

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

**DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE AMBIENTALI: tutela e gestione delle risorse
naturali**

Ciclo XXV

Settore Concorsuale di afferenza: 04/A2

Settore Scientifico disciplinare: GEO/02

TITOLO TESI

Individuazione di tecniche di gestione idrica-agronomica e di ricarica dell'acquifero freatico costiero per limitare la salinizzazione delle acque sotterranee e dei suoli.

Presentata da: Dott. Nicolas Greggio

Coordinatore Dottorato

Prof. Enrico Dinelli

Tutore

Prof. Giovanni Gabbianelli

Relatore

Prof. Marco Antonellini

Esame finale anno 2013

Sommario

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Lavori precedenti	3
1.2	Progetto <i>Coastal Salt-Water Intrusion</i> (C.S.I.)	5
1.3	Il problema fisico.....	6
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA	11
2.1	Area studio.....	11
2.2	Evoluzione Geologica	13
2.3	Evoluzione Stratigrafica	14
2.4	Geologia superficiale e paleodune.....	17
2.5	Evoluzione recente della linea di costa.....	20
2.6	Subsidenza	24
2.7	Topografia del territorio	27
2.7.1	Suoli e uso del suolo.....	31
2.8	Assetto idrologico	35
2.8.1	Fiumi.....	36
2.8.2	Pialasse.....	36
2.8.3	Bacini di cava.....	37
2.8.4	Canali di drenaggio e idrovore	37
2.9	Assetto Idro-Geologico: gli acquiferi dell'Emilia-Romagna.....	40
3	CLIMA E DRENAGGIO	43
3.1	Temperature e precipitazioni.....	43
3.2	Drenaggio	46
3.3	Conclusioni.....	48
4	RETE PIEZOMETRICA	49
4.1	Messa a dimora piezometri	49
4.2	Dati litologici dai pozzi	53
5	MONITORAGGIO PIEZOMETRICO	57
5.1	Introduzione.....	57
5.2	Strumentazione.....	58

5.2.1	Rilievo piezometrico.....	58
5.2.2	Profili di conduttività elettrica e temperatura.....	59
5.2.3	Raccolta dei campioni mediante <i>multilevel sampler</i>	60
5.2.4	Misura dei parametri chimico-fisici	62
5.2.5	Misure spettroscopiche in campo.....	64
5.2.6	Indagini geofisiche VES	66
5.3	Tempistiche e metodologie operative	70
5.3.1	Tempistiche e attività del monitoraggio	70
5.3.2	Punti di campionamento.....	71
5.3.3	Metodologie operative	74
5.4	Conclusioni monitoraggio piezometrico	76
6	MODELLO LITOLOGICO DELL'ACQUIFERO	79
6.1	Omogeneizzazione dei dati.....	79
6.2	Risultati	82
6.3	Conclusioni.....	87
7	RISULTATI DELLE ANALISI CHIMICHE	89
7.1	Introduzione.....	89
7.2	Risultati a scala di acquifero (dicembre 2010).....	90
7.2.1	Risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisici misurati in campo	90
7.2.2	Risultati delle analisi svolte presso <i>Acme Analytical Laboratories Vancouver Ltd. (Canada)</i>	94
7.2.3	Risultati delle analisi svolte nei laboratori di Chimica inorganica del C.I.R.S.A. e di geochimica del Dipartimento di Geologia dell'Università di Bologna.....	99
7.2.4	Risultati delle analisi isotopiche svolte presso l'Università di Amsterdam.....	99
7.2.5	Confronti tra laboratori.....	100
7.3	Risultati transetto e zona MAR	106
8	ELABORAZIONE DATI	109
8.1	Introduzione.....	109
8.2	Soggiacenza della falda	110
8.2.1	Acquifero.....	110

8.2.2	Transetto nel V Bacino	116
8.3	Elaborazioni salinità	117
8.3.1	Acquifero.....	118
8.3.2	Transetto.....	121
8.4	Analisi chimiche	124
8.4.1	Analisi chimiche Acquifero.....	124
8.4.2	Analisi chimiche lungo il transetto.....	136
8.5	Classificazione delle <i>Hydrofacies</i>	145
8.5.1	<i>Hydrofacies</i> Acquifero completo.....	148
8.5.2	Transetto.....	157
8.6	Conclusioni.....	159
9	TEMPERATURE DELL'ACQUIFERO	163
9.1	Introduzione.....	163
9.2	Teoria	164
9.3	Simulazione dei profili di temperatura	172
9.4	Elaborazione dati	176
9.4.1	Mappe di temperatura all'interno del V Bacino	176
9.4.2	Profili di temperatura.....	183
9.5	Discussione.....	188
9.6	CONCLUSIONI.....	191
10	TECNICA DI GESTIONE IDRICA E AGRONOMICA: AREA DI RICARICA INVOLONTARIA (AREA MAR)	193
10.1	Introduzione.....	193
10.2	Contesto geologico superficiale.....	195
10.3	Suolo	196
10.4	Morfologia, drenaggio e irrigazione.....	198
10.5	Monitoraggio	199
10.6	Risultati	201
10.7	Altre aree con interazioni acque superficiali-acquifero evidenti.....	215
10.8	Discussione e conclusioni.....	219

11 MODELLO AREA MAR	221
11.1 Introduzione.....	221
11.2 Geometria del modello	222
11.3 Condizioni al contorno	223
11.4 Condizioni iniziali.....	224
11.5 Risultati	225
11.6 Scenari alternativi per incrementare la bolla di acqua dolce	228
11.7 Conclusioni.....	232
12 CONCLUSIONI GENERALI	233
12.1 Recenti evoluzioni delle strategie comunitarie e regionali per la gestione idrica.....	240
13 RINGRAZIAMENTI	241
14 BIBLIOGRAFIA	243
15 ALLEGATI	251
15.1 Pozzi e PdC acquifero completo.....	251
15.2 Pozzi e PdC del Transetto.....	253
15.3 Pozzi e PdC dell'area di ricarica MAR.....	254
15.4 Materiale utilizzato durante la raccolta dei campioni	254
15.5 Raccolta dei campioni	255
15.6 Metodologie analitiche	256
15.6.1 Metodologie di analisi C.R.S.A. Med Ingegneria	257
15.6.2 Metodologie di analisi campioni Acme Analytical Laboratories Vancouver Ltd. (Canada)	258
15.6.3 Metodologie di analisi Università di Bologna: laboratori C.I.R.S.A. e Dipartimento di Geologia	259
15.6.4 Metodologie di analisi isotopiche (Università di Amsterdam)	260
15.7 Tabelle dati.....	261
15.8 BOX PLOT Transetto.....	273
15.9 Profili.....	276
15.10 Hydrofacies	281
15.11 Temperature e profondità di stabilizzazione dei pozzi.....	287

PREFAZIONE

La tesi di Dottorato che verrà di seguito presentata è frutto di un'attività di ricerca che ricade nell'ambito del progetto *Coastal Salt Intrusion* (C.S.I.) finanziato nell'ambito di una convenzione tra l'Università di Bologna, l'ENI e il Comune di Ravenna.

Come riportato dal titolo di questa tesi, lo scopo è stato quello di individuare ed analizzare tecniche di gestione idrica ed agronomica in grado di contrastare l'intrusione salina ed evitare la salinizzazione dei suoli agricoli della porzione costiera del Comune di Ravenna. Senza volere anticipare nulla del capitolo introduttivo che seguirà, la salinizzazione nell'area studio è stata studiata da diversi autori, ma limitatamente alle zone pinetali e naturali presenti. Con l'intenzione di realizzare un quadro complessivo, una prima parte di questa tesi tratterà lo stato attuale dell'acquifero freatico costiero, seguirà poi un approfondimento su di un transetto rappresentativo della situazione ravennate, per terminare poi sull'analisi di una tecnica di gestione idrica che produce effetti rilevanti all'interno di un'area agricola di modeste dimensioni.

La trattazione della problematica dell'intrusione salina a scala di acquifero completo è stata resa possibile grazie ad un campionamento che ha visto impegnate molte persone facenti parte del Lab. I.G.R.G., alle quali è doveroso attribuire parte del merito per i risultati conseguiti (Mollema, 2012). Allo stesso modo, il monitoraggio completo delle temperature dell'acquifero, che sarà presentato all'interno di questa tesi, è stato realizzato nell'ambito di una tesi di Laurea Magistrale presentata dal Dott. Pandolfini (Antonellini 2012). È stato scelto di presentare all'interno di questa tesi, dei capitoli che riportano lo stato della salinizzazione e delle temperature a scala di acquifero, perché indispensabili per giustificare l'importanza e gli effetti che la tecnica di ricarica studiata possiede sul contesto ravennate. Non ultimo, anche perché buona parte delle elaborazioni dei dati raccolti in campo sono state eseguite dal sottoscritto.

Risulta importante fare notare in questa prefazione, che il nucleo principale di questa Tesi di Dottorato è rappresentato dall'analisi dei transetti di dettaglio dell'acquifero, nonché dall'individuazione e dallo studio della tecnica di ricarica presente nell'area MAR, che hanno portato alla stesura di un capitolo del libro "*Resource Management for Sustainable Agriculture*" (Greggio, 2012).

Di seguito le principali pubblicazioni ottenute da questo Dottorato:

ANTONELLINI M., PANDOLFINI M., **GREGGIO N.**, MOLLEMA P. N. 2012 *Geothermal characterization of the coastal aquifer near Ravenna (Italy). Caratterizzazione geotermica dell'acquifero costiero di Ravenna.* Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater. Pagg 41-53 DOI 10.7343/AS-012-12-00XX

GREGGIO N., MOLLEMA P., ANTONELLINI M. AND GABBIANELLI G., 2012. *Irrigation Management in Coastal Zones to Prevent Soil and Groundwater Salinization, Resource Management for Sustainable Agriculture*, ISBN: 978-953-51-0808-5, InTech, DOI: 10.5772/50534. Available from: <http://www.intechopen.com/books/resource-management-for-sustainable-agriculture/>

MOLLEMA P, ANTONELLINI A, DINELLI E, GABBIANELLI G, **GREGGIO, N**, STUYFZAND P J. 2012 *Identification Of Fresh And Salt Water Intrusion Types In The Upper Ravenna Coastal Aquifer (Italy) Via Hydrochemical Systems Analysis.* Submitted to Applied Geochemistry

1 INTRODUZIONE

La salinizzazione dei suoli è uno dei processi di degradazione e perdita del suolo più diffusi; in tutto il mondo, un miliardo di ettari ne sono colpiti, in particolare nelle zone aride e semiaride di Asia, Australia e Sud America (Toth, 2008).

In Europa, la salinizzazione dei suoli ha effetti negativi su un milione di ettari, principalmente nei paesi del Mediterraneo (Toth, 2008). Ci sono due tipi di salinizzazione: salinizzazione primaria causata da eventi naturali come spray marino, alterazioni dei substrati originali dei suoli o per *seepage* sotterraneo (Louw, 2011). La salinizzazione secondaria invece è causata da attività umane come l'irrigazione con acque saline, il sovra sfruttamento delle acque sotterranee e l'eccessivo drenaggio (Toth, 2008). Nel contesto di svolgimento di questo Dottorato la causa principale di salinizzazione dei suoli è legata all'odierna contaminazione salina dell'acquifero freatico costiero.

Il fenomeno dell'intrusione salina all'interno degli acquiferi è ormai riconosciuto come un problema dal punto di vista ambientale, economico e sociale, in Europa (Scheidleger et al. 2004), ed in particolar modo in Italia dove è documentata da numerosi lavori (Barrocu et al. 2001, Cau et al. 2002, Pranzini 2002, Barrocu 2003, Scheidleger et al. 2004, Capaccioni et al. 2005, De Luca et al. 2005, Antonellini et al. 2008, Ulazzi E. et al. 2008). Con il termine "intrusione salina" è comunemente definito il processo per cui le acque marine attuali invadono il sottosuolo gli acquiferi e i corpi d'acqua superficiali nelle fasce costiere (De Breuck, 1991). La costa ravennate rappresenta una zona molto interessante dal punto di vista economico ed ambientale, in quanto coesistono aree con una destinazione d'uso molto differente: uso agricolo, insediamenti abitativi, stabilimenti balneari, aree boschive, aree di cava e zone umide. Il territorio della costa è caratterizzato dalla presenza di un acquifero freatico costiero all'interno dei depositi sabbiosi. Un acquifero costiero è definito come il volume al di sotto della superficie, in zone costiera, dove si incontrano acque continentali e acque marine (Post 2005)

Lungo la costa adriatica della Pianura Padana, le risorse idriche sono sempre più scarse, a causa degli elevati consumi irrigui, dell'eccessivo sfruttamento, della forte salinizzazione e dei lunghi periodi di siccità (Antonellini, 2008). Custodio (2010) sottolinea che, specialmente nell'Europa meridionale, le pratiche di irrigazione e il fabbisogno di acqua per sostenere l'industria del turismo costiero causano una forte pressione sulle risorse idriche.

L'impatto della salinizzazione delle acque sotterranee nelle zone costiere si ripercuote sia sulla biodiversità naturale della vegetazione che sulla produzione agricola, attraverso la salinizzazione del suolo e la riduzione della disponibilità di acqua dolce per l'irrigazione. La salinizzazione è strettamente associata al processo di desertificazione, perché la salinità può avere effetti negativi diretti sulla resa delle colture, riducendo la capacità delle radici delle

piante di assorbire l'acqua (FAO 2002). L'effetto più comune che si riscontra in condizioni di suoli salini è un arresto della crescita generale delle piante, ma non tutte le piante rispondono allo stesso modo. Grano e mais possono ridurre la loro produzione di sementi senza evidenziare problemi a livello estetico, se non un calo delle dimensioni. Frumento, orzo e cotone, invece, riducono notevolmente la loro crescita vegetativa (Maas, 1977).

L'unico criterio agronomico importante per valutare gli effetti della salinizzazione dei suoli è la diminuzione della produzione vendibile (Maas, 1977). Questo porta gli agricoltori, in alcune zone a coltivare colture resistenti al sale e in grado di adattarsi ad alte salinità del suolo e delle acque sotterranee (FAO 2002). In Provincia di Ravenna, fortunatamente, è ancora facilmente reperibile acqua di buona qualità per l'irrigazione e per ora non si è resa necessaria la coltivazione di colture tolleranti o resistenti nei confronti del sale.

Un aumento di salinità nelle acque e nei suoli di un ambiente costiero ha effetti diretti sulla vegetazione naturale e sull'agricoltura (FAO 2002 e Antonellini 2010a), causando la riduzione della ricchezza di specie vegetali, il calo di biomassa secca nelle zone umide, cambiamenti nella comunità vegetali, riduzione della germinabilità dei semi, diminuzione della superficie delle foglie, diminuzione della lunghezza dei germogli, inibizioni della fissazione dell'azoto, aumento della mortalità vegetale, ed effetti indiretti come la perdita di habitat per alcune specie di animali (Hutchinson, 1991 IPWEA, 2001 e Lombardi, 2006)

In provincia di Ravenna, più di 68 chilometri quadrati di terreni agricoli sono a rischio salinizzazione dei suoli. Si tratta in primo luogo delle zone vicino alle Pialasse e vicino ai fiumi aperti a mare. Questi terreni agricoli hanno una quota nulla o sono al di sotto del livello del mare e vengono drenati mediante idrovore. Molti degli impianti idrovori si trovano a 5 km dalla costa e mantengono la falda freatica ad oltre 2 metri sotto il livello del mare durante l'anno. Questo crea dei gradienti idraulici verso l'interno del territorio e promuove l'intrusione di acqua salata dal Mare Adriatico (Antonellini, 2008).

Gli alti tassi di subsidenza antropica e naturale nonché il drenaggio artificiale, sono le principali cause della salinizzazione delle acque sotterranee nella falda acquifera costiera non confinata e semi-confinata di Ravenna, (Antonellini, 2008 e Mollema, 2012b), mettendo quindi a rischio la fertilità dei suoli e causando una perdita di biodiversità vegetale nelle aree naturali (Antonellini 2010a).

Nel Comune di Ravenna circa 35.000 ettari sono terreni agricoli, di questi 30.000 sono coltivati a seminativi e 5000 a frutteti. L'irrigazione è ampiamente diffusa e più del 50% delle aziende sono attrezzate per fornire acque alle loro produzioni. Fino a qualche anno fa l'acqua per l'irrigazione era prelevata dai fiumi locali e dalle acque sotterranee, ma la risalita del cuneo salino nei fiumi e l'aumento dei tassi di subsidenza, hanno costretto ad un uso più intenso delle acque superficiali (Istat, 2000 e Provincia Di Ravenna 2006), per lo più prelevate dal fiume Po e da alcuni dei fiumi minori che scendono dagli Appennini.

L'acquifero freatico è costituito principalmente da depositi sabbiosi marini costieri che sono generalmente confinati alla base da sedimenti fini continentali. Due cordoni di paleodune parallele alla costa impiantati a pino domestico e pino marittimo, costituiscono l'unica topografia al di sopra del livello del mare.

La maggior parte della falda acquifera costiera nei pressi di Ravenna risulta salinizzata (maggiore di 3g/l). Sono state individuate da molti autori, effimere lenti d'acqua dolce poco profonde nella parte superiore della falda freatica, (Antonellini, 2008, Marconi 2011, Mollema, 2012b e Antonellini, 2010b).

Mollema et al. (2012a) ha concluso, da una analisi del bilancio idrologico del V Bacino (a sud della zona di Ravenna), che la quantità di acqua distribuita a scopo irriguo era abbondante, senza però quantificare gli effetti dell'irrigazione sulla falda sotterranea.

L'obiettivo di questo studio è di verificare lo stato di qualità dell'intero acquifero freatico costiero di Ravenna, e una volta inquadrata la situazione generale, di studiare l'effetto che canali di immagazzinamento delle acque irrigue provocano sull'acquifero freatico nell'ottica di una ricarica che contrasti la salinizzazione. Per svolgere queste indagini sono state utilizzate metodologie e procedure di campionamento del tutto innovative per l'area e sono state eseguite analisi geochimiche, profili geofisici e monitoraggi mensili di soggiacenza della falda. Siccome il parametro di temperatura delle acque non era, sinora, mai stato considerato come indicatore di processi idrologici, in un capitolo sarà presentato un primo inquadramento delle condizioni termiche dell'acquifero.

La tesi è stata svolta partendo da un concetto di studio generale dell'acquifero, per poi passare ad un singolo transetto rappresentativo del contesto generale, per finire poi ad analizzare e sperimentare in dettaglio una tecnica di gestione idrica/agronomica in grado di ricaricare l'acquifero freatico e di limitare perciò la salinizzazione delle acque sotterranee e dei suoli.

1.1 Lavori precedenti

La tematica dell'intrusione salina è da molti anni studiata a fondo nella zona costiera di Ravenna. I primi studi finanziati da collaborazioni tra Comune ed Università avevano come obiettivo la salvaguardia delle Pinete Storiche simbolo della città. Da uno dei primi studi effettuati sulla Pineta di San Vitale, si è visto che la pineta, specie la sua porzione orientale e meridionale a contatto con le Pialasse, mostra una forte salinizzazione e si rinvennero porzioni di acquifero con acque dolci esclusivamente nella sua parte nord occidentale (Giambastiani 2007a e 2007b; Kralj 2011).

Altri studi sostengono che i pini stessi possiedono un effetto negativo sulla salinità delle acque di falda, poiché l'apparato radicale opera un continuo pompaggio che facilita la risalita di acqua salata dal fondo dell'acquifero.

Da un lavoro pubblicato di Antonellini et al. (2008) viene valutata l'intrusione salina prendendo in considerazione la subsidenza, e quindi la topografia, e la profondità della tavola d'acqua e della salinità in falda. Ne risulta che l'acquifero costiero situato a sud del delta del Po' presenta, per quasi tutta la sua estensione aree che si trovano poco al disopra o al disotto del livello del mare. Perciò la subsidenza, la distruzione delle dune costiere, l'erosione costiera e la mancanza di apporti sedimentari fluviali dal 1950 ad oggi non permettono la presenza di un livello di falda sopra il livello del mare, e quindi di un carico idraulico, che contrastino l'ingressione marina in accordo con il principio di Ghijben-Herzberg. Solo in un'area, la Pineta di Classe, si registra la presenza di acqua dolce in quanto siamo in presenza di una topografia relativamente elevata e di un livello di falda superiore a quello marino.

La ricarica è strettamente dipendente dalla presenza di aree pinetali, poiché un clima che presenta temperature elevate incide molto sull'evapotraspirazione (Antonellini et al 2008).

Altri lavori (Marconi et al. 2008 e 2011) si sono occupati dell'effetto della vegetazione e del drenaggio sulla salinizzazione dell'acquifero costiero compreso tra foce Fiumi Uniti e foce Fiume Bevano. È emerso che il bilancio idrologico è differente per aree a diversa destinazione (aree naturali, aree agricole e corpi d'acqua superficiali). Per i corpi d'acqua superficiali il bilancio è molto negativo nei periodi estivi caldi con tassi di evaporazione fino a 5 mm/ora, nelle aree naturali è negativo nel periodo estivo e prossimo a zero nei mesi invernali e per le aree agricole l'infiltrazione, conseguenza dell'irrigazione, può creare modeste lenti di acqua dolce nelle aree interessate. Le analisi chimiche effettuate sui campioni di acquifero superficiale indicano una composizione dell'acqua prevalentemente cloruro-sodica, e che nell'acquifero è in corso, prevalentemente, un processo di salinizzazione (Marconi et al. 2008 e 2011).

Infine, un altro studio (Laghi et al 2010) ha preso in considerazione l'interazione dei fiumi con l'acquifero costiero, studiando in dettaglio il Fiume Lamone. È emerso che in condizioni normali la massa d'acqua presente nell'estuario è composta al 70% da acqua di mare. Oltre alle modeste portate e ai gradienti assenti, anche la topografia del fondale favorisce l'ingressione del cuneo salino. Nel Fiume Lamone il fondale mostra un gradiente inverso dal mare verso l'interno. Il Fiume, risulta connesso con l'acquifero e dove la litologia del fondale risulta sabbiosa (Località Bardello), sono stati misurati flussi d'acqua, dell'ordine di $0,5 \text{ m}^3/\text{giorno}$ per metro lineare che si muovono dal fiume all'acquifero (Laghi et al. 2009, Laghi 2010, Laghi et al 2010).

Uno studio effettuato su scala di acquifero nella medesima area, ma utilizzando metodologie geofisiche, ha confermato come vi fosse la presenza di acque dolci al di sotto delle pinete costiere e in ambiti agricoli distanti da canali. La vicinanza alla rete di drenaggio causa una risalita importante delle acque salate dalla base dell'acquifero. Le bolle di acqua dolce presenti hanno spessori variabili tra i 0.1 e i 2m (Capo 2011).

1.2 Progetto *Coastal Salt-Water Intrusion* (C.S.I.)

Il progetto *Coastal Salt Water Intrusion* (C.S.I.), di cui il mio percorso di Dottorato fa parte, nasce da una convenzione tra l'Università di Bologna, l'ENI e il Comune di Ravenna. Lo studio ha come oggetto l'acquifero costiero, in particolare la problematica dell'intrusione salina, fenomeno molto presente all'interno della falda freatica dell'area. Il progetto C.S.I. ha visto coinvolto il personale del Laboratorio I.G.R.G. (*Integrated Geosciences Research Group*) dei Laboratori "Renzo Sartori" presso il Dipartimento di Scienze Ambientali di Ravenna dal 2009 al 2011. Lo scopo è stato quello di comprendere i meccanismi che governano e influenzano l'intrusione salina all'interno dell'acquifero freatico costiero e valutare gli effetti che la salinizzazione delle acque sotterranee provoca sul territorio e sull'ambiente. Il progetto prevedeva il raggiungimento dello scopo mediante diversi approcci. Infatti, sono stati eseguiti:

- Monitoraggio e caratterizzazione geofisica dell'acquifero
- Monitoraggio e caratterizzazione geochimica dell'acquifero
- Caratterizzazione litostratigrafica dell'acquifero
- Modellistica analitica e numerica 2D e 3D dell'intrusione salina
- Studio sugli effetti della salinizzazione dell'acqua sulla vegetazione e sulla fauna
- Studio sugli effetti della salinizzazione dell'acqua sul suolo

Il mio percorso di Dottorato di Ricerca si è svolto all'interno di questo progetto, affrontando buona parte delle attività richieste per il buon esito del C.S.I. *Project* e cercando non solo di inquadrare la problematica della salinizzazione delle falde e nei suoli, ma soprattutto cercando di individuare alcune metodologie in grado di contrastare questa problematica.

1.3 Il problema fisico

L'intrusione dell'acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente negli acquiferi costieri. A causa della presenza d'acqua salata, all'interno dell'acquifero si crea una zona di contatto tra l'acqua dolce, più leggera, che scorre verso mare e l'acqua salata, più pesante, che si incunea dal mare verso l'entroterra.

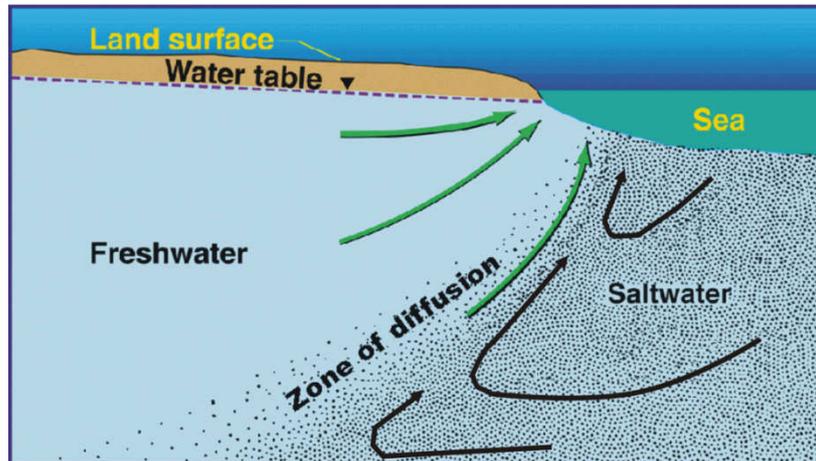


Figura 1.1 Circolazione dell'acqua dolce e acqua salata nella zona di diffusione di un acquifero costiero non confinato (da Fetter, 2001, modif.).

L'acqua dolce e l'acqua salata sono fluidi parzialmente miscibili e pertanto la zona di contatto tra i due assume la forma di una zona di transizione o di diffusione generata dalla dispersione idrodinamica (Figura 1.1). In tale zona la densità dell'acqua passa da quella dell'acqua dolce a quella dell'acqua salata. Tuttavia, in certe condizioni, l'ampiezza della zona di transizione è piccola rispetto allo spessore dell'acquifero e la zona di passaggio graduale dall'acqua dolce a quella salata può essere approssimata con un fronte netto di interfaccia. Negli acquiferi costieri non confinati si instaura una condizione di equilibrio caratterizzata da un flusso sia nella zona di acqua dolce che nella zona di acqua salata (Cooper, 1959): le acque dolci fluiscono verso mare e si crea un flusso ciclico nelle acque salate vicine all'interfaccia (Figura 1.1).

La forma e la posizione dell'interfaccia nel corpo sabbioso costiero è funzione del gradiente idraulico e quindi del suo livello freaticometrico (Figura 1.2 A). Un qualsiasi cambiamento della superficie freatica determina un cambiamento della forma e posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Minime fluttuazioni della posizione di tale superficie di separazione sono determinate da escursioni mareali e da variazioni stagionali della superficie freatica: ne deriva quindi che l'interfaccia acqua dolce-acqua salata è in uno stato di quasi-equilibrio. Alcune attività umane, agendo sul volume di acqua sotterranea o sul carico idraulico possono rompere questo equilibrio e determinare uno spostamento dell'interfaccia verso terra.

Il fenomeno dell'invasione dell'acquifero da parte delle acque marine viene detto intrusione del cuneo salino e può essere di tipo passivo o attivo (Fetter, 2001).

L'intrusione passiva avviene quando, pur avendo una riduzione del volume di acqua dolce, viene mantenuto un livello freatico al di sopra del livello del mare e con un gradiente idraulico verso mare: in questo caso l'interfaccia mantiene indicativamente la stessa forma, spostandosi verso terra fino a quando non si ristabiliscono le nuove condizioni di equilibrio (Figura 1.2 B).

L'intrusione attiva invece si verifica quando l'utilizzo della risorsa idrica determina un'inversione del gradiente idraulico (falda al di sotto del l.m.m.): questo si verifica nel caso di prelievi puntuali (es. pozzi di estrazione o sistema di drenaggio) che creano coni di depressione (Figura 1.2 C). L'interfaccia intrude molto più rapidamente rispetto al caso passivo non permettendo l'instaurazione di un nuovo stato di equilibrio e si innalza fino ad incontrare il punto più basso del gradiente idraulico, rappresentato dal centro del pozzo di pompaggio.

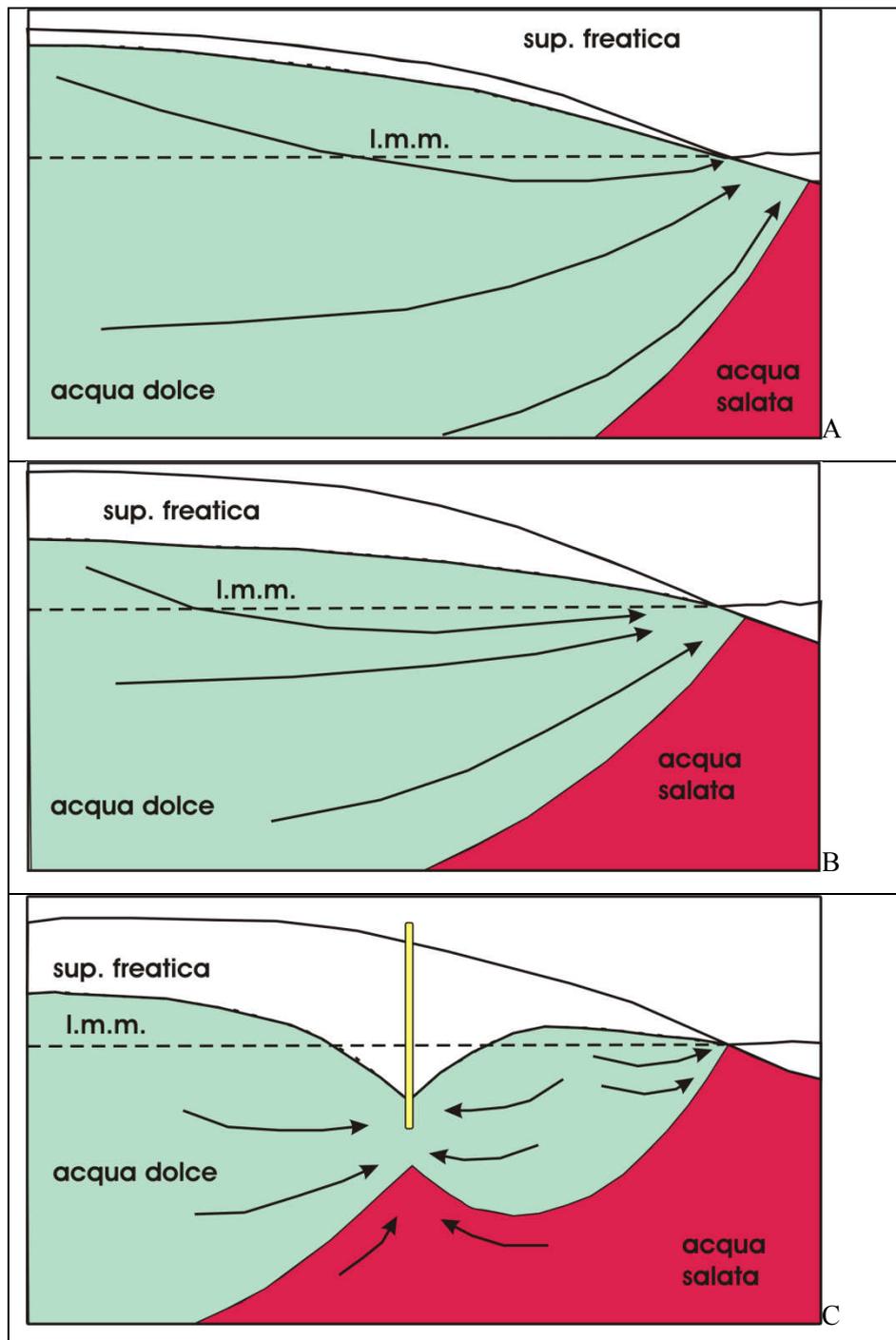


Figura 1.2 Posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata in un acquifero freatico costiero in condizioni di equilibrio A; intrusione salina passiva dovuta ad un generale abbassamento del livello della falda B; intrusione salina attiva con creazione di un cono di depressione dovuto ad un pozzo di estrazione dell'acqua C.

Il principio di Badon Ghyben-Herzberg (Fetter, 2001; Bear *et al.*, 1999) descrive la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata per un acquifero costiero (Figura 1.3).

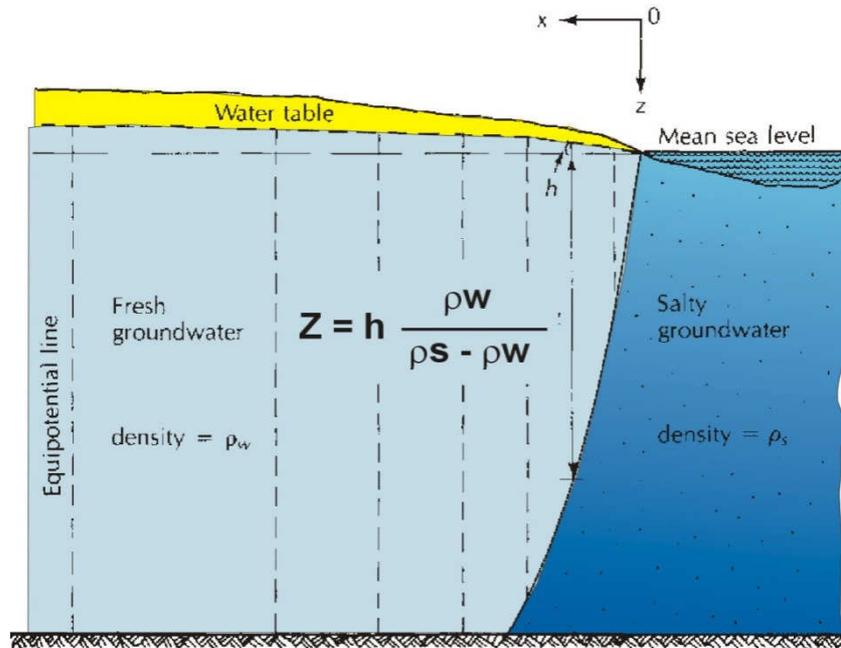


Figura 1.3 Relazione di Ghyben-Herzberg per un acquifero freatico costiero (da Fetter, 2001; modif.).

Secondo tale principio negli acquiferi freatici costieri l'interfaccia acqua dolce-acqua salata si trova ad una profondità, rispetto al livello del mare, pari a circa 40 volte l'altezza del livello piezometrico. Quindi, un abbassamento di 1 cm del livello piezometrico causa la risalita di circa 40 cm di un cono d'acqua salata. Il principio di Ghyben-Herzberg è così formulato:

$$Z_{(x,y)} = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h_{(x,y)}$$

dove:

$Z_{(x,y)}$ = profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata [L];

$h_{(x,y)}$ = la quota della falda sopra il livello del mare [L];

ρ_w = densità dell'acqua dolce [ML⁻³];

ρ_s = densità dell'acqua salata [ML⁻³].

Per $\rho_s = 1025$ [ML⁻³] e $\rho_w = 1000$ [ML⁻³], il rapporto $G = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} = 40$

L'applicazione del principio di Ghyben-Herzberg è limitata a condizioni di equilibrio statico con distribuzione idrostatica della pressione per l'acqua dolce e l'acqua salata stazionaria.

La conduttività idraulica dipende dalla litologia dell'acquifero, quindi le variazioni litostratigrafiche possono avere una forte influenza sulla distribuzione della salinità nell'acquifero freatico (Harris 1967; Fetter 1972; Simmons 1986, Collins e Easley 1999; Anderson et al. 2000, Schneider e Kruse 2005; Antonellini et al, 2008).

Date le caratteristiche specifiche del territorio nell'area di studio, è necessario ricordare un altro modello concettuale, complementare a quello precedentemente descritto. Nelle aree pianeggianti con scarsa elevazione sul livello del mare, in cui la superficie freatica è artificialmente regolata, si ha la formazione di una lente di acqua dolce al tetto dell'acquifero nell'area compresa tra due canali di drenaggio (Figura 1.4).

In queste condizioni, la lente di acqua dolce è solitamente discontinua e mostra variazioni stagionali marcate, contemporaneamente le acque saline del fondo dell'acquifero sono richiamate in superficie dalla presenza dei canali di drenaggio che riducono il carico idraulico sovrastante (Maas, 2007; Schot et al., 2004) (Figura 1.4).

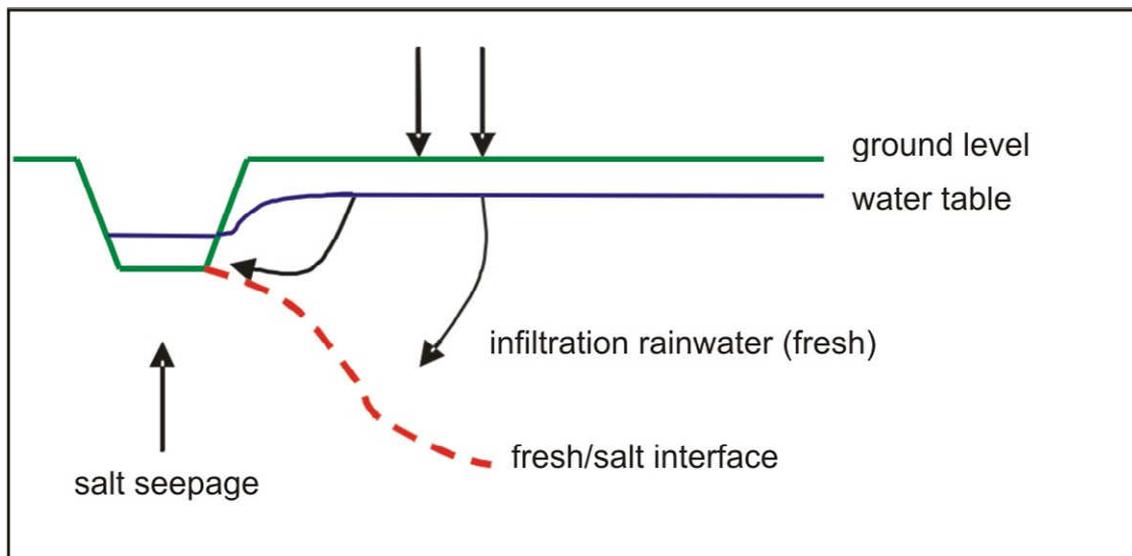


Figura 1.4 Rappresentazione schematica del fenomeno di risalita (*seepage*) di acque saline dal fondo dell'acquifero in prossimità di canali. La linea verde rappresenta il piano campagna, in blu è rappresentata la superficie freatica e la linea rossa coincide con l'interfaccia tra acque saline e dolci.

2 INQUADRAMENTO DELL'AREA

2.1 Area studio

L'area di studio di questo progetto di Dottorato è l'intera porzione costiera appartenente al Comune di Ravenna. Il territorio si estende dalla foce del fiume Reno a nord sino alla foce del fiume Savio a sud per un'ampiezza media di circa 8km, che diventano 10km dalla linea di costa per un transetto a sud della città di Ravenna.

Lo studio è stato eseguito a tre scale diverse:

1. **Intera area studio** (Figura 2.1),
2. **Transetto di dettaglio** interno al "V Bacino" di drenaggio (rettangolo rosa in Figura 2.1),
3. **Area di ricarica MAR** (*Managed Aquifer Recharge*) di seguito "area MAR" (cerchio giallo in Figura 2.1).

A scala complessiva lo studio ha visto l'utilizzo di oltre 50 piezometri per il monitoraggio della qualità dell'acquifero freatico. La densità maggiore di pozzi si trova nella Pineta di San Vitale a causa del forte interessamento che in anni recenti vi è stato per la tutela di questo *habitat*. Al di fuori delle pinete si è cercato di costruire una rete omogenea di pozzi di monitoraggio tale da garantire una copertura complessiva di tutto l'acquifero.

Il transetto di dettaglio fa parte del "V Bacino", un bacino di drenaggio che afferisce all'omonima idrovora situata ad ovest della Pineta di Classe, nella porzione meridionale del Comune di Ravenna (Figura 2.1.). Questo bacino di drenaggio è delimitato a nord e a sud dalla parte terminale di due corsi d'acqua, rispettivamente Fiumi Uniti e Bevano. Ad est è delimitato dal mare e ad ovest confina con un altro bacino di drenaggio che possiede gradiente naturale sufficiente per confluire a mare senza sollevamento meccanico.

Il transetto ha inizio dalla linea di costa situata a Lido di Dante e si sviluppa per circa 10 km fino all'abitato di S. Bartolo. Lungo la sua estensione troviamo diversi e peculiari usi del suolo. I pozzi investigati da est a ovest sono P1S e P2S in Pineta Costiera Ramazzotti, P3S, MAR1 e MAR2 in ambito agricolo di recente formazione. Proseguiamo poi con 2 pozzi P4S e P5S nella Pineta Storica di Classe. Alle spalle di tale pineta troviamo la fascia delle cave, in questa porzione abbiamo monitorato 2 piezometri: il primo di nostra costruzione P6S ed il secondo di proprietà della cava EMS, denominato appunto EMS1. Concludiamo il transetto ad ovest con il piezometro P9S.

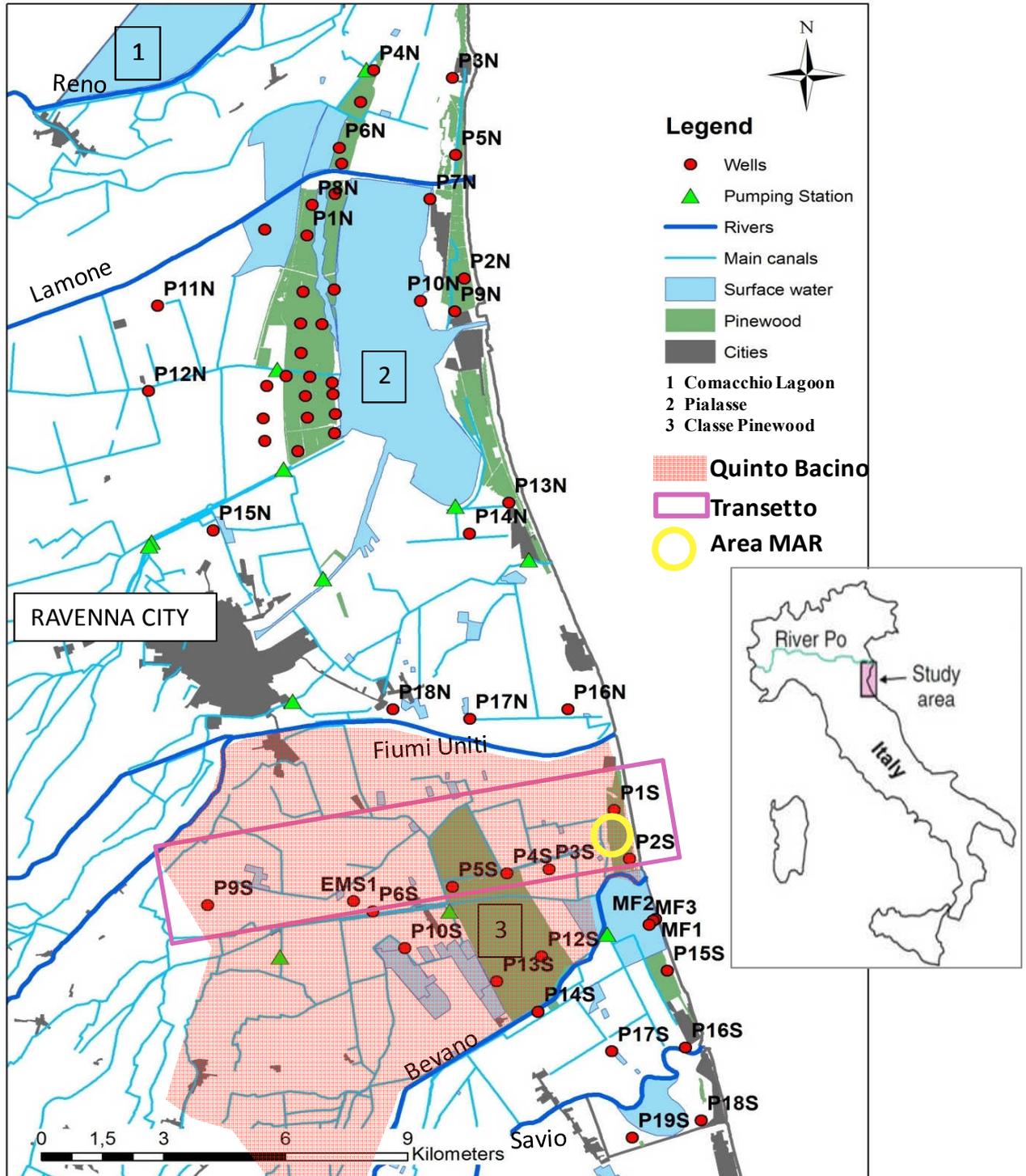


Figura 2.1 Area di studio complessiva, con dettaglio dei piezometri di monitoraggio e rappresentazione del transetto e dell'area MAR.

L'area di ricarica MAR si colloca nella porzione orientale del transetto di dettaglio. Possiede un'estensione di circa 12ha ed è interamente gestita da una Cooperativa Agricola che coltiva gli appezzamenti, principalmente a seminativi. In questa porzione sarà studiata e approfondita una tecnica di gestione idrica che permette la ricarica dell'acquifero freatico costiero.

Nei paragrafi seguenti sarà inquadrata l'area di studio sotto tutti gli aspetti principali, descrivendo, in ogni caso, le vicende a scala complessiva. Qualora all'interno del transetto di dettaglio vi siano stati aspetti che meritassero un approfondimento, essi sono stati ampliati al termine della descrizione relativa all'area vasta.

Per quanto riguarda agli aspetti evolutivi dell'area di ricarica MAR, è stato fatto riferimento a quelli descritti di seguito, mentre per alcune caratteristiche peculiari si rimanda al capitolo 10.

2.2 Evoluzione Geologica

L'evoluzione geologica di questa regione è stata da sempre controllata dall'alternanza tra sedimentazione continentale e marina.

Dal punto di vista geologico strutturale l'area di studio si inserisce nel contesto della pianura costiera romagnola che rappresenta la parte sud est della più estesa pianura del fiume Po. Questo ampio bacino sedimentario (46000 km²) prende origine dalla fossa impostata fra l'Oligocene e il Miocene a causa dell'emersione della catena appenninica e della presenza di quella Alpina già quasi completamente emersa (Amorosi, 2002). La storia evolutiva dell'area prosegue con l'alternarsi di fasi erosive e deposizionali. Nel Quaternario recente la sedimentazione prevale sulla subsidenza e depositi alluvionali continentali si sovrappongono a quelli marini. Tale fenomeno si evidenzia particolarmente nel settore orientale della pianura padana dove, a causa delle oscillazioni glaciali che interessano in quel periodo anche le nostre latitudini, si hanno pulsazioni del livello marino che rendono complesse le condizioni di deposizione dei sedimenti nelle zone prospicienti la costa.

Considerando gli ultimi 70.000 anni circa, cioè partendo dall'ultima glaciazione Wurmiana (70.000 – 18.000 anni fa, Van Husen 2004), il livello marino si abbassò progressivamente, secondo fasi successive, fino a circa 100 m rispetto al livello attuale. A seguito di tale abbassamento l'alto Adriatico si era trasformato in una vasta pianura alluvionale mentre la zona compresa tra le attuali isobate dei -60m e dei -100m, localizzata fra Ancona e Pescara era caratterizzata da ambienti lagunari e marino-costieri. Lo spessore dei sedimenti che testimonia la regressione Wurmiana è di circa 50m e sono costituiti in massima parte da limi argillosi con intercalazioni di sabbie e argille (Veggiani 1974, Amorosi et al. 1999).

A partire da 18000 anni fa, iniziò una fase di miglioramento climatico a scala globale che portò ad una riduzione dei ghiacci ed un aumento del livello marino. Tale evento trasgressivo detto Flandriano, ebbe, in alcune fasi, un ritmo di avanzamento di circa 200 metri all'anno. La fase di stazionamento alto (Optimum climatico, circa 5500 anni fa) fu caratterizzata da un forte arretramento della linea di costa che si spinse, nelle aree più depresse dell'attuale pianura ravennate e del delta padano, fino a circa 20 km all'interno rispetto alla posizione attuale (Bondesan et al., 1995). Questa e le successive fasi regressive sono responsabili

dell'interdigitazione fra sedimenti marini e continentali, caratteristica dell'area costiera ravennate (Amorosi et al., 2002).

Testimonianza di questa evoluzione la ritroviamo a circa 25 m di profondità dal piano campagna dove, ad argille e limi nerastri torbosi, si sovrappongono sedimenti marino costieri di pro-delta e cordoni litorali depositati durante la trasgressione.

2.3 Evoluzione Stratigrafica

In virtù di quanto descritto sopra, l'acquifero costiero ravennate è caratterizzato da sedimenti sabbiosi, limosi e argillosi che si alternano nella sequenza verticale secondo i vari cicli deposizionali che hanno caratterizzato quest'area nel tempo (Amorosi et al. 2004). I primi 150 m dei depositi (Figura 2.2) della porzione più superficiale, corrispondono ai due cicli trasgressivo-regressivi correlabili con la curva glacio-eustatica di Figura 2.3.

I principali cicli deposizionali (cicli di 4° ordine in Figura 2.3), che interessano la parte più superficiale della fascia costiera della pianura padana, sono stati riconosciuti ed interpretati da Amorosi et al (1999), e sono:

- Fase regressiva (FRST)
- Fase di stazionamento basso (LST)
- Fase trasgressiva (TST)
- Fase di stazionamento alto (HST)

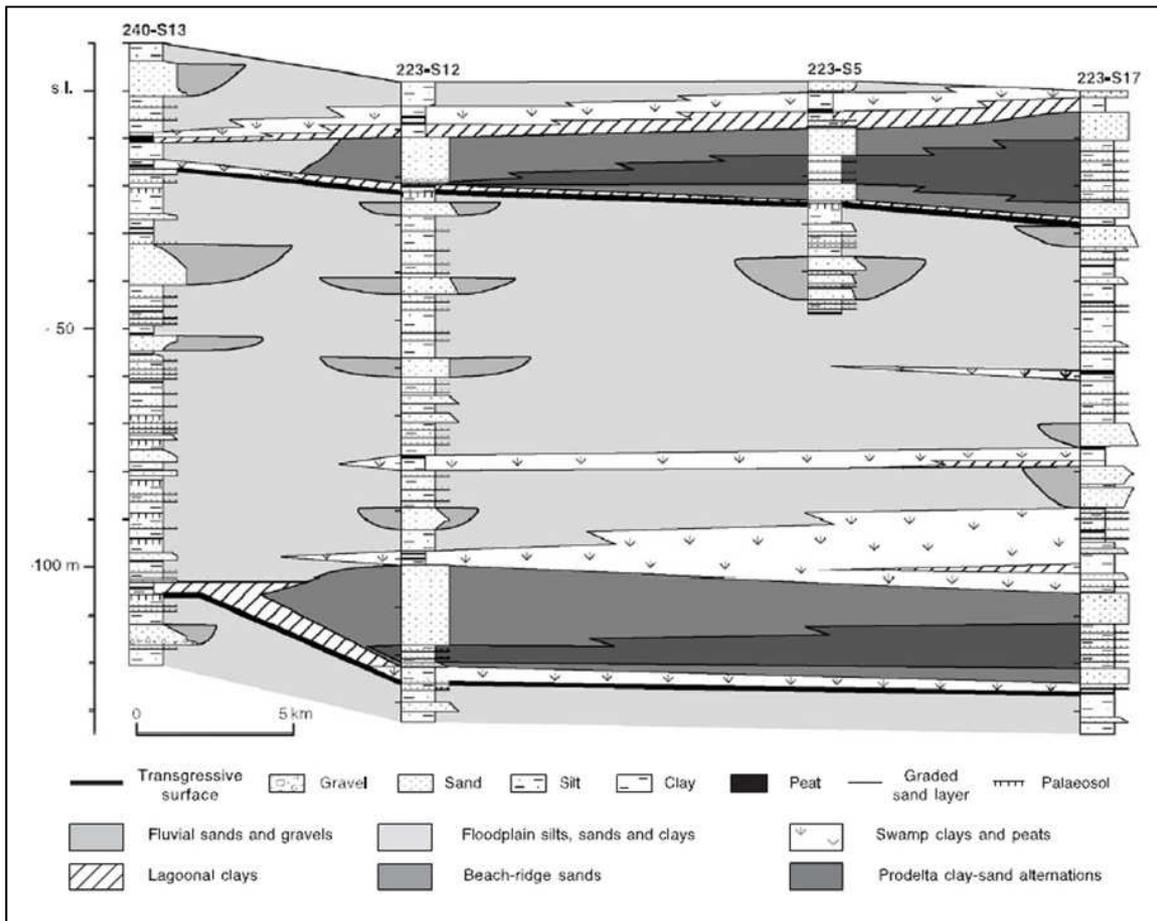


Figura 2.2 Stratigrafia dei primi 150 m del sottosuolo nella pianura padana sud orientale (da Amorosi et al.2004.)

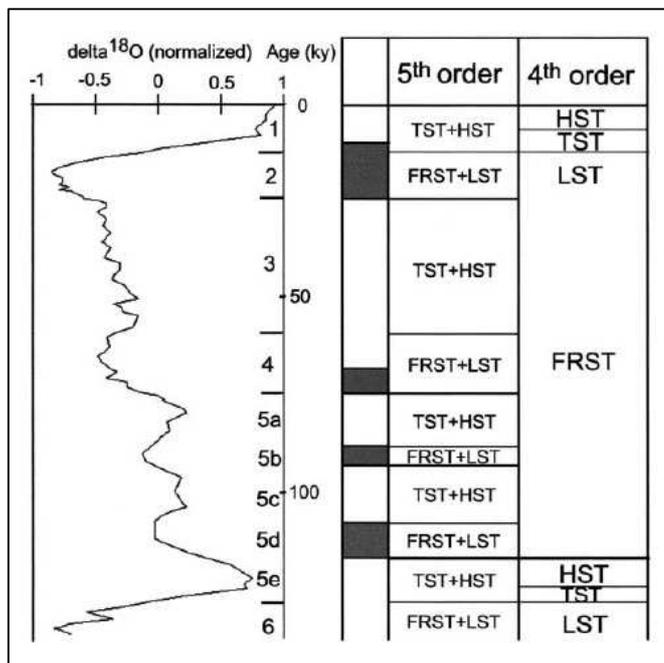


Figura 2.3 Stratigrafia sequenziale della pianura padana sud occidentale (da Amorosi et al. 2001). Le sequenze di 4° ordine sono messe in relazione con i principali cicli glacio - eustatici, mentre le oscillazioni minori sono correlate con i cicli di 5° ordine.

La fase regressiva (FRST) è caratterizzata da un forte abbassamento del livello marino (fino a circa 120 m) nel periodo compreso tra 125 ka e circa 30 ka.

Nella fase successiva di stazionamento basso (LST) che va da 30 ka a 16 ka, l'area nord adriatica diventò una pianura alluvionale con valli larghe e poco incise, dove la sedimentazione avvenne solo tra 18 ka e 16 ka.

La fase trasgressiva (TST) (16 ka – 5.5 ka) è caratterizzata da un'ingressione marina, che raggiunse il massimo nel Flandriano (Olocene) (Correggiari et al 1996), e vide spostarsi verso l'interno (Ovest) gli ambienti sedimentari di barriera-laguna. La sedimentazione prodotta in questo periodo consiste in pelite organica in facies di zona palustre e/o lagunare (in verde in Figura 2.4), facies interpretata da molti autori come corrispondente allo stadio iniziale del moderno delta del Po (Amorosi et al., 1999; Bondesan et al., 1995; Rizzini, 1974).

L'ultima fase, cioè quella di stazionamento alto (HST), corrisponde ad una forte progradazione del delta del Po dovuta ad un maggior apporto di sedimenti fluviali e da un aumento dell'erosione combinati con la subsidenza. In contemporanea alla progradazione del Fiume Po corrisponde la messa in posto di sabbie di fronte deltizia/cordoni sabbiosi e alternanza di peliti e sabbie fini di prodelta (rispettivamente in giallo e azzurro, Figura 2.4) messi in posto sopra la pelite organica che rappresenta la massima ingressione marina dell'area (Marchesini et al. 2000).

Negli ultimi 2000 anni si registrano oscillazioni minori del livello marino (cicli di 5° ordine Figura 2.3) che hanno causato la deposizione di cordoni e dune sabbiose, localmente intercalati con sottili livelli di limo e argilla in facies di retroduna (Amorosi et al. 1999). All'interno della sequenza trasgressivo-regressiva più recente, nella porzione sud orientale della pianura padana che coincide con l'acquifero oggetto di studio in questo lavoro, sono riconoscibili 8 cicli minori della durata di 1000 anni circa e con spessori di 3-5 m (Figura 2.4) (Amorosi et al 2005).

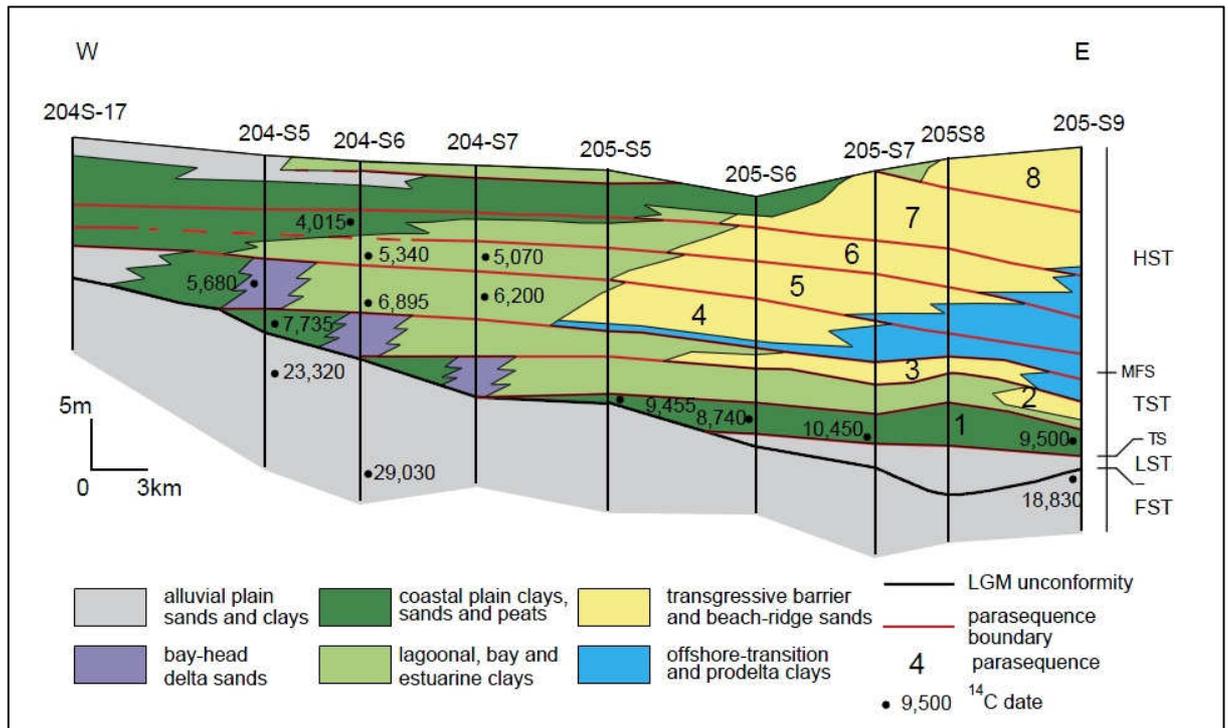


Figura 2.4 Sezione della pianura padana sud orientale che mostra la sequenza trasgressivo-regressiva suddivisa in 8 cicli minori (da Amorusi et al. 2005.)

2.4 Geologia superficiale e paleodune

L'evoluzione e le vicende antropiche recenti hanno apportato notevoli cambiamenti alla porzione costiera considerata; Come mostrato in Figura 2.6 la geologia superficiale consiste di paleo cordoni affioranti (acquifero freatico) o sepolti da materiale argillo-limoso continentale con spessore variabile da 1 a 4m portato in loco dalle bonifiche dello scorso secolo (Luppis, 1940, Calastri et al., 1976 e Stefani & Vincenzi, 2005).

Su di una sezione trasversale alla costa eseguita all'altezza dell'abitato di Lido di Dante (Figura 2.6), è evidente come i sedimenti di spiaggia e di duna, risultino affioranti nei pressi delle dune costiere attuali e al di sotto delle pinete storiche; in tali zone questi depositi formano le porzioni più superficiali dell'acquifero freatico. Tra i due corpi di paleodune affioranti, vi sono dei depositi marini sepolti da sedimenti più fini di origine continentale (neri in Figura 2.6). La medesima situazione, con spessori via via maggiori spostandoci verso ovest, si ritrovano ad occidente della fascia delle cave (Figura 2.6). Queste ultime porzioni di acquifero sono definite confinate.

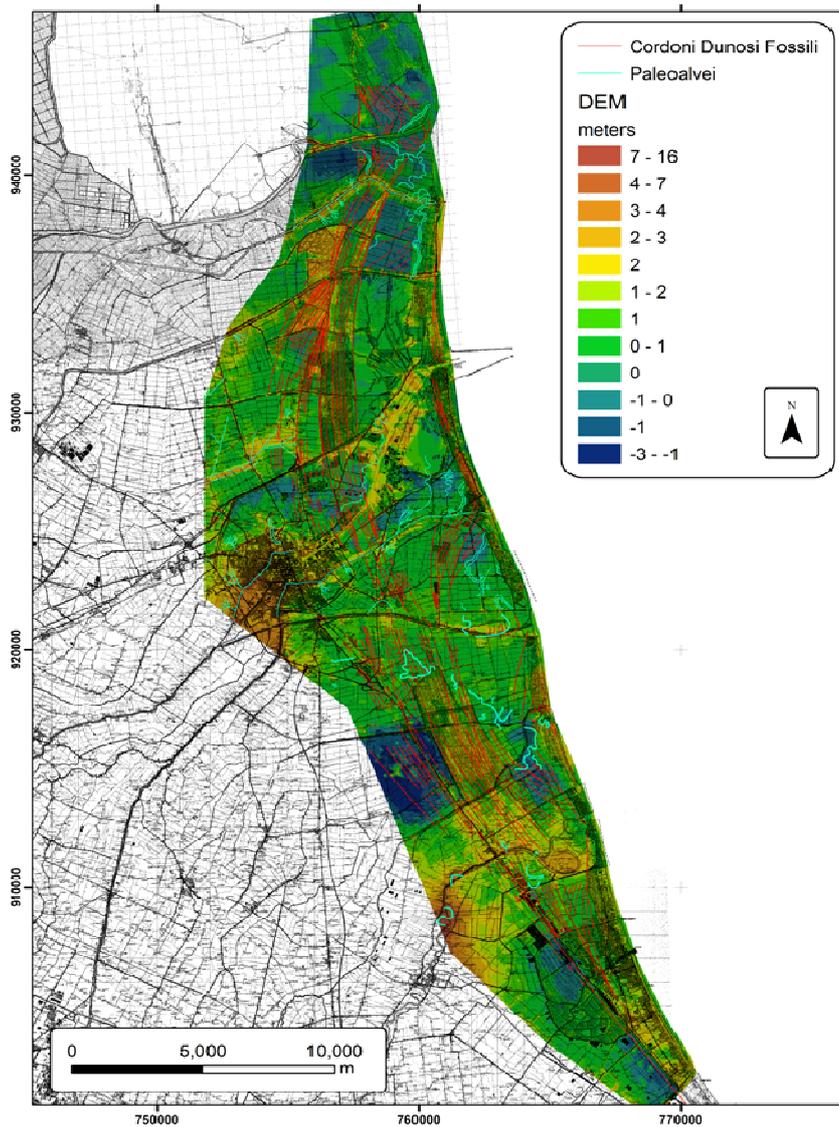


Figura 2.5 Modello di elevazione digitale (DEM) del territorio ravennate. In rosso i paleocordoni dunali e i paleovalvei ottenuti da cartografia della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 1999)

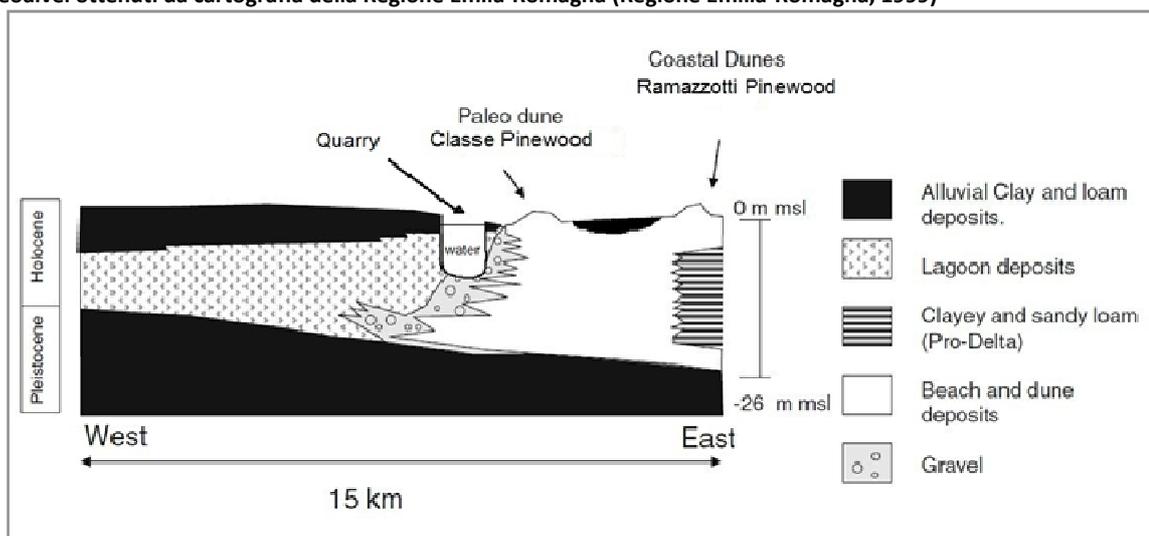


Figura 2.6 Sezione litostratigrafica schematica perpendicolare alla costa nei pressi di Lido di Dante (modificato da Amorosi et al., 1999 e Giambastiani et al., 2007).

Per quanto detto in precedenza, in Figura 2.7 sono mostrate le porzioni di territorio ravennate in cui si trovano le sabbie affioranti, di conseguenza le parti di acquifero freatiche e perciò le zone in cui la ricarica naturale raggiunge i tassi maggiori.

È evidente come nella maggior parte dei casi tali aree coincidano con le pinete storiche e con le pinete costiere, alle quali si aggiungono le aree immediatamente ad est della città di Ravenna e quelle a sud della Pineta di Classe.



Figura 2.7 Mappa delle porzioni di territorio in cui si trovano le sabbie affioranti dell'acquifero.

2.5 Evoluzione recente della linea di costa

Dal momento della massima ingressione marina ad oggi, nella regione costiera padana l'ambiente è progressivamente cambiato da marino, a salmastro e a dolce (in blu, giallo e verde, rispettivamente, in Figura 2.8).

La massima estensione di aree palustri di acqua dolce si ebbe circa 2300 anni fa (Figura 2.8) nell'area del delta del Po, mentre nell'area di studio le zone umide di acqua dolce erano presenti circa 400 anni fa (presso Classe in Figura 2.8 D). L'evoluzione del territorio in epoca storica comprende la presenza di una stretta laguna salmastra lungo tutta la linea di costa da Chioggia a Classe fino al 1600.

Nell'attuale area costiera del Comune di Ravenna, la progradazione della linea di costa è stata omogenea tra il IV sec. A.C. e il XVII sec D.C. (Figura 2.9). Si nota inoltre come in quel lasso temporale vi sia stata una prima abbondante pro-gradazione in corrispondenza della foce del Primaro (attuale corso del Fiume Reno) che è stata poi smantellata nei secoli seguenti. I sedimenti trasportati sono stati rideposti a formare le paleodune su cui si insediano le Pinete Storiche (linee gialle e arancioni in Figura 2.9).

Le attuali aree di Marina Romea e Lido di Dante (V Bacino) hanno un'origine recente; la sedimentazione passò da lagunare (ambiente salmastro) a francamente continentale solo in epoca storica recente (secolo XIX), durante l'ultima fase di progradazione della linea di costa, che si verificò dal 1851 A.D. al 1894 A.D. con un tasso di avanzamento pari a 20 m/anno. Nella porzione antistante costiera del transetto monitorato, la progradazione è stata causata dall'erosione dei sedimenti delle cuspidi deltizie dei Fiumi Uniti e del Savio, come indicato dalle frecce gialle in Figura 2.10. I sedimenti erosi sono stati poi ridistribuiti lungo la costa dalle correnti marine, che hanno indotto una progressiva rettificazione della linea di costa (Stefani & Vincenzi, 2005).

Attualmente, spiagge e dune costiere sono in erosione lungo tutta la costa adriatica (Bondesan et al., 1995b), come viene indicato dalla linea azzurra (1998) in Figura 2.7.

Nel 2003 l'altitudine delle dune più esterne dell'area di studio fu ridotta di circa 1 m da un singolo evento di tempesta (Ciavola et al., 2007).

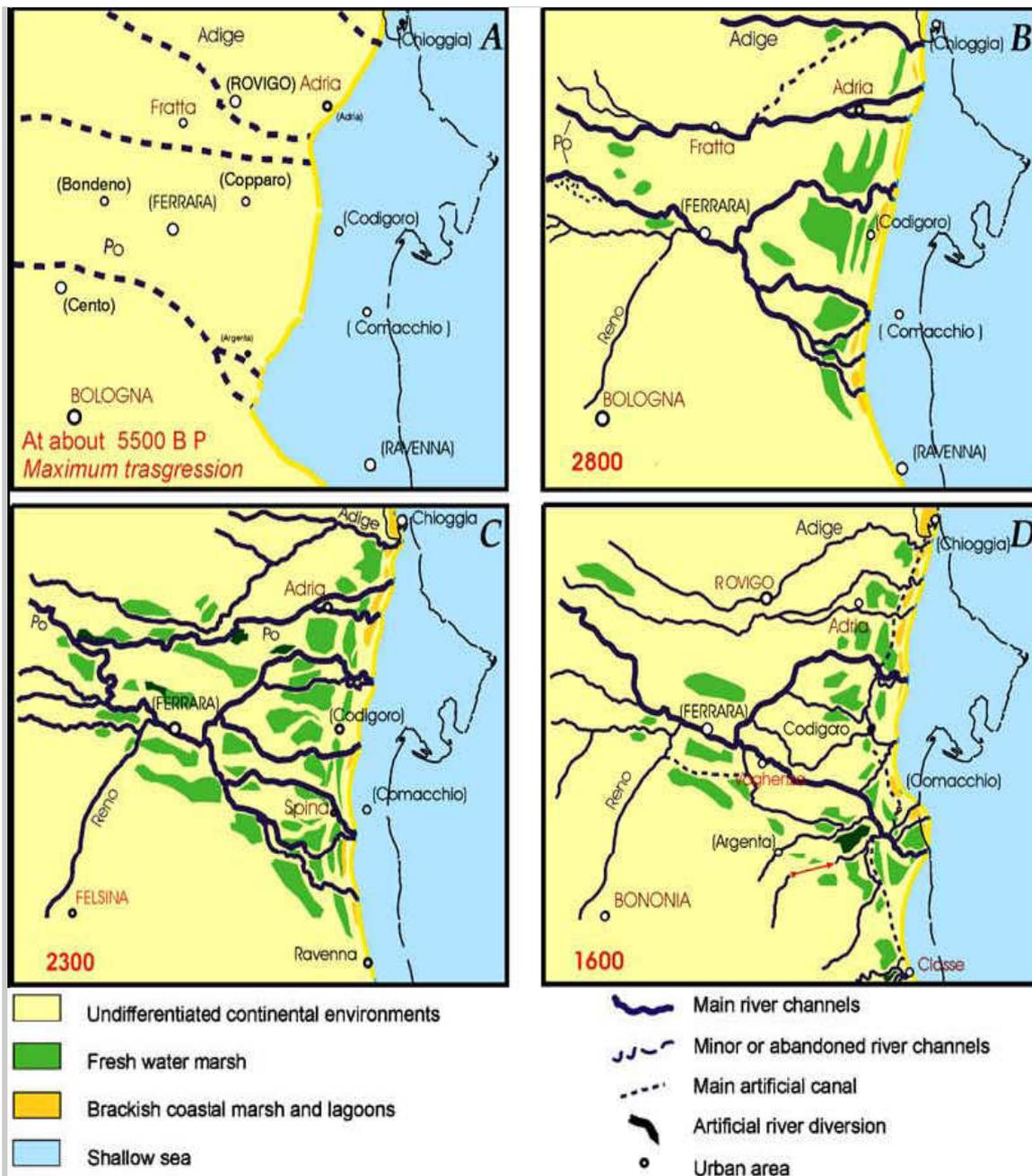


Figura 2.8 Evoluzione regionale della linea di costa dalla massima ingressione marina (5500 BP) al 1600 AD. Da notare la progressiva transizione da ambienti marini (salini), in azzurro, a salmastri (in giallo), a zone palustri (dolci), in verde (modificato da Stefani & Vincenzi, 2005).

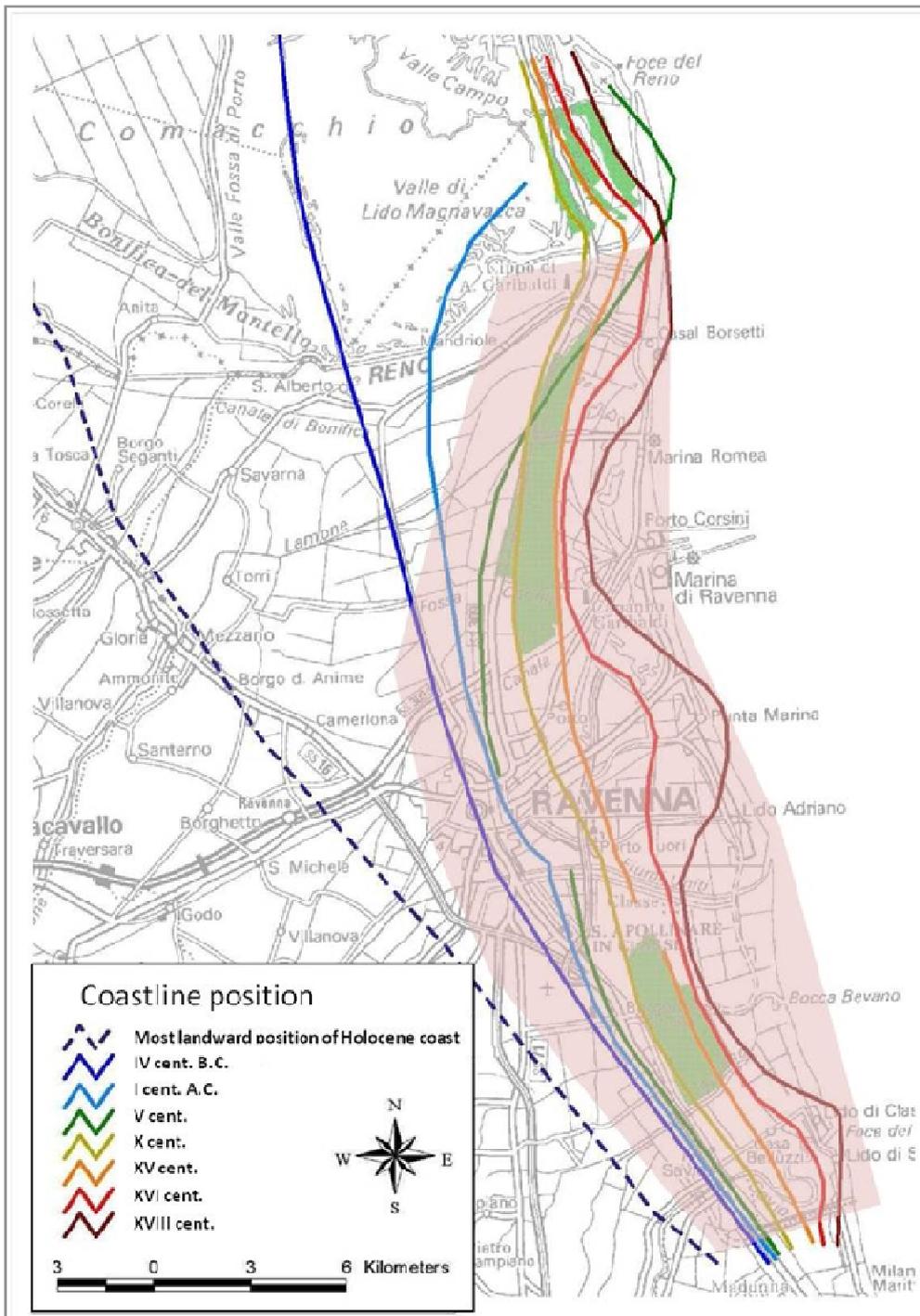


Figura 2.9 Evoluzione della linea di costa tra il IV sec. A.C. e il XVII sec. D.C. nella zona di Ravenna.

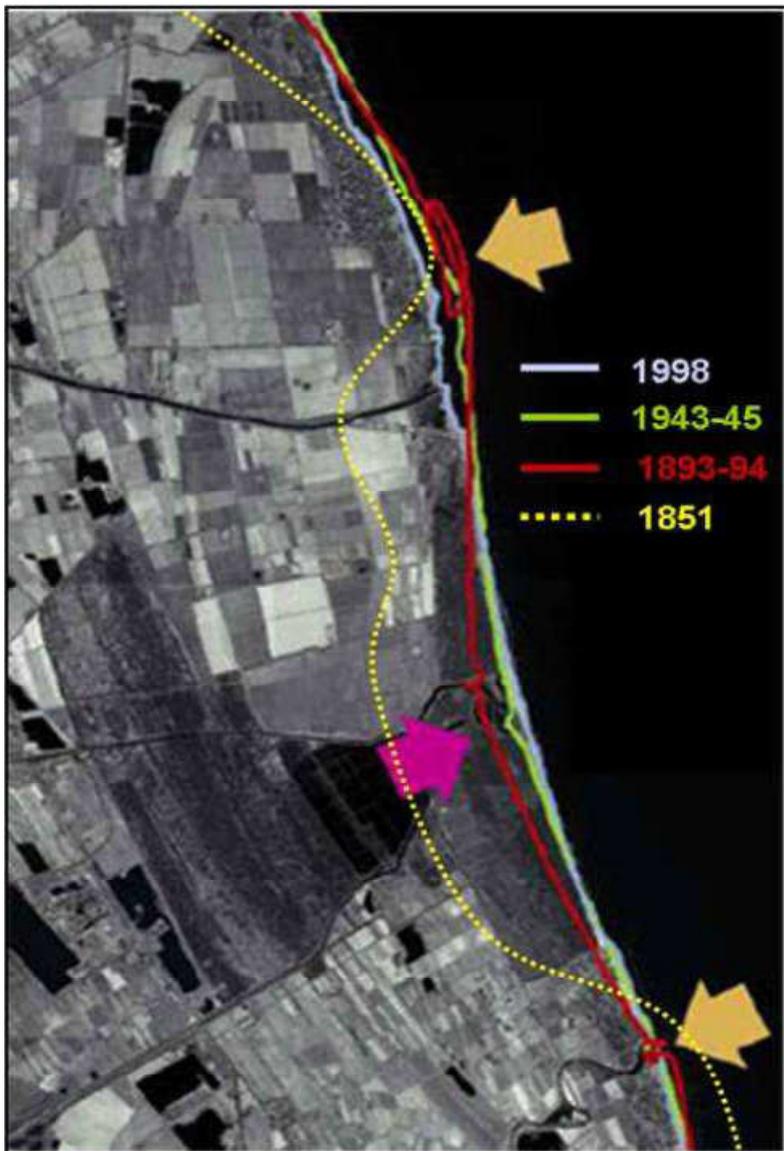


Figura 2.10 Evoluzione recente della linea di costa, modificato da http://www.ermesambiente.it/wcm/ermesambiente/canali/sicurezza/34_difesa_costa/difesa_costa/pag_01_introduzione.htm. Le frecce indicano le cuspidi deltizie in erosione, i cui sedimenti sono stati ridistribuiti dalle correnti marine causando la progradazione della linea di costa fino a metà del secolo scorso (indicata dalle linee in rosso e in verde). La linea di costa risulta retrocessa nel 1998.

2.6 Subsidenza

Trattati i contesti di formazione e le tipologie di sedimenti presenti, ne deriva che il fenomeno della subsidenza, legata sia a cause tettoniche profonde sia alla compattazione differenziale dei sedimenti plio-quadernari (Selli & Ciabatti 1977; Venturini 1966; Amorosi et al. 2002), gioca un ruolo fondamentale nel processo evolutivo di questi ambienti. Si considera che la velocità media di subsidenza nella zona di Ravenna per l'intero Quaternario sia stata circa 1,8-3 mm/anno. (Bertoni et al. 1988, Sestini 1992). Nella storia recente ai tassi di subsidenza naturale si sono aggiunti fattori antropici fra i quali i principali sono stati indicati nell'estrazione di fluidi (acqua e idrocarburi) dal sottosuolo (Gambolati et al. 1991; Gambolati & Teatini 1998; Carminati et al. 2002) destinati ad alimentare il comparto industriale di Ravenna. Un ulteriore contributo antropico è rappresentato dagli interventi di arginatura e controllo dei corsi d'acqua che hanno drasticamente ridotto l'apporto sedimentario nella zona costiera. Conseguenza immediata è stata che ampie superfici si sono trovate al di sotto del livello del mare, praticamente costituite da "catini" fra i cordoni di dune recenti e gli argini fluviali.

Il progressivo incremento dei tassi di subsidenza, entra nella sua fase più critica nel momento della rapida industrializzazione del territorio di Ravenna raggiungendo nel periodo 1972 – 1977 valori medi di 40 - 60 mm/anno sul territorio comunale con le punte più elevate in prossimità del polo industriale (Figura 2.11). I valori massimi di abbassamento si misurarono nell'area industriale e raggiunsero valori di 110 mm/anno tra il 1972 e il 1973 (Teatini et al., 2005.)

A partire dagli anni '80 la subsidenza cominciò a diminuire fino a tassi minori di 5 mm/anno per circa il 35 % di tutto il territorio comunale. Questo processo andò avanti e attualmente il fenomeno risulta essere in riduzione (con tassi minori dei 3 mm/anno) anche se per alcune aree costiere, per esempio in corrispondenza dei pozzi di estrazione "Dosso degli Angeli" e "Angela-Angelina", si registrano ancora valori prossimi ai 10 mm/anno e, quindi, molto elevati se paragonati alla soglia naturale. Il generale miglioramento della situazione è correlabile sicuramente con la chiusura di molti pozzi d'estrazione e con la sostituzione dell'approvvigionamento idrico mediante acque sotterranee con l'adduzione d'acque di superficie dal Reno e dalla diga di Ridracoli mediante l'acquedotto di Romagna (Prete, 2000).

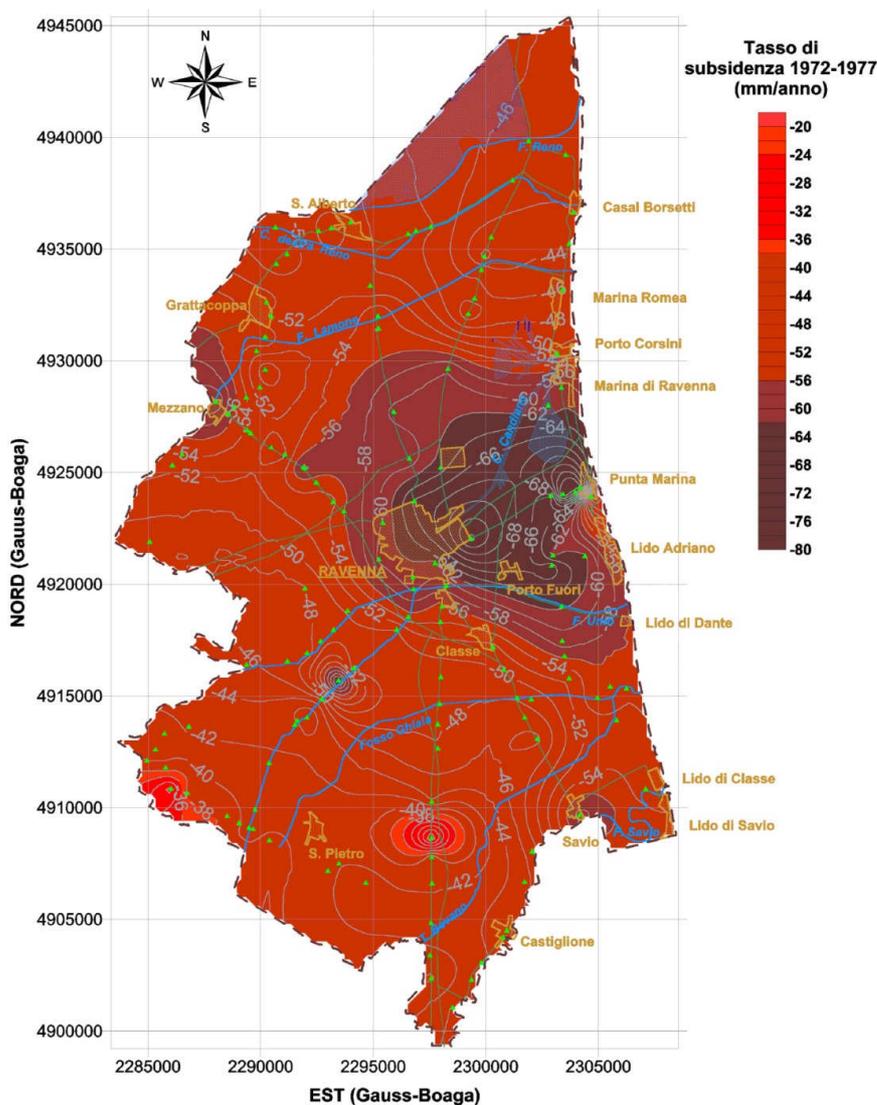


Figura 2.11 Tassi di subsidenza nel periodo 1972-1977 nel comune di Ravenna (Fonte Servizio Geologico – Comune di Ravenna, 2006.)

Alla coltivazione dei giacimenti di gas, però, non è imputabile la subsidenza estesa a tutto il territorio ravennate, anche se va tenuto presente che gli effetti, per quanto localizzati, possono essere gravi se i giacimenti sono ubicati in prossimità della linea di costa. Esiste invece una stretta correlazione, già chiaramente dimostrata (Carbognin *et al.*, 1984), tra la depressurizzazione degli acquiferi e l'entità della subsidenza causata dallo sfruttamento delle acque sotterranee. La subsidenza, quindi, ha raggiunto i valori maggiori nelle zone di maggior abbattimento piezometrico come nell'area industriale ed in altri poli di emungimento concentrato. Infatti, il prelievo di acqua da uno strato più o meno superficiale del terreno provoca un abbassamento della pressione interstiziale che provoca a sua volta un aumento del carico sopportato dai grani del terreno; a ciò corrisponde una deformazione elastica del terreno

seguita eventualmente da una compattazione degli strati che corrisponde ad una deformazione permanente di tipo plastico.

In Figura 2.12 è riportata la variazione della piezometria dell'acquifero profondo multistrato nella zona di Ravenna (Teatini *et al.*, 2005). Il profilo mostra il continuo e rapido abbassamento della piezometria a partire dal 1950 fino alla prima metà degli anni '70. Dopo questa data, appunto in concomitanza all'attivazione dell'acquedotto pubblico di Ridracoli e alla costruzione del nuovo acquedotto industriale (fine anni '70), le quote piezometriche hanno iniziato un lento recupero e i tassi di abbassamento si sono ridotti drasticamente.

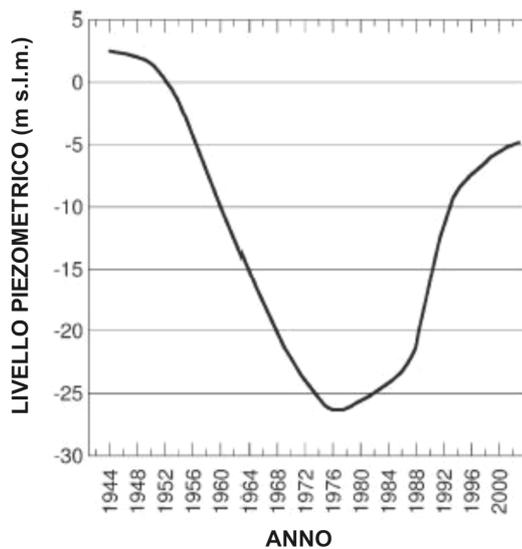


Figura 2.12 Variazione del livello piezometrico nell'acquifero profondo di Ravenna (da Teatini *et al.*, 2005).

Inoltre, la forte depressurizzazione che coinvolge sia la falda freatica che quelle artesiane più profonde, richiama lateralmente e verticalmente l'acqua salina che è insediata nelle stesse falde. Un fenomeno che spesso si accompagna ai pompaggi intensivi è il richiamo di acque saline fossili (connate) che spesso si trovano immediatamente al di sotto del sistema acquifero sfruttato.

In sintesi, negli ultimi 35 anni la quota topografica nelle aree più subsidenti si è ridotta di ben 1.5 m (Teatini *et al.*, 2005), favorendo l'ingressione di acqua marina negli acquiferi costieri. Un'altra conseguenza della subsidenza indotta dall'estrazione di idrocarburi è la risalita del livello della falda rispetto alla superficie topografica. Questo fenomeno ha reso necessario il drenaggio meccanico della falda freatica in tutta la porzione costiera della provincia di Ravenna.

2.7 Topografia del territorio

Di seguito al paragrafo relativo alla subsidenza, che ha evidenziato gli elevati tassi di abbassamento del territorio negli ultimi 30 anni (Teatini *et al.*, 2005), viene trattato l'aspetto topografico dell'area.

Il problema dell'intrusione salina negli acquiferi costieri dal punto di vista teorico, per la legge di Ghyben-Herzbergh (Fetter, 2001), prevede che la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata è circa 30 volte l'altezza della freatica sopra il livello del mare (paragrafo 1.3). Conseguentemente, una variazione di pochi cm del livello piezometrico causa un ampio spostamento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Di qui la necessità di disporre, di una topografia il più aggiornata possibile sulla base della subsidenza locale registrata per il periodo 1978-2006.

Altro aspetto affrontato in questo lavoro è stata la misurazione della quota dei piezometri e di tutti i punti di prelievo e misura di parametri fisico-chimici (capitolo 4).

La quota altimetrica di partenza, relativa alla topografia del 1978, è stata quindi ricalcolata sulla base delle diverse isocinetiche di subsidenza ricostruite per intervalli temporali corrispondenti alle livellazioni della rete di monitoraggio della subsidenza comunale (fornite dal Comune di Ravenna).

Le isocinetiche di abbassamento considerate sono relative ai seguenti intervalli temporali:

- 1977 – 1982;
- 1982 – 1986;
- 1986 – 1992;
- 1992 – 1998;
- 1998 – 2002;
- 2002 – 2006.

Il procedimento sopradescritto ha permesso di estrapolare le quote aggiornate al 2006 e, attraverso il modulo *Spatial Analyst* di ArcGis 9.3 (ESRI, 2000), di ottenere un TIN (*Triangulated Irregular Networks*) che si basa su una struttura di tipo vettoriale. Da questo TIN è stato poi possibile, con la funzione *ESRI 3D Analyst*, creare il DEM (*Digital Elevation Model*) della zona aggiornato al 2006 che permette la visualizzazione tridimensionale della superficie (Figura 2.13).

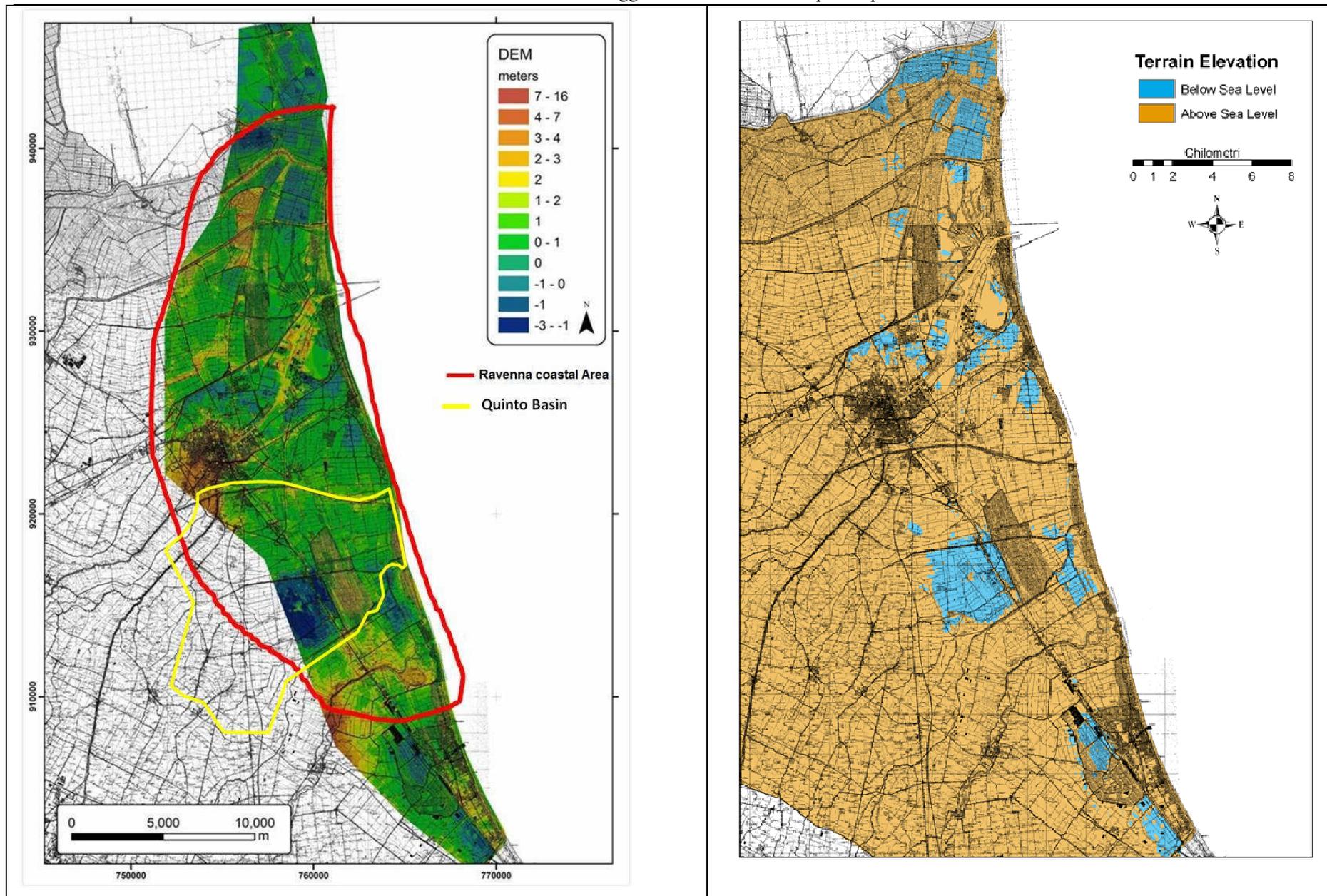


Figura 2.13 *Digital Elevation Model* per l'area costiera del Comune di Ravenna aggiornato al 2006 (Sinistra), aree al di sotto del mare (a destra).

La topografia così ricostruita evidenzia come le quote topografiche siano comprese prevalentemente tra i 4 e i -2m s.l.m. Mediamente il territorio ha una quota tra 0 e 1m s.l.m. e non evidenzia gradienti dominanti; le porzioni più elevati si ritrovano in corrispondenza delle paleodune e delle dune costiere con quote che, in queste ultime raggiungono anche i 4m s.l.m.. La zona più depressa è quella situata ad ovest della Pineta di Classe, con quote di circa -2m s.l.m.. Altre porzioni di territorio sono sotto il livello del mare e generalmente corrispondono a quelle di recente formazione, tra la Pineta di Classe e Ramazzotti e la zona di foce Reno a nord (Figura 2.13 destra). Gli spartiacque superficiali risultano spesso argini dei corsi fluviali e principali vie di comunicazione, a causa dei bassi gradienti generali dell'area.

Alla scala del V bacino a sud di Ravenna, è stata fatta la medesima analisi topografica, costruendo per l'area un DEM apposito, dal quale emerge come le quote variano tra i -2.5m s.l.m. nei pressi della fascia delle cave, fino a 4m s.l.m. che si trovano sia sulle dune costiere attuali che nella parte occidentale del bacino. Anche da questa immagine si nota come strade e arginature siano le parti più rilevate (Figura 2.14).

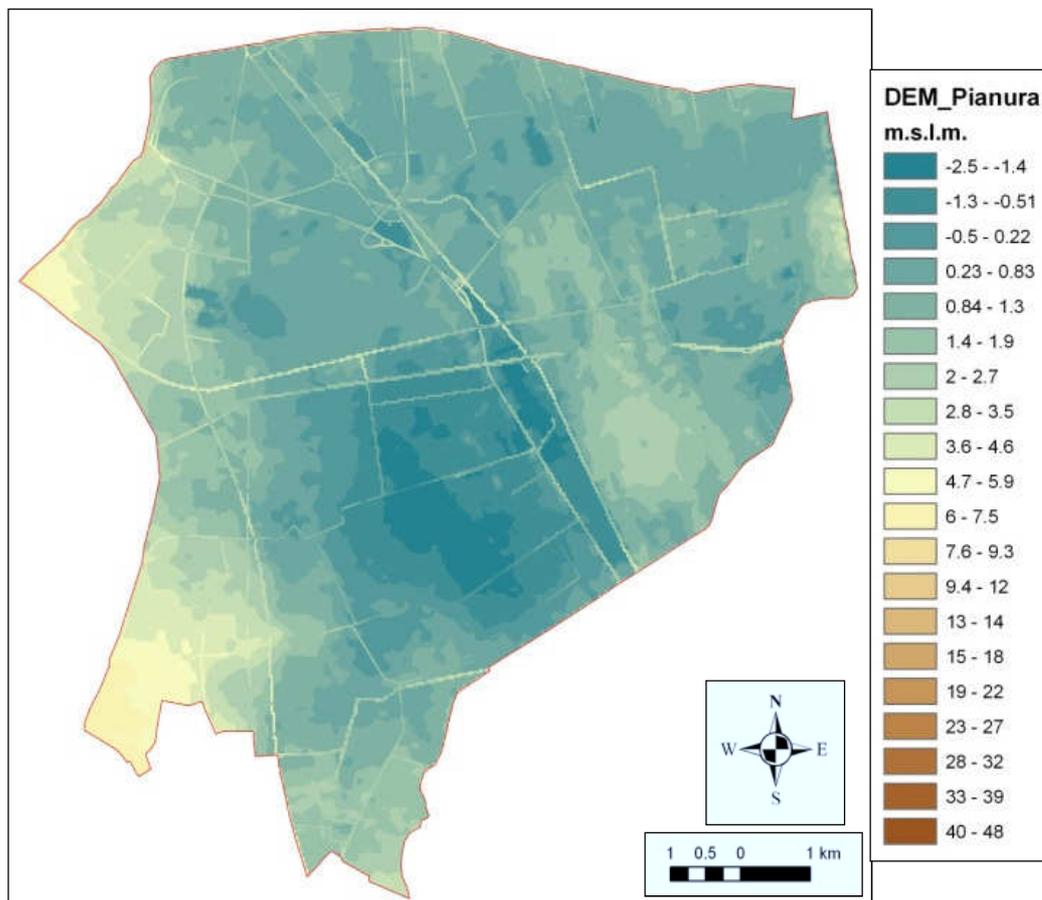


Figura 2.14 Modello digitale di elevazione del terreno del V bacino.

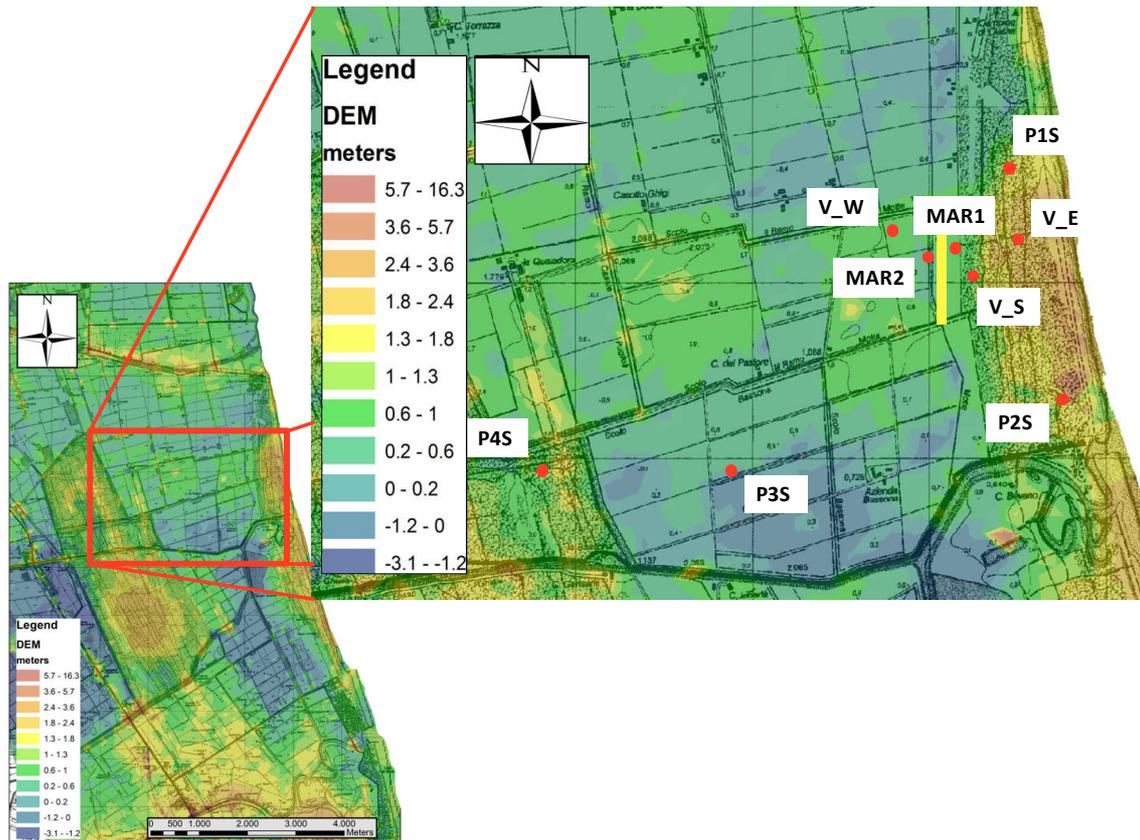


Figura 2.15 DEM dell'area MAR di ricarica dell'acquifero ricavato da quello complessivo dell'area di Ravenna 2006.

Scendendo sempre più nel dettaglio, in Figura 2.15, è rappresentata la topografia di dettaglio dell'area di ricarica MAR, con i pozzi di campionamento e la trincea di stoccaggio (linea gialla in Figura 2.15). Fatta esclusione per le due pinete presenti nell'area, le cui quote raggiungono anche i 4m s.l.m. (Pineta costiera Ramazzotti), gli ambiti agricoli centrali, delimitati dalle paleodune stesse hanno un'elevazione nulla sul livello del mare e nella porzione a diretto contatto con il Torrente Bevano la quota risulta di alcuni centimetri negativa sotto il livello del mare.

2.7.1 Suoli e uso del suolo

La carta dei suoli in Figura 2.16 mostra come i suoli presenti nell'area ravennate si differenzino in funzione della geologia superficiale. Si evince che in corrispondenza dei corsi fluviali attuali o relitti, su sedimenti sabbiosi continentali, si formano suoli Sant'Omobono (Reno Fiumi Uniti e Savio); in sedimenti sabbiosi di origine dunale (paleodune e dune costiere attuali) e nelle zone contigue e limitrofe alle precedenti, su sedimenti di sabbia fine e media si originano suoli denominati Cerba. In depositi sabbiosi, ma con la presenza di sedimenti fini di origine lagunare negli orizzonti più superficiali si formano suoli di tipo Cerba-Boschetto. Nelle porzioni occidentali dell'area, su sedimenti fini continentali, si generano suoli denominati Risaia del Duca.

A seconda della granulometria dei suoli essi mostreranno maggiori o minori rischi verso la problematica della salinizzazione (FAO, 2002). Ne deriva che tutti i suoli presenti nella porzione costiera di Ravenna sono potenzialmente a rischio di salinizzazione, a causa della topografia depressa, del forte drenaggio e della presenza di acque salate in acquifero.

Un maggiore dettaglio sulle tipologie di suoli presenti nell'area MAR verrà presentato nel (paragrafo 10.3).

La carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna (Figura 2.17) (Corticelli, 2003) evidenzia come il territorio in esame si presenti per lo più come zona agricola adibita prevalentemente a seminativo. Il resto del territorio è occupato da aree ambientali: le Pinete storiche di Classe e San Vitale, le pinete costiere, le "zone umide" di Punta Alberete e Valle Mandriole, le "Valli salmastre" della Piallassa Baiona, Piomboni ed Ortazzo e Ortazzino. Se aggiungiamo alle precedenti le aree antropiche raggiungiamo circa la metà della superficie totale presa in considerazione.

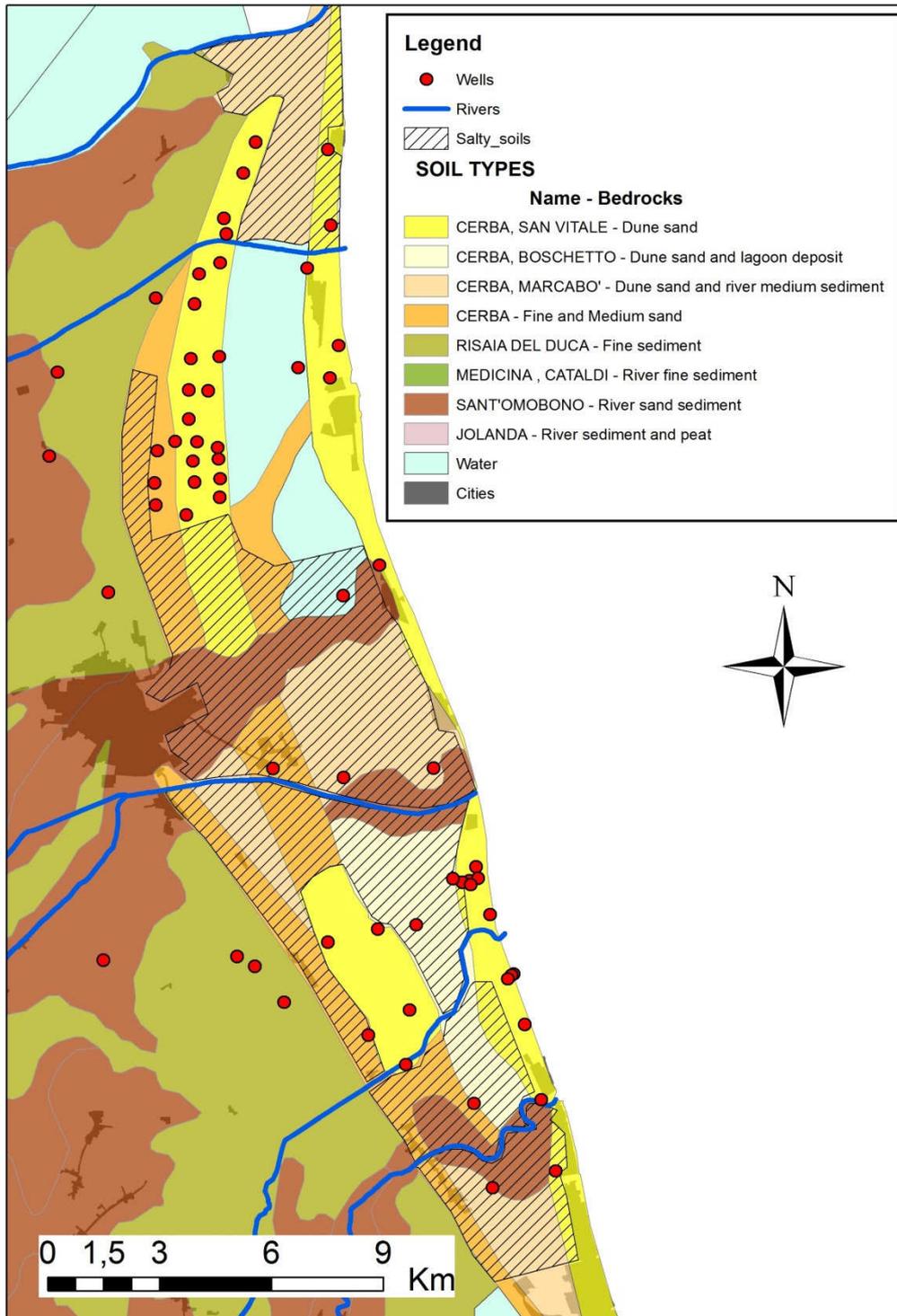


Figura 2.16 Carta dei suoli dell'area ravennate modificata da Corticelli, 2003. In tratteggio le porzioni di suoli agricoli potenzialmente esposti a salinizzazione.

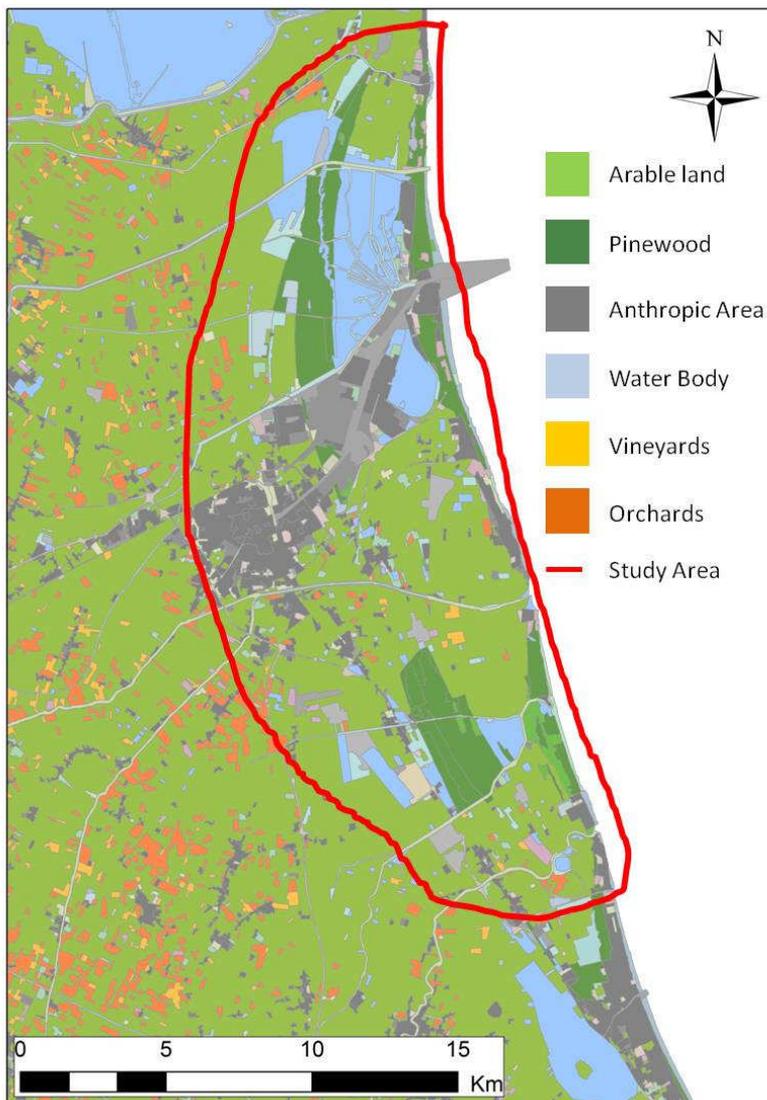


Figura 2.17 Carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna.

A scala di V Bacino l'uso del suolo rimane molto articolato (Figura 2.18). Nel transetto analizzato in dettaglio, partendo dalla linea di costa verso l'entroterra, si trova la Pineta costiera Ramazzotti, un ambito agricolo coltivato principalmente a seminativo, si entra poi nella pineta Storica di Classe ed all'uscita da essa, si giunge nella fascia delle cave estrattive. Nella porzione più occidentale, si ritrovano nuovamente ambiti agricoli, in cui, a differenza del precedente sono presenti percentuali maggiori di frutteti e vigneti. Focalizzandoci sull'area adiacente al bacino di ricarica, (*Focus Area* in Figura 2.18) notiamo come sia presente un appezzamento classificato come produzione di prodotti orticoli. Tale circostanza è stata verificata e testimoniata dai contatti con l'azienda che gestisce quei terreni e saranno discussi e approfonditi nel capitolo 10.

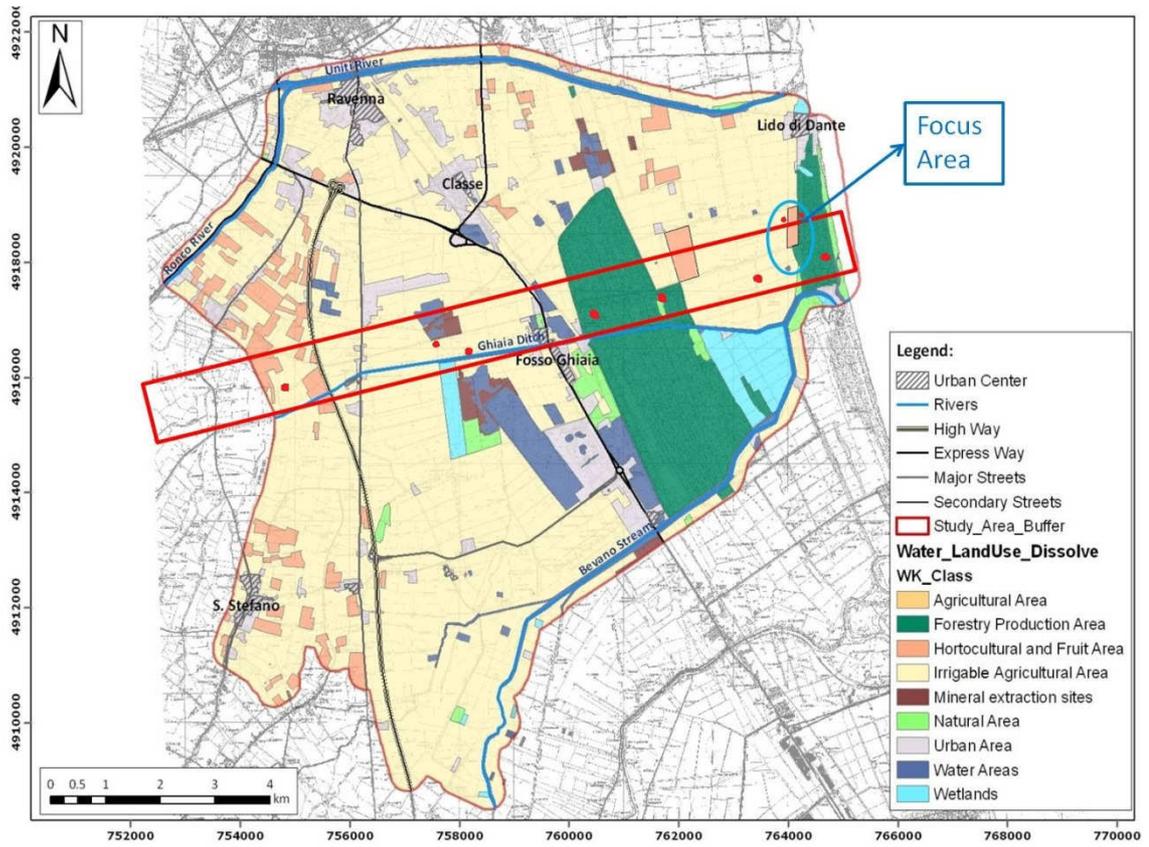


Figura 2.18 Uso del suolo all'interno del V Bacino, da Mollema, 2012.

2.8 Assetto idrologico

Il sistema idrologico dell'area ravennate risulta estremamente complesso e articolato, perché costituito da corpi idrici diversi per origine (naturale o artificiale) e per uso. Gli elementi che caratterizzano maggiormente questo territorio sono sicuramente i bacini salmastri e le Pialasse, le aste fluviali, i canali che compongono il reticolo di bonifica, le opere di presa e distribuzione delle acque fluviali e il mare Adriatico (Figura 2.19).

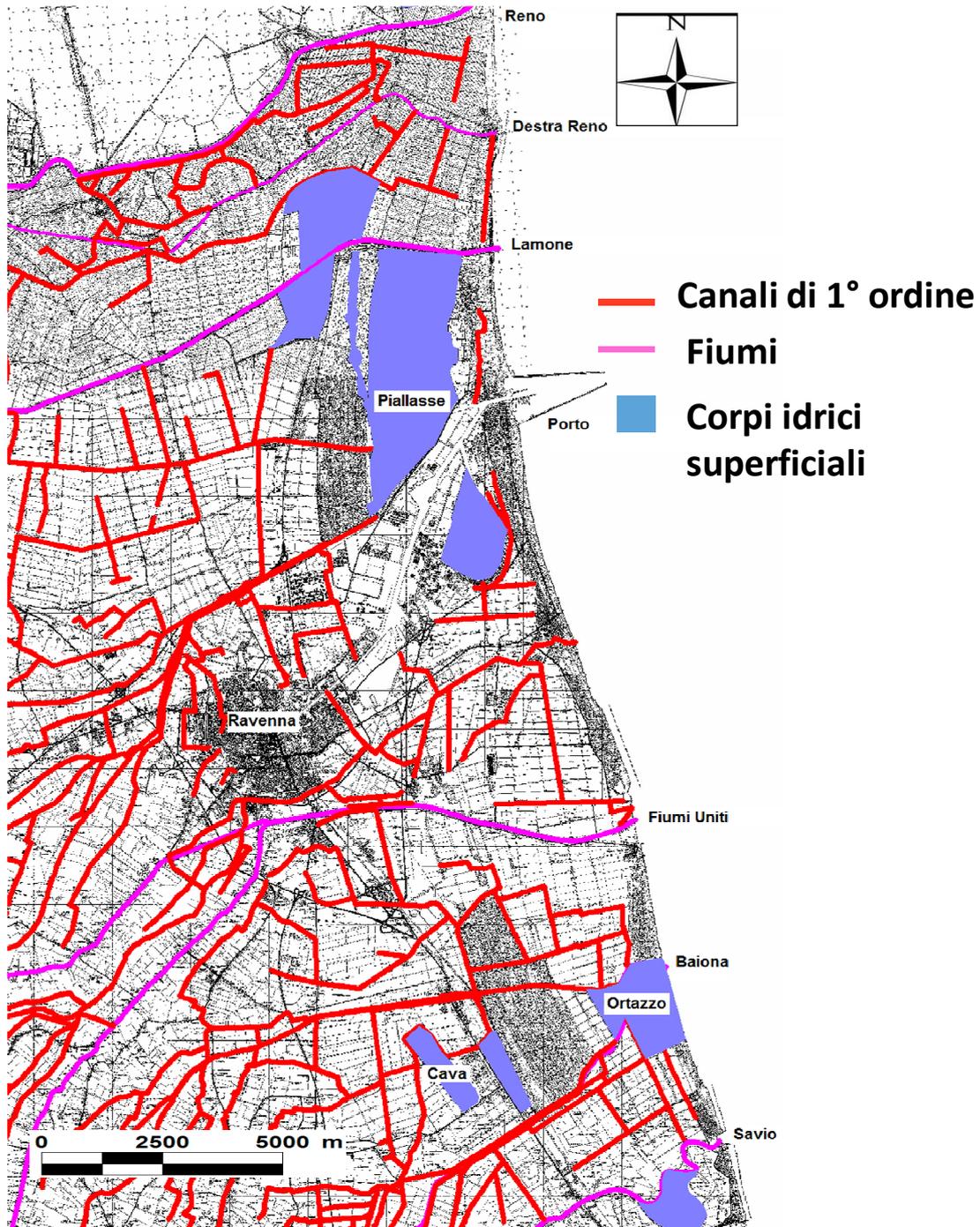


Figura 2.19 Mappa dei corpi d'acqua superficiali. In blu zone umide e laghi, in magenta i fiumi, in rosso i canali.

2.8.1 Fiumi

Analizzando in dettaglio il comparto fluviale si nota come molteplici siano i corsi d'acqua che in quest'area raggiungono l'Adriatico e interagiscono con l'acquifero. Elencati da Nord a Sud troviamo: Reno, Lamone, Fiumi Uniti, Bevano e Savio. Attualmente l'assetto delle aste fluviali non rispecchia più quello naturale a seguito delle molteplici azioni di rettificazioni e arginatura compiute dall'uomo nel secolo scorso, per favorire il deflusso dell'acqua verso mare e prevenire le esondazioni. Fanno eccezione la foce di Bevano e Savio che mantengono l'originale conformazione meandriforme.

Dalle indagini condotte dalla regione Emilia Romagna nel 2005, risulta che la maggioranza dei flussi d'acqua non derivano dalle sorgenti ma dal deflusso meteorico. Le portate sono pertanto variabili e ridotte, mantenendo valori medi annui veramente bassi, il Lamone per esempio supera di poco i 4 m³/sec (Laghi 2009).

Per fronteggiare il problema idrico in Romagna, dal 1960 è attivo il Canale Emiliano Romagnolo (CER) una delle più importanti opere idrauliche di tutta Italia. Garantisce, con una derivazione dal fiume Po, l'approvvigionamento idrico di una regione caratterizzata da un'intensa attività agricola e da molti insediamenti urbani ed industriali. Tale infrastruttura ricarica tutti e cinque i fiumi ravennati, assicurando ben 224 milioni di m³ d'acqua all'anno (<http://www.consorziocer.it/>).

2.8.2 Pialasse

Pialasse, attualmente di proprietà del Comune di Ravenna, sono oggi ridotte a quattro, tutte disposte nella zona settentrionale dell'area in esame: tre a nord del Canale Candiano e una posta a sud del medesimo. La Pialassa della Baiona, che è la maggiore, si estende lungo il territorio fra il Lamone e lo Scolo Fossatone; la Pialassa della Risega invece si trova fra il Fossatone e lo Scolo Via Cerba, mentre quella del Pontazzo occupa la parte meridionale del territorio. La loro superficie totale copre circa 1200 ha (Figura 2.19) e sono collegate al mare attraverso il Canale Candiano.

La Pialassa del Piombone, a sud del Canale Candiano, ha un'area poco più vasta di 300 ha da quando buona parte della sua superficie è stata colmata e occupata da impianti industriali, ed allo stato attuale è ridotta ad una struttura portuale priva di interesse naturalistico.

Nell'area più meridionale, in corrispondenza della foce del Bevano, sorge la zona umida dell'Ortazzo, un'antica valle di acqua dolce arginata ed ottenuta dalla riconversione di precedenti risaie. Soggetta oggi agli influssi salmastri della falda, si caratterizza come un ampio stagno costiero, in parte controllato dall'immissione di acque dal canale Bevanella e dal Fosso Ghiaia (Regione Emilia Romagna 2009).

2.8.3 Bacini di cava

Nella parte meridionale dell'area in esame sono presenti laghi di dimensioni più o meno estesi derivanti dall'attività estrattiva di cave attive o dismesse (Figura 2.19). Da queste aree estrattive è prelevata principalmente ghiaia (la loro localizzazione in una fascia non è casuale, ma testimonia il punto di chiusura dell'acquifero), impiegata in edilizia come conglomerato nel cemento armato. Per raggiungere gli strati interessati è necessario sbancare completamente tutti quelli sovrastanti causando il riempimento dello scavo di acqua freatica. Questo è uno dei principali motivi per cui è necessaria un'attenta gestione delle attività estrattive, in quanto, in assenza di suolo non esiste un "filtro" ai possibili inquinanti e inoltre viene agevolata l'evaporazione dell'acqua.

2.8.4 Canali di drenaggio e idrovore

L'assetto idrologico dell'area sarebbe incompleto se non si esaminassero le molteplici opere antropiche situate nell'area, quali: i canali di bonifica, i canali di drenaggio connessi ai sistemi di sollevamento che mantengono il franco di coltivazione per garantire l'attività agricola.

I canali mostrati in Figura 2.19 rappresentano esclusivamente quelli di primo ordine, aventi dimensioni maggiori e gestiti dal Consorzio di Bonifica della Romagna. A questi vanno aggiunti una serie fittissima di canali secondari che permettono il rapido deflusso idrico delle acque di pioggia.

Attualmente la rete di bonifica si estende all'intera area oggetto di studio, dune costiere comprese, seppur corrispondano alle zone con quota maggiore, al fine di tutelare le pinete.

Una peculiarità di alcuni di questi canali è l'uso promiscuo che ne viene fatto; nei periodi invernali, ed in generale quando l'andamento climatico lo richiede, essi raccolgono le acque piovane e drenano l'area. Nella stagione estiva, invece, alcuni di essi sono mantenuti pieni di acque in modo tale da garantire alle aree agricole circostanti, una risorsa idrica utilizzabile per l'irrigazione. L'approvvigionamento idrico che per lungo tempo è stato garantito prelevando acqua dai corsi fluviali, da alcuni anni ed nella maggior parti dei territori analizzati è garantito o mediante condutture sotterranee (area MAR) o attraverso apporti di acque del Po mediante CER.

Questo doppio comportamento di alcuni canali fa sì che siano stati registrati andamenti piezometrici anomali in alcuni pozzi adiacenti e il loro comportamento sarà trattato in dettaglio nel seguito della tesi come tecnica di ricarica dell'acquifero.

La vasta area sottoposta a drenaggio meccanico è divisa in diversi sottobacini, governati da una serie di idrovore gestite dal Consorzio di Bonifica della Romagna (Figura 2.20). La quasi totalità del territorio costiero richiede sollevamento meccanico; possiedono gradiente naturale solamente i bacini ad ovest della città di Ravenna.

All'interno del V Bacino, delimitato a nord e a sud rispettivamente dai Fiumi Uniti e dal Bevano, è presente un canale che possiede un gradiente naturale che lo porta a sfociare nel Torrente Bevano stesso: il Canale Fosso Ghiaia (Figura 2.21). Sono presenti due impianti idrovori, anche se l'unico attivo è l'idrovora del V Bacino (da dati del Consorzio di Bonifica). Tale impianto di sollevamento drena tutti i terreni ad ovest dell'impianto stesso, ma grazie ad una fitta rete di canali, raccoglie anche tutte le acque provenienti persino dalla Pineta costiera di Ramazzotti. Proprio dall'area MAR si originano i canali denominati Motte I ramo e Motte II ramo, che una volta unitisi, circondano la Pineta di Classe e nei pressi dell'idrovora del V Bacino, mediante un sottopasso, attraversano il Canale Fosso Ghiaia e giungono alle pompe (Figura 2.21). Ne deriva che la falda freatica al di sotto della Pineta costiera di Ramazzotti, così come quella nelle aree agricole ad est, è gestite da un impianto situato a 4km dalla linea di costa (vedi paragrafo 8.2.2).

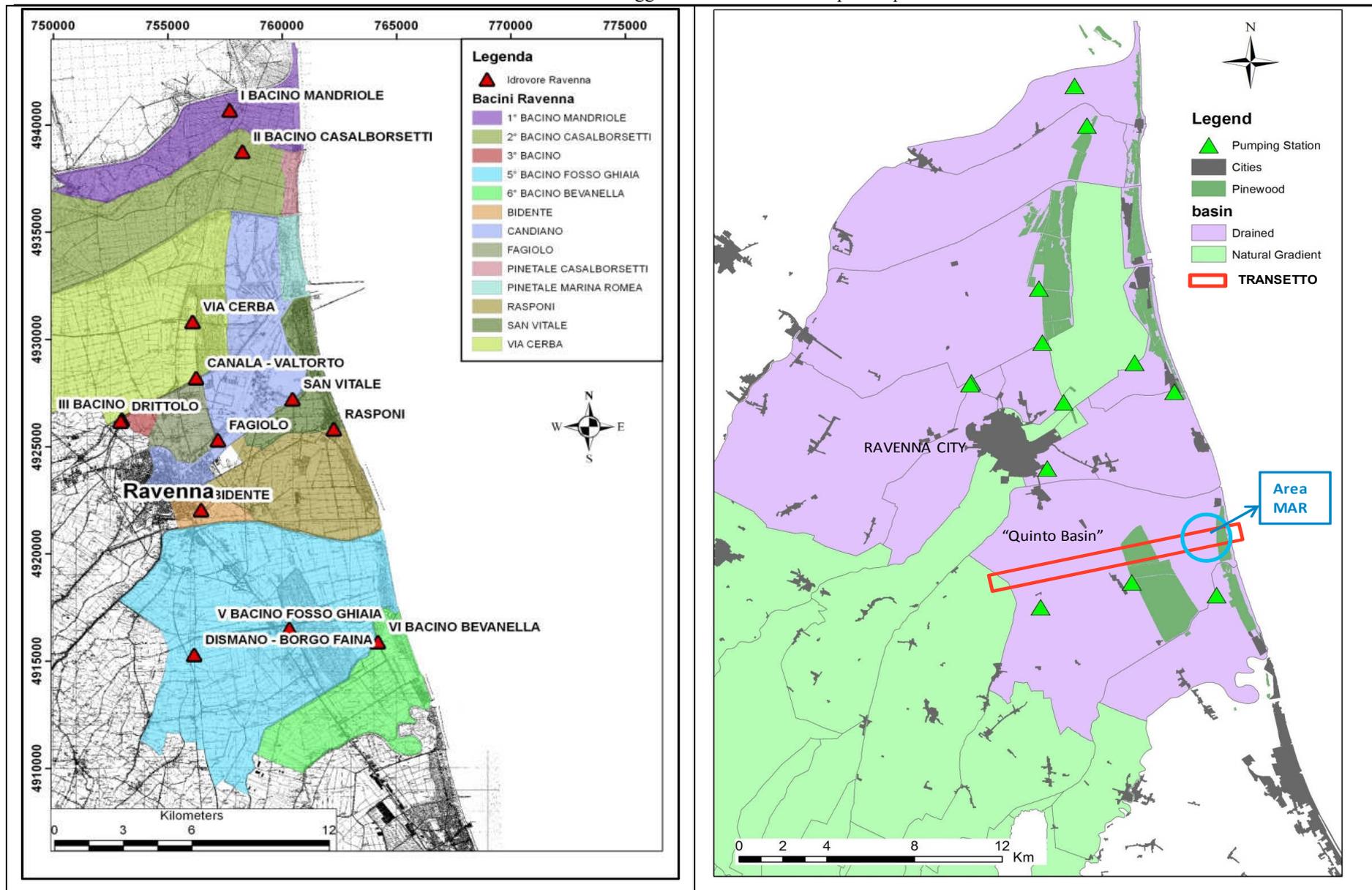


Figura 2.20 A sinistra la specifica dei bacini idrografici e delle idrovore presenti nell'area, mentre a destra un dettaglio sui bacini che possiedono gradiente naturale per sfociare a mare senza idrovora.

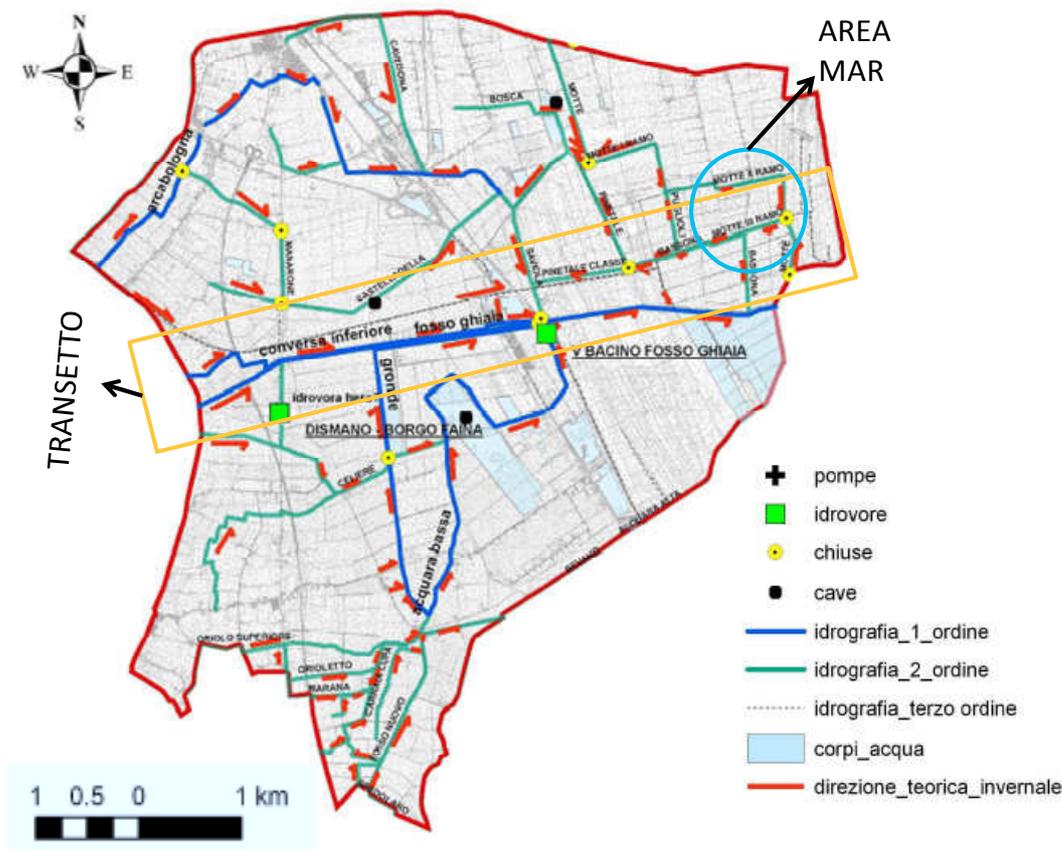


Figura 2.21 Assetto idrologico di dettaglio del V Bacino, con evidenziati il transetto di studio e l'area MAR.

2.9 Assetto Idro-Geologico: gli acquiferi dell'Emilia-Romagna

La struttura degli acquiferi padani è stata indagata grazie allo studio e l'interpretazione dei dati raccolti su tutta la Pianura Padana e messi a disposizione da AGIP alla Regione Emilia Romagna. Questa collaborazione si concluse con il lavoro eseguito congiuntamente dall'Ufficio Geologico Regionale e dall'AGIP del 1998 in seguito inserito anche nel Piano di Tutela delle Acque 2005 (RER 2005).

I dati mostrano che si possono generalmente individuare tre grandi gruppi di acquiferi denominati, in progressione verticale dall'alto in basso, A, B e C differenziati per profondità, spessore e produttività idrica. Ognuno di questi è separato dagli altri dall'interposizione di importanti aquitardi ed è costituito da diversi complessi acquiferi minori.

La geometria interna e le caratteristiche petrofisiche di queste Unità Idrostatigrafiche (ciascun gruppo acquifero) sono il prodotto della storia tettonica e deposizionale del bacino sedimentario. Ciascuna Unità rappresenta un corpo geologico con una certa estensione areale in

cui ha sede un sistema idrologico ragionevolmente distinto, di tipo sequenziale caratterizzato da una o più sequenze deposizionali e comprensivo di un livello geologico basale scarsamente permeabile (acquitardo) o impermeabili (acquicludo) di tipo continuo (R.E.R. & ENI-AGIP 1998). Il Gruppo Acquifero A è attualmente sfruttato in modo intensivo, il Gruppo Acquifero B è sfruttato solo localmente, il Gruppo Acquifero C è invece raramente sfruttato poiché rimane ad alte profondità per gran parte della sua estensione.

In prossimità dell'area di studio il sottosuolo è classificato come Acquifero A (A1 e A0) ed è caratterizzato dai depositi di pianura costiera. Tali depositi, che sovrastano gli acquiferi alluvionali sottostanti, presentano una tessitura prevalentemente sabbiosa a permeabilità elevata, ridotta localmente dalla presenza di materiali fini.

Come già accennato in precedenza queste strutture hanno, nel loro complesso, uno spessore massimo di 25 – 30 m e la sola porzione sabbiosa può arrivare ad essere spessa una ventina di metri (RER, 2003).

Per quanto riguarda la qualità delle acque sotterranee è determinata sia dall'infiltrazione di inquinanti sia, per le falde più profonde, dai meccanismi idrochimici e idrobiologici naturali. Ad esclusione dell'acquifero freatico superficiale, per quelli profondi, le possibilità di inquinamento antropico sono presenti quasi esclusivamente nell'alta pianura, dove l'acquifero diventa libero e dove avviene la frazione più importante della ricarica. Le acque sotterranee della Regione Emilia Romagna sono classificate ai sensi del Dlgs n. 152/06 in 5 classi qualitative (da 0 a 5) che tengono in considerazione la pressione antropica e le caratteristiche chimiche delle acque campionate. La quasi totalità delle acque profonde della zona della pianura di Ravenna sono classificate in classe 0, definita come —Impatto antropico nullo o trascurabile ma con particolari facies idrochimiche naturali e concentrazioni al di sopra del valore della Classe 3 (RER 2005). Ciò è dovuto alla presenza di elevate concentrazioni di ferro, di ammoniaca e talvolta di manganese, cloruri, arsenico, di sicura origine geologica.

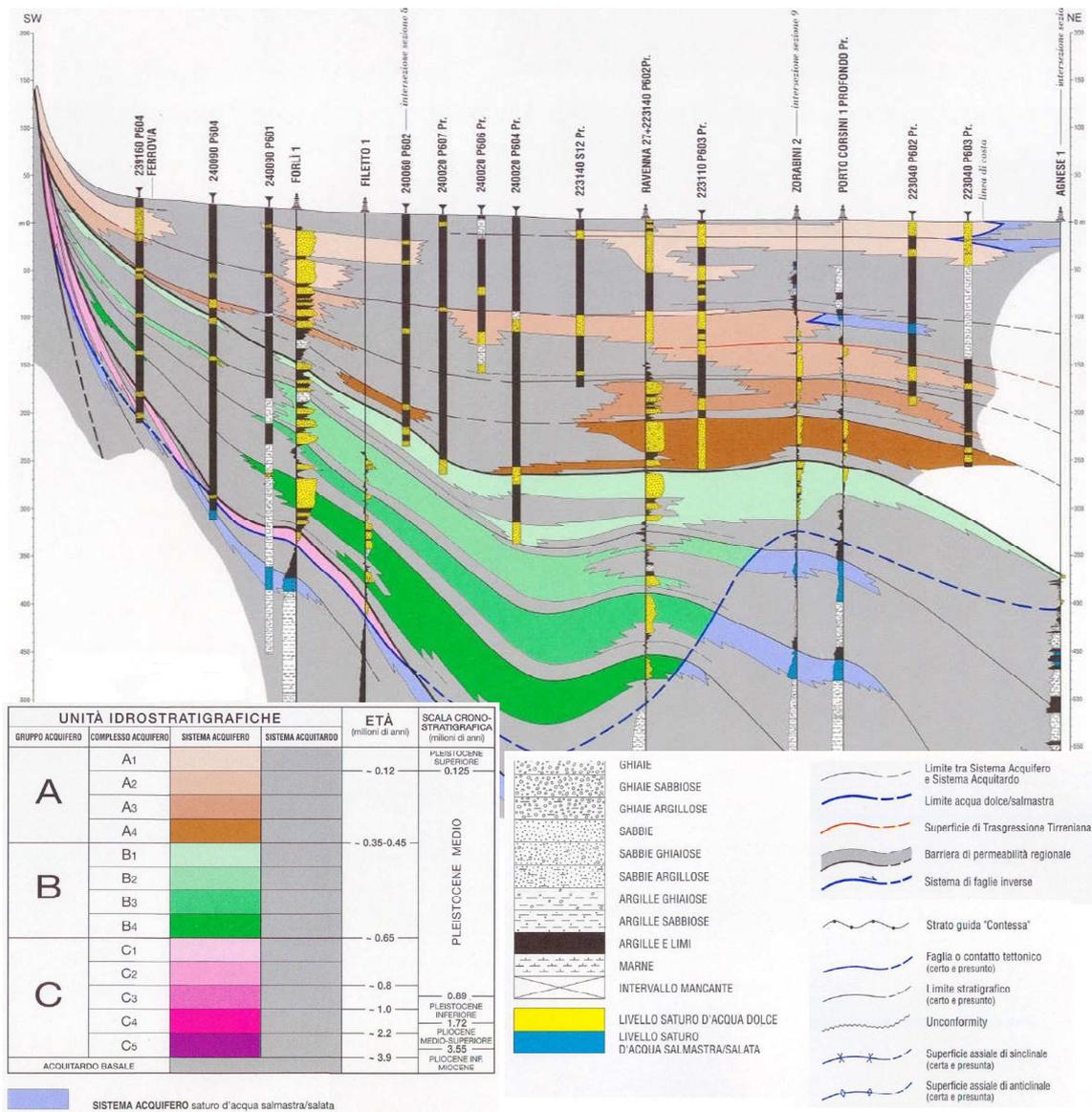


Figura 2.22 Sezione idrostratigrafica n° 29. Esagerazione verticale 50x. Servizio Geologico Sismico e dei Suoli webgis (da R.E.R. & ENI-AGIP 1998).

L'acquifero freatico superficiale costiero è considerato di scarso valore qualitativo e le sue acque non rivestono un ruolo importante nell'approvvigionamento di acque ad uso potabile (RER 2005).

In zona costiera tuttavia, oltre le problematiche sopracitate legate alla caratteristica di acquifero libero e quindi soggetto a ricarica e infiltrazione dalla superficie (e quindi anche a potenziale inquinamento), esiste la problematica legata all'intrusione del cuneo salino costiero. Descrizione, origine e chimismo di questo acquifero freatico superficiale verranno descritte nei capitoli seguenti per la porzione ravennate.

3 CLIMA E DRENAGGIO

La scelta di dedicare un intero capitolo alla componente climatica e di aggregarla al drenaggio dell'area è giustificata dal fatto che dalla valutazione e dall'interazione di questi due fattori è stato possibile, prima di tutto inquadrare il contesto climatico in cui è avvenuto lo studio e in seconda istanza discriminare la componente di ricarica naturale (qualora presente) da quella valutata per l'area MAR.

3.1 Temperature e precipitazioni

I dati climatici di temperatura e precipitazione utilizzati per ricostruire la serie storica dal 1976 al 2008 provengono dall'Az. Sperimentale Marani con sede in via Romea a circa 3 km nord della città di Ravenna. I medesimi dati dal 2009 al 2012 sono stati scaricati dall'archivio DEXTER di Arpa Emilia Romagna (<http://dexter-smr.arpa.emr.it>). Tra le stazioni disponibili facenti parte della rete DEXTER di Arpa, sono stati prelevati dati riguardanti la stazione meteorologica situata in Zona Bassette, a meno di 1km dall'Azienda Sperimentale Marani, in modo da garantire una continuità spaziale alla serie dei dati. Entrambe le serie di dati provenienti dalle due diverse sorgenti, sono state convertite da orarie a giornaliere, per poi ricavarne le medie mensili e annuali.

Il primo grafico costruito (Figura 3.1) rappresenta le precipitazioni medie annuali registrate nell'area di Ravenna per una serie storica che va dal 1976 al 2012. La linea rossa raffigura la media climatica dei 36 anni considerati. Lo stesso grafico mette in luce come in sei degli ultimi sette anni, le precipitazioni complessive siano state inferiori alle medie storiche (Figura 3.1). In particolare, nel 2009 e nel 2011 le precipitazioni non hanno superato i 500 mm a fronte di una media di circa 650mm. Nel triennio in cui è stato svolto questo lavoro di Dottorato le precipitazioni sono state rispettivamente, 870mm nel 2010, 390mm nel 2011 e 570mm per l'anno appena concluso.

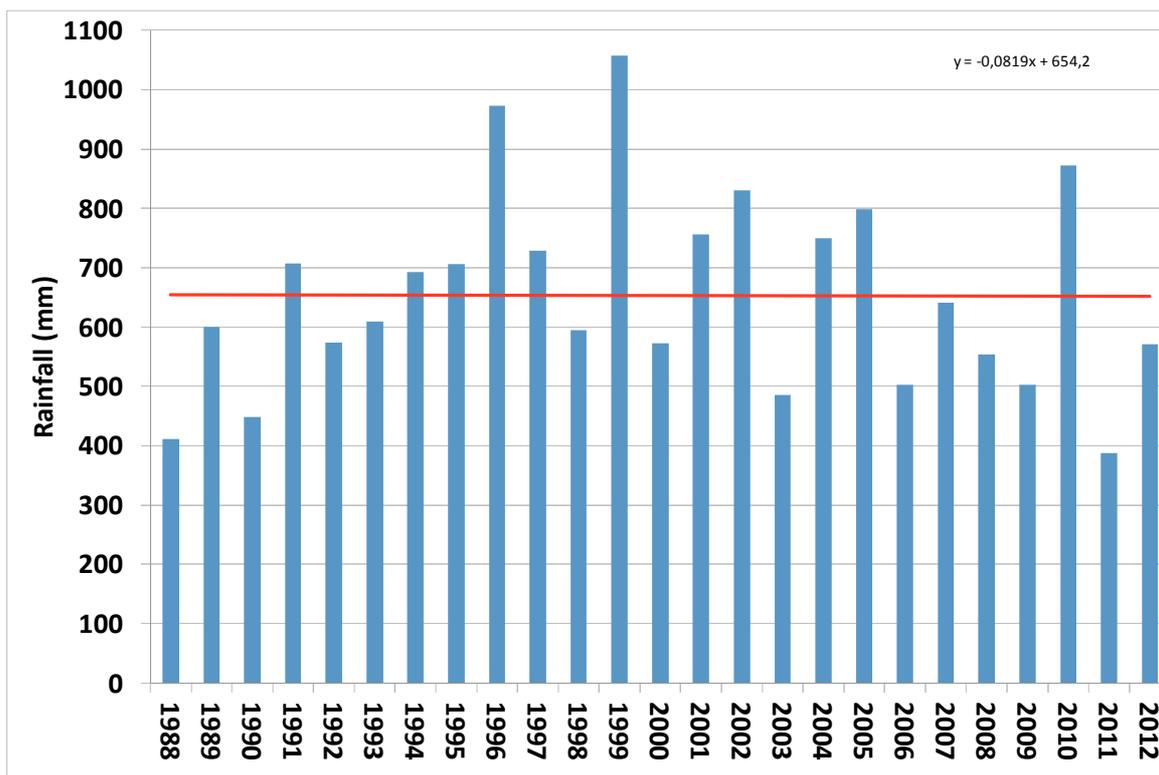


Figura 3.1 Grafico relativo alle precipitazioni medie annuali per l'area di Ravenna, costruito sui dati Marani e Arpa Dexter. La linea rossa rappresenta la media dal '76 al 2012.

Per visualizzare al meglio le vicende climatiche degli ultimi tre anni, in Figura 3.2 sono rappresentati gli andamenti medi mensili per le precipitazioni e le temperature dell'area di Ravenna. Nel medesimo grafico sono stati riportati anche i valori relativi al 2010, 2011 e 2012. Come confermato dai dati della piovosità annuale, il 2010 è stato l'anno con maggiori precipitazioni; tali eventi sono abbondantemente sopra media climatica nei primi mesi dell'anno per poi assestarsi attorno ai valori medi. Gli anni seguenti a livello di precipitazioni sono stati drammaticamente scarsi, in particolare l'intero 2011 è stato sotto la media mensile di precipitazioni; questa condizione è proseguita anche nel periodo primaverile-estivo del 2012 (ad eccezione delle abbondanti nevicate di febbraio). Negli ultimi mesi del medesimo anno, le abbondanti precipitazioni registrate hanno mitigato la drammatica situazione che perdurava da oltre 1 anno.

A livello termico è evidente come gli anni 2011 e 2012 (linee rosse e blu in Figura 3.2) si pongano nettamente al di sopra della media climatica mensile per l'area di Ravenna. In particolare le temperature si mantengono, per entrambi gli anni, di almeno 2 °C superiori alle medie, nel periodo che va da maggio a dicembre, per poi tornare a valori medi climatici nel periodo invernale. Il 2010 a livello termico è stato nella media fino ad agosto per poi mostrare temperature di anche 4 °C oltre la media climatica durante l'ottobre e novembre 2010.

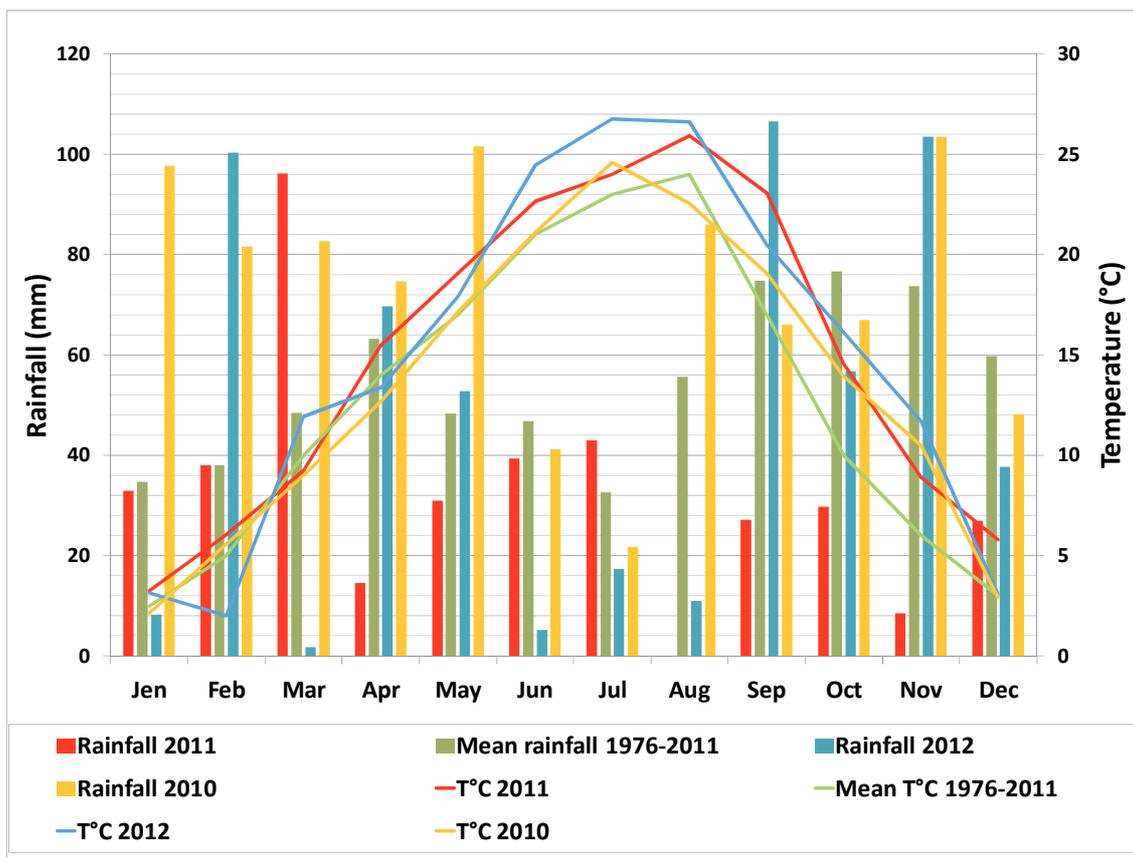


Figura 3.2 Grafico dell'andamento medio (verde) di temperatura e precipitazioni mensili relativo al periodo 1976-2012 per l'area di Ravenna. Sono riportati anche gli anni 2010 (giallo), 2011 (rosso) e 2012 (blu).

È possibile riassumere la situazione climatica nel triennio di Dottorato, dicendo che complessivamente è stata attraversata una fase siccitosa importante per l'area, che appare temporaneamente sospesa grazie alle piogge recenti (Come riportato sui Bollettini Agrometeorologici di Arpa Emilia-Romagna : <http://www.arpa.emr.it/sim/datiiningresso/Agrometeo/mensile>).

In generale, ad esclusione del monitoraggio di dicembre 2010 svolto al termine di un'annata relativamente piovosa, le altre campagne di monitoraggio che verranno trattate in questa tesi sono state svolte in condizioni particolarmente siccitose.

Si farà riferimento alla piovosità del 2011 nel capitolo in cui saranno trattati gli effetti del canale di ricarica sull'acquifero freatico (capitolo 10).

3.2 Drenaggio

Come già descritto al paragrafo 2.8.4, tutto il territorio ravennate è drenato meccanicamente da impianti idrovori che mantengono la falda freatica ad un livello prefissato per garantire il franco di coltivazione sufficiente anche nelle porzioni di territorio più depresse. Ne deriva quindi che il drenaggio rappresenta un fattore importante per le dinamiche del nostro acquifero, specialmente per le aree costiere in cui le sabbie che lo compongono sono affioranti.

Considerando i notevoli effetti che i canali inducono sulla riduzione del carico idraulico e sulla risalita di acque profonde (paragrafo 1.3) e per cercare quindi di dare una prima valutazione al sistema “drenaggio”, l’Università di Bologna ha inviato una richiesta ufficiale al Consorzio di Bonifica, per entrare in possesso dei dati di sollevamento. La richiesta è stata immediatamente accolta e da alcuni anni, il Consorzio di Bonifica della Romagna ci consegna un bilancio complessivo delle ore di attivazione delle idrovore suddivise per ciascun impianto. A scopo esclusivamente descrittivo, sono stati messi in grafico i metri cubi di acque sollevati a scala del singolo bacino, con i metri cubi di precipitazioni che sono caduti sulla medesima superficie. Queste considerazioni sono state eseguite per il Quinto Bacino Fosso Ghiaia, perché solo in questo caso ci sono stati forniti i dati orari; per tutti gli altri impianti ci viene consegnata una tabella complessiva. In ogni caso, assumendo una precipitazione costante su tutti i 10km² (1000ha) che compongono il V bacino di drenaggio, abbiamo calcolato i volumi di precipitazioni e messi a grafico con i volumi sollevati per gli anni 2009 e 2010 (Figura 3.3 e Figura 3.4).

Osservando i grafici è possibile notare come, indistintamente nel corso dei due anni analizzati, i volumi di acque sollevate dell’impianto risultino sempre maggiori dei volumi delle precipitazioni. In particolare sono confermati i dati pluviometrici che indicavano il 2010 come anno piovoso (sopra media), infatti, durante questo periodo, le idrovore hanno sollevato complessivamente un volume pari a 46 milioni di m³ di acqua a fronte di un quantitativo di circa 9 milioni di m³ precipitati (sono stati sollevati 5 volte i volumi precipitati).

Nonostante la piovosità del 2009 sia stata modesta, l’impianto ha sollevato acqua ininterrottamente fino ai primi giorni di ottobre per poi vedere un leggero calo dei sollevamenti, ma alla ripresa delle precipitazioni, riparte anche il sollevamento pressoché in maniera continua delle idrovore.

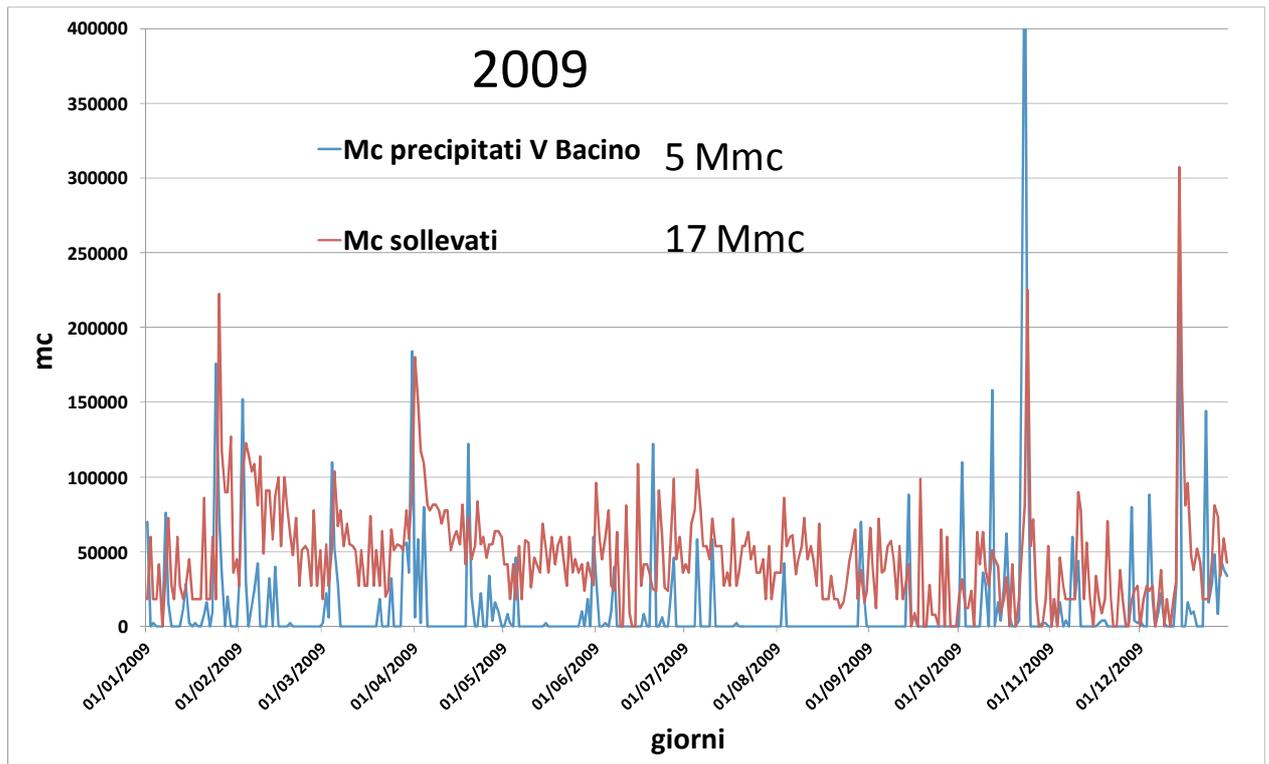


Figura 3.3 Grafico dei metri cubi di acque sollevati dell'idrovora del V Bacino rispetto ai metri cubi precipitati nella medesima area. Anno 2009.

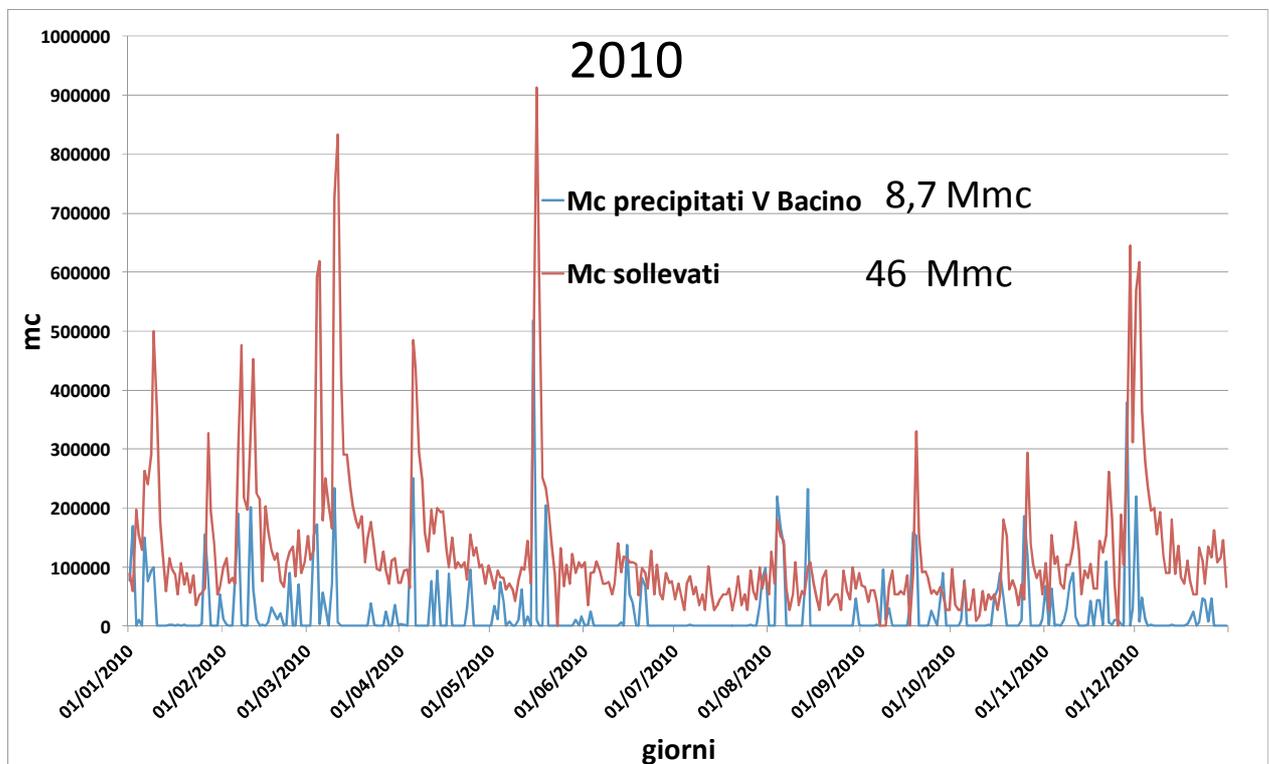


Figura 3.4 Grafico dei metri cubi di acque sollevati dell'idrovora del V Bacino rispetto ai metri cubi precipitati nella medesima area. Anno 2009.

Nel 2010, a seguito delle abbondanti precipitazioni, i sollevamenti sono stati per continui durante tutto l'anno.

3.3 Conclusioni

Come già riportato in altri lavori eseguiti nella stessa zona, l'effetto del drenaggio superficiale riduce la ricarica dell'acquifero e richiama acque salate dalle porzioni profonde dell'acquifero (Marconi, 2011; Antonellini, 2008; Giambastiani, 2009; Mollema 2012). Risulta allo stesso tempo evidente come il drenaggio sia irrinunciabile per garantire lo sfruttamento agricolo di queste aree a topografia molto bassa.

In questo quadro di effetti negativi potenzialmente causati da un eccessivo drenaggio sull'acquifero, assume ancora maggiore valore questo studio che dimostra come una gestione oculata della risorsa idrica possa modificare completamente l'assetto idrologico superficiale di una porzione di territorio che risente della problematica della salinizzazione dell'acquifero e dei suoli.

4 RETE PIEZOMETRICA

4.1 Messa a dimora piezometri

Allo scopo di caratterizzare da un punto di vista litologico l'acquifero freatico costiero del Comune di Ravenna e di studiarne in dettaglio la geochimica delle acque presenti al suo interno, è stata messa a dimora una nuova rete piezometrica a scala di acquifero. A differenza dei pozzi impiantati in precedenti progetti di ricerca, nella maggior parte dei casi localizzati all'interno delle pinete, in questo caso abbiamo distribuito i pozzi nel modo più omogeneo possibile andando ad interessare diversi tipi di uso del suolo e diversi contesti litologici superficiali (vedi capitolo 2).

Nello studio delle acque sotterranee risulta fondamentale la scelta della tipologia di pozzo da monitorare (Hantush 1964, Shalev 2009). Come riportato da Balugani (2010), sono noti i fenomeni di stratificazione e di mescolamento che si generano nelle acque all'interno di pozzi fessurati solamente al fondo. In tal caso risulta necessario spurgare il pozzo di almeno due volte il suo volume complessivo o fino a che non si raggiunge la stabilizzazione dei parametri chimico-fisici. Risulta indispensabile una trivellata manuale per ottenere la salinità della porzione superficiale dell'acquifero. Memori di tali effetti, la scelta della tipologia di pozzo da impiantare è ricaduta su di un piezometro interamente fenestrato e completamente penetrante l'acquifero. Abbiamo evitato la messa in posto, esternamente al piezometro, del *gravel pack* per evitare la creazione di flussi preferenziali durante le fasi di campionamento.

Dopo una la raccolta dei permessi, nell'aprile 2010 è iniziato l'impianto dei 37 nuovi piezometri. Il lavoro si è svolto in due campagne, la prima nella zona sud nel mese di aprile 2010 e la seconda nella zona nord nel mese di settembre 2010 (Figura 4.1).

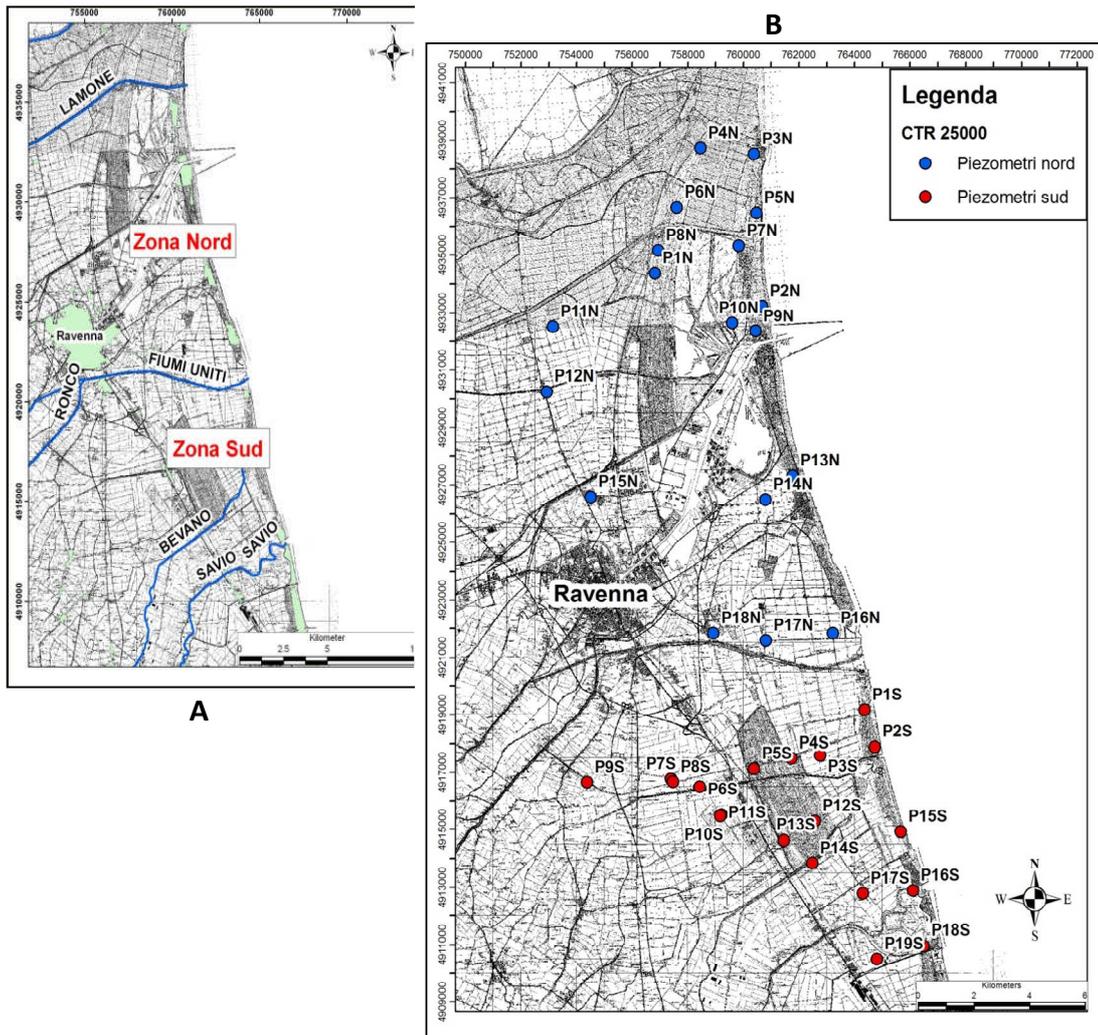


Figura 4.1 Le due macro-aree in cui si è proceduto con l’impianto dei piezometri C.S.I. (A). La localizzazione dei 37 pozzi C.S.I. suddivise per area sud (rosso) e area nord (blu) (B).

I piezometri sono stati installati dalla società contrattista SOGEO con una trivella a rotazione continua a conservazione di nucleo e con utilizzo di acqua per l’estrusione delle carote dal primo metro in poi (Figura 4.2). Le trivellazioni effettuate hanno diverse profondità finali a seconda della necessità di installare un piezometro profondo o di arrivare al basamento argilloso pre-flandriano che delimita l’acquifero verso il basso. Il basamento argilloso ha una profondità variabile tra i -30 m in prossimità della costa per poi diminuire di profondità verso ovest.

Nonostante il numero elevato di pozzi a disposizione, per comprendere al meglio la tecnica di ricarica analizzata in dettaglio in questo lavoro di Dottorato, nel febbraio 2011 sono stati scavati altri 2 piezometri con le medesime caratteristiche costruttive. I pozzi in questione sono localizzati nella porzione costiera del transetto analizzato in dettaglio, ai lati di un canale di irrigazione situato ad ovest della pineta Ramazzotti a Lido di Dante (vedi capitolo 10)(Figura 4.3).



Figura 4.2 Trivella in opera per la messa a dimora del pozzo P1S.

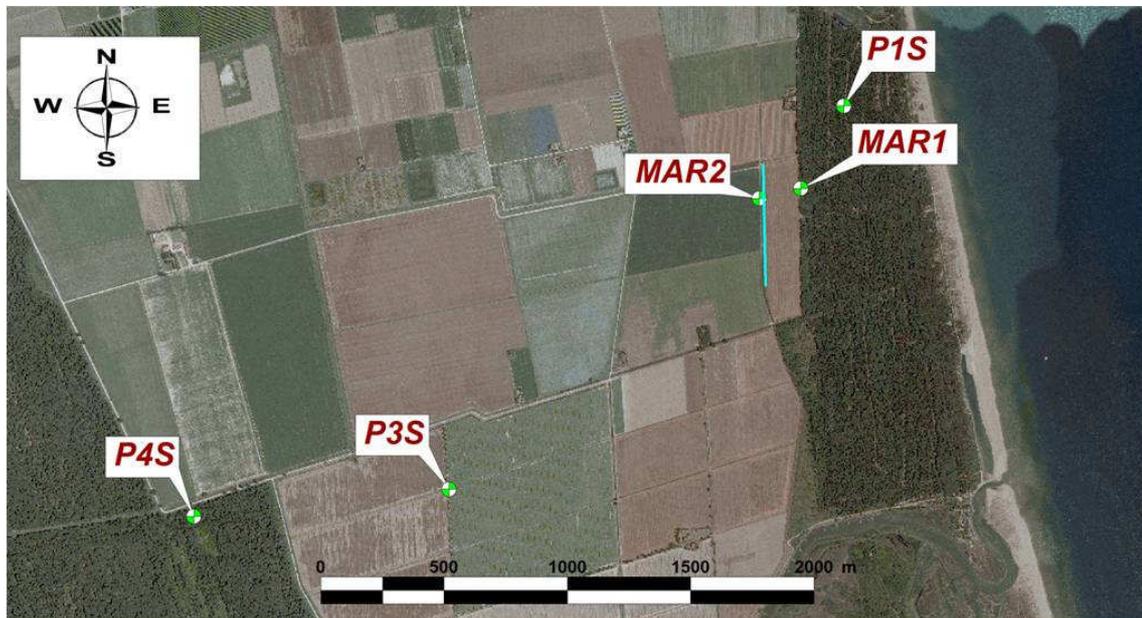


Figura 4.3 Mappa della porzione costiera dal transetto con dettaglio del canale di ricarica (azzurro) e dei pozzi MAR1 e MAR2 scavati nel 2011.

Una volta terminato il lavoro di cantiere della nuova rete piezometrica CSI, si è provveduto alla rilevazione della quota della bocca pozzo (indirettamente anche della superficie topografica) attraverso un rilievo GPS di dettaglio e una seguente integrazione dello stesso con una campagna di livellazione eseguita con Stazione Totale. L'utilizzo di due strumenti e due tecniche si è reso necessario per ottenere un valore di quota anche per quei pozzi che si trovano in luoghi dove l'assenza del segnale GPS o del segnale GSM rendevano impossibile il rilievo con tecnica DGPS.

Il rilievo GPS delle quote piezometriche è stato effettuato in modalità RTK (*Real Time Kinematic*) utilizzando via GPRS la correzione fornita dalla rete GPS gestita dalla Fondazione Geometri e Geometri Laureati dell'Emilia Romagna (<http://gpsemiliaromagna.it/>), che effettua il calcolo NRTK utilizzando i dati di più stazioni contemporaneamente.

In Tabella 1 sono riportate le coordinate in ED 50 e le profondità raggiunte dalle varie trivellazioni. Tutti i punti sono stati quotati tramite un rilievo accurato con tecnologia G.P.S. ed hanno una precisione di ± 1 cm.

Tabella 1 Coordinate, quote della superficie topografica e profondità del pozzo, per tutti i piezometri C.S.I. e per i due pozzi (MAR1 e MAR2) nell'area di ricarica.

Nome	EST_UTM_E D50	NORD_UTM_ED 50	Quota P.C. (m)	Profondità pozzo (m s.l.m.)
P1N	756807	4934366	1.37	-16.63
P2N	760668	4933232	0.99	-17.01
P3N	760381	4938526	0.54	-11.46
P4N	758446	4938727	1.7	-29.8
P5N	760460	4936488	0.18	-11.82
P6N	757600	4936679	1.46	-10.54
P7N	759833	4935328	1.31	-13.69
P8N	756932	4935171	1.42	-27.58
P9N	760436	4932363	0.2	-11.8
P10N	759592	4932644	0.37	-20.63
P11N	753140	4932513	1.50	-24.5
P12N	752920	4930257	0.59	-27.41
P13N	761765	4927309	1.52	-18.48
P14N	760792	4926497	-0.13	-27.13
P15N	754506	4926582	-0.41	-20.41
P16N	763214	4921836	0.41	-11.59
P17N	760805	4921582	0.85	-26.15
P18N	758917	4921832	0.45	-23.55
P1S	764351	4919175	0.15	-26.85
P2S	764728	4917881	0.46	-27.54
P3S	762750	4917607	0.29	-24.01

P4S	761715	4917496	-0.08	-25.08
P5S	760382	4917138	0.94	-24.06
P6S	758429	4916489	-0.51	-21.51
P8S	757463	4916777	0.07	-17.43
P9S	754369	4916678	2.89	-7.11
P10S	759209	4916654	-2.20	-22.2
P11S	759158	4915518	-2.08	-17.08
P12S	762567	4915480	0.59	-21.91
P13S	761462	4915303	0.68	-20.32
P14S	762477	4914638	0.94	-24.06
P15S	765656	4913842	1.20	-22.8
P16S	766099	4914924	0.77	-24.23
P17S	764292	4912891	0.65	-19.35
P18S	766485	4912789	1.68	-23.32
P19S	764793	4910964	0.70	-24.3
MAR1	764177	4918838	0.48	-8.52
MAR2	764009	4918797	0.02	-8.98

4.2 Dati litologici dai pozzi

Coma già accennato, parallelamente alla fase di scavo, sono stati raccolti i dati riguardanti la litologia di ciascuna carota estratta. Lo scopo di questa attività è stato quello di creare un *database* di informazioni litologiche, da aggiungere a quelle di letteratura in nostro possesso, per ricostruire la struttura litologica dell'acquifero freatico costiero con un dettaglio maggiore rispetto a quello disponibile all'epoca.

In campo sono state raccolte informazioni visive e tattili dei sedimenti presenti facendone una descrizione dettagliata. Si è preso nota di:

- profondità dell'orizzonte,
- classe granulometrica predominante,
- eventuali altre classi granulometriche presenti,
- colore,
- consistenza,
- presenza di materia organica,
- note.

Tutti i dati delle carote sono stati raccolti in fogli di calcolo Excel™ (Figura 4.4). Ogni foglio/scheda informativa è corredato con le foto di tutte le cassette contenenti i campioni (Figura 4.5).

Nome	P15	Località	Pineta Costiera - Lido di Dante	Data misura quota	08/03/2011
Quota B.P. (m s.l.m.)	0,36	Quota P.C. (m s.l.m.)	0,15	Note	
CANTIERE	C.S.I.		PROFONDITA' SONDAGGIO	27 m	
DATA	22/04/2010		PROFONDITA' PIEZOMETRO da T.P.	27 m	
PUNTO	P15_2010		GEOLOGO DI CANTIERE	Donato Capo	
COORDINATE (ED50)	E	N	Altezza s.l.m.m. (DEM provincia 2010)	0.94 m	
	764351,390734	4919175,251410			
PROFONDITA' (m)	LITOLOGIA	COLORE	CONSISTENZA	MATERIA ORG.	NOTE
0	0-7_ Sabbia medio fine	Marrone chiaro	Scarsamente addensata	Si, scarsamente concentrata	Radici fino a 1.8m. 1m di terreno vegetale. A 1.1m, 1.5 e a 1.7m sostanza organica
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	7-8_ Sabbia fine limosa con argilla	grigio	Mediamente addensata	No	
8					
9	8-18.6_ Argilla limosa con livelli sabbiosi	grigio	Consistente	Nei livelli sabbiosi più grossolani, A metri 16.3 livello scuro organico in matrice sabbiosa	presenza di conchiglie a metri 15.2, 16.6., 18.4.
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18	18.6-22_ Sabbia fine limosa	grigio	Mediamente addensata	No	
19					
20					
21					
22	22-24.8_ Limo sabbioso con argilla	grigio	Mediamente consistente	No	
23					
24	24.8-25.2_ Argilla	Grigio chiaro	Consistente	Da 25 a 25.2m accumulo di sostanza organica	
25	25.2-26.8_ Argilla sabbiosa	Grigio chiaro	Mediamente consistente		Segni di ossidazione
26	26.8-27_ Argilla	Grigio chiaro	Molto consistente		Ossidazione
27					

Figura 4.4 Esempio di scheda informativa elaborata per ogni singolo piezometro della rete. Anche l'aspetto cromatico riporta un'informazione litologica semplificata: giallo sabbia dominante, marrone argilla dominante e verde limo dominante.



Figura 4.5 Resoconto fotografico delle carote raccolte.

5 MONITORAGGIO PIEZOMETRICO

5.1 Introduzione

Per individuare tecniche di gestione idriche o agronomiche aventi come scopo la ricarica dell'acquifero è stato necessario conoscere la situazione in cui si trovava e cercare di comprendere i meccanismi e le dinamiche a grande scala dell'acquifero stesso. Per fare ciò, nel giugno del 2010 è stata eseguita una prima campagna di raccolta dati sui nuovi pozzi C.S.I. nella porzione a sud e sui pozzi esistenti a nord. Durante questa fase sono stati eseguiti profili di conduttività elettrica e temperatura in pozzo ed è stata misurata la soggiacenza della falda. I medesimi dati sono stati registrati nella seconda campagna, eseguita a scala complessiva di acquifero, del dicembre 2010 con l'aggiunta delle analisi chimiche e isotopiche sui campioni.

Di pari passo alla raccolta dati a scala complessiva di acquifero, sono state condotte campagne di monitoraggio stagionali del transetto all'interno del V Bacino raccogliendo, anche in questo caso, profili di conduttività elettrica, di temperatura e campioni per le analisi chimiche in laboratorio. Il transetto è stato monitorato nel dicembre 2010, in febbraio, aprile e giugno 2011.

Nel luglio 2012 è stata eseguita una campagna di monitoraggio dedicata esclusivamente alla porzione costiera del transetto (area MAR), inserendo nella metodologia di analisi, oltre ai profili di conduttività e temperatura, le analisi chimiche in laboratorio, anche la misura in campo di alcuni elementi come i composti dell'azoto e del ferro, diversamente non misurabili in laboratorio.

5.2 Strumentazione

5.2.1 Rilievo piezometrico

Il rilievo della soggiacenza della falda freatica è stata la prima misura rilevata in campo.

Lo strumento utilizzato è un freatimetro mod. BFK-30 con cavo di lunghezza pari a 30 metri della PASI, con segnalatore acustico e visivo di raggiungimento del livello freatico (Figura 5.1).



Figura 5.1 Freatimetro mod. BFK-30 con cavo di lunghezza pari a 30 metri.

Tutte le misure in campo sono state riferite alla “bocca pozzo” (B.P.) in quanto, la fase ottenimento della quota esatta del piezometro eseguita immediatamente dopo l’impianto (paragrafo 4.1), ha restituito la quota sul livello del mare della bocca pozzo del piezometro stesso.

5.2.2 Profili di conduttività elettrica e temperatura

I profili di conducibilità e temperatura sono stati eseguiti mediante sonde in continuo calate accuratamente in pozzo una volta misurata la soggiacenza. Sono state utilizzate due tipologie di sonde in continuo: *CTD-Diver - Schlumberger Water Services* e *Aqua TROLL® 200 In-Situ Inc.*. I parametri registrati sono la temperatura, la conducibilità elettrica e la profondità di registrazione rispetto alla tavola d'acqua.

Per la misura della conducibilità la sonda è stata tarata con soluzioni standard (HANNA Instruments) 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12.53mS/cm e 80 mS/cm, tutte a 25 gradi; l'errore sulla misura della conducibilità è di 0.5% del valore misurato, quello sulla misura di temperatura è di 0.1 °C.

Entrambe le sonde sono state impostate per registrare un valore ogni 0.5 secondi di cui poi hanno eseguito la media aritmetica e salvato il dato nella memoria interna (Figura 5.2 e Figura 5.3). Mediante i rispettivi software di interfaccia, in un secondo momento sono stati scaricati i dati raccolti ed importati in un foglio di calcolo per le elaborazioni successive.



Figura 5.2 Esempio di sonda *CTD-Diver - Schlumberger Water Services*.



Figura 5.3 Esempio di sonda Aqua TROLL ® 200 In-Situ Inc..

5.2.3 Raccolta dei campioni mediante *multilevel sampler*

Un protocollo standard univoco per il campionamento delle acque sotterranee ancora non è stato individuato dalla comunità scientifica internazionale (Cheng et al. 2001). Per risolvere questa problematica, negli ultimi anni sono stati condotti alcuni lavori per individuare la metodologia più adatta da usare nel caso di intrusione salina (Shalev et al. 2009, Balugani e Antonellini, 2010) Le metodologie applicabili per la raccolta dati in pozzo sono varie ma tutte ovviamente si basano sulle linee guida EPA 2007, recepite in Italia dal D.Lgs. N°30 del 2009, e facenti riferimento ai metodi standardizzati (ISO 5667-11). Di seguito a titolo di esempio:

1. campionamento previo lo spurgo di 3 volumi del pozzo (Appelo et al. 2005)
2. campionamento estratto ad una prefissata profondità attraverso lo *straddle packers Solinst™* (Owen 2008).
3. raccolta attraverso i sistemi con minifiltri o multi-piezometri all'interno di un singolo rivestimento (*casing*) (Stuyfzand 1983 e Lerner 1995).

L'opzione n°1 prevede uno spurgo pari ad almeno 3 volte il volume del piezometro, con tempi di esecuzione elevati, inoltre, in acquiferi molto salinizzati come il nostro, uno spurgo completo del pozzo potrebbe eliminare la piccola quantità di acqua dolce eventualmente presente al *top* dell'acquifero. L'opzione n°2 ha dei tempi di esecuzione molto lunghi, ma presenta una buona precisione e rappresentatività del campione raccolto. L'opzione n° 3 ha dei tempi di esecuzione molto rapidi, un'ottima precisione e rappresentatività delle acque di falda, però i minifiltri richiedono un grande lavoro di installazione e nella nostra area di studio sono installati in via esclusivamente sperimentale.

In questo studio, la scelta di installare piezometri interamente perforanti e completamente fenestrati, ha consentito di raccogliere campioni di acqua dall'acquifero circostante il pozzo con la certezza della profondità di campionamento e delle caratteristiche litologiche dell'orizzonte.

Tutti i campionamenti che saranno descritti nelle pagine seguenti utilizzeranno la metodologia di campionamento *straddle packer*. Essa consiste di due camere d'aria espandibili (*packer*) collegate insieme da una porzione filtrante che funge da punto di prelievo (Figura 5.4). I *packer* sono immersi all'interno del pozzo ad una profondità prefissata, gonfiati dalla superficie mediante una normale pompa da bicicletta, fino a garantire la completa adesione delle camere d'aria alla superficie interna del piezometro. Una volta espanse, la pareti del pozzo risulteranno isolate e si potrà iniziare con il pompaggio avendo certezza che il campione giungerà in superficie dall'acquifero in corrispondenza della porzione filtrante dello strumento (Figura 5.5).

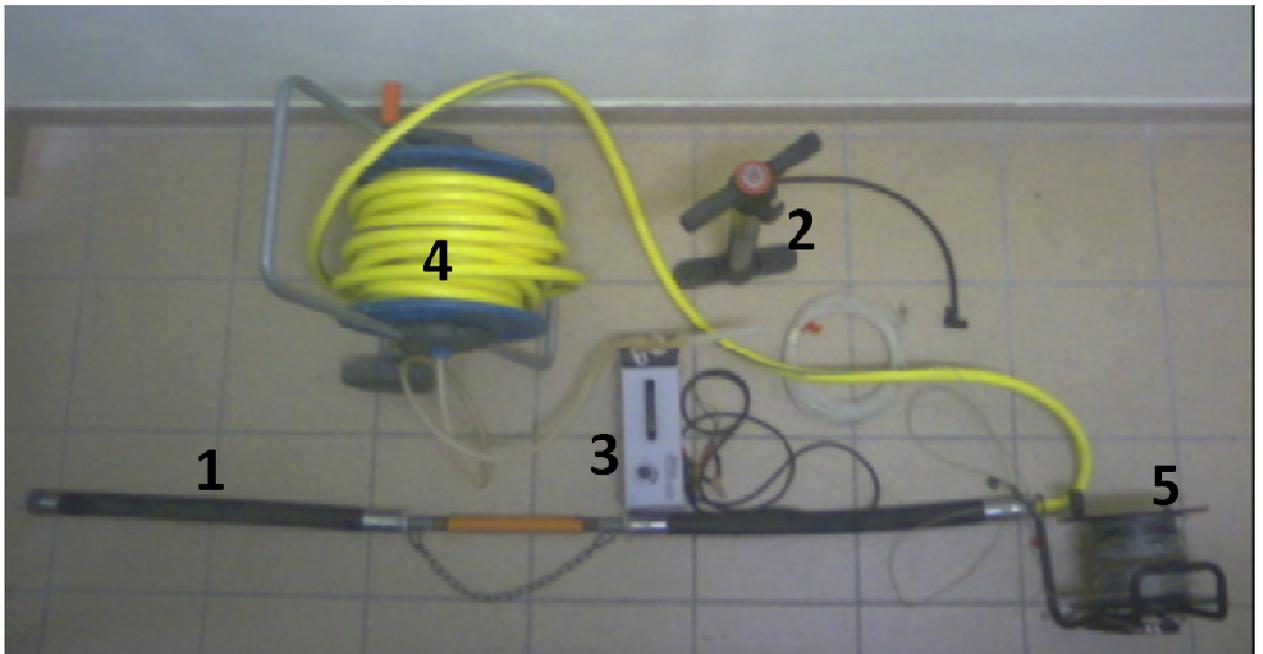


Figura 5.4 *Straddle Packer* (camere d'aria nere connesse dalla porzione filtrante arancione) 1, pompa di gonfiaggio dell'aria 2, pompa peristaltica per il prelievo del campione 3, sistema di tubi per il prelievo del campione e l'invio dell'aria 4 e cavo di sicurezza 5.

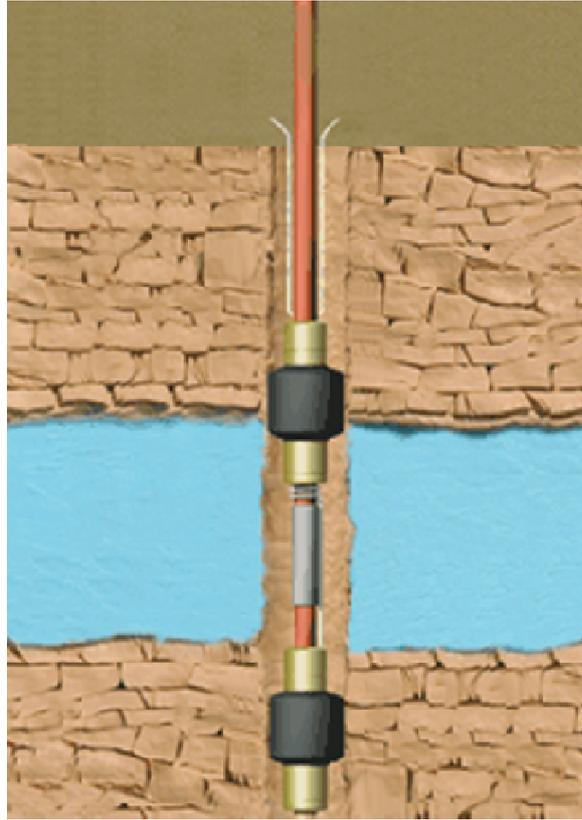


Figura 5.5 Rappresentazione semplificata dello *Straddle Packer in pozzo*.

5.2.4 Misura dei parametri chimico-fisici

Una volta che il campione giunge in superficie dalla profondità prescelta mediante lo *straddle packer*, una serie di variabili chimico fisiche sono immediatamente rilevate. Allo scopo di evitare il contatto con l'atmosfera, il campione è fatto passare attraverso una cella di flusso che porta sulla sommità gli elettrodi della sonda multiparametrica per la lettura dei parametri (Figura 5.6).



Figura 5.6 Cella di flusso per evitare il contatto con l'atmosfera e sonde in azione.

L'acqua è fatta fluire fino alla stabilizzazione delle letture – quindi il campione viene prelevato. La sonda utilizzata è la PCD650 *Eutech Instruments*, la quale restituisce contemporaneamente dati relativi a conducibilità elettrica, pH, potenziale redox (Eh), temperatura e ossigeno disciolto (Figura 5.7). Anche in questo caso, prima di ogni campagna di monitoraggio, e anche durante la campagna stessa se molto duratura, gli elettrodi della sonda sono stati tarati con standard certificati (vedi par. 5.2.2). Per quanto riguarda l'elettrodo pH è stato tarato con standard a 4 e 7 unità pH; l'elettrodo redox è stato tarato con soluzioni standard a 220 e 468 mV. L'ossigeno è stato tarato con la soluzione certificata a 0 mg/l.

Dai dati di conducibilità elettrica specifica e di temperatura è stata calcolata la salinità utilizzando la formula di conversione elaborata da Lewis & Perkins (1981) e riportata nel rapporto n. 44 degli *Unesco Technical Papers* (UNESCO, 1983).



Figura 5.7 La sonda multiparametrica utilizzata per la misura dei parametri chimico-fisici.

5.2.5 Misure spettroscopiche in campo

Come già accennato al paragrafo 5.1, nel luglio 2012 il monitoraggio della porzione terminale del transetto (Area MAR) ci ha visti impegnati, nelle misure in campo di alcuni elementi facilmente alterabili e mai misurati nei monitoraggi precedenti; infatti, processi di flocculazione, di precipitazione e di alterazione biologica sono molto frequenti nelle acque sotterranee portate in superficie, in particolare a carico delle specie del ferro, dell'azoto e dei solfuri.

Abbiamo ottenuto così informazioni ulteriori sulle specie dell'azoto e del ferro che in alcuni casi in acquifero raggiungono concentrazioni non trascurabili.

Mediante uno spettrofotometro da campo abbiamo misurato, su campione appena estratto, le concentrazioni di:

- ✓ ferro ferroso,
- ✓ ferro totale,
- ✓ solfuri,
- ✓ fosfati,
- ✓ nitrati,
- ✓ nitriti,
- ✓ ammonio.

Le analisi vengono eseguite con metodi speditivi utilizzando singoli reagenti per ogni determinazione (Tabella 5.1). La concentrazione è restituita mediante differenza tra la lettura di un bianco di reazione e il campione stesso. Durante questa fase analitica anche l'alcalinità è stata misurata con un kit speditivo in campo, direttamente alla raccolta del campione.

Tabella 5.1 Parametri, metodi e apparecchiature utilizzate

Parametri	Metodi e apparecchiature
Alcalinità	Titolazione kit da campo Acuqamerk
Ferro ferroso	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: FerroVerIronPillow Metodo: 8146 Range: 0 - 3.00 mg/L
Ferro totale	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: FerroVerIronPillow Metodo: 8008 Range: 0 - 3.00 mg/L
Solfuri	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: Sulfide 01/ Sulfide 02 Metodo: 8131 Range: 0 - 600 mg/L
Fosfati	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: PhosVer 3 PhosphatePillow Metodo: 8048 Range: 0 - 2,50 mg/L
Nitrati	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: NitraVer 5 Nitrate ReagentPillow Metodo: 8039 Range: 0 - 30 mg/L
Nitriti	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: NitraVer 3 Nitrate ReagentPillow Metodo: 8507 Range: 0 - 0,300 mg/L
Ammonio	Spettrofotometria; Spettrofotometro hach dr/2010 Reagente: AmmoniaSalicylateReagentPowderPillow / AmmoniaCyanurateReagentPowderPillow Metodo: 8155 Range: 0 - 0,50 mg/L

5.2.6 Indagini geofisiche VES

Si è reso necessario lo svolgimento di queste ulteriori indagini nell'area MAR per chiarire l'evoluzione del processo di ricarica del canale di immagazzinamento per l'acqua di irrigazione.

E' ampiamente riconosciuto e descritto (Kunetz 1966) che le prospezioni geo-elettriche sono tra i metodi più adatti agli studi idrogeologici. Risultano particolarmente utili al fine di definire lo stato di intrusione salina di un acquifero costiero come dimostrano vari studi che ne documentano l'utilizzo (Carbognin L. et al. 2003, Hamzah U. 2006, Cimino A. 2007, Sung-Ho Song 2007, Adepelumi A.A. 2009).

Il metodo geo-elettrico VES consiste nell'immettere nel terreno dell'energia elettrica e di dedurre la resistività apparente degli elettro-strati attraversati, mediante l'equazione della prima legge di Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

Dove:

R = resistività

ΔV = differenza di tensione di corrente

i = intensità di corrente

Lo strumento utilizzato durante le campagne di rilievo geo-elettrico è della *Allied Associates Geophysical LTD Omega* con 4 bobine di cavi e 4 elettrodi in acciaio. I sondaggi elettrici verticali (V.E.S.) sono stati eseguiti con 4 elettrodi disposti secondo lo schema *Wenner* e con una spaziatura iniziale degli elettrodi di 1 metro, la spaziatura degli elettrodi al massimo dello stendimento è di 21,5 metri. Il tipo di stendimento *Wenner* è caratterizzato da una distanza costante tra i quattro elettrodi durante il rilievo. All'aumentare della profondità di investigazione e quindi dell'ampiezza dello stendimento, le distanze tra gli elettrodi rimangono comunque uguali tra loro.

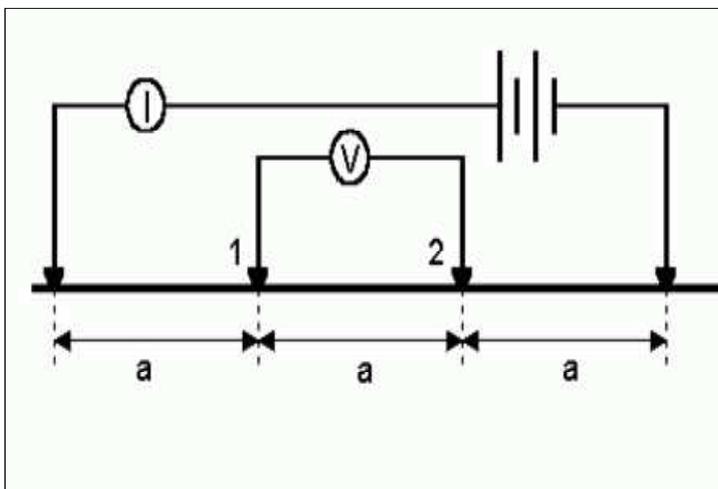


Figura 5.8 Schema della disposizione elettrodica tipo *Wenner* (da Burger R.H. 1992b)

Lo stendimento tipo *Wenner* prevede lo spostamento dei 4 elettrodi ad ogni ciclo di lettura, quindi richiede più tempo rispetto allo stendimento tipo *Schlumberger*. Per rilievi superficiali poco profondi lo stendimento *Wenner* può risultare più sensibile alle variazioni laterali e verticali rispetto allo *Schlumberger* (Burger 1992a), per questo motivo il metodo *Wenner* è stato scelto per le campagne geoelettriche. La direzione dello stendimento è sempre stata N-S, cioè parallela alla linea di costa. Ogni dato è composto da 3 cicli di letture, il limite di errore tollerato per i dati di resistività raccolti in campagna è del 3% tra una lettura e l'altra. In campo sono stati raccolti tre dati di resistività da cui se ne fa una media da usare per l'inversione. Ogni punto di sondaggio VES è accompagnato da una trivellata manuale per conoscere meglio i primi metri della stratigrafia e la conducibilità elettrica delle acque presenti nella parte superficiale della falda.

La sonda per la misura della conduttività elettrica è la PCD 650 (vedi sopra) ed è stata tarata con soluzione standard (*HANNA instruments*) 1,413 mS/cm a 25°C. Tutti i valori raccolti sono stati poi utilizzati durante l'inversione dei dati geofisici.

I dati di resistività apparente sono invertiti, cioè interpretati, in laboratorio in modo da ottenere dati di resistività calcolata ottenuti da una trasposizione ideale e realistica della distribuzione degli elettro-strati con la profondità.

Il *software* per l'inversione dei dati applica equazioni che tengono conto della rifrazione che subisce la corrente elettrica immessa nel terreno incontrando strati a differente resistività. I dati raccolti sono stati invertiti attraverso l'utilizzo del software *Resist* (Burger D.C., Burger H. R., 1992) che utilizza come input le resistività apparenti raccolte in campagna e restituisce come output lo spessore dei vari strati a diversa resistività. *Resist* è un programma che permette di risalire alla resistività dei vari elettro-strati mediante operazioni iterative manuali, in cui di volta in volta bisogna inserire o modificare i vari parametri. Nelle varie inversioni i parametri che sono stati utilizzati come fissi e non modificabili dalla procedura iterativa sono:

- la profondità della tavola d'acqua dal piano campagna,
- la resistività dei vari depositi incontrati.

I dati che il software può ottimizzare (invertire) sono:

- Lo spessore degli elettro-strati al di sotto della tavola d'acqua:
- Lo spessore della zona satura in acqua dolce
- Lo spessore della zona satura di acqua salmastra dovuta al mescolamento fra acqua dolce e salata.

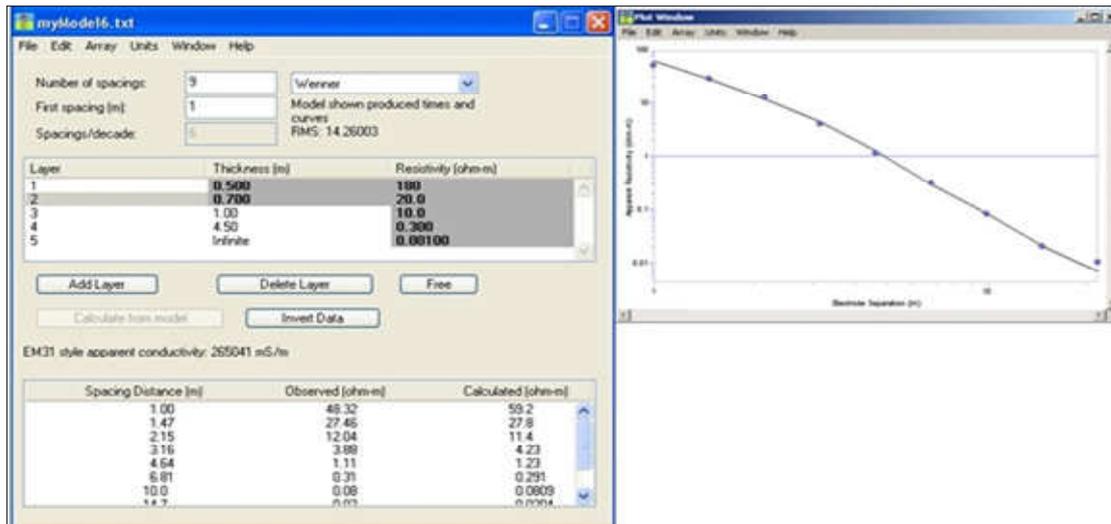


Figura 5.9 Software utilizzato per l'inversione dei dati geofisici con grafico dati osservati/curva calcolata

La soglia massima tollerata dell'errore definita dallo scarto quadratico medio (RMS) è 30, poiché è il limite sotto il quale la curva dei valori calcolati fitta bene con i dati osservati in campagna. Alla fine dell'inversione sono stati individuati vari elettro-strati che rappresentano sia diverse litologie che la distribuzione della salinità all'interno delle acque di falda.

Per l'inversione si è utilizzata una tabella di resistività calcolate attraverso una campagna di calibrazione effettuata all'interno della Pineta San Vitale nel luglio del 2009 (Capo 2011).

Per quanto riguarda la resistività dei vari depositi e dei vari tipi di acque vi è un'ampia letteratura (Burger H.R. 1992, Celico 1998, Bulter D. K. 2005). All'inizio della campagna è stata fissata una prima tabella di valori teorici di resistività da letteratura per i vari materiali incontrati nell'area di studio (Tabella 5.2).

Tabella 5.2 Valori teorici di resistività

Sabbia Asciutta	$\rho_a = 80-500 \Omega \cdot m$
Sabbia umida zona vadosa	$\rho_a = 10-30 \Omega \cdot m$
Sabbia satura in acqua dolce	$\rho_a = \sim 10 \Omega \cdot m$
Argilla asciutta	$\rho_a = 10 \Omega \cdot m$
Argilla	$\rho_a = 2-5 \Omega \cdot m$
Zona di mescolamento	$\rho_a = 0,3 \Omega \cdot m$
Sabbia satura in acqua salata	$\rho_a = 0,01/0,001 \Omega \cdot m$

Capo (2012 – tesi di PhD) ha ottenuto mediante calibrazioni eseguite in campo la seguente tabella della resistività in $\Omega \cdot m$ dei materiali che compongono l'acquifero, differenziati a seconda della presenza o meno di materiali fini in superficie.

Tabella 5.3 Media della resistività in Ω -m ottenuti dalla calibrazione con carotaggi di pozzo (da Capo 2012).

	SENZA ARGILLA IN SUPERFICIE				
	Sogeo 1	Sogeo 10	Sogeo 11	Sogeo 13	Media
Sabbia asciutta	699	538	649	736	655,5
Zona vadosa (sabbia)	20	22	11,9	17,2	17,775
Acqua dolce (sabbia)	10				10
Zona transizione	0,513	0,246	0,288	0,284	0,33275
1° Acqua salata (sabbia)	0,04	0,00531	0,00219	0,00188	0,01235
2° Acqua salata (sabbia)	0,00057	0,00117	0,00139	0,00109	0,00105
Argilla asciutta					
Argilla "vadosa"					
Argilla profonda	2	2	2,01	2	2,0025
	ARGILLA IN SUPERFICIE O MESCOLATA A SABBIA				
	Sogeo 4	Sogeo 5	Sogeo 9	Sogeo14	Media
Sabbia asciutta		299	20,1355		159,5678
Zona vadosa (sabbia)	11	1,59	2,58797		5,05932
Acqua dolce (sabbia)	6				6,00
Zona transizione	0,517	0,168	0,16745	0,0936	0,23651
1° Acqua salata (sabbia)	0,00193	0,00195	0,00986	0,0048	0,00464
2° Acqua salata (sabbia)	0,0006	0,00048	0,00164	0,001	0,00093
Argilla asciutta	34,8			24	29,4
Argilla "vadosa"	3,74			0,858	2,299
Argilla profonda	2	2	1,4954	1,8	1,82385

Al di sotto della tavola d'acqua si è ipotizzata la presenza di sabbia da fine a media, fino alla profondità limite di investigazione strumentale. La profondità d'investigazione dello strumento varia a seconda dei tipi di deposito incontrati e alla salinità dell'acqua presente, nei nostri rilievi la profondità di investigazione è compresa tra gli 8 e i 10 m.

5.3 Tempistiche e metodologie operative

5.3.1 Tempistiche e attività del monitoraggio

Di seguito un riassunto temporale dei monitoraggi eseguiti e delle attività svolte.

Tabella 5.4 Tabella riassuntiva delle attività di monitoraggio dell'acquifero divisa per ogni singola porzione monitorata. La soggiacenza è stata misurata durante ogni attività in campo.

Date	Area		
	Acquifero completo (63 pozzi)	Transetto (9 pozzi)	Zona MAR (5-6 pozzi)
Giugno 2010	✓ Profili Temp. e Cond	✓ Profili Temp. e Cond	
Dicembre 2010	✓ Profili Temp. e Cond ✓ Parametri Chimico fisici multilivello ✓ Analisi chimiche ✓ Isotopi	✓ Profili Temp. e Cond ✓ Parametri Chimico fisici multilivello ✓ Analisi chimiche ✓ Isotopi	
Febbraio 2011		✓ Parametri chimico fisici multilivello	✓ Parametri chimico fisici multilivello ✓ GEOELETTRICA VES
Aprile 2011		✓ Profili Temp. e Cond ✓ Parametri Chimico fisici multilivello ✓ Analisi chimiche	✓ Profili Temp. e Cond ✓ Parametri Chimico fisici multilivello ✓ Analisi chimiche
Luglio 2011		✓ Parametri chimico fisici multilivello	✓ Parametri chimico fisici multilivello ✓ GEOELETTRICA VES
Gennaio 2012	✓ Profili Temp. e Cond	✓ Profili Temp. e Cond	✓ Profili Temp. e Cond
Luglio 2012			✓ Profili Temp. e Cond ✓ Parametri Chimico fisici multilivello ✓ Analisi chimiche ✓ Spettroscopie

Oltre alle attività riassunte nella Tabella 5.4, è stato eseguito un monitoraggio mensile della soggiacenza della falda per 9 pozzi facenti parte del transetto di dettaglio posto nella zona sud di Ravenna(paragrafo 2.1). I dati sono stati raccolti in un arco temporale che va da giugno 2010 a

dicembre 2011, con cadenza all'incirca mensile. I pozzi monitorati erano inizialmente i soli messi a dimora nell'aprile 2010 nell'ambito del progetto CSI, ma poi sono stati aggiunti altri pozzi per scendere in dettaglio nella zona di ricarica MAR (capitolo 10).

5.3.2 Punti di campionamento

Il primo monitoraggio su scala di acquifero completo con le successive analisi chimiche di laboratorio è stato eseguito nel dicembre 2010; nel giugno dello stesso anno, sono stati raccolti esclusivamente soggiacenza e profili di temperatura e conduttività.

Siccome quello di Dicembre 2010 è risultato il monitoraggio più vasto e complesso realizzato nella'area (Tabella 5.4), di seguito una veloce descrizione di quanto svolto con dettaglio sui Punti di Campionamento (di seguito PdC) e sull'approccio utilizzato.

Con una disponibilità di oltre 60 piezometri è stato necessario selezionare accuratamente le profondità a cui raccogliere i campioni. Per ciascun pozzo selezionato sono stati individuati al proprio interno diversi Punti di Campionamento (di seguito PdC) basandosi principalmente sulla descrizione litologica eseguita durante lo scavo e sulla profondità complessiva del pozzo (capitolo 4). Nel caso dei nuovi piezometri CSI, aventi tutti profondità superiori ai 10 metri, la localizzazione dei PdC è stata fatta cercando di prelevare campioni equidistanti tra loro all'interno delle sabbie costituenti l'acquifero freatico costiero. In presenza di variazioni litologiche frequenti il numero dei PdC è stato aumentato per avere un maggiore dettaglio. All'interno della pineta di San Vitale nei piezometri interamente filtranti l'acquifero sono stati posizionati i PdC come in precedenza, mentre nei pozzi superficiali (5m di profondità) sono stati raccolti esclusivamente il campione più superficiale (Top falda) e quello più profondo.

Come esempio riguardo la scelta dei punti di campionamento si riportano i casi del piezometro P3S che mostra una successione litologica piuttosto articolata con numerose alternanze tra sedimenti limosi e argillosi (colori rosso e verde) e sedimenti sabbiosi (colore giallo). In questo caso sono stati individuati 5 PdC localizzati nei livelli sabbiosi principali cercando di distribuirli lungo tutta la sezione dell'acquifero.

L'estremo opposto è rappresentato dal piezometro P6S in cui troviamo un acquifero confinato da 2 metri di sedimenti fini, avente uno spessore di circa 13 metri; in questo pozzo sono stati identificati 3 PdC equidistanti tra loro ma tutti nello stesso deposito sabbioso.

Piezometro P3S campionato a -2, -8,-11,-17, -21.5 m

CANTIERE	C.S.I.	PROFONDITA' SONDAGGIO	24.3 m		
DATA	23/04/2010	PROFONDITA' PIEZOMETRO da T.P.	24 m		
PUNTO	P3S_2010	GEOLOGO DI CANTIERE	Donato Capo		
COORDINATE (ED50)	E 762750.809215 N 4917607.107160	Altezza s.l.m.m. (DEM provincia 2010)	0.50 m		
PROFONDITA' (m)	LITOLOGIA	COLORE	CONSISTENZA	MATERIA ORG.	NOTE
0	0-0.3 Suolo argilloso	Marrone scuro		Radici abbondanti	
1	0.3-2.1 Argilla limosa con pochissima sabbia	Marrone /grigio	Consistente	Radici fino a 1.4m	Sabbia più presente verso il basso
2	2.1-9.4 Sabbia medio fine debolmente limosa	Marrone chiaro	Mediamente addensata		Piccole conchiglie
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9	9.4-9.8 Argilla	Grigio	Mediamente consistente	Poca	
10	9.8-10.3 Limo sabbioso	Grigio	Consistente	No	
11	10.3-12 Sabbia media debolmente limosa	Marrone chiaro	Mediamente addensata	No	
12	12-12.1 Argilla	Grigio	Mediamente consistente	No	
13	12.1-14 Sabbia media debolmente limosa	Marrone chiaro	Mediamente addensata	No	
14	14-14.7 Limo sabbioso con argilla	Grigio	Mediamente consistente	Si	Livello di torba a 14.4m.
15	14.7-15.3 Sabbia fine limosa	Grigio	Mediamente addensata	No	
16	15.3-16.6 Argilla limosa con sabbia	Grigio	Mediamente consistente	No	
17	16.6-18 Sabbia fine limosa	Grigio	Mediamente addensata	No	
18	18-18.4 Argilla limosa con sabbia	Grigio	Consistente	No	
19	18.4-19 Sabbia fine limosa	Grigio	Addensata	No	
20	19-19.4 Argilla limosa con sabbia	Grigio	Consistente	No	
21	19.4-22.5 Sabbia fine limo/argillosa	Grigio	Addensata	No	Da 20.4 a 20.5 più argillosa
22	22.5-24.3 Argilla limosa con intercalazioni sabbiose	Grigio/marrone chiaro	Consistente	No	
23					
24					

Figura 5.10 Esempio dei Punti di Campionamento eseguiti nel P3S

Piezometro P6S campionato a -3,-9,-15 m

CANTIERE	C.S.I.	PROFONDITA' SONDAGGIO	21 m		
DATA	08/04/2010	PROFONDITA' PIEZOMETRO da T.P.	21 m		
PUNTO	P6S_2010	GEOLOGO DI CANTIERE	Paolo Di Paola		
COORDINATE (ED50)	E 758429.384435 N 4916489.635130	Altezza s.l.m.m. (DEM provincia 2010)	-0.47m		
PROFONDITA' (m)	LITOLOGIA	COLORE	CONSISTENZA	MATERIA ORG.	NOTE
0	0-1.4 Argilla limosa	Marrone	Mediamente consistente	0-0.4 Materia organica	
1	1.4-2 Limo argilloso	Marrone scuro	Mediamente consistente		
2	2-6.5 Sabbia da media a grossa, debolmente limosa	grigio	Da scarsamente a mediamente addensata	Presenza di livelli organici	6-6.2 Sabbia fine debolmente limosa, color grigio con S.O. grigio scura, addensata
3					
4					
5					
6					
7	6.5-12.1 Sabbia fine debolmente limosa	grigio	Mediamente addensata	no	
8					
9					
10					
11					
12					
13	12.1-15.5 Sabbia grossolana con inclusioni di ghiaia	grigio	Scarsamente addensata	no	
14					
15	15.5-17.8 Argilla debolmente limosa	grigio	da mediamente consistente a consistente		
16					
17	17.8-19.6 Limo argilloso debolmente sabbioso	grigio	Mediamente consistente		
18					
19	19.6-21 Argilla	grigio	Consistente		
20					
21					

Figura 5.11 Esempio dei Punti di Campionamento eseguiti nel P6S

Per meglio definire le origini delle acque presenti nell'acquifero oggetto del monitoraggio sono state campionate anche le acque superficiali che potenzialmente interagiscono con le acque sotterranee. Sono state raccolte acque dai principali fiumi che attraversano l'area: Reno, Lamone, Fiumi Uniti, Bevano e Savio, per valutare potenziali interazioni fiume-acquifero o eventuali prelievi di acque fluviali a scopo irriguo. Altri campioni sono stati raccolti dai principali canali di bonifica dell'area: Canale Destra Reno, Canale Cerba, Scolo Valtorto, Canale Fosso Ghiaia e Canale Bevanella; questi ultimi drenando i terreni raccolgono sicuramente acqua di origine meteorica, ma specie negli ambiti più depressi del territorio, possono drenare anche acque sotterranee.

Sono stati raccolti campioni dai principali chiari della Pialassa Baiona, mantenendo separati i diversi campioni perché originati da un mescolamento di acque continentali e marine differenti: Chiaro del Comune, Chiaro del Pontazzo, Chiaro Nord, isolati artificialmente dal mare, mentre Baiona, Piombone e Risega aperti direttamente all'Adriatico.

Il campionamento ha incluso anche acqua di mare, prelevata nei pressi di Porto Corsini utilizzato come riferimento per l'intrusione marina.

Siccome nella porzione sud dell'area di studio (Lido di Dante) è da alcuni anni operativa una condotta sotterranea che porta acqua dal Canale Emiliano Romagnolo utilizzata a scopo irriguo, è stato raccolto un campione direttamente nel CER nei pressi di Coccolia (capitolo 10).

A conclusione dei lavori sono stati prelevati anche 4 campioni di acque direttamente dal bacino di cava di cui tre dalla cava Ca' Bianca a S. Bartolo e uno all'interno della cava Cavallina a Camerlona.

Di seguito (Tabella 5.5) tutti i Punti di Campionamento monitorati nel dicembre 2010, separati per tipologie e un riassunto generale di quella campagna (Tabella 5.6).

Tabella 5.5 Tabella riassuntiva dei Punti di Campionamento

Tipo di campione	PdC
Acque di falda	207
Acque superficiali	5
Canali di bonifica	5
Acque di irrigazione	1
Cave	4
Lagune costiere	6
Mare	1

Tabella 5.6 Riassunto dei Siti di Campionamento e dei Punti di Campionamento. Dicembre 2010.

	Piezometri	Acque superficiali	Totale
Numero siti di campionamento	63	20	83
Punti di Campionamento (PdC)	207	22	229

Questo approccio mediante PdC per le acque sotterranee e le misure dei medesimi parametri sulle acque superficiali che possono interagire con le acque di falda è stato utilizzato per tutti i monitoraggi (Tabella 5.4). Inoltre, per quanto possibile si è cercato di monitorare gli stessi pozzi e gli stessi PdC in ogni campagna successiva a questa appena descritta per ovvi motivi di omogeneità dei dati. Fa eccezione l'ultima campagna di monitoraggio di luglio 2012 in cui è stata nostra intenzione focalizzarci su di un'area molto dettagliata, aumentando notevolmente i Punti di Campionamento per pozzo.

5.3.3 Metodologie operative

In campo, come prima operazione è stata misurata la soggiacenza della falda, di seguito è stato svolto un profilo di conduttività elettrica e di temperatura; successivamente si è immerso lo *Stradlle packer* alla profondità prescelta (PdC) e con la pompa peristaltica si è iniziato ad estrarre acqua. Preventivamente è stato calcolato il volume minimo indispensabile per garantire lo spurgo dei piezometri: è risultato essere di circa 5 litri per i piezometri recenti, mentre per i vecchi piezometri all'interno di San Vitale, il volume spurgato è stato di soli 3 litri a causa del minore volume. Eseguito lo spurgo, il tubo di uscita dal *packer* è stato collegato alla cella di flusso la quale è stata riempita completamente facendo uscire dall'apposito foro tutta l'aria presente; con la cella totalmente piena è stato mantenuto un flusso costante in uscita e sono stati immersi gli elettrodi della sonda multiparametrica nelle apposite fessure presenti nella parte alta della cella. Una volta raggiunta la stabilità dei parametri chimico-fisici, sono stati annotati i valori, iniziando dall'Eh che è risultato il più suscettibile al contatto con l'atmosfera, poi a seguire pH, Ossigeno disciolto, temperatura e CE (Figura 5.12).

Nei casi riportati in Tabella 5.4 in cui non sono state eseguite analisi chimiche, il lavoro in campo è terminato dopo questa fase. Negli altri casi, a cui è seguita una fase di analisi chimiche o isotopiche, si è proceduto alla fase di raccolta e stabilizzazione campioni (Tabella 5.4). Terminata questa procedura per il primo Punto di Campionamento si è passati al seguente PdC del medesimo pozzo, immergendo fino alla seconda profondità prescelta lo *straddle packer*.

Per l'elenco complessivo dei materiali, dei campioni raccolti e delle procedure analitiche utilizzate, si rimanda agli allegati (paragrafi 15.4 e 15.5).



Figura 5.12 Misura e raccolta dei campioni nel piezometro PZSV24 all'interno della Pineta di San Vitale durante il primo giorno di lavoro in campo.



Figura 5.13 Sistema filtrante e pompa peristaltica durante le operazioni di filtraggio dei campioni.

5.4 Conclusioni monitoraggio piezometrico

La fase di monitoraggio e di raccolta dei campioni risulta essere un momento chiave per la comprensione delle dinamiche e della qualità degli acquiferi sotterranei (Cheng et al. 2001, Shalev et al. 2009, Balugani e Antonellini 2010, Appelo et al. 2005).

Sebbene non vi sia un metodologia standardizzata e univoca per queste operazioni, in questa tesi si è cercato di focalizzare l'attenzione sul campionamento multilivello (*multilevel sampling*) che appare essere quello più indicato per la nostra tipologia di acquifero freatico superficiale, in quanto permette di caratterizzare in modo univoco episodi di stratificazione di inquinanti (per esempio sale) che con i metodi classici di spurgo del pozzo, darebbero luogo ad un segnale confuso (Kralj, 2012).

Ad esclusione dei metodi basati sui mini-filtri (attualmente stiamo monitorando una fascia dunosa costiera mediante tale metodologia), questa tecnica multilivello, accoppiata alla realizzazione dei profili, alla raccolta e la corretta gestione dei campioni appare attualmente il metodo più corretto per il nostro acquifero. Ove possibile si può raccomandare di svolgere in campo l'analisi di componenti facilmente alterabili come i composti del ferro e dell'azoto che completano, con l'analisi di cationi e anioni principali, lo spettro delle analisi per questa tipologia di acque (paragrafi 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, 5.2.5).

Le metodologie analitiche adottate per la valutazione, in primo luogo di cationi e anioni, sono state diverse e svolte in strutture differenti (paragrafo 15.6). Nel capitolo 7.2.5..verrà presentato il confronto tra i risultati derivanti dal confronto dei tre laboratori. Per tutti i campioni è stata svolta una valutazione delle analisi mediante il bilancio di carica. In ogni caso, sono stati inseriti nella serie dei campioni anche standard interni e dei campioni duplicati a scopo di verifica e controllo esterno.

Per quanto riguarda questa tesi, il monitoraggio piezometrico completo (soggiacenza, profili e tutte le analisi chimiche) è stato eseguito in periodi diversi e su scale diverse. Si è partiti da un contesto di grande scala per comprendere fenomeni complessivi dell'acquifero per poi scendere a scale sempre inferiori (transetto), fino a giungere alla sola area MAR in cui abbiamo studiato in dettaglio una metodologia di ricarica dell'acquifero mediante un canale irriguo (Figura 5.14, Figura 5.15).

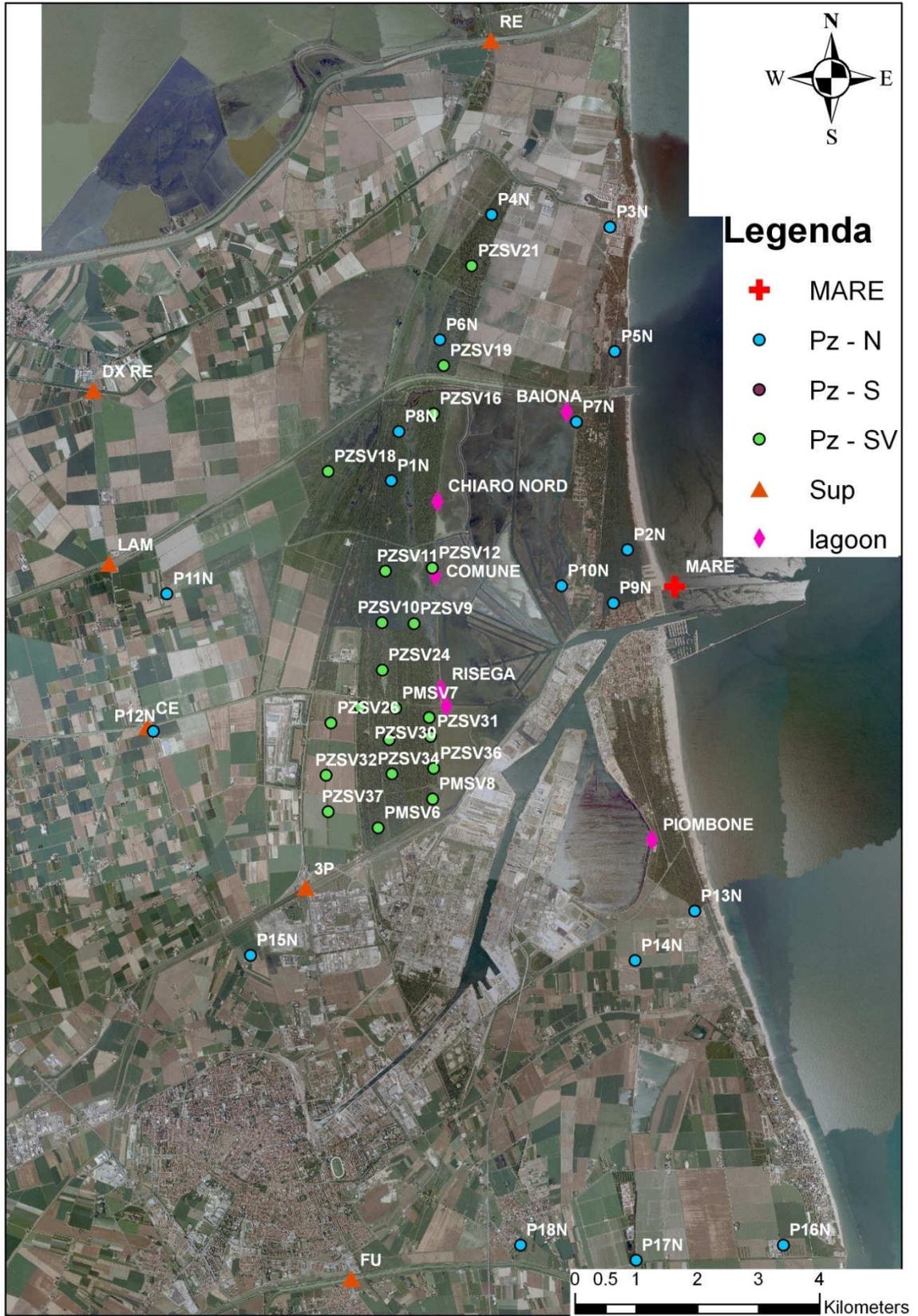


Figura 5.14 Localizzazione dei pozzi campionati nel monitoraggio di dicembre 2010, con la diversa appartenenza ai 6 gruppi; porzione di acquifero nord.

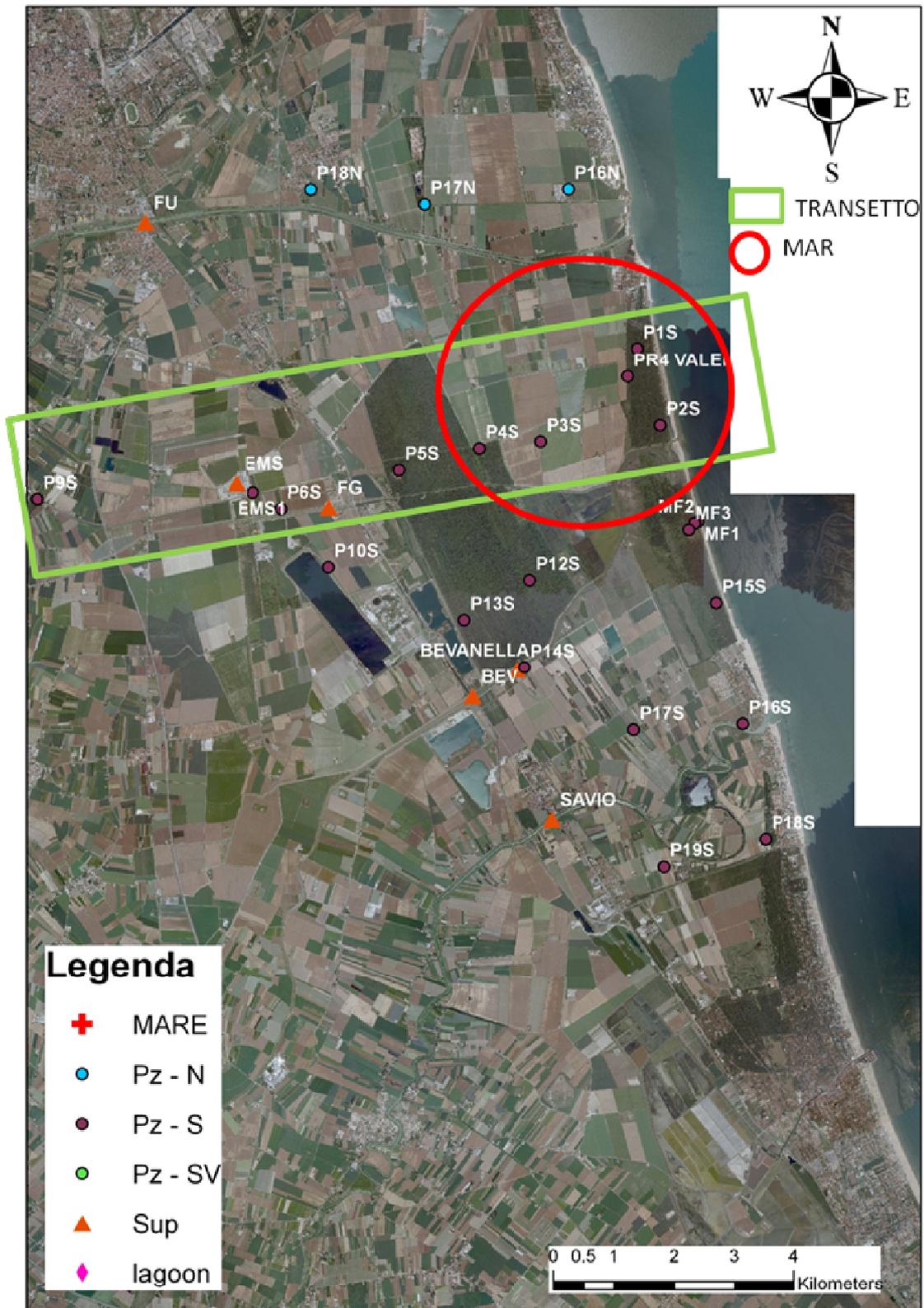


Figura 5.15: Localizzazione dei pozzi campionati nel monitoraggio di dicembre 2010, con la diversa appartenenza ai 6 gruppi; porzione di acquifero sud. Inoltre dettaglio del transetto e della zona di ricarica MAR.

6 MODELLO LITOLOGICO DELL'ACQUIFERO

Terminata la fase di messa a dimora dei piezometri e con a disposizione un numero elevato di descrizioni litologiche, provenienti dalla carote di scavo, si è passati all'organizzazione e all'elaborazione dei dati. Sapendo che l'area di interesse è piuttosto vasta, è stato necessario acquisire il maggior numero di descrizioni litologiche possibile. Sono state recuperate informazioni da vecchie campagne di scavo di pozzi del nostro laboratorio (specialmente per le aree pinetali), sono stati scaricati, dal portale della regione Emilia Romagna, i sondaggi geognostici disponibili nell'area (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>) e in ultimo, sono stati inseriti nel *database* di partenza informazioni litologiche derivanti dalla pubblicazioni eseguite dal Prof. Amorosi negli anni precedenti (Amorosi *et al.* 1999, 2001, 2002, 2004, 2005).

6.1 Omogeneizzazione dei dati

Poiché le informazioni utilizzate per la ricostruzione litostratigrafica hanno fonti diverse si è dovuti ricorrere ad una omogeneizzazione dei dati per poter operare in modo univoco alla creazione degli elaborati grafici. Partendo dai sondaggi geognostici ed eseguendo la medesima semplificazione anche sui pozzi pubblicati da Amorosi, si è considerata la descrizione della classe granulometrica principale (Figura 6.1), tralasciando le classi secondarie presenti nella didascalia descrittiva, in modo da ottenere un modello semplice ma esplicativo delle condizioni di permeabilità dell'acquifero a grande scala.

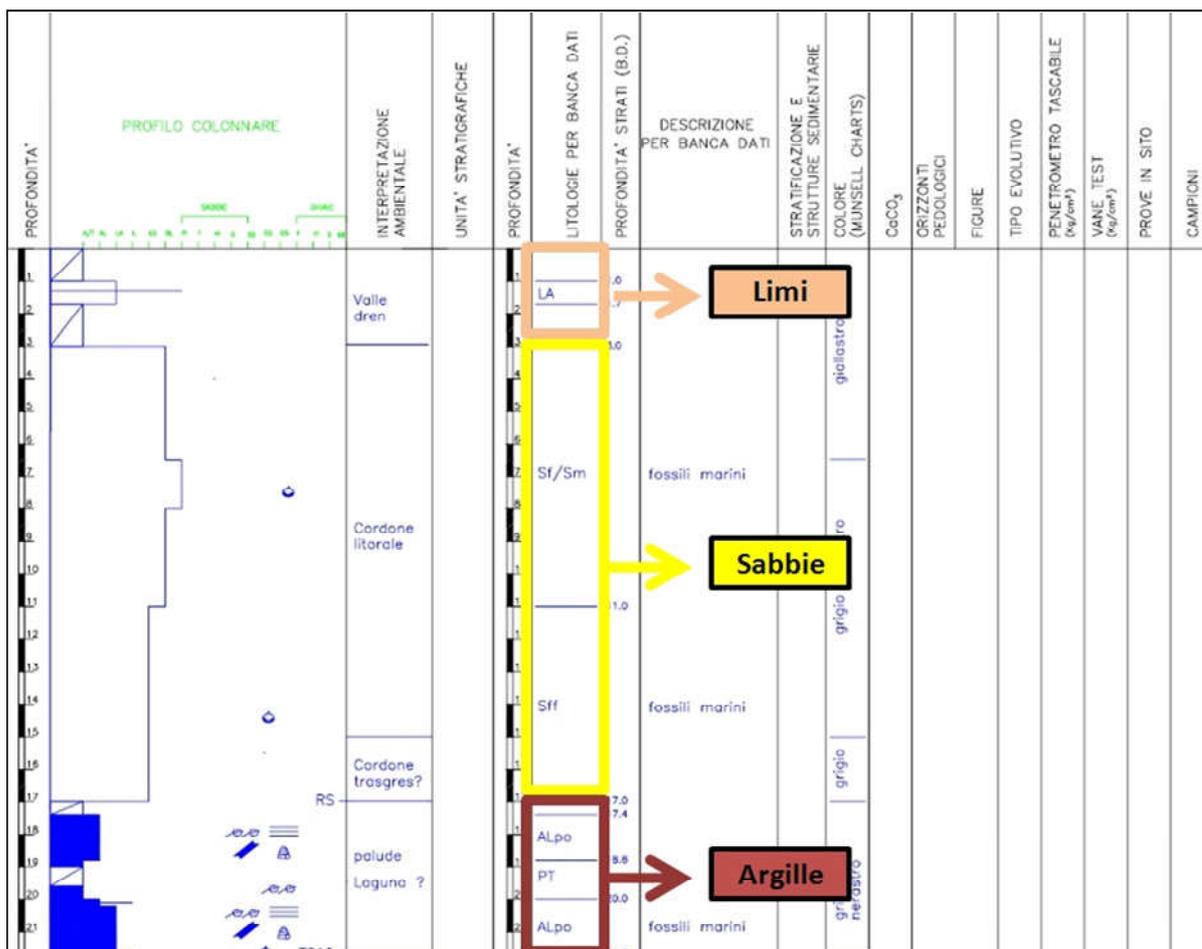


Figura 6.1 Esempio di come sono stati riassunti i dati litologici provenienti da diverse fonti.

Questo lavoro è stato fatto per i sondaggi ottenuti dalla banca dati della Regione Emilia-Romagna, per i dati provenienti dalle trivellazioni in Pineta di San Vitale nel 2006 e per i dati ottenuti dalla nuova rete piezometrica C.S.I.

Una volta uniformato tutto il materiale a disposizione abbiamo inserito i dati all'interno di un software di elaborazione e visualizzazione dati *RockWorks 15*, della *RockWare incorporated*. All'interno del software, ogni punto di rilievo ha una scheda identificativa in cui porre le informazioni spaziali e strutturali, essenziali per la rappresentazione.

Location Information

Required Fields

Name
P12S

Symbol  Raster Symbol 

Easting Northing

762'567.780282 4'915'303.34076

Elevation Total Depth

1.68 22.5

Optional Fields

Figura 6.2 Esempio di finestra di *input* dei dati spaziali nel software *RockWorks 15*.

Il passo successivo è stato l'inserimento delle caratteristiche litologiche semplificate e omogeneizzate tra le varie sorgenti, per ciascun singolo pozzo.

Sono state create 4 classi litologiche: ghiaie, sabbie, limi e argille. All'interno della classe granulometrica "sabbie" è stata distinta l'origine di queste, differenziandole tra "sabbie di cordone litorale" e "sabbie di tracimazione fluviale", rispettivamente di origine marina e continentale, avvalendoci di quanto riportato nella Carta Geologica D'Italia scala 1:50000 fogli 240-241Forli-Cervia.

Il software per costruire gli elaborati cartografici è basato su un sistema di celle discretizzate che vanno a definire il numero dei nodi utilizzati durante l'interpolazione dati, nello specifico il nostro progetto ha delle celle di dimensione di 200 m per 200 m in xy (orizzontale) per 0,2 m in z (verticale).

6.2 Risultati

I risultati del modello mostrano come l'acquifero freatico costiero di Ravenna sia un corpo sabbioso cuneiforme aperto a mare (Figura 6.3), che si estende dalla linea di costa verso l'entroterra, aumentando di dimensioni e spessori procedendo in direzione nord.

In Figura 6.3 è mostrato, a scopo esemplificativo, un estratto del modello tridimensionale dell'acquifero relativo ad un transetto situato nella porzione meridionale del Comune di Ravenna. Esso, evidenzia come il corpo di sabbie (giallo) sia aperto a mare e si spinga verso l'interno per circa 8 km. Nella porzione più costiera del transetto l'acquifero risulta separato in due porzioni da uno strato a componente principale argillosa denominato pro-delta. Tale separazione origina una porzione superficiale di acquifero avente uno spessore di circa 7-8 m ed una profondità di dimensioni inferiori (circa 2-3m). Il pro-delta tende poi a scomparire a circa 3km da mare originando un corpo sabbioso unico al di sotto del pozzo P5S. La chiusura dell'acquifero si trova a circa 8km da mare in corrispondenza dei depositi a granulometria maggiore (ghiaie), testimoniati anche dalla presenza della fascia delle cave. Da questo punto verso ovest l'acquifero scompare e la litologia diventa prettamente argillosa con intercalazioni sabbiose di origine continentale.

Oltre allo sviluppo in profondità, è determinante individuare quelle porzioni di acquifero freatico dove troviamo dei depositi di sabbie dell'acquifero direttamente in superficie. Sempre utilizzando la Figura 6.3 a titolo di esempio, possiamo notare come le sabbie siano presenti a livello superficiale nella prima porzione adiacente alla linea di costa (attuale cordone dunoso) e più all'interno, in corrispondenza delle paleodune su cui sono insediate le pinete storiche di Ravenna. Tra la Pineta costiera "Ramazzotti" e la Pineta di Classe l'acquifero risulta confinato (orizzonti argillosi in superficie), così come avviene anche dalla Pineta di Classe verso ovest (Figura 6.3).

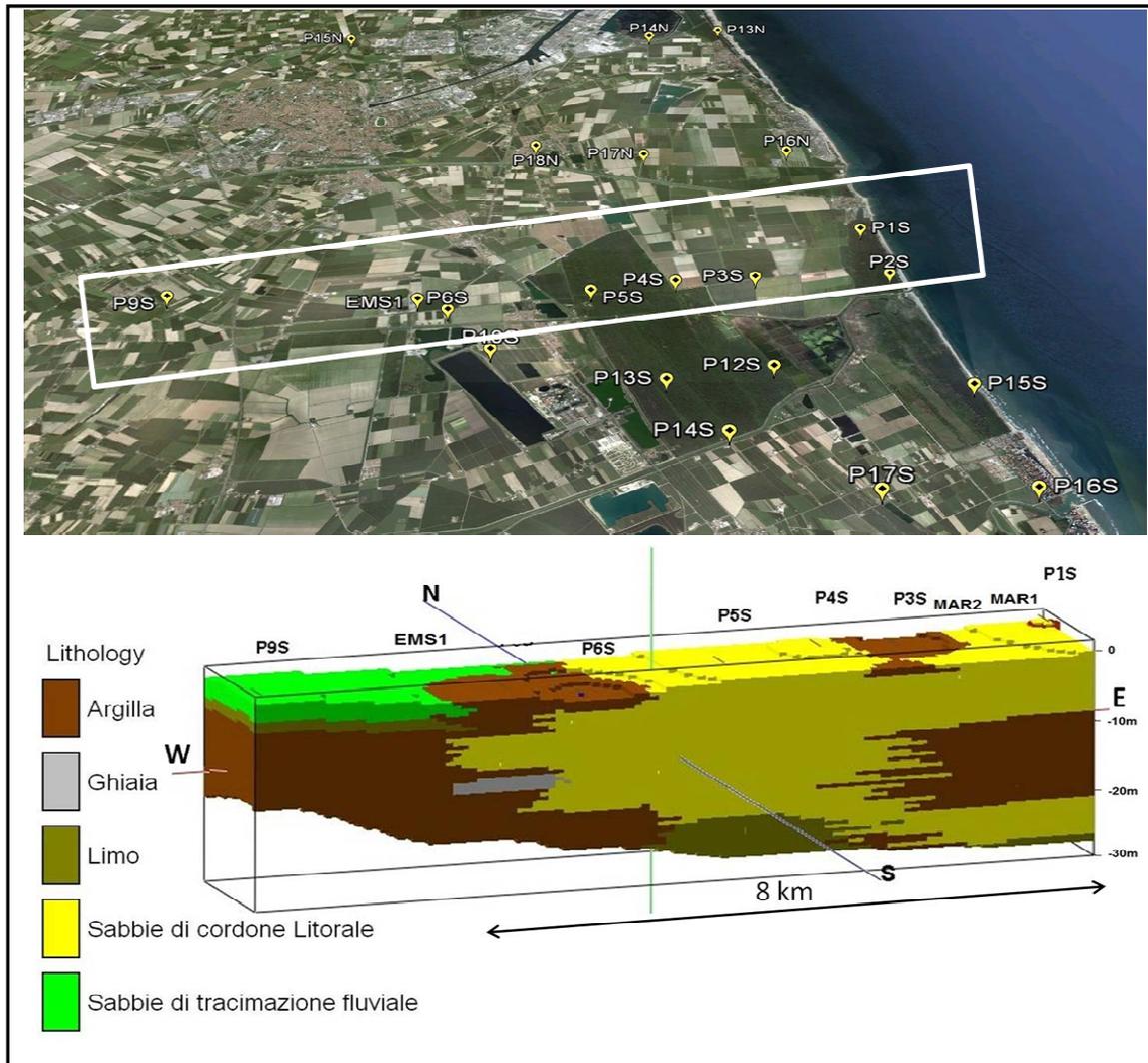


Figura 6.3 Modello tridimensionale di un transetto caratteristico situato nella porzione meridionale del comune di Ravenna. Software utilizzato: *RockWorks 15*, esagerazione verticale 100x.

Per rappresentare al meglio i risultati ottenuti dal modello complessivo dell'acquifero costiero, sono stati eseguiti dei diagrammi a steccato dell'area (Figura 6.4 e Figura 6.5) aventi un'esagerazione verticale di 100 volte. I seguenti diagrammi a steccato sono stati disegnati in modo da avere le sezioni il più vicino possibile ai punti di litologia noti.

Commentando la porzione settentrionale di acquifero in Figura 6.4, si nota come l'acquifero sia composto esclusivamente dalle sabbie di cordone litorale che si trovano al di sopra dei depositi di pro-delta. Lo spessore dei depositi sabbiosi varia da 4,6 m nel punto 11N a 16,3 m nel punto 15N. Lo spessore medio delle sabbie che compongono l'acquifero superficiale è di 10 m. I depositi di pro-delta della zona nord formano una strato continuo dalla costa spostandosi verso ovest, al di sotto delle sabbie di cordone litorale che compongono l'acquifero. Al di sotto dei depositi di pro-delta è visibile un altro strato di sabbie di spessore molto modesto che va da un minimo di 0,4 m nel punto PMSV6P ad un massimo di 3,9 m nel punto PMSV7P (Figura 6.4). Dal calcolo dei volumi nel modello per l'acquifero nella zona nord, risulta che esso è

composto da circa $2,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ di sabbia di cordone litorale. Al di sotto delle sabbie di litorale profonde è possibile vedere un sottile strano di argille, che delimitano ed isolano l'acquifero verso il basso (Figura 6.4 e Figura 6.5).

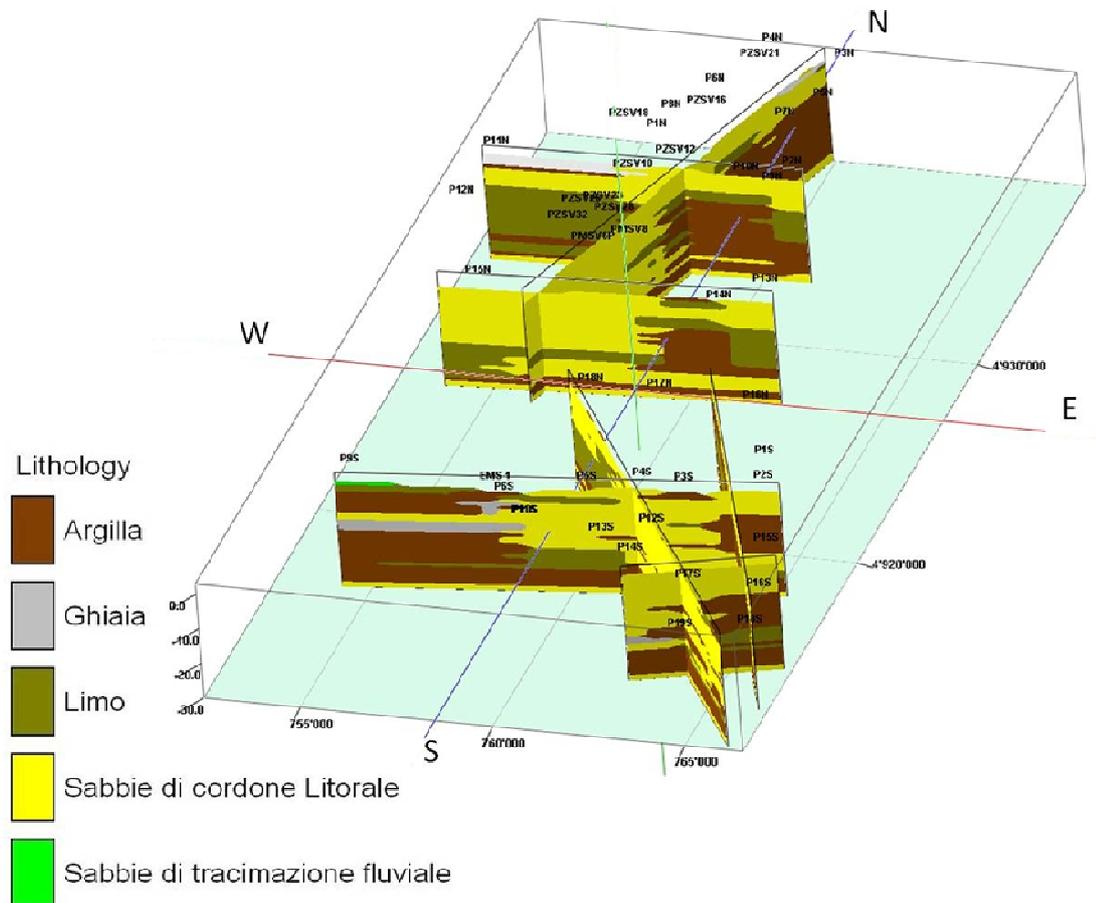


Figura 6.4 Diagramma a steccato per l'intero acquifero di Ravenna. Vista da S.

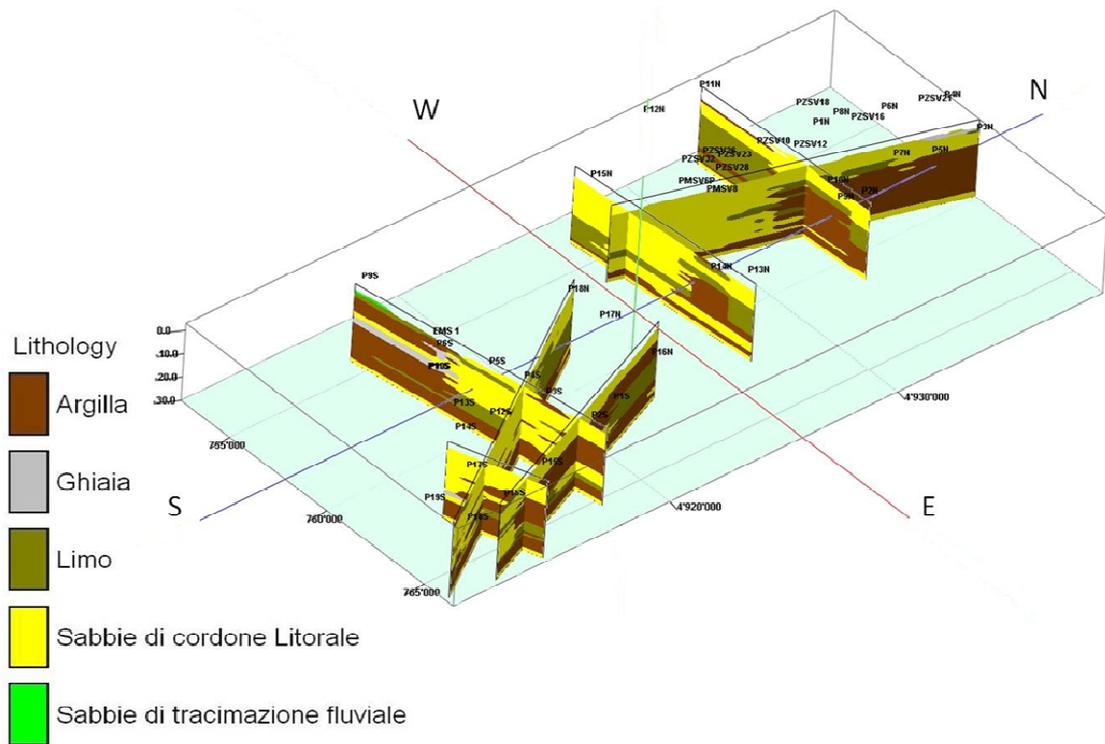


Figura 6.5 Diagramma a steccato per l'intero acquifero di Ravenna. Vista da S-E.

La porzione meridionale mostra come l'acquifero e il pro-delta abbiano un'estensione ridotta rispetto alla porzione settentrionale (Figura 6.5). Si nota anche come tutto il sistema tenda a diminuire vistosamente spostandosi verso sud.

Gli spessori della parte superficiale dell'acquifero aumentano raggiungendo i 10m, con spessori che arrivano anche a 11,50 m nel punto P2S in Pineta Ramazzotti. Muovendosi verso sud e verso ovest il pro-delta scompare interdigitandosi con i depositi di sabbia di cordone litorale (Figura 6.5). Anche in questo caso, nella parte bassa della sequenza litostratigrafica si possono vedere le argille che delimitano l'acquifero. Le argille si incontrano ad una profondità media di - 18,5 m con valori massimi in corrispondenza del punto P2S uguali a - 24,5 m. In corrispondenza dei punti P6S, P8S, P10S, P13S, P14S si ritrova un deposito di sabbia grossa e ghiaia con spessori che vanno da 1,00 a 2,00 m sfruttato dal punto di vista estrattivo.

Selezionando esclusivamente le sabbie di cordone litorale (Figura 6.6) si vede come varia lo spessore dell'acquifero spostandosi da nord verso sud. Nella parte settentrionale ci sono spessori di circa 8/9 m, mentre nella parte meridionale ci sono spessori di circa 10/15 m con punte di 22.3 m nel punto P14S. Questo è dovuto alla scomparsa del deposito di pro-delta che divide l'acquifero sabbioso in due porzioni, una superficiale ed una profonda. Al di sotto delle paleodune di Classe, le sabbie di cordone litorale che compongono l'acquifero non sono interrotte dal prodelta e danno origine ad un corpo sabbioso unico dello spessore di oltre 20 m.

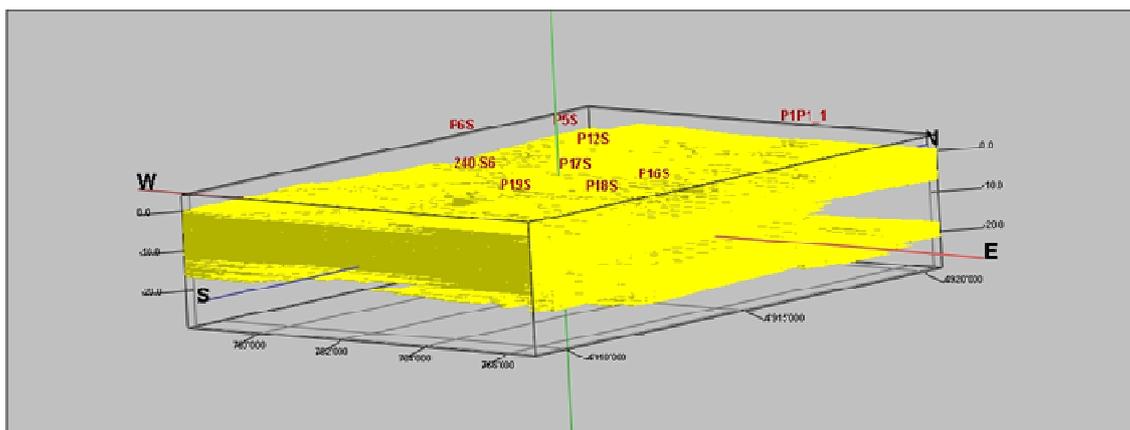


Figura 6.6 Modello 3D delle sabbie di cordone litorale che costituiscono l'acquifero. Esagerazione verticale 100x.

Complessivamente, dalla ricostruzione ed interpretazione dei dati litostratigrafici, risulta che l'area di studio è caratterizzata da un acquifero composto da sabbie di cordone litorale. Nella zona nord è presente, ad una profondità media di - 10 m, un deposito di tipo argilloso-limoso-sabbioso (deposito di pro-delta) che funge da discontinuità idraulica con le sabbie che si trovano ad una profondità maggiore e che poggiano sul substrato argilloso che chiude l'acquifero verso il basso (Figura 6.4 e Figura 6.5). Nella zona sud, i depositi di pro-delta scompaiono interdigitandosi con le sabbie sia verso sud sia verso ovest. I depositi superficiali sono di natura sabbiosa nella prima fascia a ridosso della costa ed anche in una fascia più interna, che corrisponde con la linea delle paleo-dune, su cui sono insediate le pinete storiche di San Vitale e Classe. I depositi argillosi superficiali sono compresi tra le due "fasce" sabbiose appena descritte e nelle porzioni occidentali del modello rendendo l'acquifero confinato al di sotto di queste porzioni. L'acquifero è delimitato verso il basso da depositi argillosi e limosi, i quali si trovano ad una differente profondità dal piano campagna che varia da i - 8,80 m nel punto P15S ai - 29,40 m s.l.m. nel punto P4N, denotando in ogni caso, un aumento della profondità muovendoci verso nord.

6.3 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati ottenuti elaborando i dati litologici, rileviamo che l'acquifero in studio è formato da depositi sabbiosi di origine marina, possiede una forma cuneiforme e si estende da mare verso l'entroterra. La sua estensione è di 3-4 km nelle porzione meridionale, salendo verso nord la dimensione aumenta, fino ad uscire dal database dei nostri pozzi. Servendoci del lavoro di Amorosi *et al.* 1999, possiamo concludere che esso raggiunga, nella porzione nord dell'area, un'estensione di oltre 20 km dall'attuale linea di costa.

Al suo interno, presenta una discontinuità rappresentata dai depositi di pro-delta. Questi depositi presentano una permeabilità minore rispetto alle sabbie, perché composti da granulometrie più fini (Amorosi *et al.* 1999). La presenza di depositi a permeabilità molto bassa divide, dal punto di vista idraulico, l'acquifero in due parti. La parte più superficiale freatica, la parte più profonda è semi-confinata dai depositi di pro-delta. Le sabbie di cordone litorale si presentano senza interruzioni esclusivamente nella zona sud, dove vi è la graduale scomparsa dei depositi di pro-delta. Qui le sabbie raggiungono spessori che arrivano a 23 m nel punto P14S.

A grande scala, i depositi superficiali si presentano come delle fasce con direzione N-S di depositi sabbiosi e di depositi argillosi (Figura 6.7), tranne che in corrispondenza delle foci fluviali attuali o di quelle abbandonate, dove troviamo depositi argillosi quasi continui con direzione E-O. Ove presenti, i depositi argillosi possono confinare l'acquifero superficialmente.

L'acquifero è delimitato verso il basso da depositi argillosi che si trovano a una profondità media di circa - 25 m s.l.m. (Figura 6.3), con un minimo riscontrato di - 9 m nel punto P15S ad un massimo di - 29,40 m nel punto P4N. In generale, la chiusura inferiore dell'acquifero da parte delle argille pre-flandriane è più profonda nella zona nord e meno nella zona sud.

Le sabbie di cordone litorale presentano una volumetria complessiva per tutto l'acquifero di $4 \times 10^9 \text{ m}^3$, ipotizzando una porosità media del 30%, contengono $1,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ di acqua, circa 30 volte l'invaso di Ridracoli (Figura 6.8).

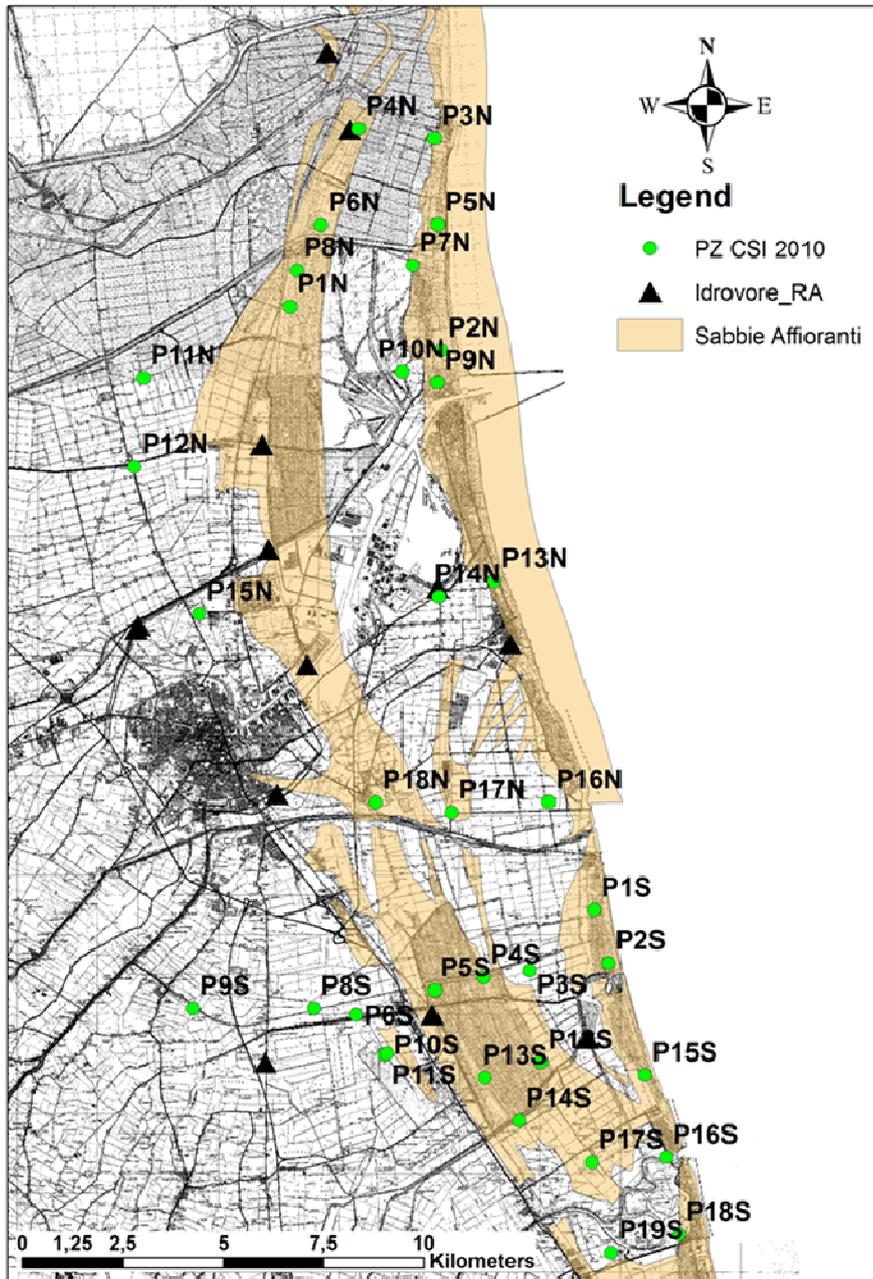


Figura 6.7 Mappa delle sabbie affioranti per l'intera zona di studio.

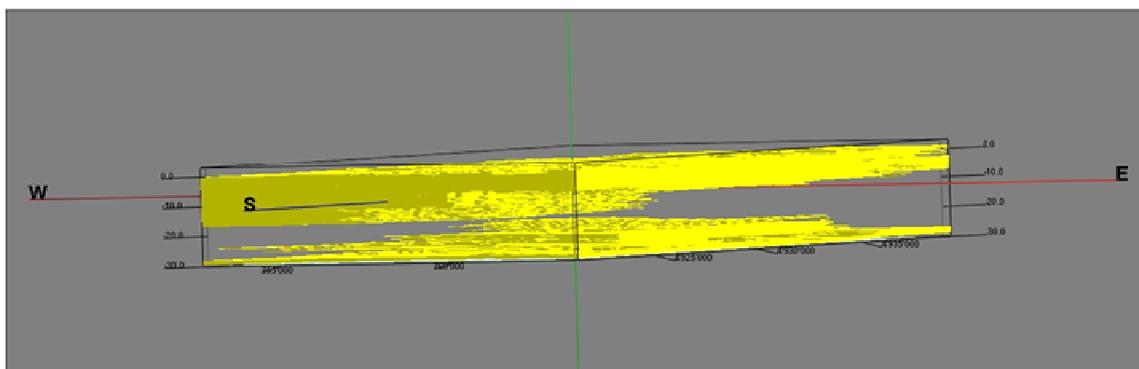


Figura 6.8 Modello 3D dell'intero acquifero relativo alla sola litologia "sabbia di Cordone Litorale".

7 RISULTATI DELLE ANALISI CHIMICHE

7.1 Introduzione

Nei paragrafi seguenti saranno presentati in forma sintetica tutti i risultati ottenuti nelle campagne di raccolta dati in campo e dalle analisi di laboratorio eseguite durante questo lavoro di tesi.

Per ovvi motivi di spazio i dati di seguito riportati sono rappresentati come tabelle riassuntive in cui sono mostrati parametri statistici descrittivi dell'intero insieme di dati, suddivisi per gruppi omogenei di acque. I dati in formato originale saranno forniti come allegati alla fine del volume.

Di seguito si riporta una rapida spiegazione dei parametri utilizzati per la sintesi:

Tabella 7.1 Riassunto dei parametri utilizzati per la sintesi dei dati raccolti

ABBREVIAZIONE	NOME COMPLETO	SIGNIFICATO
Unità mis.	Unità di misura	È l'unità di misura dell'elemento considerato
Lim. Ril.	Limite di rilevabilità	la massima concentrazione di un analita che non può essere distinta significativamente da zero
N° oss.	Numero delle osservazioni	Numero di osservazioni ottenuto di una variabile ottenuto da analisi chimiche o da misure in campo
N°oss > Lim. Ril.	Numero di osservazioni risultate maggiori al limite di rilevabilità della variabile analizzata	Numero di osservazioni risultate maggiori al limite di rilevabilità della variabile analizzata che perciò possono essere utilizzate nell'elaborazione e nella discussione dei dati
10° perc.	Decimo percentile	È il valore al di sotto del quale si trova il 10% delle osservazioni
25° perc.	venticiquaresimo percentile	È il valore al di sotto del quale si trova il 25% delle osservazioni
Mediana/50° perc.	Mediana/cinquantesimo percentile	È il valore centrale della serie ordinata delle osservazioni / È il valore al di sotto del quale si trova il 50% delle osservazioni
75° perc.	settantacinquesimo percentile	È il valore al di sotto del quale si trova il 75% delle osservazioni
90° perc.	novantesimo percentile	È il valore al di sotto del quale si trova il 90% delle osservazioni
Max	Massimo	È il valore massimo che assume la variabile all'interno della serie di dati a nostra disposizione
Min	Minimo	È il valore minimo che assume la variabile all'interno della serie di dati a nostra disposizione
Media	Media	È la sommatoria di tutte le osservazioni diviso il numero totale di osservazioni
Dev. St.	Deviazione standard	È una misura di variabilità di una popolazione di dati
Pioggia generica*	\	Valori chimico-fisici medi per una precipitazione generica (Reimann, 1996)
Mare Adriatico	\	Valori chimico-fisici misurati nelle acque del

		Mare Adriatico raccolte nel dicembre 2010
Mare generico*	\	Valori chimico-fisici di letteratura per una acqua oceanica (Turekian, 1968)
CER	Canale Emiliano Romagnolo	Valori chimico-fisici misurati nelle acque del CER raccolte nel dicembre 2010

Riferimento per “Pioggia generica*”: Reimann, et al, 1996 Rainwater Composition in eight arctic catchments in Northern Europe (Finland, Norway And Russia) *Atmospheric Environment* Vol. 31, No. 2, pp. 159-170, 1997

Riferimento per “Mare generico*”: Karl K Turekian: Oceans. 1968. Prentice-Hall

7.2 Risultati a scala di acquifero (dicembre 2010)

In questa prima fase analitica sono state eseguite analisi in tre diversi laboratori; di seguito saranno riportati i singoli risultati per ciascuna fonte eseguiti sullo stesso *data set* di campioni raccolti nel dicembre 2010. Seguirà anche un breve confronto dei risultati tra i diversi laboratori.

7.2.1 Risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisici misurati in campo

Le tabelle seguenti (Tabella 7.2, Tabella 7.3, Tabella 7.4 e Tabella 7.5) mostrano un riassunto di tutti i risultati ottenuti dai dati chimico fisici misurati in campo (grigio) e delle analisi degli elementi principali eseguite presso C.R.S.A. Med Ingegneria suddivisi per la provenienza dei campioni: acque superficiali, laguna o sotterranee.

Tabella 7.2 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisico misurati in campo (grigio) esclusivamente per i campioni di acque superficiali. In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

SUP	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ca (mg/l)	1	16	16	57.9	68.6	110.9	154.3	169.5	205.0	41.7	113.2	49.6	292.0	41.7	411.0	2.9
Mg(mg/l)	0.5	16	16	27.7	39.0	57.1	209.1	260.2	288.2	11.3	113.7	100.9	837.0	11.3	1290.0	0.3
Na(mg/l)	5	16	16	8.4	30.9	145.7	1172.8	1620.0	2007.0	2.0	550.3	739.3	6386.0	11.3	10800.0	1.0
K(mg/l)	0.5	16	16	2.3	4.2	8.1	42.7	51.2	53.3	1.9	21.1	21.4	240.0	1.9	392.0	0.5
HCO3(mg/l)	1	16	16	278.0	398.0	495.5	616.0	780.5	812.0	188.0	509.9	192.4	242.0	188.0		6.2
SO4(mg/l)	2.5	16	16	90.8	109.8	203.0	283.9	381.2	669.8	33.0	224.8	160.6	1672.0	33.0	2712.0	2.1
Cl(mg/l)	2.5	16	16	26.6	83.7	233.0	2314.2	2730.0	4048.0	19.7	1016.2	1353.3	12302.0	19.7	19400.0	1.8
NO3(mg/l)	2.5	16	16	1.3	3.2	8.1	27.9	45.6	53.3	1.3	17.2	18.2	3.6	3.8		2.0
Br(mg/l)	2.5	16	16	1.3	1.3	1.3	7.9	9.8	16.3	1.3	4.2	4.8	44.4	1.3	67.3	0.0
Temperatura (°C)		16		1.9	2.2	3.6	4.6	5.8	6.8	1.4	3.6	1.7	4.8	2.7		
Cond. El. (mS/cm)		16		0.7	1.3	2.0	9.2	11.3	15.7	0.4	4.7	5.0	38.9	0.4	66.0	1.5
Salinità (g/l)		16		0.3	0.5	0.8	4.2	5.2	7.5	0.1	2.1	2.4	20.2	0.1	35.0	0.6
pH		16		8.0	8.2	8.4	8.4	8.7	8.7	7.9	8.3	0.2	8.3	8.4	8.0	5.0
Eh		16		-2.2	0.6	23.5	42.4	95.0	186.0	-34.4	35.3	54.4	51.0	186.0	200.0	200.0
Ossigeno disciolto (mg/l)			14	9.8	10.3	10.6	11.4	11.9	12.5	5.7	10.5	1.6	10.7	#		
Ione solfuro (mg/l)		0		#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#		

Tabella 7.3 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisico misurati in campo esclusivamente per i campioni di acque di laguna. In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

Lagoon	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ca (mg/l)	1	6	6	73.2	106.0	244.0	328.8	337.5	343.0	61.3	218.2	129.2	292.0	41.7	411.0	2.9
Mg(mg/l)	0.5	6	6	135.1	198.8	589.5	981.0	1008.5	1021.0	86.3	577.7	449.1	837.0	11.3	1290.0	0.3
Na(mg/l)	5	6	6	648.6	1216.0	4402.5	7582.3	7831.0	7967.0	196.1	4294.0	3693.7	6386.0	11.3	10800.0	1.0
K(mg/l)	0.5	6	6	27.4	51.7	170.2	290.3	297.5	299.0	8.3	165.0	137.8	240.0	1.9	392.0	0.5
HCO3(mg/l)	1	6	6	235.5	247.0	293.0	345.8	440.0	531.0	225.0	322.8	114.0	242.0	188.0		6.2
SO4(mg/l)	2.5	6	6	373.2	520.3	1220.7	1973.4	1996.4	1997.5	230.5	1196.8	851.0	1672.0	33.0	2712.0	2.1
Cl(mg/l)	2.5	6	6	1358.4	2475.3	8746.7	14895.1	15101.1	15155.3	434.2	8402.1	7152.1	12302.0	19.7	19400.0	1.8
NO3(mg/l)	2.5	6	6	1.3	1.3	1.3	2.1	25.6	48.7	1.3	9.4	19.3	3.6	3.8		2.0
Br(mg/l)	2.5	6	6	4.7	8.6	28.3	49.7	51.1	51.3	1.3	28.0	23.8	44.4	1.3	67.3	0.0
Temperatura (°C)		6		1.3	2.0	2.7	3.4	4.1	4.6	0.8	2.7	1.3	4.8	2.7		
Cond. El. (mS/cm)		6		5.6	9.2	26.0	41.6	42.0	42.1	2.7	24.5	18.9	38.9	0.4	66.0	1.5
Salinità (g/l)		6		2.5	4.2	13.2	21.8	22.0	22.0	1.1	12.6	10.1	20.2	0.1	35.0	0.6
pH		6		8.2	8.2	8.3	8.6	9.3	9.9	8.1	8.6	0.7	8.3	8.4	8.0	5.0
Eh		6		25.3	46.3	85.0	118.8	125.3	125.5	12.2	78.5	46.7	51.0	186.0	200.0	200.0
Ossigeno disciolto (mg/l)		1		#	#	#	#	#	#	#	#	#	10.7	#		
Ione solfuro (mg/l)		0		#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#		

Tabella 7.4 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisico misurati in campo esclusivamente per i campioni di acque sotterranee. In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

Pozzi	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ca (mg/l)	1	207	207	67.1	136.9	211.9	385.6	538.3	1315.0	17.3	274.2	202.2	292.0	41.7	411.0	2.9
Mg(mg/l)	0.5	207	207	65.1	154.3	431.2	863.1	1135.2	1844.0	13.5	532.9	437.9	837.0	11.3	1290.0	0.3
Na(mg/l)	5	207	207	206.7	813.2	2718.0	6085.5	8854.6	14470.0	0.9	3868.0	3514.6	6386.0	11.3	10800.0	1.0
K(mg/l)	0.5	207	207	11.3	32.8	87.0	180.3	298.2	564.4	1.4	121.2	111.6	240.0	1.9	392.0	0.5
HCO3(mg/l)	1	207	207	362.4	472.5	641.0	842.0	1060.4	1618.0	158.0	677.2	278.7	242.0	188.0		6.2
SO4(mg/l)	2.5	207	206	7.5	63.1	347.6	1099.3	1811.5	2852.9	0.0	630.1	695.1	1672.0	33.0	2712.0	2.1
Cl(mg/l)	2.5	207	207	414.5	1554.0	5263.9	11595.7	16796.3	25929.1	30.6	7328.8	6565.2	12302.0	19.7	19400.0	1.8
NO3(mg/l)	2.5	207	207	1.3	1.3	1.3	1.3	4.9	184.4	1.3	8.0	27.3	3.6	3.8		2.0
Br(mg/l)	2.5	206	206	1.3	5.6	17.6	36.9	57.1	75.0	1.3	23.5	20.5	44.4	1.3	67.3	0.0
Temperatura (°C)		207		11.6	12.3	12.8	13.5	14.4	16.6	8.4	12.9	1.2	4.8	2.7		
Cond. El. (mS/cm)		207		2.7	7.1	17.6	34.0	43.7	63.1	0.5	21.7	16.2	38.9	0.4	66.0	1.5
Salinità (g/l)		207		1.2	3.2	8.5	17.4	23.0	34.6	0.2	11.0	8.7	20.2	0.1	35.0	0.6
pH		207		6.1	7.2	7.5	7.8	8.2	9.6	5.6	7.4	0.7	8.3	8.4	8.0	5.0
Eh		207		-189.2	-171.8	-147.3	-104.7	-33.2	360.5	-408.9	-126.8	86.5	51.0	186.0	200.0	200.0
Ossigeno disciolto (mg/l)		198		1.4	2.3	3.4	5.5	6.8	9.6	0.2	3.9	2.1	10.7	#		
Ione solfuro (mg/l)		25		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6.7	0.0	0.3	1.3	#	#		

Le tabelle sopradescritte riportano le informazioni riassuntive dalle quali risulta evidente che i campioni delle acque superficiali mostrano concentrazioni di tutti gli elementi inferiori rispetto a quelle degli altri gruppi di campioni, ed anche i valori massimi osservati in questo gruppo non superano la mediana degli altri gruppi.

Le acque delle lagune sono quelle con i valori centrali più alti (media e mediana in Tabella 7.3), anche se con un numero di osservazioni oggettivamente limitato, mentre le acque sotterranee mostrano gli intervalli più estesi, raggiungendo in alcuni casi per Na e Cl concentrazioni superiori a quelle di una acqua di mare generica. Il campione di acqua raccolta a mare mostra valori inferiori rispetto all'acqua di mare generica (ad esempio la salinità misurata è di 20 g/l, Tabella 7.2). Le acque sotterranee sono quelle che mostrano lo spettro più ampio di valori di pH (6.1-9.6) rispetto agli altri tipi di acque, anche se i valori centrali sono pressoché identici.

Il pH varia in un intervallo di valori compreso tra 6 fino a quasi 10, ma la maggior parte dei campioni si attesta attorno a valori di 7.5-8, valori comuni per un'acqua derivante dal mescolamento di acqua di mare e precipitazioni.

I valori di Eh misurati mostrano che la maggior parte dei campioni si trova in ambienti riducenti, infatti solo il 10% dei campioni possiede un Eh positivo e questi campioni corrispondono alle acque superficiali e alle acque lagunari. L'ossigeno disciolto, essendo strettamente relazionata con l'Eh, risulta mediamente basso (4.3 g/l) con valori intorno ai 10 g/l per le acque superficiali.

Lo ione solfuro, sintomo di processi degradativi di orizzonti ricchi in sostanza organica in condizioni anaerobiche, è stato riscontrato esclusivamente nelle acque sotterranee, e solo nel 10% dei campioni (25 misure), ma con concentrazioni che in alcuni casi hanno raggiunto anche i 6.7 g/l.

Per quanto riguarda il parametro temperatura, si registrano i valori inferiori per le acque superficiali, in quanto, il monitoraggio è avvenuto in dicembre, mentre per i campioni di origine profonda le temperature sono in linea con la capacità termica dell'acquifero e con il gradiente geotermico terrestre (nel periodo invernale la temperatura dell'acquifero aumenta con la profondità, l'inverso nei mesi estivi).

Tra i cationi (Ca, Mg, Na, K), il sodio risulta il più abbondante, con circa il 25% dei campioni aventi una concentrazione di sodio superiore al campione di acqua di mare campionata. L'intervallo di concentrazione va da 5 mg/l dei principali fiumi monitorati, agli oltre 14000 mg/l di alcuni piezometri situati in pineta San Vitale sud.

A conferma del dato di salinità, tra gli anioni (cloro, solfato, bromo e alcalinità) il più presente risulta essere il cloro che raggiunge concentrazioni pari anche a 20000 mg/l. Oltre il 50% dei campioni raccolti ha un contenuto in cloro oltre i 4700 mg/l. Come il cloro, anche solfati e bromuri sono ioni conservativi di origine prettamente marina e la loro concentrazione è

direttamente rapportabile alla presenza di acqua di mare. Come mostra la Tabella 7.5, i valori registrati per il mare Adriatico di solfati e bromuri sono rispettivamente 1672 mg/l e 44 mg/l; in tal senso, circa il 25% dei campioni raccolti ha una concentrazione di bromuri oltre i 36 mg/l, mentre, per i solfuri il 75° percentile corrisponde a 1067 mg/l.

Tabella 7.5 Confronto dei risultati delle analisi svolte presso C.R.S.A. Med Ingegneria e parametri chimico fisici misurati in campo (grigio) per ciascuna tipologia di acque raccolte. In verde alcune analisi di riferimento.

	SUP		Lagoon		Pozzi		Mare adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.				
Ca (mg/l)	113.2	49.6	218.2	129.2	274.2	202.2	292.0	41.7	411.0	2.9
Mg(mg/l)	113.7	100.9	577.7	449.1	532.9	437.9	837.0	11.3	1290.0	0.3
Na(mg/l)	550.3	739.3	4294.0	3693.7	3868.0	3514.6	6386.0	11.3	10800.0	1.0
K(mg/l)	21.1	21.4	165.0	137.8	121.2	111.6	240.0	1.9	392.0	0.5
HCO3(mg/l)	509.9	192.4	322.8	114.0	677.2	278.7	242.0	188.0		6.2
SO4(mg/l)	224.8	160.6	1196.8	851.0	630.1	695.1	1672.0	33.0	2712.0	2.1
Cl(mg/l)	1016.2	1353.3	8402.1	7152.1	7328.8	6565.2	12302.0	19.7	19400.0	1.8
NO3(mg/l)	17.2	18.2	9.4	19.3	8.0	27.3	3.6	3.8		2.0
Br(mg/l)	4.2	4.8	28.0	23.8	23.5	20.5	44.4	1.3	67.3	0.0
Temperatura (°C)	3.6	1.7	2.7	1.3	12.9	1.2	4.8	2.7		
Cond. El. (mS/cm)	4.7	5.0	24.5	18.9	21.7	16.2	38.9	0.4	66.0	1.5
Salinità (g/l)	2.1	2.4	12.6	10.1	11.0	8.7	20.2	0.1	35.0	0.6
pH	8.3	0.2	8.6	0.7	7.4	0.7	8.3	8.4	8.0	5.0
Eh	35.3	54.4	78.5	46.7	-126.8	86.5	51.0	186.0	200.0	200.0
Ossigeno disciolto (mg/l)	10.5	1.6	#	#	3.9	2.1	10.7	#		
Ione solfuro (mg/l)	#	#	#	#	0.3	1.3	#	#		

7.2.2 Risultati delle analisi svolte presso *Acme Analytical Laboratories Vancouver Ltd.* (Canada)

Le analisi svolte presso questi laboratori hanno consentito di ottenere informazioni su numerosi elementi, anche se tra le variabili un discreto numero non ha dato risultati superiori al limite di rilevabilità (Dy, Ge, Hf, Hg, Nb, Pd, Pt, Ta, Te, Ti, Yb), e numerosi sono pure gli elementi con un numero di risultati positivi inferiori a 10 (Au, Be, Cd, Er, Eu, Ga, Gd, Ho, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Th, Tm). Come per le altre tabelle presentate occorre segnalare che sono riportati alcuni dati di riferimento per le acque marine, di cui una inclusa nel set analitico.

Anche per questo insieme di analisi è possibile distinguere i risultati sulla base dei tipi di acque già identificati: acque superficiali (Tabella 7.6), acque di laguna (Tabella 7.7) e acque sotterranee (Tabella 7.8), anche se occorre specificare che sono solo 3 i campioni del gruppo lagune. Le lagune si confermano mediamente più ricche in elementi arricchiti in acqua marina (B, Li, Rb, Sr) anche se i valori più alti per questi elementi sono osservati in alcuni campioni delle acque sotterranee. Mediamente più concentrati nelle acque di falda, anche a livelli significativi risultano Fe e Mn, accompagnati anche da altri elementi come Zn e Ni. Altri elementi arricchiti nelle acque di falda risultano essere As, Se e V, che condividono un comune comportamento in soluzione, essendo generalmente presenti in forma anionica.

In Tabella 7.9 un confronto immediato dei valori medi dei 3 tipi di acque e dei possibili riferimenti utilizzati che confermano quanto commentato in precedenza.

Tabella 7.6 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso ACME Ltd. Per le acque superficiali. In rosso evidenziati gli elementi con un basso numero di osservazioni superiori al limite di rilevabilità In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

SUP	Unità mis	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ag	ppb	0.05	15	5	0.0	0.0	0.0	1.1	2.2	3.1	0.0	0.6	1.0	16.5	0	0.28	0.01
Al	ppb	1	15	15	5.4	7.5	11.0	22.5	30.0	270.0	4.0	31.1	66.6	75	6	1	12.4
As	ppb	0.5	15	11	0.0	0.6	1.2	7.1	12.0	13.0	0.0	3.9	5.2	37.5	0.9	2.6	0.58
Au	ppb	0.05	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.75	0	0.011	
B	ppb	5	15	15	109.8	152.0	268.0	1177.5	1928.0	2090.0	48.0	695.9	782.4	2725	48	4450	0.5
Ba	ppb	0.05	15	15	53.8	62.9	113.0	462.4	794.9	1768.0	35.1	339.6	487.4	31	35.11	21	0.83
Be	ppb	0.05	15	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0006	0
Bi	ppb	0.05	15	3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	10.5	0.0	1.0	2.8	0	0	0.02	0
Br	ppb	5	15	15	110.0	298.0	1293.0	6295.0	11174.0	16840.0	90.0	3916.9	5523.2	40325	108	67300	0
Ca	ppm	0.05	15	15	57.6	66.9	95.9	153.6	166.3	209.0	49.1	113.3	50.0	318	49.06	411	0.15
Cd	ppb	0.05	15	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	0	0	0.11	0.07
Ce	ppb	0.01	15	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0.01	0.0012	
Cl	ppm	1	15	15	37.4	66.5	234.0	1755.0	3002.0	4760.0	36.0	1074.3	1532.8	12400	37	19400	0.9
Co	ppb	0.02	15	15	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	1.1	0.1	0.4	0.3	0.5	0.2	0.39	0.36
Cr	ppb	0.5	15	7	0.0	0.0	0.5	0.8	6.3	9.0	0.0	1.6	2.9	0	0	0.2	0
Cs	ppb	0.01	15	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.3	
Cu	ppb	0.1	15	15	2.5	2.8	6.5	8.5	10.3	21.0	2.5	6.8	4.8	30	2.5	0.9	0.5
Dy	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00091	
Er	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00087	
Eu	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0013	
Fe	ppb	10	15	12	0.0	25.0	41.0	100.0	110.0	140.0	0.0	57.3	46.2	300	41	3.4	0.04
Ga	ppb	0.05	15	3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	6.4	0.0	0.6	1.7	0	0	0.03	
Gd	ppb	0.01	15	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0007	
Ge	ppb	0.05	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.06	
Hf	ppb	0.02	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.008	
Hg	ppb	0.1	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.15	
Ho	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00022	
In	ppb	0.01	15	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	8.2	0.0	0.7	2.1	0	0		
K	ppm	0.05	15	15	4.4	7.7	14.5	69.4	76.3	77.4	2.9	31.0	31.6	272.75	2.93	392	0.17
La	ppb	0.01	15	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.1	0.2	1	0	0.0029	
Li	ppb	0.1	15	15	15.6	19.3	23.8	42.8	44.6	51.0	3.4	29.0	14.4	160	3.4	170	0.1
Lu	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00015	
Mg	ppm	0.05	15	15	30.2	41.2	64.0	214.4	302.3	390.2	15.8	129.6	125.2	889.5	15.79	1290	0.1
Mn	ppb	0.05	15	15	21.8	26.7	32.5	77.0	169.8	222.6	3.9	64.6	67.7	15.25	3.85	0.4	3.6
Mo	ppb	0.1	15	15	0.9	1.0	1.1	6.7	13.6	14.0	0.6	4.3	5.5	7.5	1	10	0.03
Na	ppm	0.05	15	15	35.6	58.5	181.8	1286.8	2237.0	2975.0	18.6	751.9	1052.7	7367.5	18.6	10800	0.4
Nb	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.015	
Nd	ppb	0.01	15	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.0028	
Ni	ppb	0.2	15	15	1.4	2.3	3.5	5.5	8.0	13.0	0.9	4.4	3.2	7.5	3.4	6.6	10.36
P	ppb	20	15	15	91.8	118.0	385.0	550.0	590.0	906.0	47.0	351.2	253.8	0	87	88	0
Pb	ppb	0.1	15	10	0.0	0.1	0.2	0.8	1.5	6.0	0.0	0.8	1.5	7.5	0.1	0.03	0.6
Pd	ppb	0.2	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Pr	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00064	
Pt	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Rb	ppb	0.01	15	15	1.8	2.3	4.3	11.0	18.0	30.6	1.4	7.9	8.5	78.25	2.01	120	0.19
Re	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0084	
Rh	ppb	0.01	15	9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.01		
Ru	ppb	0.05	15	4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	0	0	0.0007	
S	ppm	1	15	15	34.6	45.0	75.0	98.0	100.0	130.0	15.0	70.9	32.5	675	15	904	2.25
Sb	ppb	0.05	15	14	0.1	0.2	0.2	0.7	1.1	1.1	0.0	0.4	0.4	0	0.18	0.33	0.025
Sc	ppb	1	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.004	
Se	ppb	0.5	15	14	0.9	1.8	4.8	21.8	37.0	52.0	0.0	13.3	17.4	137.5	0	0.9	0
Si	ppb	40	15	15	1480.0	1545.0	2250.0	3657.0	4396.8	4778.0	1367.0	2688.8	1231.9	2175	1367	2900	0
Sm	ppb	0.02	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00045	
Sn	ppb	0.05	15	5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.8	1.0	0.0	0.2	0.4	2.25	0	0.81	
Sr	ppb	0.01	15	15	814.5	1048.5	1390.0	1596.5	1915.4	2247.0	366.4	1338.8	490.6	5242.5	366.4	8100	0.83
Ta	ppb	0.02	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0025	
Tb	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00014	
Te	ppb	0.05	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Th	ppb	0.05	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0004	0
Ti	ppb	10	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	1	
Tl	ppb	0.01	15	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.6	0.0	0.1	0.4	0	0		0
Tm	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0	0.00017	
U	ppb	0.02	15	15	1.3	1.7	3.3	3.6	4.3	4.9	0.9	2.9	1.2	2.75	1.14	3.3	0.01
V	ppb	0.2	15	15	0.4	1.0	1.9	7.5	14.0	15.0	0.4	4.7	5.7	25	0.5	1.9	0.47
W	ppb	0.02	15	8	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	1.1	0.0	0.2	0.3	0	0.03	0.001	
Y	ppb	0.01	15	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.75	0.02	0.013	
Yb	ppb	0.01	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00082	
Zn	ppb	0.5	15	15	11.9	14.6	20.0	40.8	62.5	79.5	6.3	30.2	22.3	107.5	14.5	5	15
Zr	ppb	0.02	15	8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.4	0.0	0.1	0.1	0	0	0.026	

Tabella 7.7 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso ACME Ltd. Per le acque di laguna. In rosso evidenziati gli elementi con un basso numero di osservazioni superiori al limite di rilevabilità. In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

lagoon	Unità mis	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ag	ppb	0.05	6	3	0.0	0.0	0.8	2.5	5.4	7.9	0.0	2.0	3.1	16.5	0	0.28	0.01
Al	ppb	1	6	4	0.0	5.0	22.5	25.0	25.0	25.0	0.0	15.8	12.4	75	6	1	12.4
As	ppb	0.5	6	5	4.0	8.4	10.3	29.0	35.0	35.0	0.0	16.4	14.9	37.5	0.9	2.6	0.58
Au	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.75	0	0.011	
B	ppb	5	6	6	852.5	1112.5	2767.5	4137.5	5450.0	6725.0	725.0	3023.3	2357.1	2725	48	4450	0.5
Ba	ppb	0.05	6	6	28.0	32.8	45.9	50.2	73.3	95.0	27.5	49.0	24.6	31	35.11	21	0.83
Be	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0006	0
Bi	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.02	0
Br	ppb	5	6	6	8410.0	9476.3	29410.0	47637.5	51937.5	56025.0	8125.0	29919.2	22573.5	40325	108	67300	0
Ca	ppm	0.05	6	6	83.6	117.5	273.1	369.4	400.0	430.0	70.1	252.2	155.8	318	49.06	411	0.15
Cd	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.11	0.07
Ce	ppb	0.01	6	2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.75	0.01	0.0012	
Cl	ppm	1	6	6	2552.5	2912.5	8850.0	14431.3	15787.5	17000.0	2455.0	9063.3	6801.6	12400	37	19400	0.9
Co	ppb	0.02	6	3	0.0	0.0	0.3	0.5	0.6	0.6	0.0	0.3	0.3	0.5	0.2	0.39	0.36
Cr	ppb	0.5	6	1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.0	0.0	0.5	1.2	0	0	0.2	0
Cs	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.3	
Cu	ppb	0.1	6	5	6.3	13.1	15.8	17.3	19.8	22.0	0.0	13.9	7.5	30	2.5	0.9	0.5
Dy	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00091	
Er	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00087	
Eu	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0013	
Fe	ppb	10	6	6	120.0	178.8	375.0	432.5	1567.5	2700.0	110.0	687.5	995.8	300	41	3.4	0.04
Ga	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.03	
Gd	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0007	
Ge	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.06	
Hf	ppb	0.02	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.008	
Hg	ppb	0.1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.15	
Ho	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00022	
In	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
K	ppm	0.05	6	6	63.1	75.9	203.6	319.8	345.3	367.5	57.2	204.0	143.8	272.75	2.93	392	0.17
La	ppb	0.01	6	3	0.0	0.0	0.2	0.5	0.8	1.0	0.0	0.3	0.4	1	0	0.0029	
Li	ppb	0.1	6	6	39.0	42.5	92.8	141.9	160.0	175.0	39.0	97.3	60.5	160	3.4	170	0.1
Lu	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00015	
Mg	ppm	0.05	6	6	236.3	260.8	756.3	1211.8	1307.8	1397.5	231.2	766.8	556.1	889.5	15.79	1290	0.1
Mn	ppb	0.05	6	6	4.6	11.0	26.0	116.8	166.6	188.1	1.1	65.7	80.0	15.25	3.85	0.4	3.6
Mo	ppb	0.1	6	5	0.5	1.3	2.3	8.1	10.0	10.0	0.0	4.3	4.5	7.5	1	10	0.03
Na	ppm	0.05	6	6	1572.3	1802.0	5626.8	8956.9	9258.8	9537.5	1530.5	5485.9	4014.1	7367.5	18.6	10800	0.4
Nb	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.015	
Nd	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.0028	
Ni	ppb	0.2	6	4	0.0	0.5	3.5	5.0	363.8	722.5	0.0	122.4	294.0	7.5	3.4	6.6	10.36
P	ppb	20	6	6	452.5	553.8	1102.5	1531.3	8250.0	14950.0	410.0	3268.3	5743.4	0	87	88	0
Pb	ppb	0.1	6	2	0.0	0.0	0.0	1.9	2.5	2.5	0.0	0.8	1.3	7.5	0.1	0.03	0.6
Pd	ppb	0.2	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Pr	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00064	
Pt	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Rb	ppb	0.01	6	6	18.5	23.1	58.0	89.6	99.1	107.5	16.1	58.5	40.6	78.25	2.01	120	0.19
Re	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0084	
Rh	ppb	0.01	6	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.01		
Ru	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0007	
S	ppm	1	6	6	142.5	166.3	517.5	850.0	1175.0	1500.0	125.0	611.7	552.4	675	15	904	2.25
Sb	ppb	0.05	6	2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5	0.0	0.2	0.2	0	0.18	0.33	0.025
Sc	ppb	1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.004	
Se	ppb	0.5	6	6	26.5	29.8	90.3	148.1	175.0	200.0	26.0	97.3	76.0	137.5	0	0.9	0
Si	ppb	40	6	2	0.0	0.0	0.0	2066.3	2792.5	2830.0	0.0	930.8	1442.2	2175	1367	2900	0
Sm	ppb	0.02	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00045	
Sn	ppb	0.05	6	1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3.3	0.0	0.5	1.3	2.25	0	0.81	
Sr	ppb	0.01	6	6	1065.3	1365.3	3882.5	5889.4	6482.5	7057.5	953.6	3810.1	2744.9	5242.5	366.4	8100	0.83
Ta	ppb	0.02	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0025	
Tb	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00014	
Te	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Th	ppb	0.05	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0004	0
Ti	ppb	10	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	1	
Tl	ppb	0.01	6	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0	0		0
Tm	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0	0.00017	
U	ppb	0.02	6	5	0.4	0.9	2.1	2.7	2.9	3.0	0.0	1.8	1.2	2.75	1.14	3.3	0.01
V	ppb	0.2	6	6	8.0	9.6	22.5	35.0	67.5	100.0	6.5	32.7	35.4	25	0.5	1.9	0.47
W	ppb	0.02	6	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0	0.03	0.001	
Y	ppb	0.01	6	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.75	0.02	0.013	
Yb	ppb	0.01	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00082	
Zn	ppb	0.5	6	5	15.5	35.8	55.0	61.5	79.3	96.5	0.0	49.9	32.5	107.5	14.5	5	15
Zr	ppb	0.02	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.026	

Tabella 7.8 Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso ACME Ltd. Per le acque sotterranee. In rosso evidenziati gli elementi con un basso numero di osservazioni superiori al limite di rilevabilità In azzurro la media e la deviazione standard ed in verde delle analisi di riferimento.

PZ	Unità mis	Lim. Ril.	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Ag	ppb	0.05	83	45	0.0	0.0	0.7	5.4	8.8	57.0	0.0	4.3	8.8	16.5	0	0.28	0.01
Al	ppb	1	83	77	6.4	17.5	25.0	50.0	75.0	250.0	0.0	39.2	44.7	75	6	1	12.4
As	ppb	0.5	83	77	2.0	9.0	20.0	30.0	40.0	134.4	0.0	22.8	21.9	37.5	0.9	2.6	0.58
Au	ppb	0.05	83	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.1	0.4	2.75	0	0.011	
B	ppb	5	83	83	420.6	1432.5	1955.0	3312.5	4295.0	9875.0	57.0	2502.3	1887.7	2725	48	4450	0.5
Ba	ppb	0.05	83	83	78.7	133.9	226.9	486.6	799.8	1546.3	48.6	353.7	317.4	31	35.11	21	0.83
Be	ppb	0.05	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0006	0
Bi	ppb	0.05	83	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	43.5	0.0	1.0	5.2	0	0	0.02	0
Br	ppb	5	83	83	1416.0	6702.5	21110.0	33650.0	48100.0	67050.0	288.0	22304.8	17017.0	40325	108	67300	0
Ca	ppm	0.05	83	83	104.9	152.0	206.0	288.9	420.5	551.5	31.5	230.8	119.1	318	49.06	411	0.15
Cd	ppb	0.05	83	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0	0.11	0.07
Ce	ppb	0.01	83	29	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0	0.0	0.1	0.2	0.75	0.01	0.0012	
Cl	ppm	1	83	83	386.0	2160.0	5720.0	10175.0	14135.0	19700.0	100.0	6649.4	5140.4	12400	37	19400	0.9
Co	ppb	0.02	83	65	0.0	0.2	1.1	1.7	2.7	6.0	0.0	1.2	1.2	0.5	0.2	0.39	0.36
Cr	ppb	0.5	83	26	0.0	0.0	0.0	3.8	12.5	20.0	0.0	2.8	5.1	0	0	0.2	0
Cs	ppb	0.01	83	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1	0.75	0	0.3	
Cu	ppb	0.1	83	82	4.8	7.5	12.5	17.5	23.3	60.0	0.0	14.6	11.5	30	2.5	0.9	0.5
Dy	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00091	
Er	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00087	
Eu	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0013	
Fe	ppb	10	83	79	190.0	584.0	3000.0	6765.0	10595.0	47890.0	0.0	4865.0	7056.3	300	41	3.4	0.04
Ga	ppb	0.05	83	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.2	1.4	0	0	0.03	
Gd	ppb	0.01	83	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0007	
Ge	ppb	0.05	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.06	
Hf	ppb	0.02	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.008	
Hg	ppb	0.1	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.15	
Ho	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00022	
In	ppb	0.01	83	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	4.0	0.0	0.1	0.6	0	0		
K	ppm	0.05	83	83	25.1	58.3	117.6	185.4	289.5	428.5	4.7	133.7	100.6	272.75	2.93	392	0.17
La	ppb	0.01	83	51	0.0	0.0	0.2	0.5	1.7	17.5	0.0	0.9	2.7	1	0	0.0029	
Li	ppb	0.1	83	83	27.9	35.0	47.5	67.8	105.8	180.0	11.5	56.5	33.1	160	3.4	170	0.1
Lu	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00015	
Mg	ppm	0.05	83	83	85.3	211.0	494.1	781.1	1171.6	1594.0	30.9	552.8	398.2	889.5	15.79	1290	0.1
Mn	ppb	0.05	83	83	136.6	312.0	438.3	845.2	1335.9	2807.5	17.0	662.8	604.0	15.25	3.85	0.4	3.6
Mo	ppb	0.1	83	71	0.0	1.8	5.0	6.0	10.0	40.0	0.0	5.3	6.1	7.5	1	10	0.03
Na	ppm	0.05	83	83	353.2	1446.0	3574.0	6401.3	8751.0	13185.0	89.5	4210.3	3208.0	7367.5	18.6	10800	0.4
Nb	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.015	
Nd	ppb	0.01	83	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.0028	
Ni	ppb	0.2	83	62	0.0	1.5	7.5	32.0	80.0	685.0	0.0	32.9	83.7	7.5	3.4	6.6	10.36
P	ppb	20	83	83	304.0	585.0	1400.0	2025.0	3450.0	5470.0	59.0	1568.7	1308.2	0	87	88	0
Pb	ppb	0.1	83	58	0.0	0.0	2.0	3.0	7.0	20.0	0.0	2.8	4.1	7.5	0.1	0.03	0.6
Pd	ppb	0.2	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Pr	ppb	0.01	83	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00064	
Pt	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Rb	ppb	0.01	83	83	4.0	9.6	22.7	31.9	38.2	91.0	1.3	23.4	18.0	78.25	2.01	120	0.19
Re	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0084	
Rh	ppb	0.01	83	27	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	0	0.01		
Ru	ppb	0.05	83	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	6.0	0.0	0.2	0.7	0	0	0.0007	
S	ppm	1	83	75	25.0	77.5	170.0	350.0	638.0	1000.0	0.0	256.8	261.2	675	15	904	2.25
Sb	ppb	0.05	83	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.1	0	0.18	0.33	0.025
Sc	ppb	1	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.2	0	0	0.004	
Se	ppb	0.5	83	83	4.9	22.8	60.0	110.0	151.0	225.0	1.1	71.1	54.6	137.5	0	0.9	0
Si	ppb	40	83	81	3571.0	4897.5	6175.0	7650.0	8838.0	12400.0	0.0	6218.3	2260.7	2175	1367	2900	0
Sm	ppb	0.02	83	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00045	
Sn	ppb	0.05	83	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.0	0.0	0.1	0.5	2.25	0	0.81	
Sr	ppb	0.01	83	83	1389.9	2264.0	3493.0	5628.8	6576.0	9217.5	311.7	3846.4	2051.0	5242.5	366.4	8100	0.83
Ta	ppb	0.02	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0025	
Tb	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00014	
Te	ppb	0.05	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Th	ppb	0.05	83	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0004	0
Ti	ppb	10	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	1	
Tl	ppb	0.01	83	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.5	0.0	0.1	0.5	0	0		0
Tm	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0	0.00017	
U	ppb	0.02	83	54	0.0	0.0	0.8	2.6	8.3	29.7	0.0	2.6	4.7	2.75	1.14	3.3	0.01
V	ppb	0.2	83	82	2.4	5.5	14.0	27.5	35.0	45.0	0.0	17.6	13.0	25	0.5	1.9	0.47
W	ppb	0.02	83	23	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.3	0.0	0.1	0.2	0	0.03	0.001	
Y	ppb	0.01	83	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.75	0.02	0.013	
Yb	ppb	0.01	83	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00082	
Zn	ppb	0.5	83	81	52.4	81.5	113.0	239.5	414.0	5730.0	0.0	297.2	717.8	107.5	14.5	5	15
Zr	ppb	0.02	83	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	0.0	0.0	0.1	0	0	0.026	

Tabella 7.9: Tabella riassuntiva di confronto delle analisi svolte presso ACME Ltd per i diversi tipi di acque.

	Unità mis	Lim. Ril.	Sup		lagoon		Pz		Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
			Media	Dev. St.	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.				
Ag	ppb	0.05	0.6	1.0	2.0	3.1	4.3	8.8	16.5	0	0.28	0.01
Al	ppb	1	31.1	66.6	15.8	12.4	39.2	44.7	75	6	1	12.4
As	ppb	0.5	3.9	5.2	16.4	14.9	22.8	21.9	37.5	0.9	2.6	0.58
Au	ppb	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	2.75	0	0.011	
B	ppb	5	695.9	782.4	3023.3	2357.1	2502.3	1887.7	2725	48	4450	0.5
Ba	ppb	0.05	339.6	487.4	49.0	24.6	353.7	317.4	31	35.11	21	0.83
Be	ppb	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0006	0
Bi	ppb	0.05	1.0	2.8	0.0	0.0	1.0	5.2	0	0	0.02	0
Br	ppb	5	3916.9	5523.2	29919.2	22573.5	22304.8	17017.0	40325	108	67300	0
Ca	ppm	0.05	113.3	50.0	252.2	155.8	230.8	119.1	318	49.06	411	0.15
Cd	ppb	0.05	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.11	0.07
Ce	ppb	0.01	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.75	0.01	0.0012	
Cl	ppm	1	1074.3	1532.8	9063.3	6801.6	6649.4	5140.4	12400	37	19400	0.9
Co	ppb	0.02	0.4	0.3	0.3	0.3	1.2	1.2	0.5	0.2	0.39	0.36
Cr	ppb	0.5	1.6	2.9	0.5	1.2	2.8	5.1	0	0	0.2	0
Cs	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.75	0	0.3	
Cu	ppb	0.1	6.8	4.8	13.9	7.5	14.6	11.5	30	2.5	0.9	0.5
Dy	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00091	
Er	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00087	
Eu	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0013	
Fe	ppb	10	57.3	46.2	687.5	995.8	4865.0	7056.3	300	41	3.4	0.04
Ga	ppb	0.05	0.6	1.7	0.0	0.0	0.2	1.4	0	0	0.03	
Gd	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.0007	
Ge	ppb	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.06	
Hf	ppb	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.008	
Hg	ppb	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.15	
Ho	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00022	
In	ppb	0.01	0.7	2.1	0.0	0.0	0.1	0.6	0	0		
K	ppm	0.05	31.0	31.6	204.0	143.8	133.7	100.6	272.75	2.93	392	0.17
La	ppb	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.9	2.7	1	0	0.0029	
Li	ppb	0.1	29.0	14.4	97.3	60.5	56.5	33.1	160	3.4	170	0.1
Lu	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00015	
Mg	ppm	0.05	129.6	125.2	766.8	556.1	552.8	398.2	889.5	15.79	1290	0.1
Mn	ppb	0.05	64.6	67.7	65.7	80.0	662.8	604.0	15.25	3.85	0.4	3.6
Mo	ppb	0.1	4.3	5.5	4.3	4.5	5.3	6.1	7.5	1	10	0.03
Na	ppm	0.05	751.9	1052.7	5485.9	4014.1	4210.3	3208.0	7367.5	18.6	10800	0.4
Nb	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.015	
Nd	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0	0.0028	
Ni	ppb	0.2	4.4	3.2	122.4	294.0	32.9	83.7	7.5	3.4	6.6	10.36
P	ppb	20	351.2	253.8	3268.3	5743.4	1568.7	1308.2	0	87	88	0
Pb	ppb	0.1	0.8	1.5	0.8	1.3	2.8	4.1	7.5	0.1	0.03	0.6
Pd	ppb	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Pr	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00064	
Pt	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Rb	ppb	0.01	7.9	8.5	58.5	40.6	23.4	18.0	78.25	2.01	120	0.19
Re	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0084	
Rh	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0.01		
Ru	ppb	0.05	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.7	0	0	0.0007	
S	ppm	1	70.9	32.5	611.7	552.4	256.8	261.2	675	15	904	2.25
Sb	ppb	0.05	0.4	0.4	0.2	0.2	0.0	0.1	0	0.18	0.33	0.025
Sc	ppb	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0	0	0.004	
Se	ppb	0.5	13.3	17.4	97.3	76.0	71.1	54.6	137.5	0	0.9	0
Si	ppb	40	2688.8	1231.9	930.8	1442.2	6218.3	2260.7	2175	1367	2900	0
Sm	ppb	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00045	
Sn	ppb	0.05	0.2	0.4	0.5	1.3	0.1	0.5	2.25	0	0.81	
Sr	ppb	0.01	1338.8	490.6	3810.1	2744.9	3846.4	2051.0	5242.5	366.4	8100	0.83
Ta	ppb	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0025	
Tb	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0	0.00014	
Te	ppb	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0		
Th	ppb	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0004	0
Ti	ppb	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	1	
Tl	ppb	0.01	0.1	0.4	0.0	0.1	0.1	0.5	0	0		0
Tm	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0	0.00017	
U	ppb	0.02	2.9	1.2	1.8	1.2	2.6	4.7	2.75	1.14	3.3	0.01
V	ppb	0.2	4.7	5.7	32.7	35.4	17.6	13.0	25	0.5	1.9	0.47
W	ppb	0.02	0.2	0.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0	0.03	0.001	
Y	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.75	0.02	0.013	
Yb	ppb	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.00082	
Zn	ppb	0.5	30.2	22.3	49.9	32.5	297.2	717.8	107.5	14.5	5	15
Zr	ppb	0.02	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0	0.026	

7.2.3 Risultati delle analisi svolte nei laboratori di Chimica inorganica del C.I.R.S.A. e di geochimica del Dipartimento di Geologia dell'Università di Bologna

Come mostra la Tabella 7.10, i 38 campioni analizzati (gli unici a disposizione per le analisi nei laboratori bolognesi), hanno un contenuto di macroelementi marini, infatti, Cl e Na hanno rispettivamente al 25°percentile valori oltre 2000 e oltre 1000 ppm.

Da un rapido confronto con i valori misurati per il Mare Adriatico, oltre il 10% dei campioni possiede un contenuto di sali maggiori dell'acqua di mare stessa.

Anche se sono stati inclusi campioni dei diversi tipi di acque anche in questo set di analisi, il basso numero non consente di entrare nel dettaglio come già visto nei paragrafi precedenti. I dati verranno discussi in una sezione successiva, dedicata alla confronto tra i risultati ottenuti nei tre laboratori.

Tabella 7.10: Riassunto dei risultati delle analisi svolte presso i laboratori dell'Università di Bologna; in verde alcuni campioni di riferimento.

	Unità mis	N° oss.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
Na	ppm	38	265.6	1104.4	2463.0	3852.1	6507.3	8693.5	17.2	2906.0	2462.6	6386	11.34	10800	1
K	ppm	38	25.0	60.4	97.8	168.4	303.8	391.6	3.2	128.0	106.5	240	1.865	392	0.54
Ca	ppm	38	57.9	143.7	187.7	291.1	380.1	403.1	34.7	209.5	109.0	292	41.7	411	2.87
Mg	ppm	38	41.5	175.6	303.9	515.6	754.0	1048.0	12.8	365.0	286.7	837	11.3	1290	0.25
HCO ₃ [*]	ppm	38	301.1	448.5	578.5	781.3	835.2	868.0	188.0	580.7	207.1	242	188		6.2
F	ppm	37	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	2.6	0.1	0.8	0.5				
Cl	ppm	38	354.9	2131.8	4173.7	7175.2	11866.5	16701.9	22.7	5284.4	4612.8	12302	19.7	19400	1.76
NO ₂	ppm	4	5.4	6.3	7.5	9.9	12.8	14.8	4.8	8.7	4.3				
Br	ppm	37	1.4	6.9	15.0	25.0	40.4	54.1	0.3	18.0	15.1	44.43	1.25	67.3	
NO ₃	ppm	38	0.5	1.0	3.3	22.8	41.8	142.9	0.3	15.1	26.9	3.5556	3.817		2
SO ₄	ppm	38	140.9	275.9	438.2	1246.1	1484.0	2299.6	37.1	742.1	628.6	1672	33	2712	2.14

7.2.4 Risultati delle analisi isotopiche svolte presso l'Università di Amsterdam

Anche i risultati delle analisi isotopiche sono riportati in maniera sintetica e suddivisi per tipologia di acque: acque superficiali (Tabella 7.11) acque di laguna (Tabella 7.12), acque sotterranee (Tabella 7.13); ed in forma riassuntiva e per un più facile confronto in Tabella 7.14. I dati variano complessivamente tra -9.0 e 0.2‰ per $\delta^{18}\text{O}$ e -68.4 e -5.5‰ per $\delta^2\text{H}$. Le acque superficiali mostrano i valori tendenzialmente più negativi, come lecito attendersi vista l'origine prevalente delle acque dolci, mentre le acque di laguna e le acque sotterranee mostrano intervalli di variazione molto più estesi ed una maggiore frequenza di osservazioni solo debolmente impoverite in isotopo pesante, più simili a valori di acqua di mare. Alcune osservazioni sono superiori rispetto a quanto osservato nell'acqua di mare campionata in questo progetto.

Nelle tabelle sottostanti, i dati di riferimento (verde) derivano rispettivamente:

V-SMOW* International Atomic Energy Agency (IAEA)

Pioggia Comacchio* Longinelli, A., et al., 2006

Pioggia Bologna* Cortecchi G., Dinelli E., Mussi M., 2008.

Tabella 7.11 Tabella riassuntiva delle analisi isotopiche svolte sui campioni di acque superficiali; in verde alcuni dati di riferimento.

SUP		N° oss.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	CER	Mare Adriatico	V-SMOW *	Pioggia Comacchio*	Pioggia Bologna*
d18O (‰ vs VSMOW)	Media	15	-8.8	-8.3	-7.4	-7.1	-6.2	-4.7	-9.0	-7.5	1.2	-9.0	-2.8	0.0	-8.2	-12.3 / -2.9
dH (‰ vs VSMOW)	Media	15	-55.3	-53.7	-50.4	-46.5	-40.7	-37.4	-68.4	-49.9	7.5	-68.4	-18.2	0.0	-56.0	-87.2 / -29.6

Tabella 7.12 Tabella riassuntiva delle analisi isotopiche svolte sui campioni di acque di laguna; in verde alcuni dati di riferimento.

lagoon		N° oss.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	CER	Mare Adriatico	V-SMOW *	Pioggia Comacchio*	Pioggia Bologna*
d18O (‰ vs VSMOW)	Media	6	-5.2	-3.7	-2.8	-2.2	-1.7	-1.4	-6.6	-3.3	1.8	-9.0	-2.8	0.0	-8.2	-12.3 / -2.9
dH (‰ vs VSMOW)	Media	6	-35.8	-27.1	-23.8	-15.6	-11.3	-9.5	-43.6	-23.7	12.1	-68.4	-18.2	0.0	-56.0	-87.2 / -29.6

Tabella 7.13 Tabella riassuntiva delle analisi isotopiche svolte sui campioni di acque sotterranee; in verde alcuni dati di riferimento.

PZ		N° oss.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	CER	Mare Adriatico	V-SMOW *	Pioggia Comacchio*	Pioggia Bologna*
d18O (‰ vs VSMOW)	Media	206	-7.5	-6.8	-5.3	-3.2	-1.2	0.2	-8.6	-4.8	2.3	-9.0	-2.8	0.0	-8.2	-12.3 / -2.9
dH (‰ vs VSMOW)	Media	206	-49.1	-44.6	-36.0	-22.9	-10.8	-5.5	-59.6	-33.1	13.8	-68.4	-18.2	0.0	-56.0	-87.2 / -29.6

Tabella 7.14 Tabella di confronto delle medie osservate nei diversi tipi di acqua campionati in verde alcuni dati di riferimento.

	Sup		lagoon		Pz		CER	Mare Adriatico	V-SMOW *	Pioggia Comacchio*	Pioggia Bologna*
	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.					
d18O (‰ vs VSMOW)	-7.5	1.2	-3.3	1.8	-4.8	2.3	-9.0	-2.8	0.0	-8.2	-12.3 / -2.9
dH (‰ vs VSMOW)	-49.9	7.5	-23.7	12.1	-33.1	13.8	-68.4	-18.2	0.0	-56.0	-87.2 / -29.6

7.2.5 Confronti tra laboratori

Passiamo ora ad un confronto tra i risultati delle analisi dei macro-elementi provenienti dai diversi laboratori.

Il laboratorio C.R.S.A. Med Ingegneria (di seguito MED) ha analizzato tutti i campioni raccolti (229) e dal bilancio ionico emerge che 21 campioni non hanno un bilancio ionico soddisfacente (< 5%), nel caso specifico la differenza è prevalentemente sbilanciata verso le cariche negative.

Il laboratorio canadese (di seguito CANADA), ha analizzato 105 campioni, e per Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, NO₃ e Br è possibile il confronto con i medesimi risultati di MED, che per gli stessi elementi può essere esteso anche ai 38 campioni analizzati nei laboratori interni all'Università di Bologna (di seguito BORA).

Il primo controllo sui risultati è stato quello di proiettare sul grafico i singoli valori ottenuti dai diversi laboratori. In questa tipologia di grafico (Figura 7.1, una selezione) si confrontano 2

laboratori alla volta, rappresentando con i punti blu i valori dell'elemento per il medesimo campione; se il dato coincidesse, si disporrebbe esattamente sulla retta nera, tanto maggiore è lo spostamento dalla retta e tanto maggiore sarà il valore per lo stesso campione. Per motivi di spazio, in Figura 7.1 sono mostrati solamente i grafici di Ca, Na e Br.

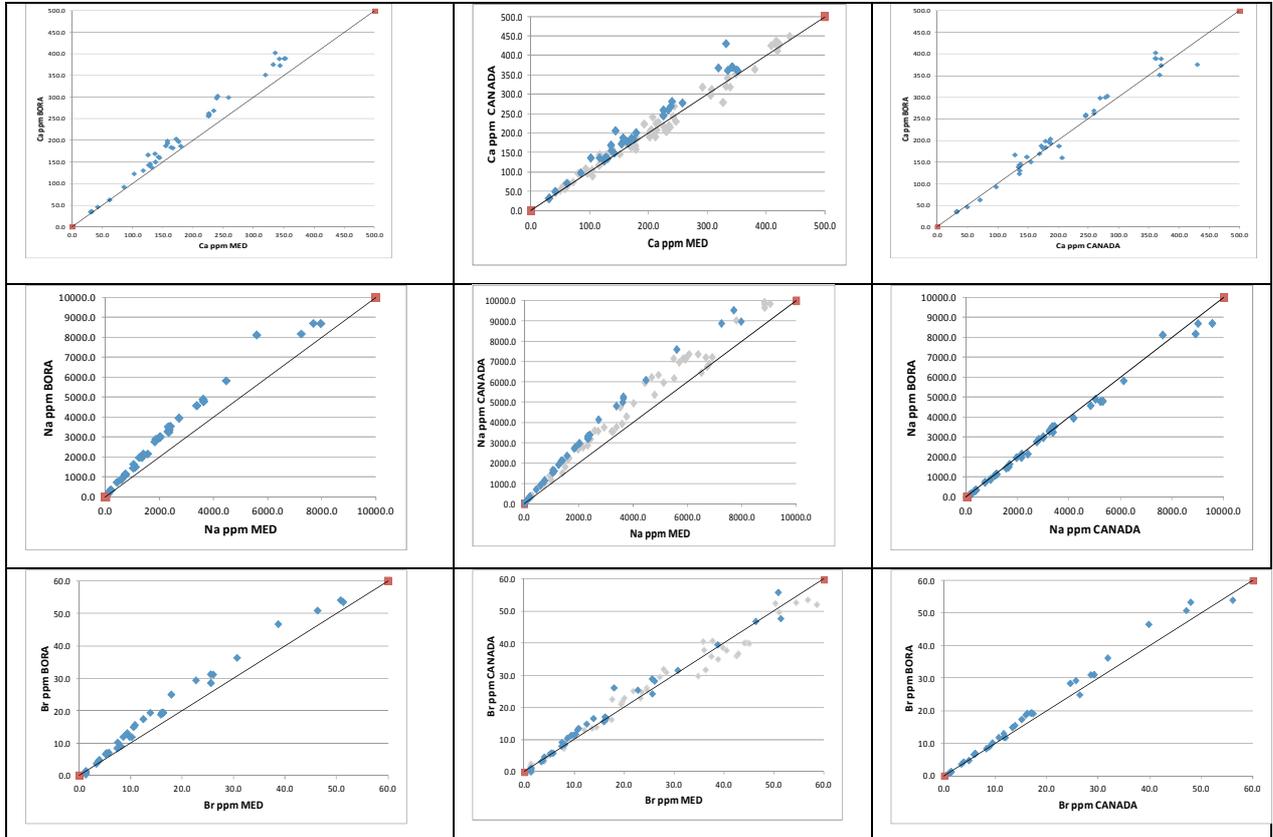


Figura 7.1 Grafici di confronto dei risultati chimici eseguiti nei tre diversi laboratori; in blu figurano i dati, mentre la retta nera rappresenta la coincidenza perfetta dei dati.

Il numero di analisi di controllo eseguito nei laboratori universitari (BORA) funge da fattore limitante per il confronto, in quanto, solo 38 campioni si possono comparare con BORA, mentre sono 105 campioni utilizzati nel confronto CANADA-MED anche compaiono in colore blu solamente i 38 campioni BORA (in grigio i restanti 67 campioni).

Dalla Figura 7.1 si può facilmente evincere che i risultati MED e BORA sono i maggiormente distanti (basso numero di punti), mentre i dati canadesi mostrano valori intermedi e mostrano scarti minori nei grafici di confronto con gli altri tipi. In particolare, nonostante il basso numero di dati confrontati, CANADA-BORA mostra un'ottima affinità nei risultati.

Un'altra metodologia di confronto ha previsto l'utilizzo del software R con l'applicazione GCDkit; sono stati confrontati tutti i risultati e in Figura 7.2 sono mostrati alcuni semplici parametri statistici.

	n	NA	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Ca MED	38	0	182	96	30	127	160	237	352
Ca CANADA	38	0	203	106	32	136	181	266	430
Ca BORA	38	0	210	109	35	144	188	291	403
Mg MED	38	0	315	263	11	150	254	433	1021
Mg CANADA	38	0	411	344	16	188	335	549	1398
Mg BORA	38	0	365	287	13	176	304	516	1048
Na MED	38	0	2160	2100	11	725	1692	2639	7967
Na CANADA	38	0	2981	2584	19	1108	2543	3962	9538
Na BORA	38	0	2906	2463	17	1104	2463	3852	8694
K MED	38	0	77	77	2	30	56	100	299
K CANADA	38	0	109	95	3	50	80	145	368
K BORA	38	0	128	106	3	60	98	168	392
SO4 MED	38	0	668	539	33	241	525	1092	1998
SO4 CANADA	38	0	814	665	45	291	518	1380	2550
SO4 BORA	38	0	742	629	37	276	438	1246	2300
Cl MED	38	0	4184	4105	20	1527	3078	5212	15155
Cl CANADA	38	0	4685	4259	37	1802	3750	6574	17000
Cl BORA	38	0	5284	4613	23	2132	4174	7175	16702
NO3 MED	38	0	9	21	1	1	1	3	117
NO3 BORA	38	0	15	27	0	1	3	23	143
Br MED	38	0	15	14	1	5	10	18	51
Br CANADA	38	0	16	14	0	6	12	23	56
Br BORA	37	1	18	15	0	7	15	25	54

Figura 7.2 Sintesi dei risultati statistici ottenuti dal confronto dei dati chimici per i tre laboratori presso cui sono state fatte le analisi

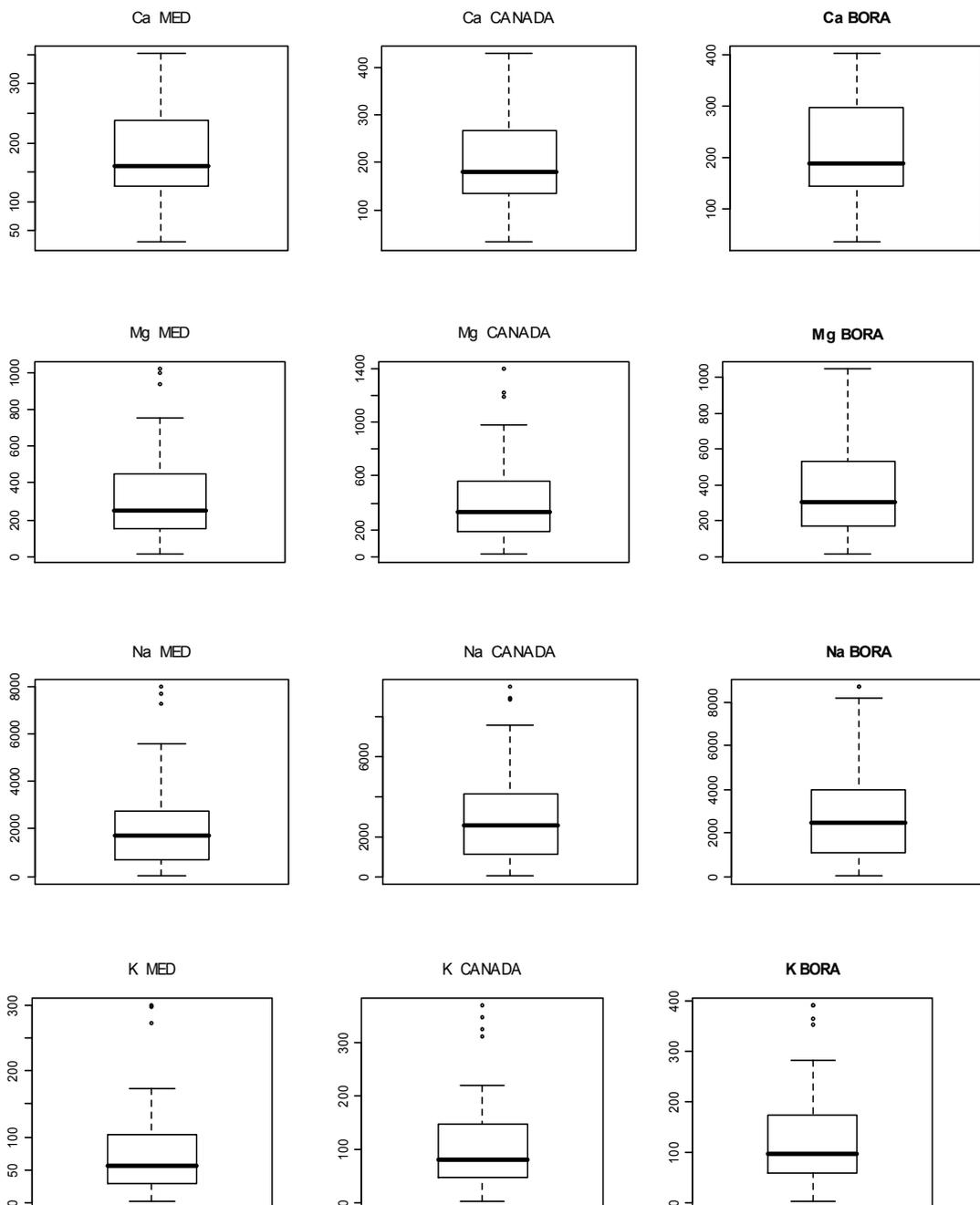
Attraverso lo stesso *software* sono stati costruiti poi *box plot* per ciascun elemento analizzato e per ogni laboratorio, considerando solamente i 38 campioni comuni (Figura 7.3).

Una breve delucidazione relativa al significato statistico dei *box plot*:

la linea interna alla scatola rappresenta la mediana della distribuzione. Le linee estreme della scatola rappresentano il primo ed il terzo quartile. La distanza tra il terzo ed il primo quartile, Distanza interquartile, è una misura della dispersione della distribuzione. Il 50% delle osservazioni si trovano comprese tra questi due valori. Se l'intervallo interquartile è piccolo, tale metà delle osservazioni si trova fortemente concentrata intorno alla mediana; all'aumentare della distanza interquartile aumenta la dispersione dei dati intorno alla mediana. Le distanze tra ciascun quartile e la mediana forniscono informazioni relativamente alla forma della distribuzione. Se una distanza è diversa dall'altra allora la distribuzione è asimmetrica. Le linee che si allungano dai bordi della scatola (Baffi) individuano gli intervalli in cui sono posizionati i valori rispettivamente minori di Q1 e maggiori di Q3; i punti estremi dei "baffi" evidenziano i valori adiacenti. Se si indica con $r = (Q3-Q1)$ la differenza interquartile, il valore adiacente inferiore (VAI) è il valore più piccolo tra le osservazioni che risulta maggiore o uguale a $Q1-1,5r$. Il valore adiacente superiore (VAS), invece, è il valore più grande tra le osservazioni che risulta minore o uguale a $Q3+1,5r$. Pertanto se gli estremi della distribuzione sono contenuti tra

Q1-1,5r e Q3+1,5r essi coincideranno con gli estremi dei "baffi", altrimenti come estremi verranno usati i valori Q1-1,5r e Q3+1,5r.

I valori esterni a questi limiti (esterni rispetto ai valori adiacenti, chiamati in genere valori anomali), vengono segnalati individualmente nel box-plot per meglio evidenziarne la presenza e la posizione. Questi valori infatti costituiscono una "anomalia" rispetto alla maggior parte dei valori osservati e pertanto è necessario identificarli per poterne analizzare le caratteristiche e le eventuali cause che li hanno determinati.



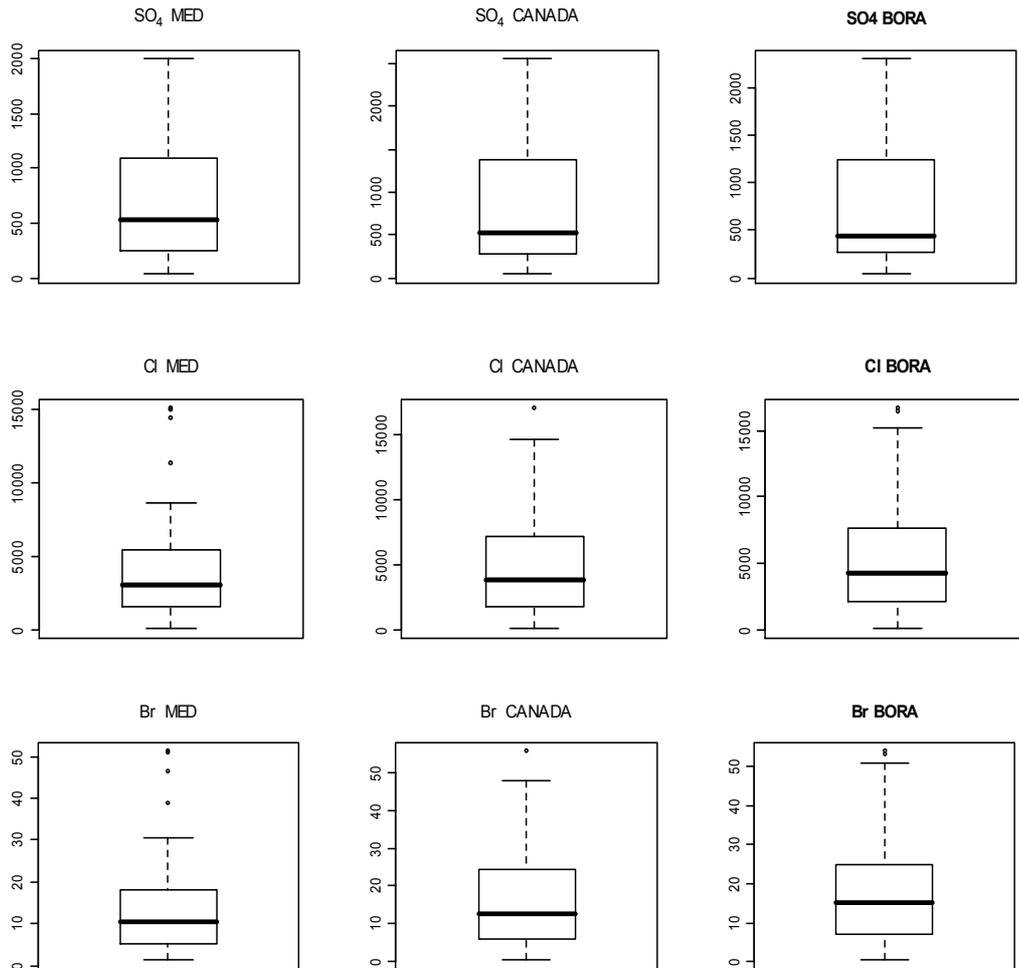


Figura 7.3 Rappresentazione grafica dell'analisi statistica eseguita attraverso la creazione di *Box plot* per gli elementi comuni a tre laboratori di analisi.

Dalla Figura 7.2 possiamo notare come i risultati dei tre laboratori abbiano una tendenza costante per tutti gli elementi: le analisi MED restituiscono costantemente valori inferiori, le analisi BORA hanno costantemente valori superiori, mentre le analisi canadesi portano a risultati intermedi tra i precedenti. Un'altra osservazione possibile è che, in apparenza, esistano differenze importanti tra i laboratori, specialmente per quanto riguarda i cationi. Più in dettaglio, se per Ca e Mg le differenze a livello di media, di 25° e 75° percentile sono attorno al 10-15% per Na e K tali distanze subiscono un incremento notevole posizionandosi attorno al 30%. Per Na e K, inoltre, i valori di BORA e CANADA si avvicinano molto tenendo pesantemente lontano il valore MED. Per gli anioni tali differenze tendono ad attenuarsi ed in particolare per bromuri e nitrati i valori medi, del 25° e 75° percentile tendono ad allinearsi.

Dall'analisi dei *Box plot*, però, le differenze trattate sinora vengono notevolmente ridotte, in quanto, il confronto tra le dimensioni del Box, la posizione della mediana e dei rispettivi baffi non emergono differenze significative (occorre fare attenzione però ad alcune scale verticali differenti nei box plot soprastanti). Possiamo perciò notare come Br, Cl e Solfati abbiano dei

grafici quasi sovrapponibili che indicano la totale assenza di differenze statistiche, in quanto anche la distanza interquartile risulta costante. Minime differenze si notano nella lunghezza dei baffi che indicano come alle alte concentrazioni si hanno *range* di variazioni maggiori.

Più evidenti, anche se non statisticamente rilevanti, le differenze tra i cationi, che vedono Mg, Na e K, riportare i risultati meno simili, con la presenza anche di alcuni campioni “anomali” (oltre 1,5 volte la distanze tra la mediana e 1° e 3° quartile).

Possiamo concludere che l’analisi statistica non ha mostrato differenze rilevanti tra le analisi dei principali macroelementi eseguite appositamente in tre laboratori diversi, per ottenere un minimo controllo sui dati restituitici.

Risulta importante fare emergere che, anche le analisi interne all’Università di Bologna, eseguite in tempi diversi e in laboratori diversi, restituiscono un database di dati del tutto confrontabile con quelli ottenuti presso laboratori certificati.

Il database che andremo d’ora in poi ad utilizzare per le successive analisi all’interno della tesi è quello fornitoci dal laboratorio canadese, che risulta essere il più completo, in quanto ha analizzato i campioni provenienti da tutte le campagne di monitoraggio.

7.3 Risultati transetto e zona MAR

A scala di transetto e più in dettaglio della zona MAR, sono riportate di seguito le tabelle riassuntive delle analisi chimiche e dei parametri raccolti in campo. Come concluso nel precedente paragrafo, i risultati utilizzati si riferiscono alle analisi svolte presso il laboratorio canadese (Acme Lab – Vancouver).

Osservando le Tabella 7.16, Tabella 7.17, Tabella 7.15 emerge come il bilancio ionico (BI) sia generalmente prossimo allo zero, con valori tendenzialmente negativi, ma in ogni caso, al di sotto del 5% di errore per oltre il 90% dei campioni analizzati. Questo indica il quasi equilibrio tra le specie disciolte e quindi conferma la bontà e l'affidabilità del dato chimico.

Mediamente il 25% dei campioni, per tutte e tre le stagioni di campionamento, mostrano concentrazioni di Cl e Na al di sopra dell'acqua di Mare Adriatico; questo testimonia che in acquifero sono presenti acque con un contenuto di sali, in alcuni casi maggiori rispetto al nostro riferimento per la contaminazione salina. Stesse valutazioni si traggono per il Mg e Br, mentre per i solfati, a differenza delle attese, solo il 10% supera il valore del Mare Adriatico. Dal confronto delle tabelle 15, 16 e 17, si evince che per i solfati vi è una forte contrazione nelle sue concentrazioni andando verso periodi estivi (lug-2012), per i quali si rileva un valore massimo registrato nei 29 PdC, che si attesta a circa 750ppm, circa la metà della concentrazione in Adriatico.

Questo quadro sui macro-elementi ci indica un'estesa contaminazione di sali marini in acquifero; infatti meno del 10% dei campioni del transetto mostra un contenuto di ioni principali prossimi al nostro riferimento continentale rappresentato dalle acque del Canale Emiliano Romagnolo ed anche nei casi migliori abbiamo concentrazioni di un ordine di grandezza superiori al CER.

I parametri chimico-fisici come la salinità e la conducibilità elettrica ci confermano, ovviamente, quanto mostrato da anioni e cationi; si va per la salinità da 0.5 a circa 24, senza grosse variazioni stagionali, da 6 a 8 per il ph, anch'esso abbastanza costante stagionalmente. Eh e temperatura, risultano invece, i più legati agli andamenti stagionali; il primo va da -10 a -190 per dicembre 2010, da -12 a -210 per aprile 2011 e scende ad un intervallo che va da +80 a -170 in luglio 2012. Anche la temperatura delle acque sotterranee segue l'evoluzione stagionale, difatti, si va da 8 a 13 in dicembre, ai 12 - 18 in primavera, fino ai 14 - 22 in estate.

Dal confronto stagionale per i valori medi delle acque sotterranee del transetto e della zona MAR (Tabella 7.18) possiamo notare come tendenzialmente con l'avanzare della stagione estiva le concentrazioni di tutti gli elementi indagati tenda a scendere; tale diminuzione si evidenzia maggiormente in Na, Mg, cloruri e solfati. Anche tra i parametri chimico-fisici misurati in campo si nota questa tendenza in particolare per la salinità e per l'Eh, stabile invece il pH.

Tabella 7.15 Riassunto dei risultati chimici delle acque sotterranee del transetto per il monitoraggio di dicembre 2010; in verde alcuni campioni di riferimento, in grigio i parametri fisici.

Dic_2010	Lim. Rilv	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
B.I.		33		-4,4	-2,6	-1,6	0,6	4,1	6,3	-7,2	-1,0	3,1				
Na ppm	5	33	33	221,4	2319,0	3632,0	6790,0	8618,4	9036,0	50,9	4426,4	2910,6	6386,0	11,3	10800,0	1,0
K ppm	0,5	33	33	39,3	103,4	129,7	208,3	289,4	309,0	10,1	150,8	86,5	240,0	1,9	392,0	0,5
Ca ppm	1	33	33	141,3	170,2	211,2	326,9	417,4	503,0	104,0	244,8	107,5	292,0	41,7	411,0	2,9
Mg ppm	0,5	33	33	121,5	312,8	588,9	888,2	1124,0	1203,0	52,0	625,8	362,2	837,0	11,3	1290,0	0,3
HCO3 ppm	1	33	33	379,8	647,0	745,0	853,0	1158,2	1468,0	291,0	760,8	291,4	242,0	188,0		6,2
SO4 ppm	1	33	33	50,8	357,0	574,6	1135,2	2004,0	2182,6	1,3	773,7	675,5	1672,0	33,0	2712,0	2,1
Cl ppm	1	33	33	259,5	3641,4	7144,1	13161,1	16355,7	17199,5	99,7	8510,3	5696,5	12302,0	19,7	19400,0	1,8
NO3 ppm	0,1	33	33	1,3	1,3	1,3	1,3	4,0	117,0	1,3	6,7	22,0	3,6	3,8		2,0
Br ppm	1	33	33	1,8	14,4	25,5	46,9	54,0	61,2	1,3	29,0	19,1	44,4	1,3	67,3	
T °C		33	33	10,2	11,3	12,2	12,6	12,7	13,2	8,4	11,8	1,1				
CE mS/cm		33	33	3,3	15,2	26,7	37,9	43,7	44,1	1,3	25,4	14,1	38,9	0,4	66,0	1,5
SALINITA' g/l		33	33	1,4	7,2	13,4	19,6	23,0	23,2	0,5	12,9	7,5	20,2	0,1	35,0	0,6
pH		33	33	6,0	7,0	7,5	7,6	7,7	8,7	5,9	7,2	0,7	8,3	8,4	8,0	5,0
Eh		33	33	-179,0	-170,1	-146,2	-129,0	-43,6	-10,0	-190,0	-134,6	50,9	51,0	185,0	200,0	200,0

Tabella 7.16 Riassunto dei risultati chimici delle acque sotterranee del transetto per il monitoraggio di aprile 2011; in verde alcuni campioni di riferimento, in grigio i parametri fisici.

Apr_11	Lim. Rilv	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
B.I.		32		-4,5	-3,2	-2,4	-0,6	3,4	4,7	-5,5	-1,6	2,8				
Na ppm	5	32	32	241,5	1851,7	3191,7	6885,6	8719,0	9452,8	64,0	3901,7	2999,3	6386,0	11,3	10800,0	1,0
K ppm	0,5	32	32	40,8	70,9	119,8	241,3	350,6	367,6	18,2	150,9	108,8	240,0	1,9	392,0	0,5
Ca ppm	1	32	32	79,5	114,2	185,7	254,0	408,2	989,8	38,3	228,3	181,6	292,0	41,7	411,0	2,9
Mg ppm	0,5	32	32	64,2	185,6	370,2	869,7	1060,1	1197,4	20,5	490,1	372,0	837,0	11,3	1290,0	0,3
HCO3 ppm	1	32	32	294,2	397,0	666,0	843,0	954,0	1168,0	244,0	640,4	257,4	242,0	188,0		6,2
SO4 ppm	1	32	32	60,4	167,4	360,8	1328,3	1997,3	2315,5	20,0	704,0	778,5	1672,0	33,0	2712,0	2,1
Cl ppm	1	32	32	370,7	3337,8	6150,6	14147,9	16050,5	18098,6	116,7	7524,5	5965,3	12302,0	19,7	19400,0	1,8
NO3 ppm	0,1	32	32	0,4	0,6	0,9	1,4	5,6	24,5	0,0	2,8	5,4	3,6	3,8		2,0
Br ppm	1	32	32	2,8	12,6	21,1	47,0	51,5	60,3	0,6	25,3	19,1	44,4	1,3	67,3	
T °C		32	32	13,0	13,8	14,7	15,5	17,2	18,7	12,5	14,9	1,5				
CE mS/cm		32	32	2,0	9,7	16,6	33,8	42,3	43,0	0,9	19,5	14,0	38,9	0,4	66,0	1,5
SALINITA' g/l		32	32	0,9	4,5	7,9	17,3	22,2	22,5	0,4	9,8	7,4	20,2	0,1	35,0	0,6
pH		32	32	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,1	6,8	7,5	0,3	8,3	8,4	8,0	5,0
Eh		32	32	-178,1	-158,1	-123,5	-72,0	-55,5	-11,9	-210,0	-114,3	52,4	51,0	185,0	200,0	200,0

Tabella 7.17 Riassunto dei risultati chimici delle acque sotterranee del transetto per il monitoraggio di luglio 2012; in verde alcuni campioni di riferimento, in grigio i parametri fisici.

Lug_12	Lim. Rilv	N° oss.	N°oss > Lim. Ril.	10° perc.	25° perc.	Mediana/ 50° perc.	75° perc.	90° perc.	Max	Min	Media	Dev. St.	Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
B.I.		29		-5,2	-4,7	-3,0	-0,5	2,3	3,9	-11,7	-2,5	3,4				
Na ppm	5	29	29	115,0	200,0	2050,0	6175,0	8430,0	9050,0	100,1	3159,1	3078,7	6386,0	11,3	10800,0	1,0
K ppm	0,5	29	29	11,0	68,0	100,0	181,5	260,0	300,0	10,0	122,0	90,2	240,0	1,9	392,0	0,5
Ca ppm	1	29	29	67,5	85,0	107,4	181,0	187,0	214,0	67,5	126,0	49,3	292,0	41,7	411,0	2,9
Mg ppm	0,5	29	29	37,0	110,0	200,0	802,5	1060,0	1100,0	35,0	389,8	390,9	837,0	11,3	1290,0	0,3
HCO3 ppm	1	29	29	351,2	520,0	652,0	768,0	1145,6	1224,0	336,0	669,7	249,1	242,0	188,0		6,2
SO4 ppm	1	29	29	18,0	75,0	120,0	390,0	630,0	750,0	10,0	238,8	243,9	1672,0	33,0	2712,0	2,1
Cl ppm	1	29	29	222,3	583,3	3577,7	12317,4	15411,4	16351,8	202,5	5953,1	5830,7	12302,0	19,7	19400,0	1,8
NO3 ppm	0,1	29	9	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3	1,9	0,0	0,3	0,6	3,6	3,8		2,0
Br ppm	1	29	29	0,8	2,3	11,0	33,6	46,8	49,8	0,7	17,9	17,3	44,4	1,3	67,3	
T °C		29		15,6	16,6	17,8	19,2	19,3	22,6	14,7	17,8	1,8				
CE mS/cm		29		1,1	2,6	11,1	37,0	38,6	39,8	1,1	16,5	14,7	38,9	0,4	66,0	1,5
SALINITA' g/l		29		0,5	1,3	6,0	22,5	24,9	26,4	0,5	10,0	9,7	20,2	0,1	35,0	0,6
pH		29		7,4	7,5	7,6	7,8	7,8	7,9	7,4	7,6	0,2	8,3	8,4	8,0	5,0
Eh		29		-161,0	-151,0	-120,0	-50,0	34,4	80,0	-172,0	-95,6	71,7	51,0	185,0	200,0	200,0
Fe ferroso ppm	0,1	29	29	0,2	0,4	1,4	2,4	3,3	4,0	0,0	1,6	1,2				
Fe TOT ppm	0,1	29	29	0,2	0,7	5,0	7,4	10,4	22,4	0,1	5,3	4,9				
Ammonio ppm	0,1	29	23	0,0	0,3	9,6	12,0	40,6	62,5	0,0	14,3	17,3				
Fosfati ppm	0,01	29	25	0,0	0,1	0,4	3,6	4,6	19,8	0,0	2,3	4,1				
Solfuri ppm	0,01	29	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0				
Nitriti ppm	0,01	29	19	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0				

Tabella 7.18 Confronto di medie e Dev. St. dei macroelementi e dei parametri chimico-fisici misurati nel transetto e nella area MAR, per le diverse campagne di monitoraggio.

	Dic_2010		Apr_2011		Lug_2012		Mare Adriatico	CER	Mare generico*	Pioggia generica*
	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.	Media	Dev. St.				
Na ppm	4426,4	2910,6	3901,7	2999,3	3159,1	3078,7	6386,0	11,3	10800,0	1,0
K ppm	150,8	86,5	150,9	108,8	122,0	90,2	240,0	1,9	392,0	0,5
Ca ppm	244,8	107,5	228,3	181,6	126,0	49,3	292,0	41,7	411,0	2,9
Mg ppm	625,8	362,2	490,1	372,0	389,8	390,9	837,0	11,3	1290,0	0,3
HCO3 ppm	760,8	291,4	640,4	257,4	669,7	249,1	242,0	188,0		6,2
SO4 ppm	773,7	675,5	704,0	778,5	238,8	243,9	1672,0	33,0	2712,0	2,1
Cl ppm	8510,3	5696,5	7524,5	5965,3	5953,1	5830,7	12302,0	19,7	19400,0	1,8
NO3 ppm	6,7	22,0	2,8	5,4	0,3	0,6	3,6	3,8		2,0
Br ppm	29,0	19,1	25,3	19,1	17,9	17,3	44,4	1,3	67,3	
T °C	11,8	1,1	14,9	1,5	17,8	1,8				
CE mS/cm	25,4	14,1	19,5	14,0	16,5	14,7	38,9	0,4	66,0	1,5
SAL. g/l	12,9	7,5	9,8	7,4	10,0	9,7	20,2	0,1	35,0	0,6
pH	7,2	0,7	7,5	0,3	7,6	0,2	8,3	8,4	8,0	5,0
Eh	-134,6	50,9	-114,3	52,4	-95,6	71,7	51,0	185,0	200,0	200,0

8 ELABORAZIONE DATI

8.1 Introduzione

Le mappe e le sezioni che verranno presentate di seguito sono state eseguite mediante il software *EnviroInsite*, che è un programma di *contouring* e creazione di mappe e superfici tridimensionali. Esso permette l'interpolazione di un *dataset* ampio scegliendo tra diversi tipi di algoritmi. Nello specifico, dopo un'attenta analisi dei vari metodi è stato scelto il metodo probabilistico chiamato *kriging*. Diversi autori ritengono infatti, che esso sia uno dei metodi migliori per l'interpolazioni di dati sparsi ed in particolare nell'ambito delle applicazioni geoscientifiche (Burrough 1998, KNMI 2009, Mitchell 2008 e Schuurmans 2007). I parametri utilizzati per il *kriging* durante le interpolazioni sono riportati in Figura 8.1.

The screenshot shows the 'Kriging' interpolation panel in the software. It includes the following elements:

- Search Parameters:** Search Radius (2640), Default Value (-9999), and a checkbox for 'Use default value'.
- Kriging Parameters:** Method (Spherical), Sill, c (10), Nugget (0), Range (a max: 1690, a min: 1690, a vert: 52.8125), and angle, degrees clockwise (0).
- Mathematical Formulas:**
 - Spherical:**
$$y = \frac{ch}{a} \left[3/2 - 1/2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right]$$
 - Exponential:**
$$y = c \left(1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right)$$
 - Gaussian:**
$$y = c \left[1 - \exp \left(- \left(3 \frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$$
 - Power:**
$$y = kh^a$$
 - Hole:**
$$y = c \left[1 - \cos \left(\frac{h\pi}{a} \right) \right]$$

Figura 8.1 Estrapolazione del pannello di gestione dell'interpolatore *Kriging* nel software *EnviroInsite*.

8.2 Soggiacenza della falda

8.2.1 Acquifero

Dalle attività di monitoraggio dell'acquifero, svolte secondo le tempistiche riportate in Tabella 5.4 al paragrafo 5.3.1, vengono presentate di seguito le elaborazioni riguardanti la soggiacenza della falda; come consuetudine sono mostrate le mappe a scala generale, per poi scendere alla dimensione del transetto. I dati di estremo dettaglio relativi alla zona di ricarica MAR saranno trattati in una sezione seguente (capitolo 10).

La Figura 8.2 mostra le mappe di soggiacenza della falda a scala di acquifero completo. A prescindere dalla stagionalità, possiamo notare come l'area in cui la falda freatica è maggiormente profonda è quella ad ovest della Pineta di Classe, in corrispondenza della porzione di territorio morfologicamente più depresso. In tale posizione raggiungiamo quote di alcuni metri sotto il livello del mare. Allo stesso modo, risulta evidente come la tavola d'acqua sia costantemente al di sopra del livello del mare nei dintorni del pozzo P9S, localizzato a circa 10 km dalla linea di costa. Altri punti in cui la falda risulta depressa sono nella porzione meridionale della Pineta di San Vitale e al suo vertice settentrionale, i cui valori si aggirano mediamente circa -1m s.l.m..

Confrontando le mappe relative ai mesi di giugno e dicembre 2010, risulta evidente come passando da una stagione estiva ad una invernale la soggiacenza della falda tenda a diminuire specie in corrispondenza della porzioni di acquifero freatico (dune costiere e pinete storiche) e nelle adiacenze ai principali corsi idrici, come nella zona dei Fiumi Uniti e del Lamone. Anche nel punto più depresso dell'area analizzata la soggiacenza passa da circa -3.7m in giugno a -2.8m nel dicembre 2010. Allo stesso modo, a ridosso del pozzo P9S si passa da 1.7m a 2.3m rispettivamente per giugno e dicembre. Questa analisi viene confermata se osserviamo la Figura 8.3, in cui vengono mostrate le porzioni di territorio in cui la falda freatica è maggiore o minore del livello del mare. Risulta evidente come nei pressi della Pineta San Vitale e a ridosso delle dune costiere aumenti nella stagione invernale la quantità di territorio con falda sopra l.m.m..

A questo punto se comprendiamo nella analisi anche la soggiacenza misurata nel gennaio 2012 notiamo come sia, dei tre monitoraggi, quello che mostra la massima profondità di falda, circa 30-40cm più profonda anche rispetto ai mesi estivi del 2010. Abbiamo registrato in tale periodo la massima soggiacenza a ridosso della Pineta di Classe con un valore di oltre -4m s.l.m.m. e non superiamo il metro nel punto più alto. Mediamente la falda si trova a -1 da piano campagna con punte di -2m a ridosso del P15N e del P4N a nord. Le porzioni di territorio con falda sopra il l.m.m. risultano, nel Gennaio 2012, modestissime e riscontrabili esclusivamente in

un pozzo all'interno di San Vitale ed esclusivamente nella zona più interna e della zona a sud di Ravenna (P9S).

Dal confronto tra le due stagioni invernali analizzate (Figura 8.5) emerge come vi sia stato un generale abbassamento della falda freatica. Le diminuzioni maggiori sono state registrate nella porzione centrale dell'area (a ridosso dei Fiumi Uniti) e al di sotto della Pineta di Classe, in cui si registrano diminuzioni anche superiori al metro. Nelle altre aree, mediamente, abbiamo registrato un calo di 50-70cm, mentre nelle zone prossime alla costa o adiacenti alle Piallasse, i cali sono più contenuti, al di sotto dei 50cm.

In questo contesto di falda quasi ovunque al di sotto del l.m.m., i vettori di flusso in Figura 8.4 costruiti per tutta l'area mostrano come vi sia un flusso dominante diretto da mare verso l'entroterra in gran parte del territorio costiero. Le Piallasse, aperte a mare e l'Adriatico stesso fungono da carico costante della zona costiera, orientando la maggior parte dei vettori verso l'entroterra. Sono molto scarsi e confinati alla zona di Marina Romea i vettori diretti in modo logico, inoltre scompaiono nella mappa di gennaio 2012.

Se osserviamo la posizione delle idrovore (paragrafo 2.1) notiamo nella maggior parte dei casi, le porzioni di acquifero che possiedono la falda depressa coincidano con le idrovore presenti nell'area. Allo stesso modo, anche i vettori di flusso convergono verso questi impianti di sollevamento.

Un'altra aspetto che si evince dalla Figura 8.4 risulta essere il fatto che i bacini amministrativi afferenti ad una singola idrovora (paragrafo 2.8.4) vengono ridisegnati e non coincidono con quelli conosciuti; difatti, se osserviamo nella zona sud, tutti i vettori di flusso convergono verso l'Idrovora del V bacino, mentre dalle mappe dei bacini sottesi alle idrovore, la porzione sud dovrebbe essere drenata anche dall'Idrovora della Bevanella (paragrafo 2.8.4). Tra gli spartiacque principali di questi bacini sotterranei annoveriamo il corso dei Fiumi Uniti a sud e il corso del Lamone a nord. Anche la zona di Punta Alberete, come in generale tutta la porzione occidentale della Pineta di San Vitale, risulta essere un punto di origine dei vettori di flusso che testimonia la presenza di un battente idraulico sopra il livello del mare.

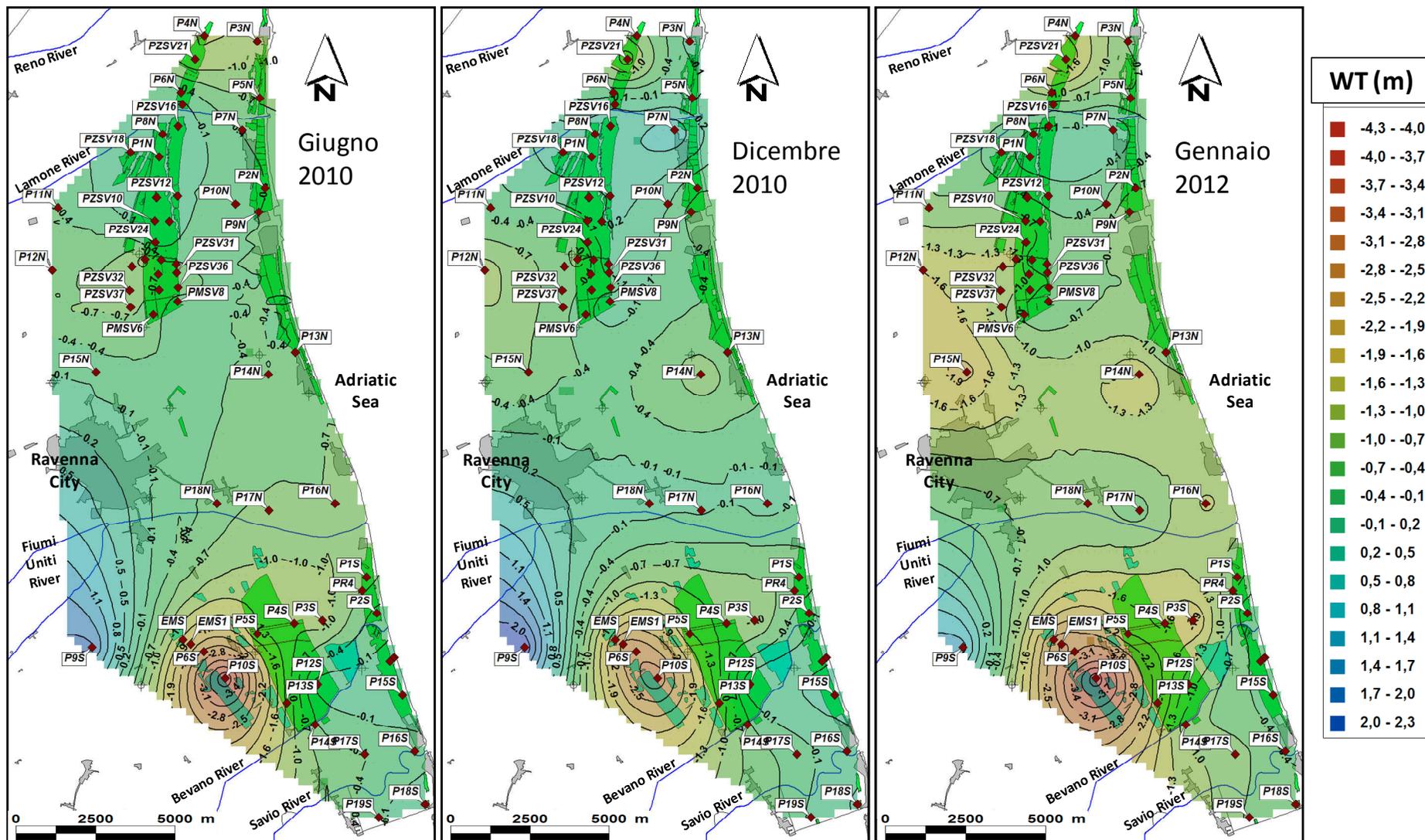


Figura 8.2 Mappe di soggiacenza della falda, per giugno 2010, dicembre 2010 e Gennaio 2012.

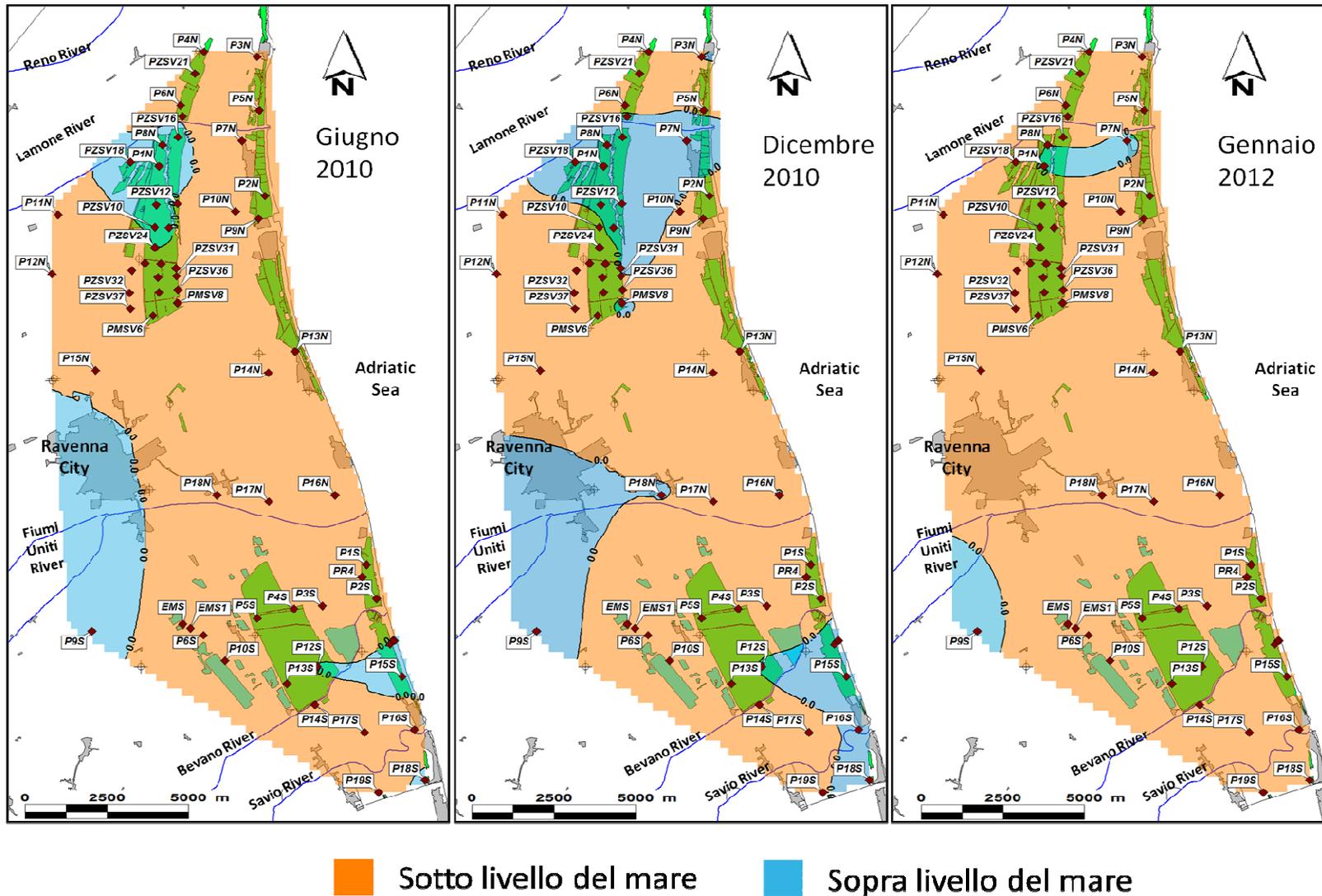


Figura 8.3 Mappe delle porzioni di territorio in cui la falda freatica risulta essere al di sopra o al di sotto del livello del mare

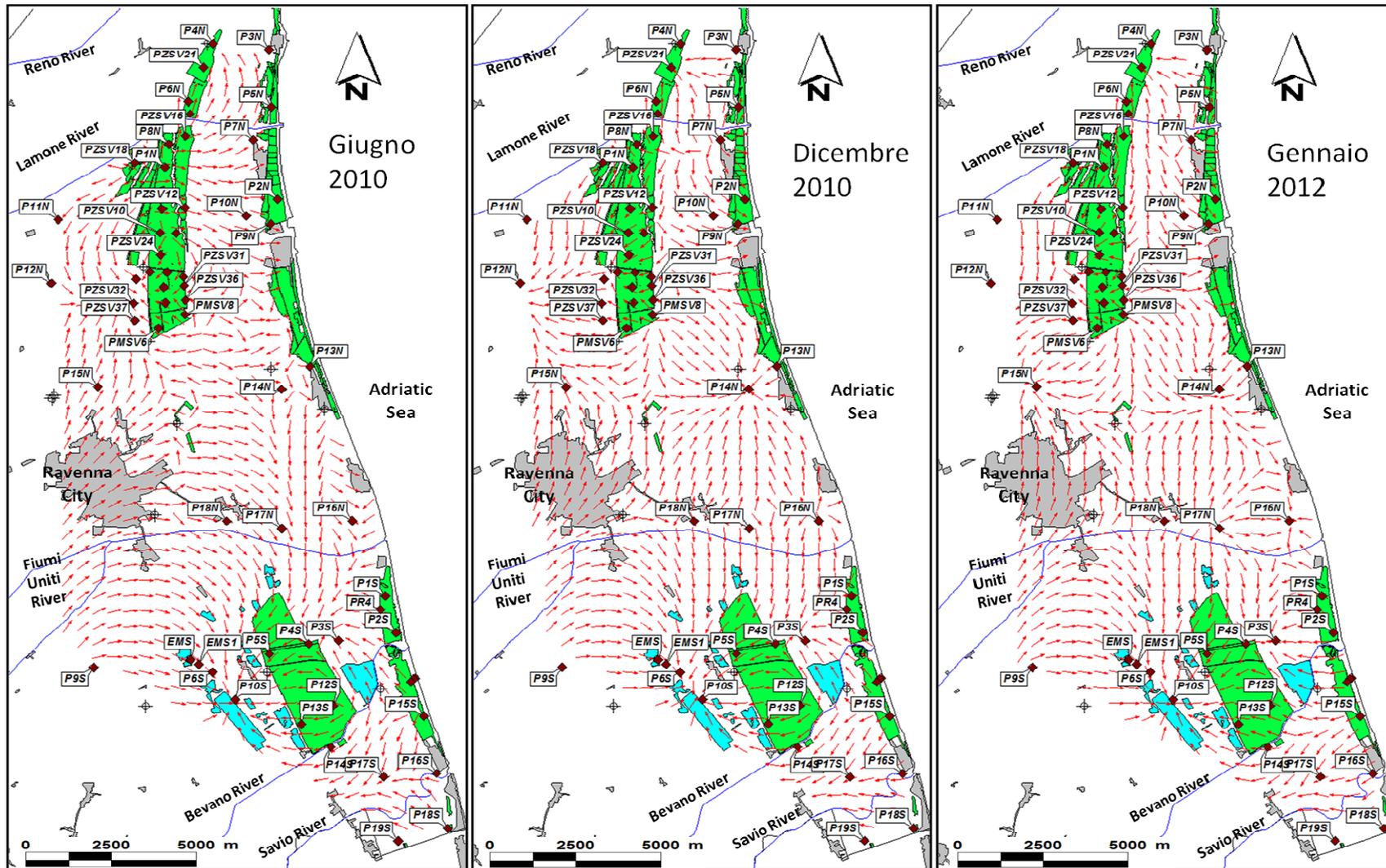


Figura 8.4 Mappe dei vettori di flusso.

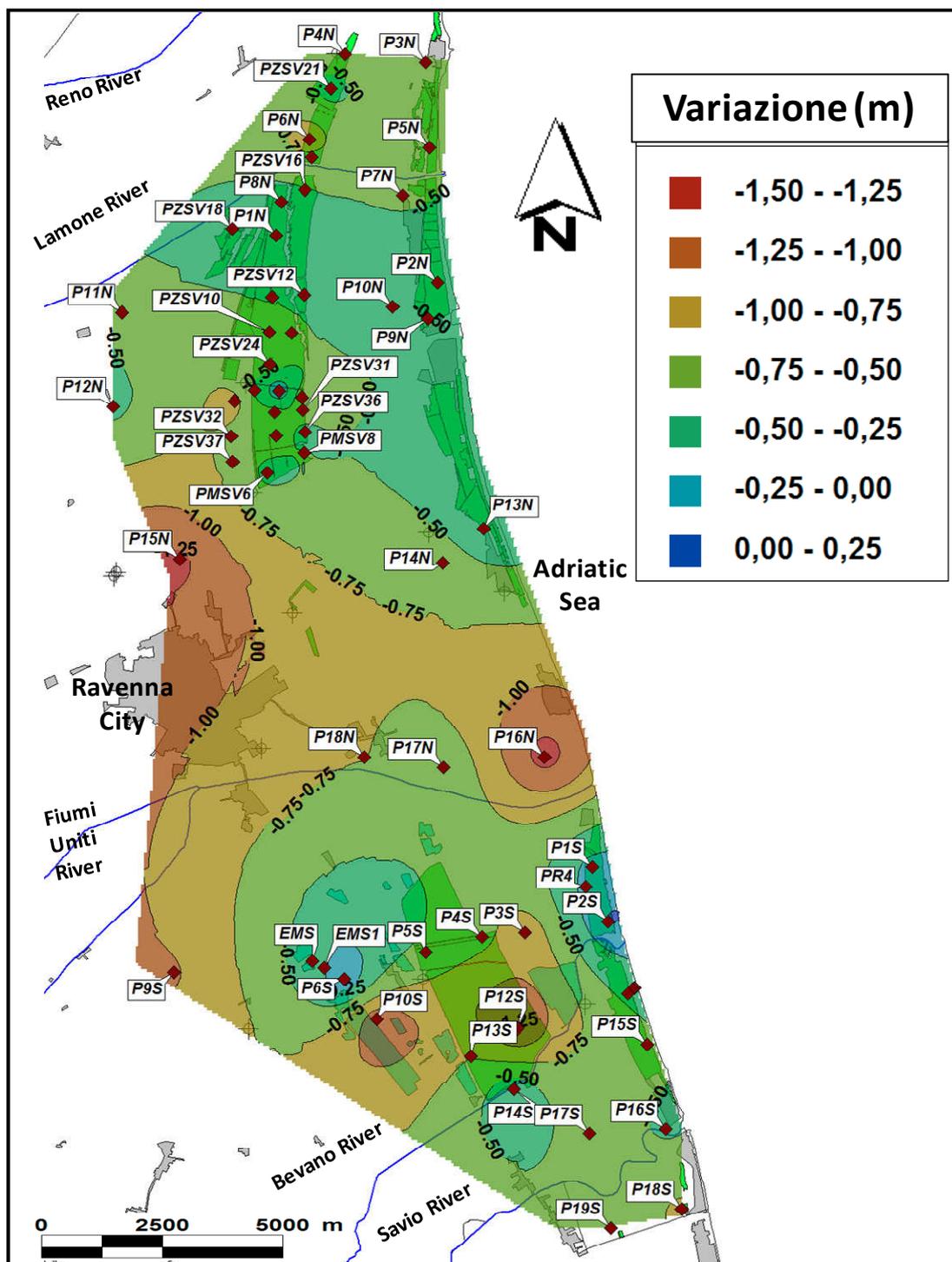


Figura 8.5 Mappa di variazione della soggiacenza della falda tra i monitoraggi di Dicembre 2010 e gennaio 2012.

Il confronto stagionale mostrato in Figura 8.5 restituisce gli abbassamenti della falda freatica a livello complessivo di acquifero che si sono verificati tra il dicembre 2010 e il gennaio 2012. Si può parlare di abbassamenti, in quanto nessun piezometro mostra una risalita nel livello piezometrico; il solo pozzo che rimane pressoché costante è il P2S. Viceversa, i pozzi in cui si misurano i maggiori abbassamenti risultano essere il P15N e P16N con riduzioni pari a circa -1.5m nella porzione a nord dei Fiumi Uniti, mentre a sud i pozzi P9S, P10S e P12S hanno avuto un decremento dell'ordine di un metro.

8.2.2 Transetto nel V Bacino

Osservando i dati derivanti dal monitoraggio mensile della soggiacenza della falda nel transetto che ricade all'interno del V Bacino, si evince come vi sia un gradiente da mare verso l'entroterra. Tale andamento della falda freatica si manifesta ininterrottamente durante tutti i 18 mesi di monitoraggio e termina sempre in corrispondenza del pozzo EMS1 a ridosso della fascia delle cave. Ad ovest della zona delle attività estrattive la superficie freaticometrica aumenta di quota fino al pozzo P9S in cui raggiunge anche oltre i 2m al di sopra del mare. Questo gradiente da mare verso terra risulta totalmente governato dall'idrovora del V bacino localizzata nei pressi dell'abitato di Fosso Ghiaia, a poche centinaia di metri dal pozzo EMS1.

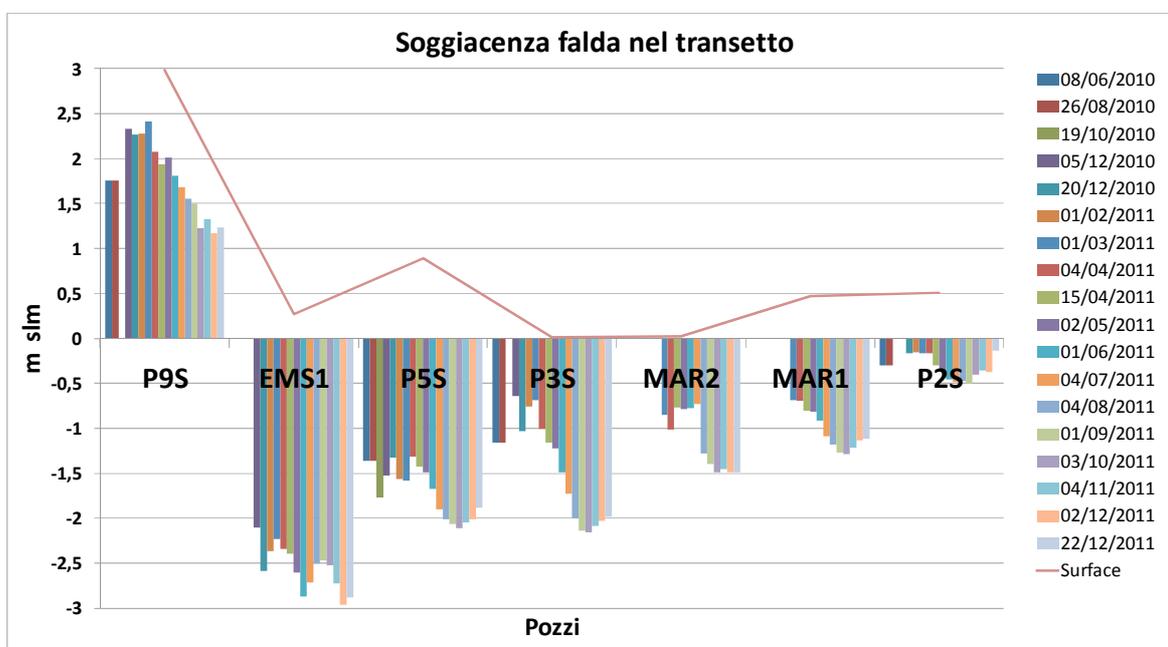


Figura 8.6 Grafico della profondità della falda all'interno dei pozzi appartenenti al transetto per un periodo di tempo che va da giugno 2010 a dicembre 2011.

In Figura 8.7 è mostrata la soggiacenza della falda, con particolare attenzione alle variazioni stagionali dei singoli pozzi. Si può notare come nei 12 mesi di monitoraggio del transetto, la falda tenda ad approfondirsi con l'avanzare della stagione estiva e raggiunga il suo minimo, all'interno di ciascun pozzo, indicativamente a cavallo dei mesi di settembre ed ottobre. Non si può dire lo stesso per il pozzo MAR2 in cui, a differenza degli altri, la falda rimane alla stessa quota anche durante i mesi estivi, in concomitanza con la stagione irrigua. Anche il piezometro EMS1 pur mantenendosi il più profondo, mostra un rialzo della falda freatica nei mesi estivi, dovuta alla vicinanza con il canale promiscuo Fosso Ghiaia, il quale svolge entrambe le funzioni di drenaggio nella fase invernale e di irrigazione in quella estiva.

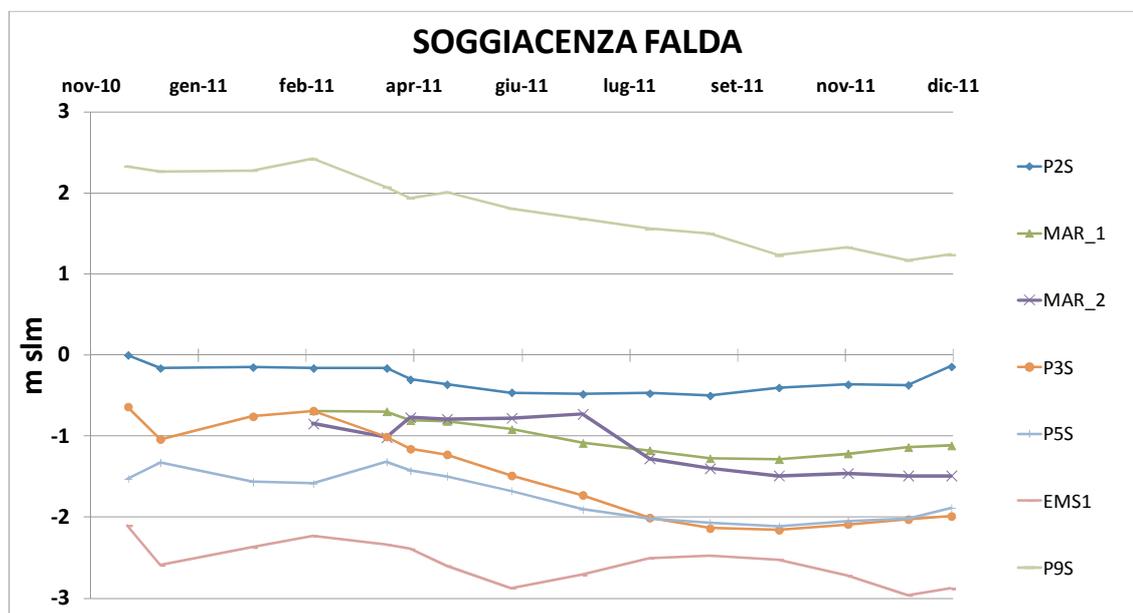


Figura 8.7 Grafico della soggiacenza della falda per l'anno 2011 in cui è mostrata l'evoluzione dei singoli pozzi.

8.3 Elaborazioni salinità

Prima di presentare le elaborazioni relative alla salinità occorre definire una scala omogenea a cui si farà riferimento per tutte le rappresentazioni seguenti.

In letteratura vi sono innumerevoli intervalli di concentrazione che vengono considerati a seconda dell'utilizzo che si deve fare della risorsa idrica. La FAO, nel manuale per l'irrigazione mediante acque saline, considera come limite una concentrazione di cloro pari a 100ppm e per il sodio 250ppm (FAO 1992). Appelo e Postma 2005, per gli usi domestici, pongono dei limiti di 200ppm per il sodio e 250 per il cloro. Altri studi prettamente idrologici come Stuyfzand 1999 e Vandenbohede 2011, utilizzano il cloro per discriminare la tipologia di acqua; entrambi pongono come limite per le acque dolci 150ppm di cloro (paragrafo 8.5).

In questa tesi di dottorato si è scelto di utilizzare una suddivisione delle acque in funzione della salinità del campione, in accordo con quanto riportato da Antonellini et al. nel 2010, in cui si legge che per l'area oggetto di studio, si ritiene opportuno individuare la soglia dei 3g/l come limite per definire le acque dolci. Al di sopra di tale valore si instaura una caduta repentina della biodiversità vegetale all'interno delle zone naturali dell'area (Antonellini 2010).

Di seguito una tabella riassuntiva delle divisioni adottate in questa tesi:

Tabella 8.1 Tabella riassuntiva delle classi di salinità adottate in questo studio.

Nome	Salinità (g/l)	Cloro (ppm)	Uso
Molto dolci	< 1	0 - 250	Irrigazione classica
Dolci	1 - 3	250 - 1500	Irrigazione con acque saline
Dolci - salmastre	3 - 5	1500 - 2800	Nessun uso
Salmastre	5 - 10	2800 - 6250	Nessun uso
Salmastre - salate	10 - 15	6250 - 9900	Nessun uso
Salate	15 - 25	9900 - 18000	Nessun uso
Iperaline	> 25	>18000	Nessun uso

8.3.1 Acquifero

A scala di acquifero, per il parametro salinità, le elaborazioni che verranno presentate si riferiscono al monitoraggio eseguito nel dicembre 2010, perché è l'unico che ha coperto tutta l'area campionando con il metodo multilivello (*multilevel sampler – Straddle Packer*) (paragrafo 5.3.1).

Le elaborazioni eseguite per rappresentare la salinità a scala complessiva di acquifero sono della mappatura a diversa profondità. In Figura 8.8 sono mostrate 3 diverse mappe costruite per tre diverse profondità; la prima a sinistra mostra la distribuzione di salinità superficiale dell'acquifero, ove è possibile notare come già al *top* la salinità si presenta largamente sopra la soglia dei 3g/l nella maggior parte del territorio ravennate. Si trova acqua dolce esclusivamente al di sotto della Pineta di San Vitale e nel pozzo P12N per la porzione nord del territorio. All'interno della pineta stessa si riscontra una notevole differenza tra la porzione orientale, a contatto con le Pialasse e quella occidentale in cui ancora si trovano lenti di acqua dolce, specialmente nelle vicinanze delle Punte Alberete (bosco idrofilo). Spostandoci verso sud, acque dolci sono presenti al di sotto del corso attuale dei Fiumi Uniti, fino nelle vicinanze della costa, a testimonianza di come vi sia interazione tra il corso d'acqua e l'acquifero sottostante. Più a sud, all'interno del V bacino, l'acquifero risulta salmastro per tutta la sua estensione, ad eccezione del pozzo P9S a 10 km dal mare e per la porzione sud della Pineta Storica di Classe.

Tra i piezometri P14S e P17S compare l'unica bolla di acqua avente una salinità al di sotto di 1g/l tale da essere definita "molto dolce". Altrove vi è un'estesa salinizzazione che trova i valori maggiori nei pressi della costa e delle Pialasse della Baiona e del Piombone.

Scendendo all'interno dell'acquifero fino a circa -6m al di sotto della tavola d'acqua possiamo notare come si riducano notevolmente le aree con acque dolci. Al di sotto di San Vitale scompaiono completamente le parti di acquifero classificate come dolci lasciando spazio ad acque aventi salinità tra 3-5g/l. rimangono corpi di acque dolci al di sotto dei Fiumi Uniti e nella zona delle cave, testimonianza che è una delle poche aree a sud in cui resiste acqua dolce. Nel limite meridionale dell'area, nei pressi della foce del Fiume Savio i pozzi P19S e P18S, continuano a rimanere dolci. Le aree che mostrano un acquifero salato si estendono specialmente nella parte meridionale della Pineta di San Vitale e nella porzione più costiera del V Bacino in cui si superano i 15g/l.

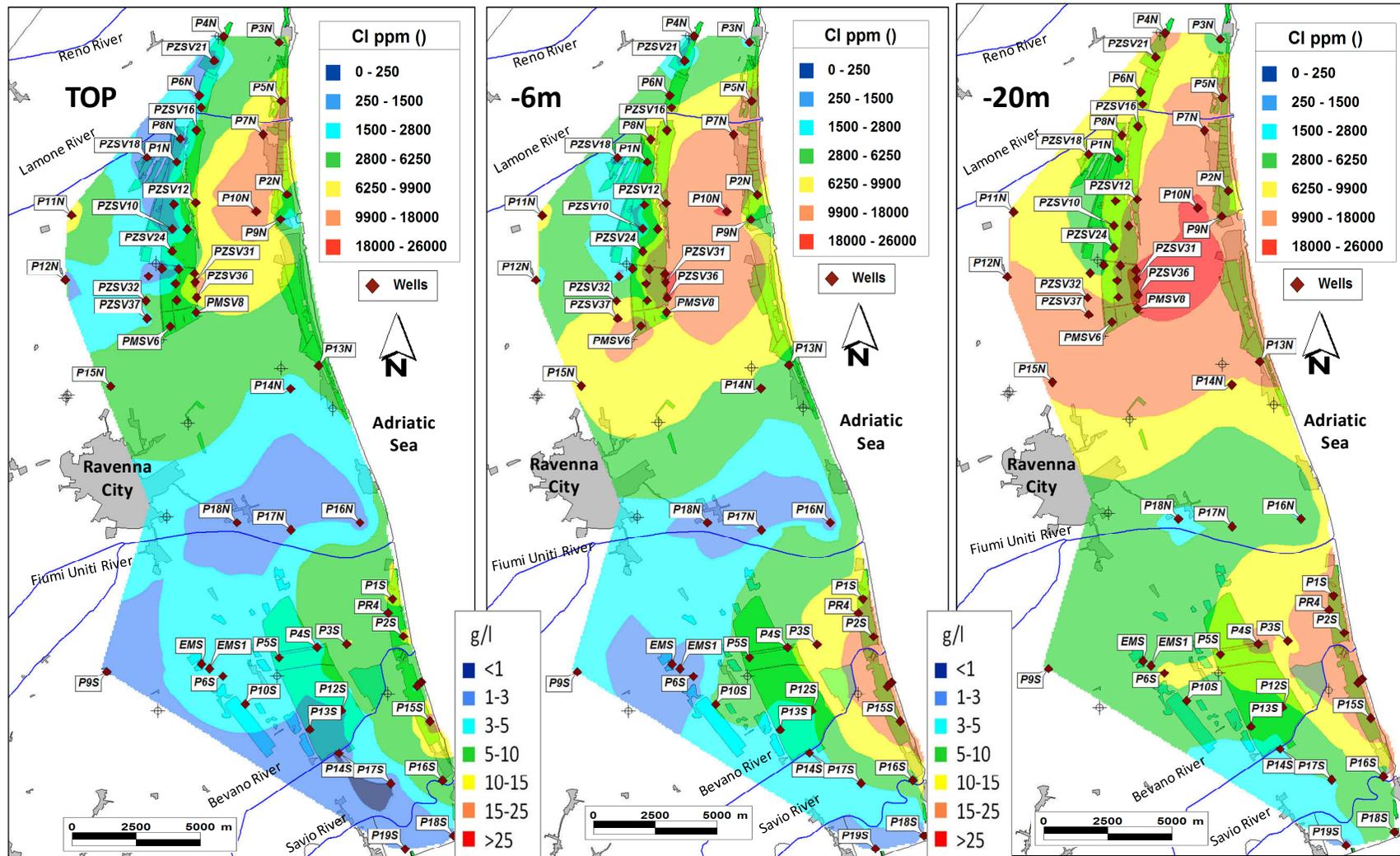


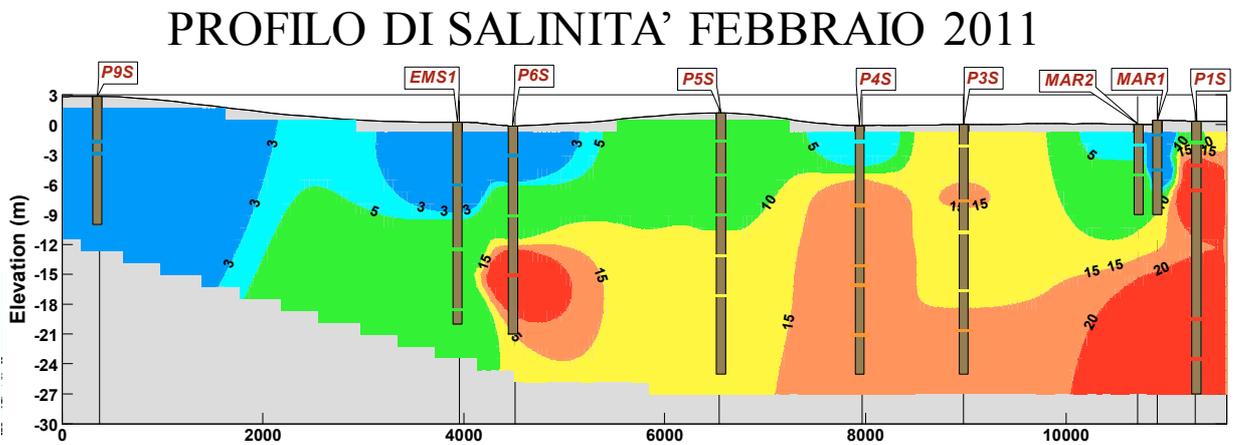
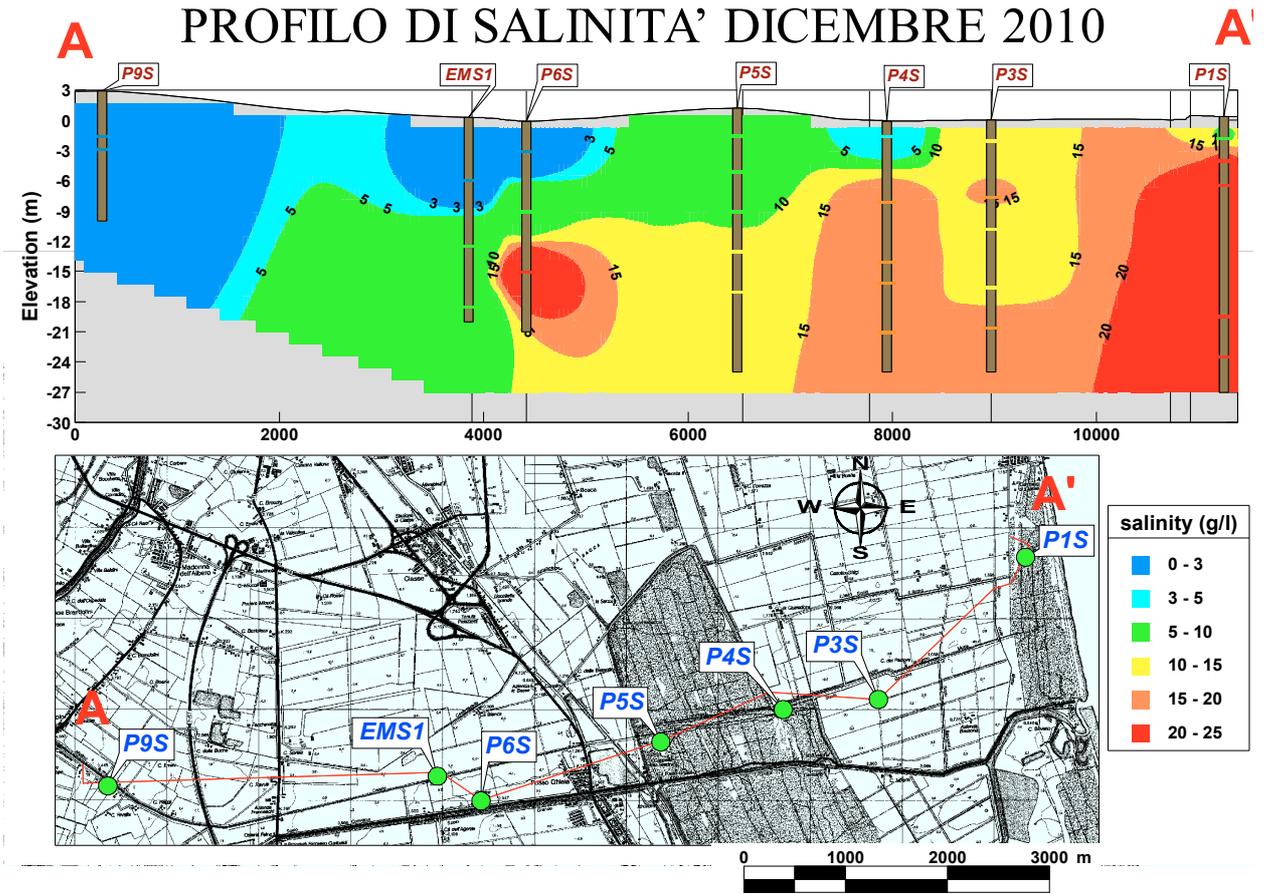
Figura 8.8 Rappresentazione della salinità attraverso 3 mappe a diversa profondità dell'acquifero: superficiale, - 6m e fondo acquifero. Dicembre 2010.

Nella mappa di destra, in Figura 8.8, siamo a fondo acquifero ad una profondità media di circa -20m dalla tavola d'acqua. Ovunque l'acquifero ha una salinità superiore a 3g/l ed è quindi salmastro in ogni sua porzione. Le zone meno salate rimangono quelle a sud della Pineta di Classe, nei pressi dei Fiumi Uniti e la parte occidentale di San Vitale, pur con salinità comprese tra 5 e 10g/l. Nei pozzi meridionali di San Vitale si raggiungono salinità superiori ai 25g/l a testimonianza della forte problematica che affligge tale area. All'interno del V bacino si verifica un ulteriore avanzamento delle acque con salinità maggiore dei 15g/l che lambiscono la Pineta di Classe. Più a sud i piezometri P14S, P17S e P19S sono gli unici ad avere una salinità inferiore ai 5g/l.

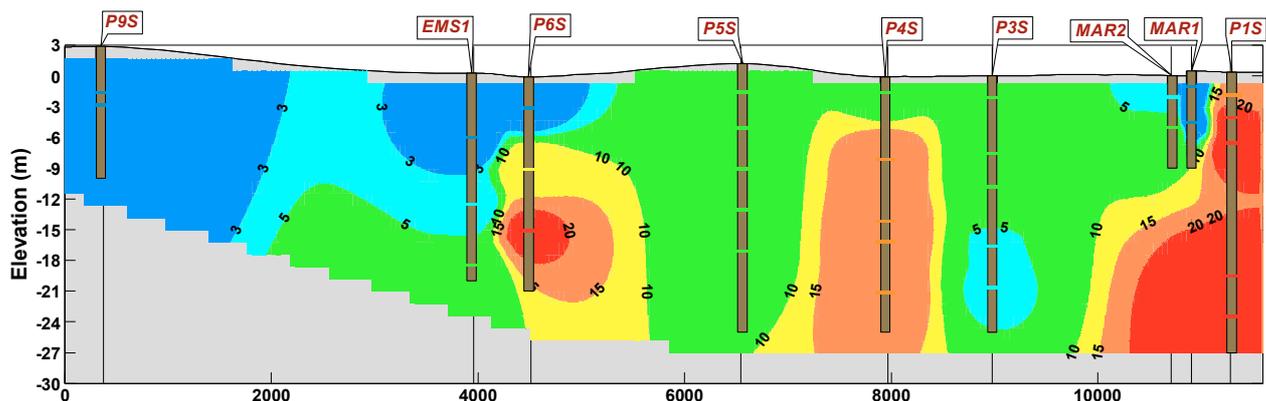
8.3.2 Transetto

I dati mostrati a scala di acquifero, implementati con i monitoraggi eseguiti appositamente per il transetto ricadente all'interno del V bacino (paragrafo 2.1), saranno di seguito mostrati sottoforma di sezioni stagionali di salinità. Sono state elaborate le sezioni per i mesi di dicembre 2010, febbraio, aprile e luglio 2011, raccogliendo perciò dati della stagione invernale, primaverile ed estiva. La legenda è da ritenersi la medesima per tutte le sezioni e rispecchia quanto detto nell'introduzione al capitolo, con la semplificazione che le acque con salinità inferiore a 3g/l ricadono nella stessa classe di acque dolci.

In Figura 8.9 sono riportate tutte le sezioni eseguite per il transetto rappresentativo della situazione complessiva dell'acquifero. Nella prima sezione è rappresentata anche una mappa con la localizzazione spaziale dei punti di misura. Complessivamente possiamo notare come la situazione sia critica, poiché la presenza di acque dolci si ritrova esclusivamente ad ovest del transetto nei pressi del pozzo P9S e nella parte superficiale dei pozzi EMS1 e P6S. Tale presenza fortunatamente rimane costante nel tempo anche procedendo verso la stagione estiva. Dalla parte bassa dei pozzi EMS e P6S, procedendo verso mare, si nota un aumento della salinità che culmina nel pozzo P1S con salinità superiori a 20g/l.



PROFILO DI SALINITA' APRILE 2011



PROFILO DI SALINITA' LUGLIO 2011

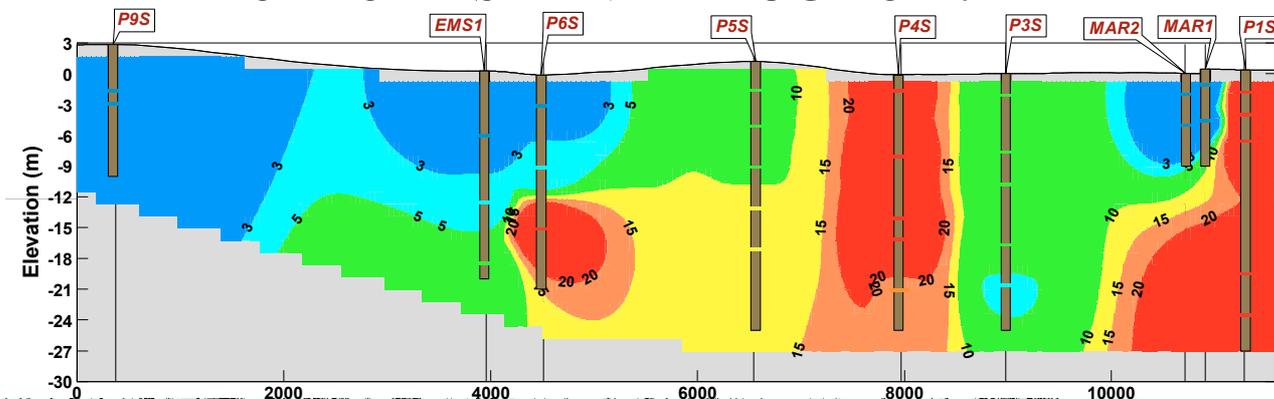


Figura 8.9 Sezioni di salinità per il transetto ricadente all'interno del V bacino assunto come rappresentativo della situazione generale a scala di acquifero.

Analizzando nello specifico le sezioni possiamo notare come il piezometro P6S mostri le variazioni maggiori dalla superficie verso la base dell'acquifero, in quanto, possiede acque dolci in superficie mentre acque saline al fondo; il suo comportamento temporale rimane il medesimo durante tutti i monitoraggi, salvo una leggera variazione di salinità che si registra nel secondo punto di misura, in cui nei mesi di aprile e luglio scende al di sotto dei 5g/l.

Il piezometro P5S situato all'interno della Pineta di Classe, esibisce un comportamento pressoché costante sia in termini di variazioni verticali che temporali; la sua salinità si aggira costantemente intorno ai 10g/l senza mostrare variazioni stagionali.

Il pozzo P4S, anch'esso all'interno della Pineta di Classe, torna ad avere salinità molto elevate. Negli ultimi 4 dei 5 punti di campionamento (PdC) esso mantiene salinità costantemente al di sopra dei 15g/l, con un incremento che si registra nel periodo estivo che lo porta ad oltre 20g/l. Il PdC più superficiale, invece, mostra delle variazioni stagionali importanti in risposta agli andamenti pluviometrici del periodo. In dicembre e febbraio è presente acqua con salinità inferiore a 5g/l, che sale a 10g/l in aprile, fino a giungere ad oltre i 20g/l in luglio.

Muovendoci ancora verso est, il piezometro P3S possiede una salinità costante lungo il profilo, ma variabile stagionalmente. Esso passa da valori di 10-15g/l in inverno, a salinità inferiori a 5g/l nel periodo primaverile estivo. Questo suo comportamento stagionale, opposto agli altri pozzi, è stata una delle cause che ha indotto ad un'analisi più approfondita nell'area MAR di cui si tratterà in seguito (capitolo 10). Così come il precedente, anche i due pozzi MAR mostrano variazioni stagionali importanti e rappresentano la seconda motivazione che ha orientato lo studio verso le tecniche di ricarica dell'acquifero (Capitolo 10).

Il piezometro P1S insediato nella pineta costiera Ramazzotti, dista poche centinaia di metri dalla linea di costa e di conseguenza mostra per tutto l'anno delle salinità tipiche dell'acqua di mare in tutto il suo profilo. Come gli altri pozzi in pineta di Classe, però, mostra un'infiltrazione delle precipitazioni invernali le quali fanno scendere la salinità al di sotto dei 10g/l dai 25g/l estivi.

Complessivamente, ad esclusione dei pozzi Mar di cui si tratterà nell'apposito capitolo, il transetto mostra una forte contaminazione salina che risparmia solamente la porzione più occidentale del transetto. I pozzi che si trovano nelle porzioni di acquifero freatico risentono, esclusivamente nella parte superficiale, delle infiltrazioni durante la stagione invernale. Questo leggero addolcimento superficiale scompare immediatamente ai primi segnali di ripresa dell'attività fisiologica della vegetazione.

8.4 Analisi chimiche

I risultati delle analisi chimiche sono stati elaborati dapprima mediante un'analisi statistica mediante *boxplot* per proseguire con i diagrammi di *Piper* che riassumono le caratteristiche principali dei campioni raccolti e per finire con alcuni profili caratteristici di alcuni elementi.

8.4.1 Analisi chimiche Acquifero

I 229 campioni raccolti nell'unico monitoraggio complessivo dell'acquifero di dicembre 2010, sono stati raggruppati in 6 categorie che tengono conto della tipologia del campione e della diversa provenienza (Figura 8.10 e Figura 8.11). Sono stati separati i campioni provenienti da acque superficiali (Fiumi, canali irrigui e di bonifica) e acque di laguna (Chiari delle Piallasse), mentre quelli provenienti da acque sotterranee sono stati suddivisi in 3 gruppi in funzione della zona di provenienza (pozzi a sud Fiumi Uniti, PZ – S, pozzi a nord PZ – N, mentre quelli dentro San Vitale, PZ – SV). Il campione di acqua raccolto in mare fa gruppo separato per consentire un immediato confronto.

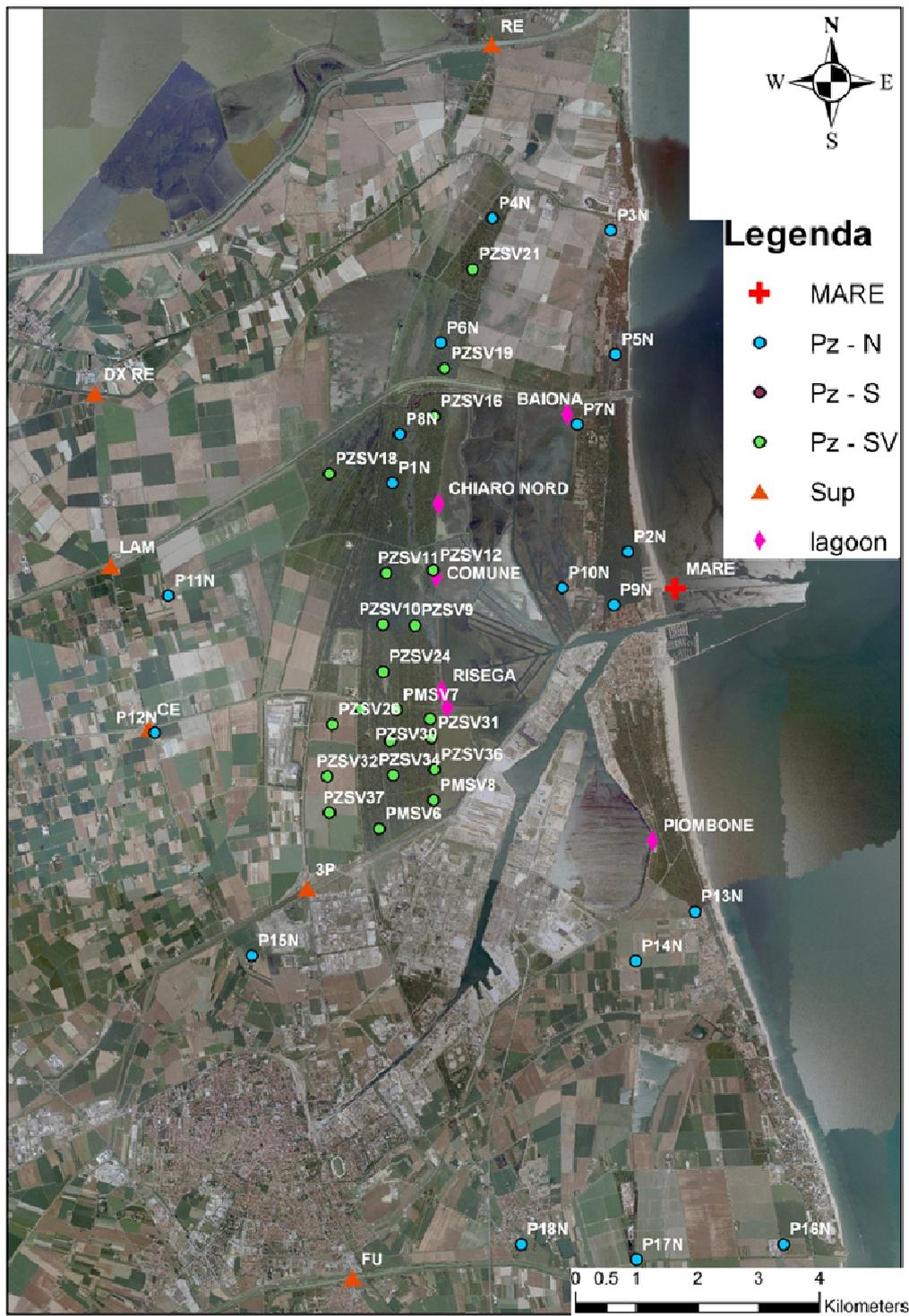


Figura 8.10 Suddivisione dei piezometri e dei punti delle acque superficiali monitorati, a seconda delle 6 categorie individuate. Area nord.



Figura 8.11 Suddivisione dei piezometri e dei punti delle acque superficiali monitorati, a seconda delle 6 categorie individuate. Area sud.

La Figura 8.12, riporta i *box plot* di cationi e anioni relativi ai 6 gruppi di campioni individuati.

Per la maggior parte degli elementi indagati il gruppo delle acque superficiali risulta essere il maggiormente impoverito, eccezione fatta per solfati e alcalinità, i cui parametri statistici somigliano a quelli delle acque sotterranee e si discostano maggiormente dal campione di mare

e dalle lagune. Solamente per i nitrati il gruppo delle acque superficiali, possiede la mediana maggiore agli altri gruppi, anche se nelle acque sotterranee sono presenti parecchi *outlier*, specie nei pozzi in Pineta San Vitale. Mare e lagune hanno un comportamento analogo per tutti gli elementi; l'elevata variabilità delle lagune è da attribuire alla presenza nel gruppo di campioni provenienti da chiari delle Piallasse in cui affluisce acqua di drenaggio e non sono direttamente aperti a mare.

I campioni raccolti nei piezometri di San Vitale rappresentano il gruppo con la maggiore variabilità per tutti gli elementi analizzati (il box ha le dimensioni maggiori); il medesimo gruppo mostra valori medi maggiori agli altri per quanto riguarda i principali elementi marini (Na, Cl, Mg e Br) indice di un forte processo di salinizzazione in corso, ma allo stesso tempo possiede anche concentrazioni di Ca superiori alle altre acque sotterranee, sintomo di apporti continentali.

Il grafico dei solfati (Figura 8.12) mostra dei box con andamento differente dagli altri; le mediane dei campioni Pz – SV e Pz – N sono nettamente inferiori alle acque sotterranee dei pozzi a sud, nonostante i cloruri, per quei gruppi, abbiano una mediana lievemente maggiore a Pz – S. Tale andamento può essere spiegato da processi biologici che vanno, in condizioni anossiche, ad alterare la sostanza organica consumandola e producendo un'acidificazione delle acque circostanti che porta ad una conseguente dissoluzione di carbonati con aumento di HCO_3 (Appelo 2005, Whiticar 1999, Wei-Jun Cai 2003). Questo, almeno in parte, giustifica il grafico di HCO_3 che mostra la mediana nei Pz – N maggiore rispetto al gruppo Pz – S; anche se non si può fare la stessa assunzione per i Pz – SV, perché la mediana risulta inferiore, si nota la presenza di molti campioni *outlier* con valori di HCO_3 oltre i 1000 ppm.

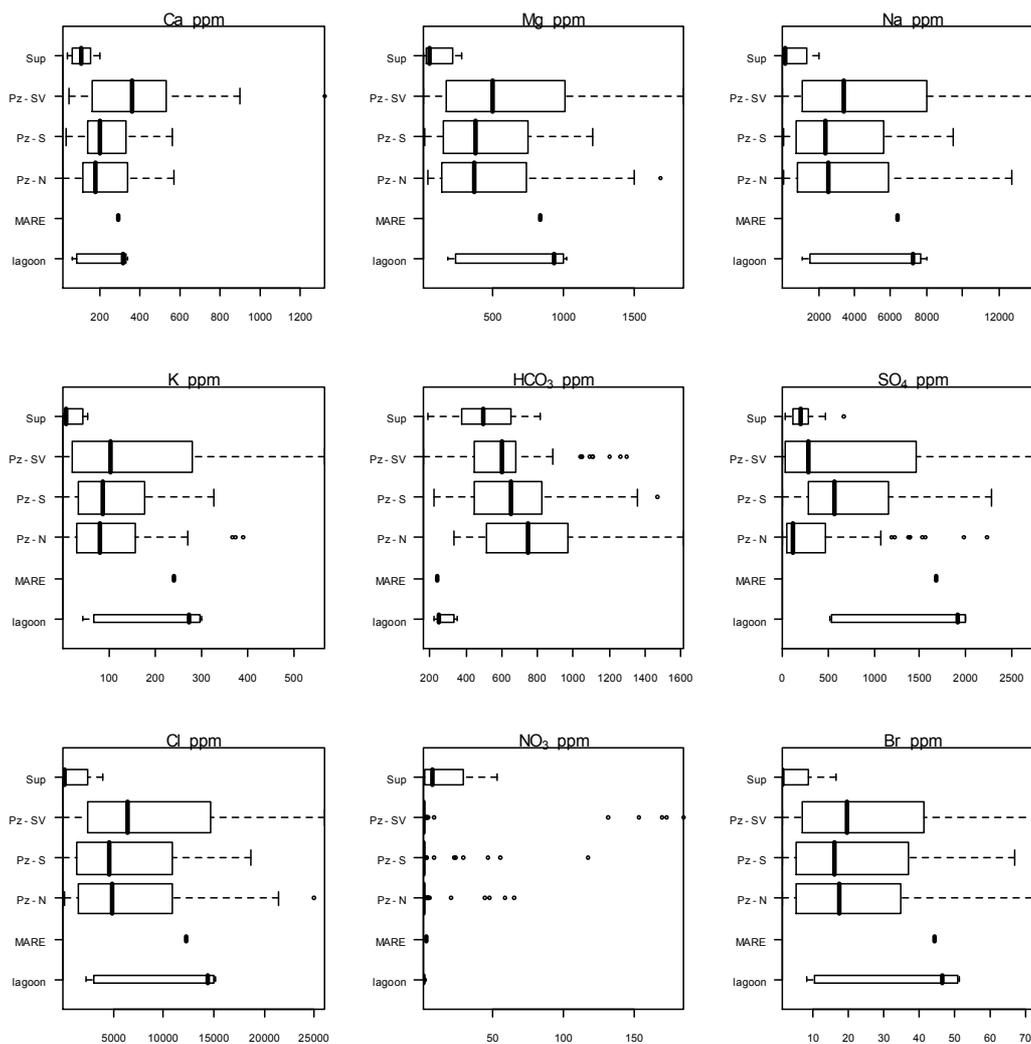


Figura 8.12 Rappresentazione grafica dell'analisi statistica eseguita attraverso la creazione di *Box plot* per gli elementi analizzati presso il laboratorio canadese.

Il diagramma di Piper seguente (Figura 8.13) riassume la composizione chimica dei 229 campioni, suddivisi nei 6 gruppi descritti in precedenza. Esso si compone di due diagrammi triangolari, uno relativo alla concentrazione dei principali cationi (Ca, Na e Mg) e il secondo alla concentrazione dei principali anioni (HCO₃, SO₄ e Cl) e di un diamante centrale che rappresenta l'elaborazione complessiva del dato chimico.

Nel nostro caso, la maggior parte delle acque ha una composizione chimica cloruro-sodica prevalente, individuabile sul grafico dall'enorme nuvola di punti presenti nei pressi del simbolo del campione marino (in alto nel diamante). A questa area del grafico appartengono, senza alcuna distinzione geografica, la maggior parte delle acque sotterranee, tutte le acque provenienti dalle lagune e il campione di acqua marina. Complessivamente i restanti campioni si dispongono su di una ipotetica linea di mescolamento con le acque superficiali (simbolo a croce nella Figura 8.13), i quali vanno verso una composizione carbonato calcica.

Osservando la piramide dei cationi si può osservare come tutti i campioni siano allineati su di una retta molto stretta di mescolamento tra sodio e calcio, solamente 3 campioni (rossi, Pz –

S) hanno come catione dominante il Mg (oltre il 50% della composizione). Non è lo stesso per la piramide degli anioni, anch'essi si dispongono tra cloruri e carbonati, ma i punti sono più dispersi in una nuvola in cui è possibile riconoscere come in Pz – N (disco verde) vedano il cloro come anione dominante, mentre Pz – S e SV, (disco rosso e blu), presentino alcuni campioni carbonato-dominanti. Allo stesso modo, possiamo dedurre che il gruppo Pz – SV risulta maggiormente impoverito in anione solfato (dischi blu alla base del triangolo), meno evidente è questa tendenza per le altre acque sotterranee.

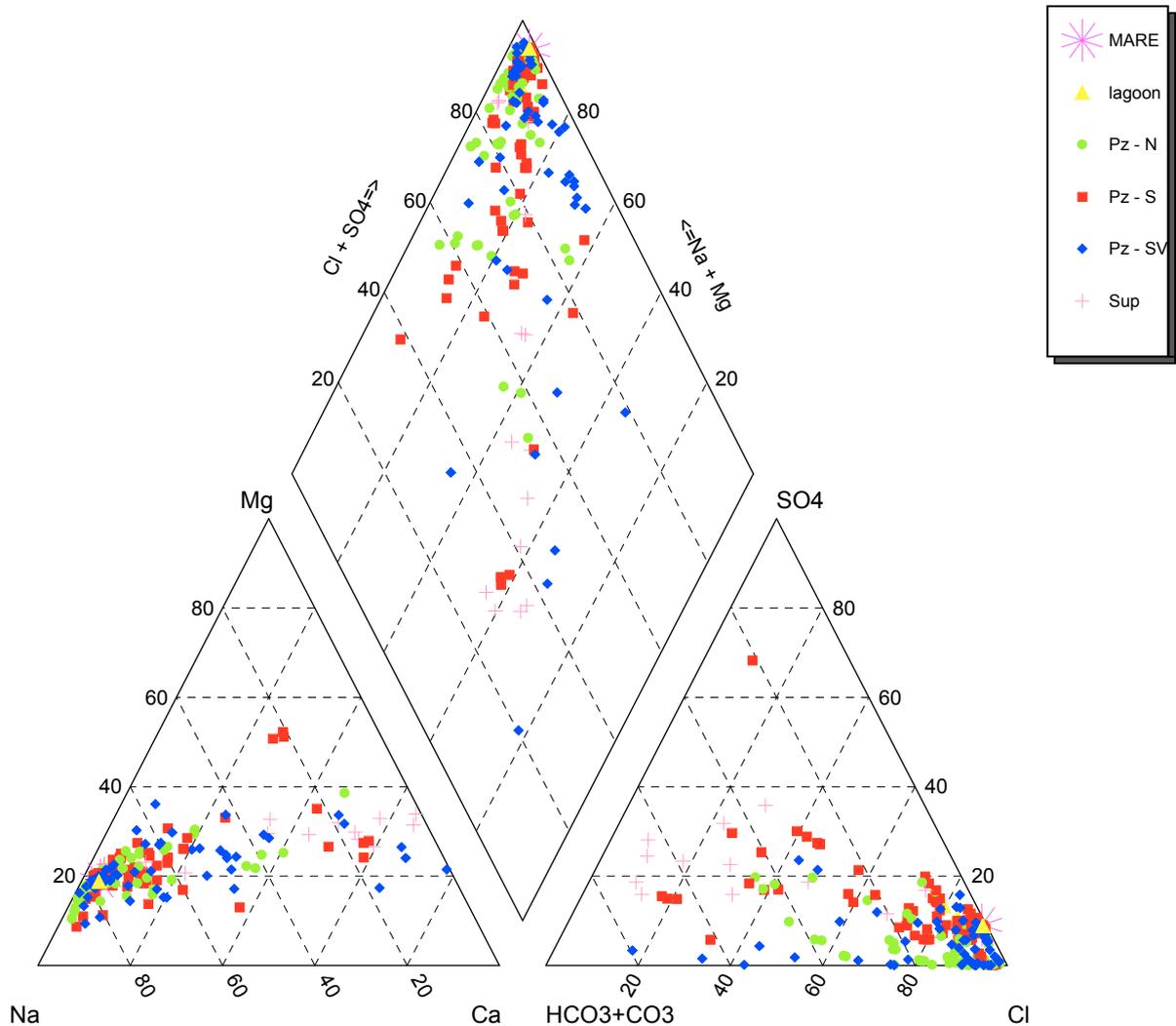


Figura 8.13 Diagramma di Piper dei 229 campioni analizzati, suddivisi nei 6 gruppi principali.

Nei grafici sottostanti (Figura 8.14) è riportata la relazione tra la salinità (ascisse) e tutti gli elementi analizzati presso *l'Acme lab.* (Canada) (ordinate). Questa tipologia di grafico è utilizzata per mostrare quali elementi sono maggiormente dipendenti dalla salinità. A tal proposito, risulta evidente come Mg, Na, K, Cl e Br siano strettamente dipendenti dalla salinità, o meglio, al crescere della salinità anche le concentrazioni tendano ad aumentare. La linearità risulta molto buona per Cl e Na, sono presenti alcuni campioni che si discostano dalla linearità per Mg, K e Br; per i bromuri, specialmente ad alti valori di salinità, ci possono essere sovrapposizioni con il Cl durante le fasi di analisi che portano a valori relativamente distanti dalla retta ipotetica.

Calcio e carbonato non mostrano almeno in apparenza tendenze particolari, anche se tracciando una retta ipotetica passante per le acque superficiali e il mare (simbolo x in Figura 8.14) è possibile riconoscere una nuvola di campioni che si dispone su di essa, indicando un mixing conservativo. Nel medesimo grafico è possibile individuare anche un cospicuo numero di campioni che si collocano al di sopra della retta di cui sopra, indicando un arricchimento in Ca dovuto probabilmente a dissoluzione di carbonato di calcio. Discorso analogo per il grafico carbonato-salinità in cui tracciando una retta passante per il campione mare si osservano campioni disposti su di essa e una folta nuvola di campioni al di sopra, che stanno ad indicare un arricchimento di carbonato derivante da dissoluzione di CaHCO_3 .

Il solfato, come già accennato in precedenza, dovrebbe avere un comportamento conservativo (lineare con la salinità), ma specie in presenza di sedimenti arricchiti in sostanza organica, esso viene sottratto e utilizzato per la degradazione del materiale organico, ottenendo un impoverimento nel campione. Nel grafico solfato-salinità possiamo osservare come un buon numero di punti si disponga sulla retta passante per il campione mare, ma altrettanto abbondante risulta il numero di campioni contenenti pochissimo solfato (vicini alla base del grafico).

Il grafico dei nitrati risulta indipendente dalla salinità, ma come già accennato, i campioni con alte concentrazioni di nitrati si trovano all'interno dell'area indagata senza un ordine spaziale preciso, ma molto dipendente dalla vicinanza ad ambiti agricoli o a canali di drenaggio.

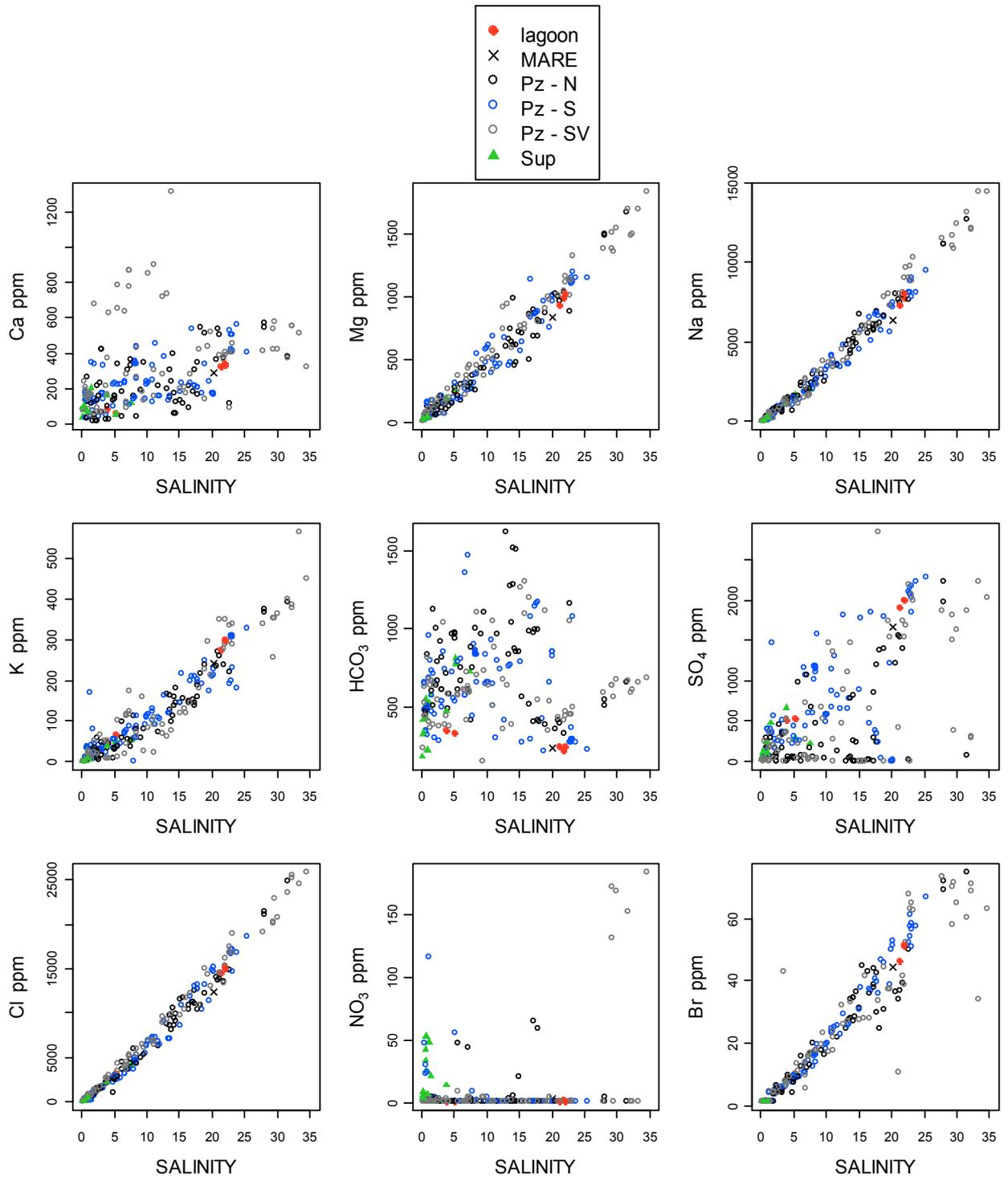


Figura 8.14 Diagrammi binari tra gli elementi analizzati e la salinità dei 229 campioni, suddivisi nei 6 gruppi principali.

Con lo scopo di fornire nel modo più chiaro possibile la distribuzione spaziale e verticale di salinità, solfati e alcalinità sono stati costruiti i grafici riportati in Figura 8.15 e Figura 8.16, separando la porzione nord dell'acquifero da quella meridionale.

Nella Figura 8.15 sono rappresentati sei profili trasversali alla linea di costa che vanno dal più settentrionale (P3N e P4N) nei pressi di Casalborgsetti fino al più meridionale (PZSV37, PZSV36 e PZSV34) situato nella porzione meridionale della Pineta di San Vitale. Osservando la figura possiamo affermare che in tutti i pozzi è presente, nella porzione più superficiale dell'acquifero, uno spessore di acqua "meno salata" rispetto ai dati di salinità profonda (paragrafo 8.3.1). Solamente per i pozzi P5S, P7S, P10S e P11S non riscontriamo questa lente di acqua dolce, che in ogni caso possiede valori di salinità compresi tra 3 e 10g/l. Muovendoci verso la base dell'acquifero osserviamo che la salinità aumenta in tutti i pozzi e si attesta a valori intorno a 20g/l, eccezione fatta per i pozzi sopracitati il cui profilo è costantemente salato. Il PZSV18 e il P3S, il primo localizzato dentro Punta Alberete ed il secondo a ridosso del canale Destra Reno in località Casalborgsetti, anche se raggiungono una modesta profondità, mostrano un profilo interamente dolce; per il primo risulta importante il notevole apporto di acque continentali che si registra in Punta Alberete, mentre il secondo risente dell'interazione con il canale Destra Reno. I piezometri più salati risultano essere quelli a ridosso delle Pialasse, sia lato mare (P10N e P7N) sia interni alla Pineta di San Vitale (PZSV30).

L'andamento dei solfati, contrariamente a quanto atteso, diminuisce con la profondità nonostante l'incremento della salinità; questo fenomeno, già citato precedentemente, è da attribuire all'utilizzo dei solfati nella degradazione della sostanza organica del sedimento con simultaneo aumento della concentrazione di alcalinità. Questo andamento opposto alla salinità è evidente nella grande maggioranza dei pozzi in Figura 8.15 e aumenta con la profondità; non si riscontra, invece, nei pozzi P3N, P5N, P7N (costieri) e PZSV23, PZSV11, PZSV12 (dentro San Vitale).

In Figura 8.16 sono raffigurati sei transetti che vanno dal più a nord (P13N, P14N e P15N) in località Punta Marina, fino a più meridionale (P18S e P19S) nei pressi di Lido di Savio. Come per la porzione settentrionale, anche in questo caso in ogni grafico sono riportati la salinità, i solfati e i carbonati in funzione della profondità. I primi due transetti per motivi grafici, sono raffigurati nella seconda immagine anche se facenti parte della porzione Nord dell'acquifero. Questi due transetti hanno il medesimo comportamento dei pozzi a Nord, è possibile notare, infatti, come vi sia una diminuzione dei solfati al crescere della salinità (P15N e P14N) e un simultaneo aumento dei carbonati; il secondo transetto in Figura 8.16 (P16N, P17N e P18N) presenta salinità inferiori a 5 g/l in tutti i punti di osservazione anche quelli profondi, dovuta all'estrema vicinanza dei piezometri ai Fiumi Uniti (paragrafo 10.7).

Nella porzione meridionale, come riscontrato anche in quella nord, quasi tutti i pozzi mostrano la presenza di una bolla di acqua dolce superficiale che raggiunge la sua massima

estensione nei pozzi P12S, P13S, P14S e P17S, in cui sono state misurate salinità inferiori a 5 g/l anche a -10m dal piano campagna.

Meno evidente nei pozzi meridionali la carenza di solfati con la profondità che si riscontra esclusivamente all'interno dei pozzi P4S e P1S entrambi dentro le zone pinetali.

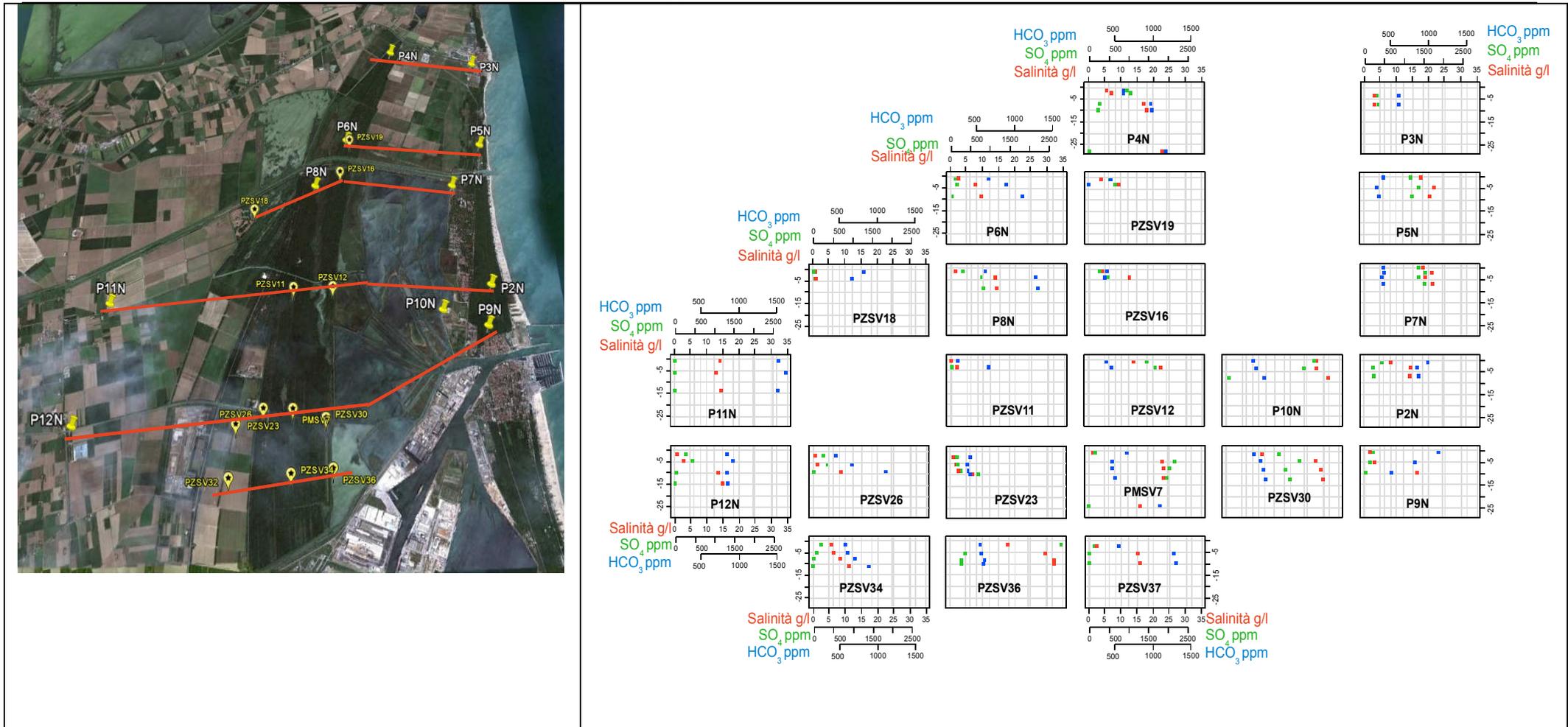


Figura 8.15 Rappresentazione dei profili di profondità relativi a salinità (rosso), solfati (verde) e carbonati (blu) nella porzione destra; mentre a sinistra la localizzazione spaziale dei transetti e dei singoli pozzi rappresentati per la porzione nord dell'acquifero.



Figura 8.16 Rappresentazione dei profili di profondità relativi a salinità (rosso), solfati (verde) e carbonati (blu) nella porzione destra; mentre a sinistra la localizzazione spaziale dei transetti e dei singoli pozzi rappresentati per la porzione sud dell'acquifero.

8.4.2 Analisi chimiche lungo il transetto

I *boxplot* delle figure Figura 8.17, Figura 8.18, Figura 8.19 mettono in relazione, nei tre campionamenti stagionali eseguiti, rispettivamente i cationi, gli anioni e nella terza figura i nitrati, salinità pH ed Eh. Occorre fare notare che nei tre campionamenti alcuni pozzi non si ripetono, a causa dell'impossibilità di accedere ai piezometri stessi (P1S aprile 2011), o della costruzione successiva di pozzi (MAR1 e MAR2). Il campionamento del 2012i è poi stato condotto solamente sui pozzi orientali del transetto (area MAR e limitrofi).

Negli allegati a questo capitolo si trovano i *boxplot* separati per stagione di campionamento (paragrafo 15.8).

Lo scopo di queste rappresentazioni è quello di analizzare rapidamente in modo statisticamente valido l'andamento stagionale degli elementi e la loro variabilità all'interno dei pozzi.

Ne deriva che, per quanto riguarda i cationi, la Figura 8.17, riporta come il piezometro P6S sia nel 2010 che nel 2011, per tutti i cationi, possieda la massima variabilità. Passando dal 2010 al 2011 i cationi mantengono le medesime concentrazioni per i pozzi presenti in entrambi i campionamenti. Si registra un unico aumento per i valori di calcio nel piezometro P6S che nel 2011 raggiunge concentrazioni oltre gli 800ppm. Nei pozzi P6S e P2S le concentrazioni medie di calcio sono maggiori a tutti gli altri pozzi, con valori medi superiori ai 400ppm. Per tutti gli altri cationi le medie sono statisticamente maggiori nei pozzi P1S, P2S e P4S in tutte le stagioni analizzate. Per gli stessi cationi, le concentrazioni inferiori si registrano costantemente nei piezometri P9S, EMS, MAR1 e MAR2. Per il Mg, il Na e il K, pozzi P3S e P5S possiedono delle mediane con valori intermedi per tutte le stagioni.

L'analisi statistica degli anioni in Figura 8.18, per quanto riguarda cloro e bromo (conservativi), conferma quanto visto per i cationi: P1S, P4S e P2S, quando campionati possiedono le mediane maggiori costanti per tutte le stagioni. Allo stesso modo il P6S mostra la variabilità maggiore. Capitolo a parte meritano solfati e alcalinità. I primi sono statisticamente più abbondanti nei pozzi P6S e P2S, sia in dicembre 2010 che in aprile 2011 con valori per le mediane sopra ai 1500ppm. In tutti gli altri pozzi non si superano mai i 700ppm. L'alcalinità si presenta statisticamente maggiore nei piezometri P4S e EMS, seguiti dal P6S e P1S. Le mediane più basse, si registrano nei pozzi P2S, MAR1 e MAR2, costantemente nei tre monitoraggi.

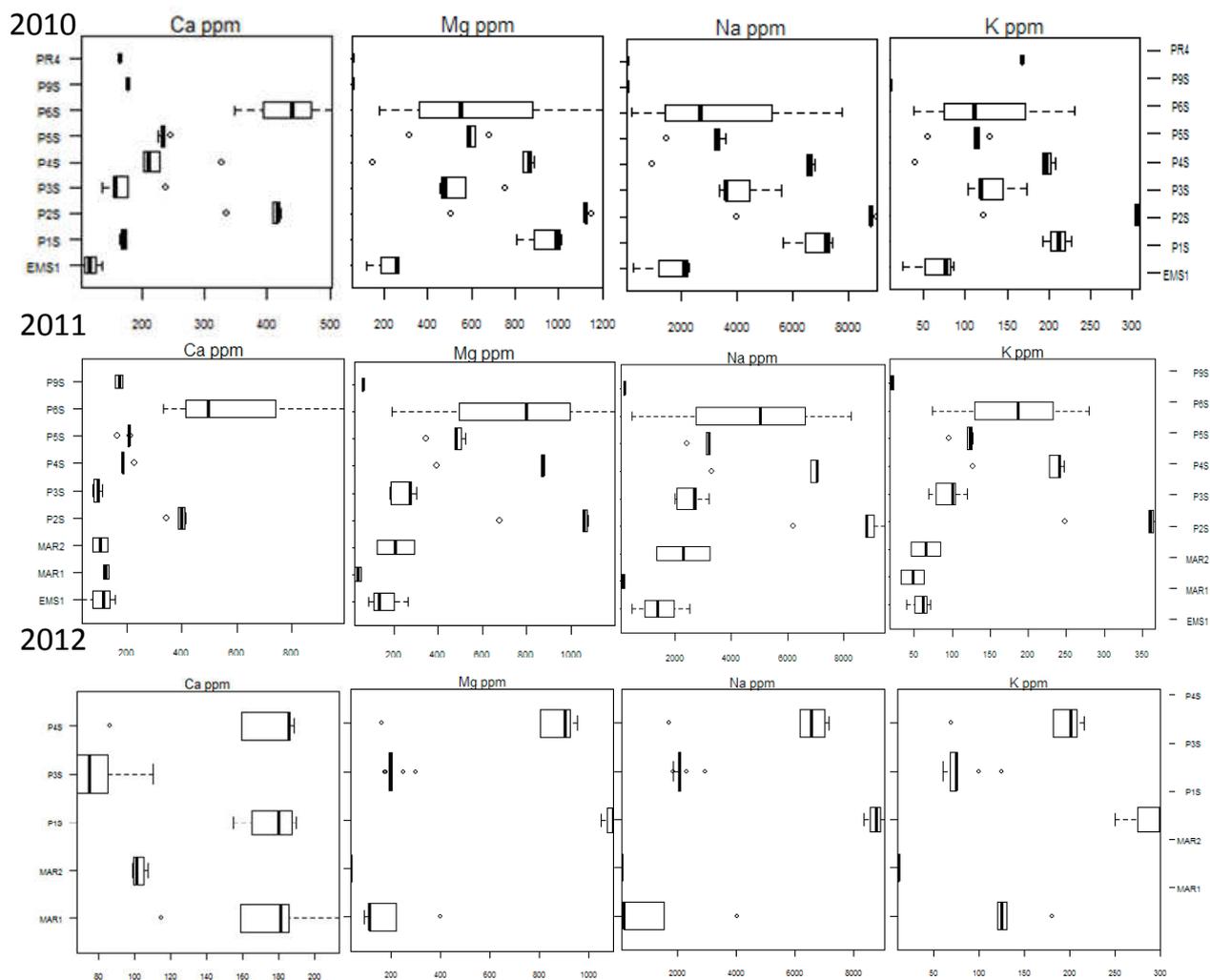


Figura 8.17 Rappresentazione statistica mediante *boxplot* dei cationi misurati nei tre campionamenti eseguiti sul transetto del V bacino. In alto relativo al dicembre 2010, al centro aprile 2011, in basso luglio 2012.

Sempre per quanto riguarda gli anioni, in Figura 8.18 è evidente come a valori bassi di solfati corrispondano, mediamente, valori alti di alcalinità nei pozzi P1S e P4S, fenomeno ben conosciuto come alterazione di sostanza organica che porta ad un aumento di alcalinità a discapito dei solfati usati come ossidanti (Appelo & Postma, 2005). Questo processo pare diminuire per poi scomparire con l'avanzare della stagione estiva nel pozzo P4S.

La Figura 8.19 ripropone la stessa analisi per i nitrati, la salinità, pH ed Eh; i primi risultano molto sporadici e frequentemente prossimi allo zero, eccezion fatta per il pozzo MAR1, in cui pur variando le scale si ritrovano in entrambi i campionamenti.

La salinità segue le statistiche precedentemente trattate per gli elementi conservativi, esibendo pozzi con mediane statisticamente maggiori agli altri come nel caso dei pozzi P4S, P1S e P2S. Tra quelli che possiedono le medie inferiori ci sono MAR1, MAR2 e P9S.

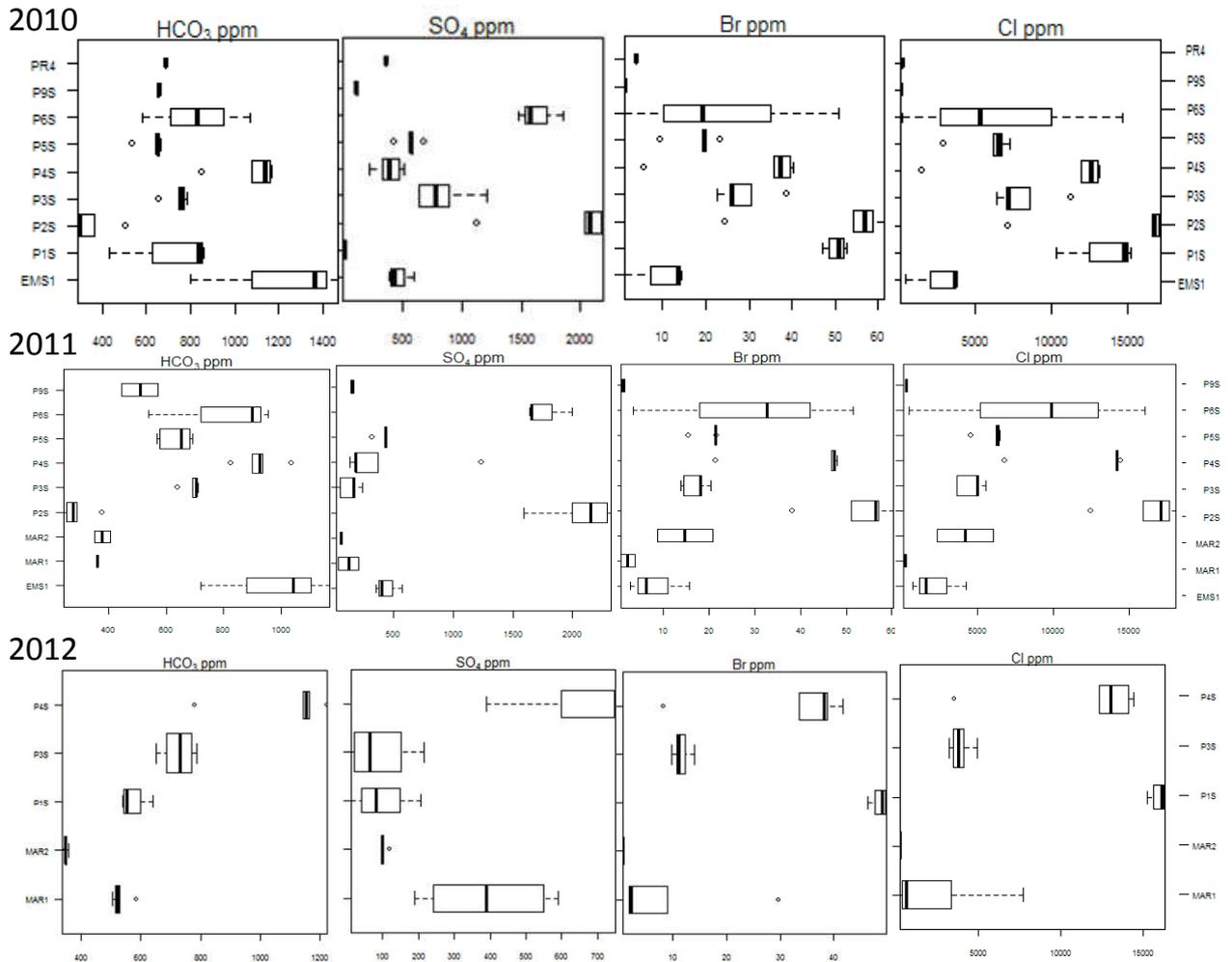


Figura 8.18 Rappresentazione statistica mediante *boxplot* degli anioni misurati nei tre campionamenti eseguiti sul transetto del V bacino. In alto relativo al dicembre 2010, al centro aprile 2011, in basso luglio 2012.

Anche per questi parametri, il piezometro P6S risulta quello a variabilità maggiore, se non per il pH, che appare sia nel 2010 che nel 2011 leggermente inferiore a tutti gli altri piezometri. Il pH risulta mediamente compreso tra le 7 e le 8 unità, fanno eccezione il piezometro P6S nel 2011 e il P1S e P2S nel 2010 che possiedono mediane inferiori al 7. Nel 2010, da notare il pH del P9S che si assesta attorno a 8.5 unità, diminuendo poi nel monitoraggio del 2011.

Il parametro Eh per tutti i pozzi, risulta con le mediane al di sotto dei -50mV. Nel 2010 fanno storia a parte i pozzi P9S e P6S (seppur con la consueta variabilità alta) con mediane attorno ai -60mV. Nell'aprile 2011 si conferma con una mediana di poco negativa il P9S, a cui si aggiunge il MAR1 ed aumenta la media anche nel P5S. Per il 2012 MAR1 e MAR2 possiedono mediane di poco negative, indicando interazioni con le acque superficiali.

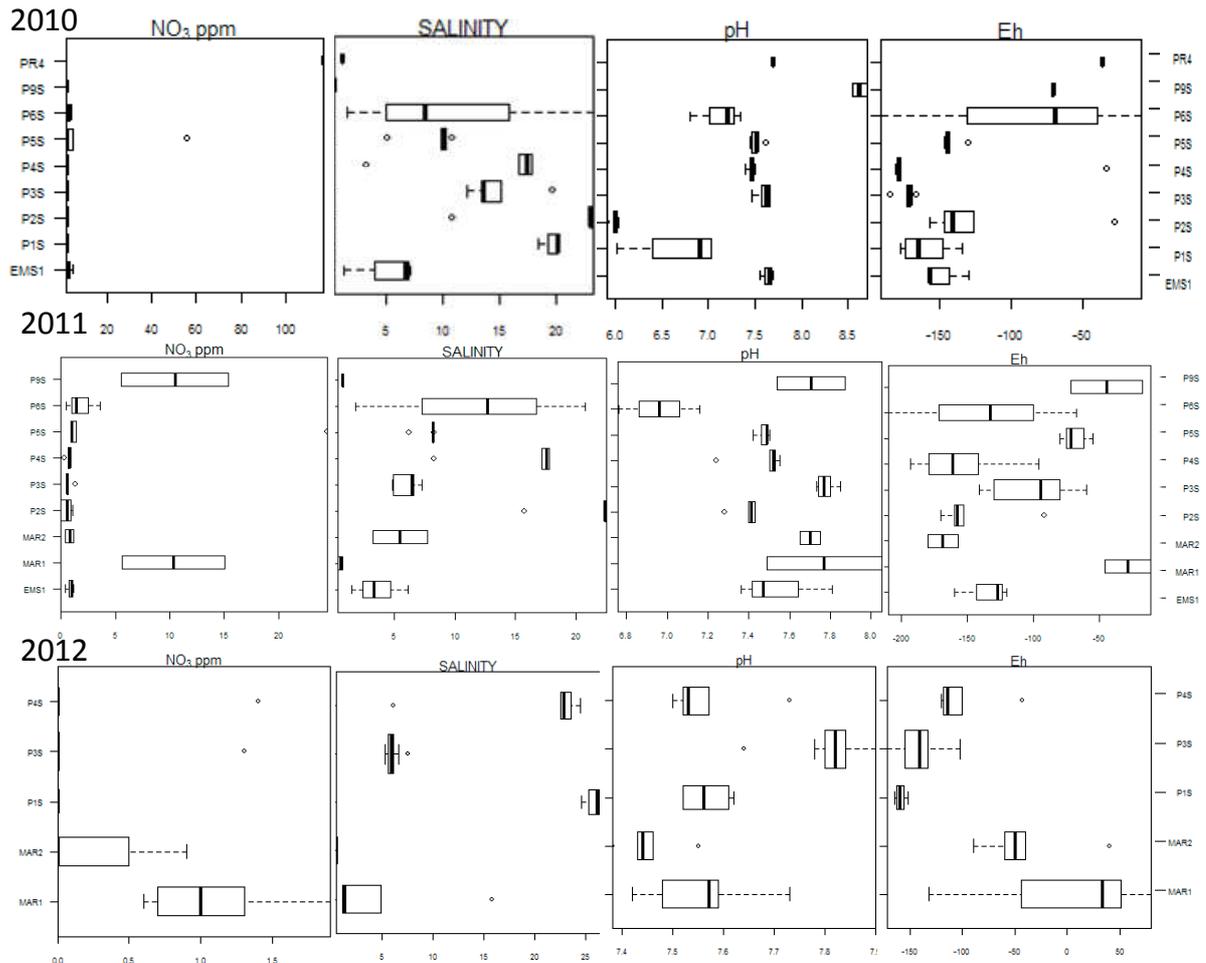


Figura 8.19 Rappresentazione statistica mediante *boxplot* di nitrati, salinità, pH ed Eh, misurati nei tre campionamenti eseguiti sul transetto del V bacino. In alto dicembre 2010, al centro, e aprile 2011, in basso, luglio 2012.

I grafici in Figura 8.20 e Figura 8.21, riportano i profili di Bromo e Calcio, i restanti grafici sono disponibili nel capitolo degli allegati (paragrafo 15.9). Questa rappresentazione ha lo scopo di identificare, a prescindere dai valori reali o dalle variazioni stagionali, gruppi di piezometri che possiedono andamenti paragonabili. La linea nera verticale rappresenta il valore per l'acqua del Mare Adriatico. Se osserviamo la Figura 8.20 possiamo individuare tre tendenze dominanti tra i profili di bromo: la prima, di cui fanno parte i piezometri P1S e P4S, è rappresentata da una costante e alta concentrazione di bromo che varia tra i 30 e 50ppm. Il secondo gruppo, possiede concentrazioni intermedie, con la peculiarità che i valori, all'interno di questi pozzi, aumentano con la profondità fino a raggiungere valori dai 10 ai 25ppm. Di questo gruppo fanno parte il P5S, EMS1, P6S. I restanti piezometri entrano nella terza categoria che vede concentrazioni di bromo inferiori a 10. Così come individuato per il Br, queste 3 classi si rintracciano anche per altri elementi quali: Na, Mg, K, e Cl (paragrafo 15.9).

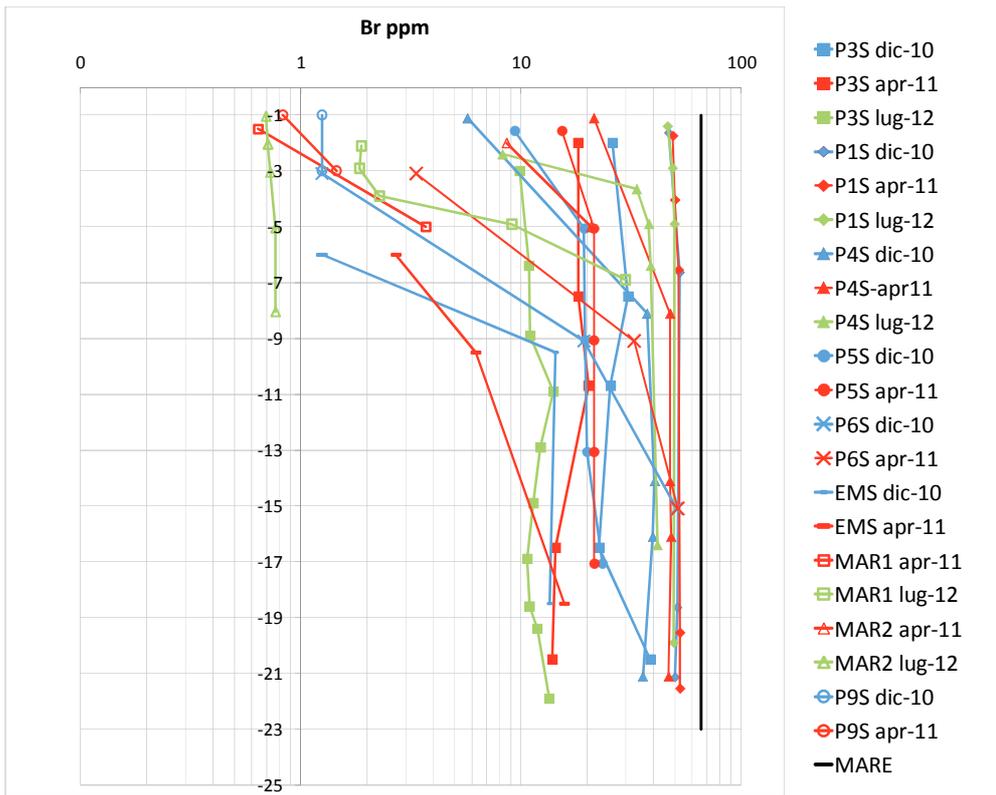


Figura 8.20 Profili di bromo per tutti i pozzi del transetto, per tutti i monitoraggi eseguiti.

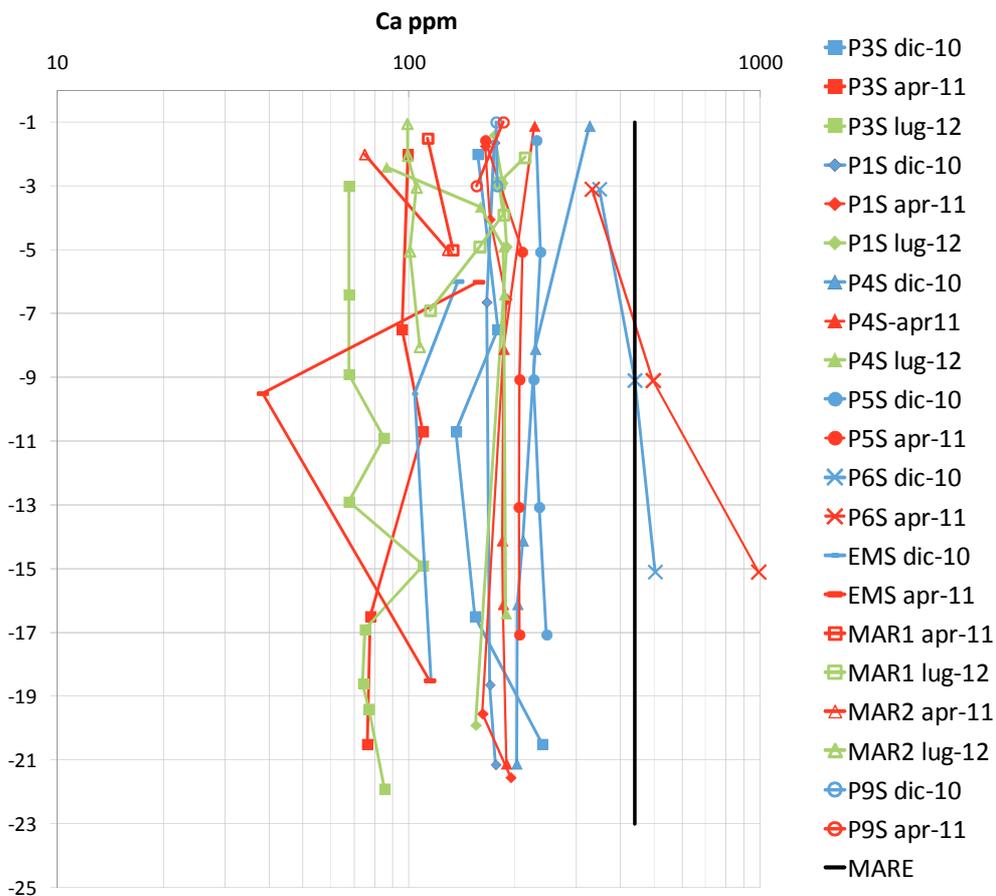


Figura 8.21 Profili di calcio per tutti i pozzi del transetto, per tutti i monitoraggi eseguiti.

I profili in Figura 8.21, invece, individuano sempre tre andamenti diversi, ma che coinvolgono pozzi diversi. Un primo gruppo di pozzi che hanno un contenuto di calcio che va da 40 a circa 150ppm di cui fanno parte i pozzi P3S ed EMS1; un secondo gruppo di piezometri con profili regolari e concentrazioni tra 150 e 200ppm in cui ricadono tutti i rimanenti pozzi ad esclusione del P6S che fa gruppo a parte, in quanto possiede concentrazioni sempre oltre 300 ppm.

Un metodo per evidenziare le variazioni stagionali delle concentrazioni degli elementi analizzati in laboratorio è mostrato in Figura 8.22. Nell'immagine che segue, sono ricostruiti i profili per ogni singolo elemento o parametro di campo per tutte e tre i monitoraggi eseguiti sul transetto. L'ordine dei pozzi in Figura 8.22 segue la reale disposizione dei pozzi in campo.

Analizzando singolarmente i pozzi, emerge che i pozzi P1S, P5S e P9S, non possiedono variazioni stagionali per nessuno dei parametri in Figura 8.22. fa esclusione il P1S per i solfati, la cui concentrazione aumenta nel periodo estivo. I profili dei pozzi P4S, P5S, P6S ed EMS1, si comportano allo stesso modo, mostrando concentrazioni inferiori alla superficie dell'acquifero, che tendenzialmente aumentano con la profondità e con l'avanzare della stagione estiva. Tra questi 4, EMS1, mantiene regolarmente i valori invernali superiori a quelli primaverili per tutti i parametri considerati. Il P4S è quello che in assoluto mostra le variazioni stagionali maggiori nel punto di monitoraggio più superficiale indicando una interazione con le acque superficiali. All'interno del piezometro P3S si riducono notevolmente le concentrazioni di tutti gli elementi durante la stagione estiva ed in concomitanza si misura un aumento dei valori di Eh.

Per quanto riguarda i piezometri MAR, pur mostrando generalmente le concentrazioni inferiori per tutte le variabili presenti in Figura 8.22, evidenziano andamenti stagionali opposti; ad esclusione dell'Eh che aumenta in entrambi i pozzi nel monitoraggio di luglio 2012, la salinità, Mg, K, Na, Cl, Br, aumentano nel MAR1 in luglio 2012, ma calano nel MAR2 nel medesimo campionamento. Maggiori dettagli dell'area MAR verranno trattati nel capitolo 10.

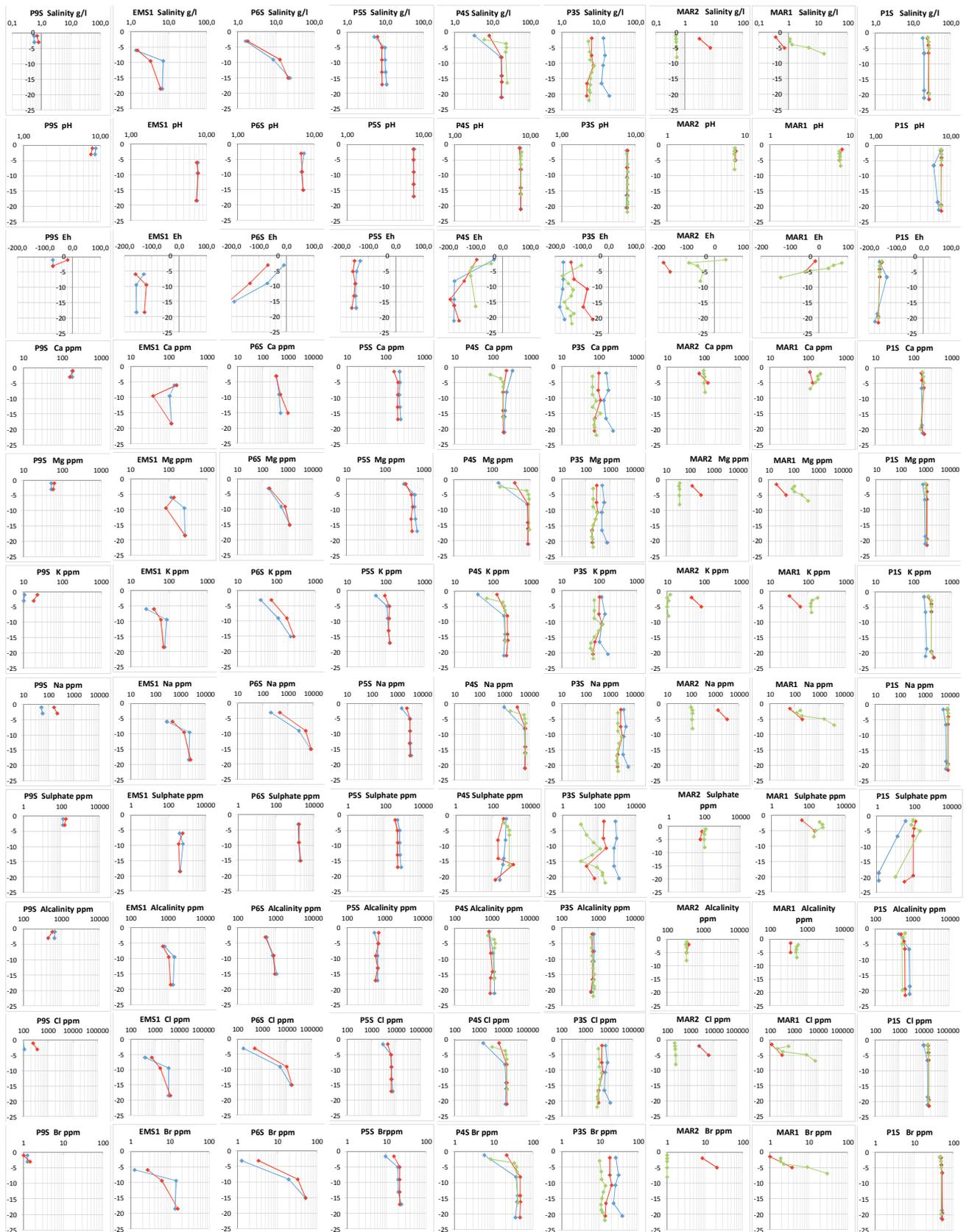


Figura 8.22 Sezioni dei profili di tutti gli elementi analizzati in laboratorio e dei parametri di campo, misurati in tutte e tre le campagne di monitoraggio. Linea BLU dicembre 2010, linea ROSSA aprile 2011 e linea VERDE luglio 2012.

I diagrammi di Piper rappresentati in Figura 8.23, Figura 8.24 e Figura 8.25, restituiscono una classificazione della tipologia di acque presenti in acquifero.

In tutti i diagrammi seguenti è ben visibile come i cationi si dispongano su di una retta perfetta tra il riferimento delle acque dolci (Canale CER) e l'acqua del Mare Adriatico. Anche per gli anioni vi è questo mixing acqua dolce-acqua salata ad esclusione di alcuni campioni che si arricchiscono di solfati e che li portano a spostarsi verso l'alto nella piramide degli anioni.

In generale i campioni provenienti dai pozzi P1S, P2S, P3S, P4S e P5S hanno una composizione simile a quella del mare adriatico indistintamente per tutte le stagioni di monitoraggio. Si dispongono separatamente i campioni superficiali dei pozzi P4S, P6S, EMS1, i quali nel periodo invernale hanno una composizione tendenzialmente vicina alle acque dolci continentali, che si avvicina a quella marina, non appena inizia la stagione vegetativa (Figura 8.23 e Figura 8.24).

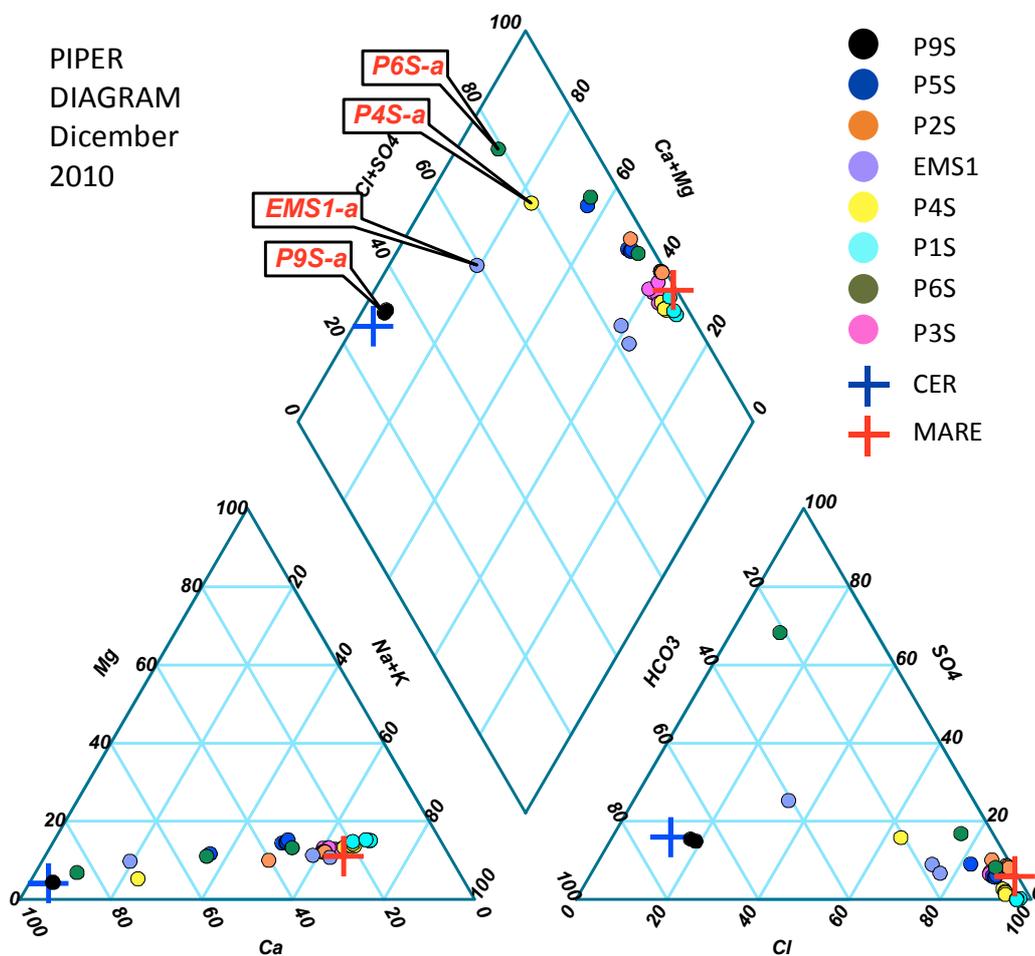


Figura 8.23 Digramma di Piper per i piezometri monitorati nel dicembre 2010.

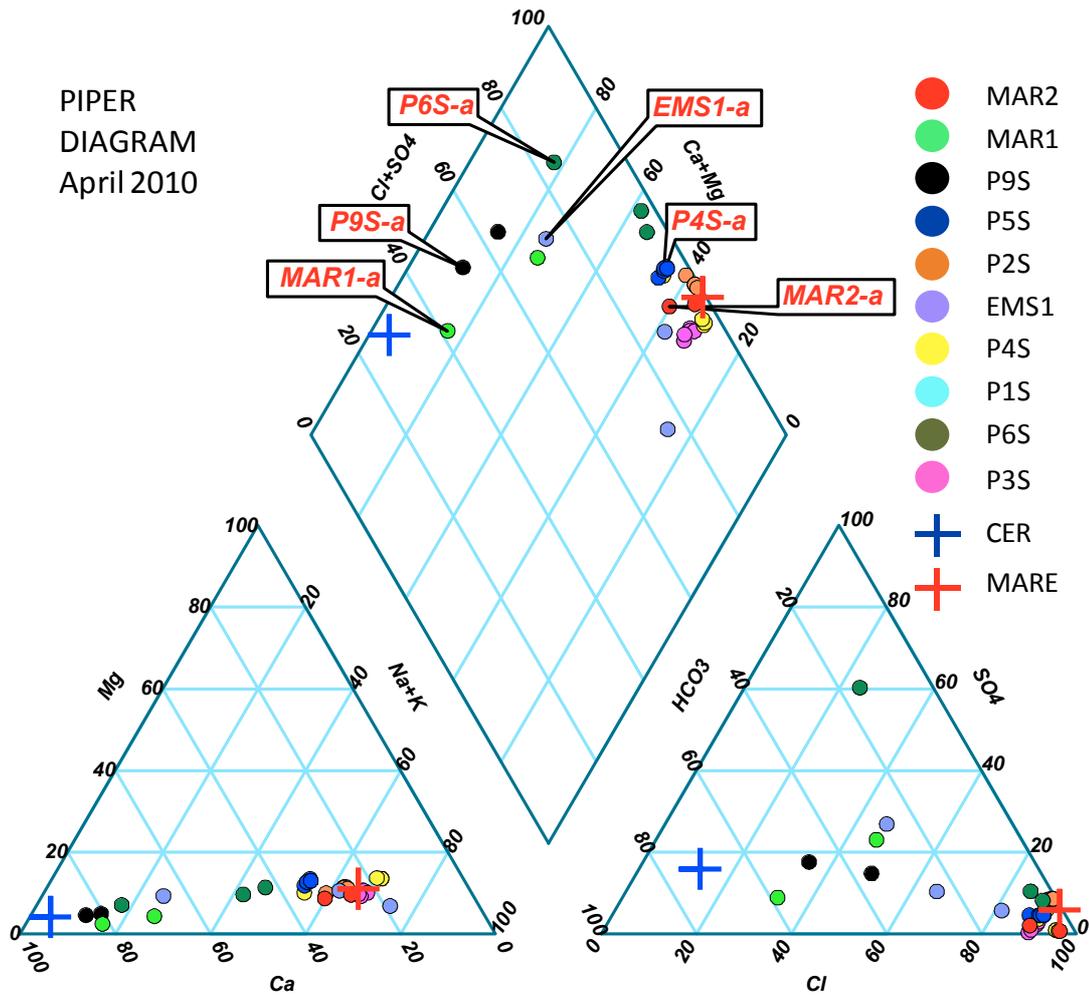


Figura 8.24 Diagramma di Piper per i piezometri monitorati nell'aprile 2011.

Rimane costantemente distante dalla composizione marina il pozzo P9S, anche se tra dicembre ed aprile avviene uno spostamento in direzione della composizione marina. Questo andamento si riscontra per la maggior parte dei campioni superficiali.

Nella stagione estiva oltre a consolidarsi la somiglianza con le acque marine per i pozzi già fortemente salinizzati, (Figura 8.25), si vede che i campioni dei pozzi MAR2 e MAR1, si spostano nella direzione della composizione delle acque continentali, a testimonianza delle infiltrazioni di acqua dolce dalla superficie in acquifero.

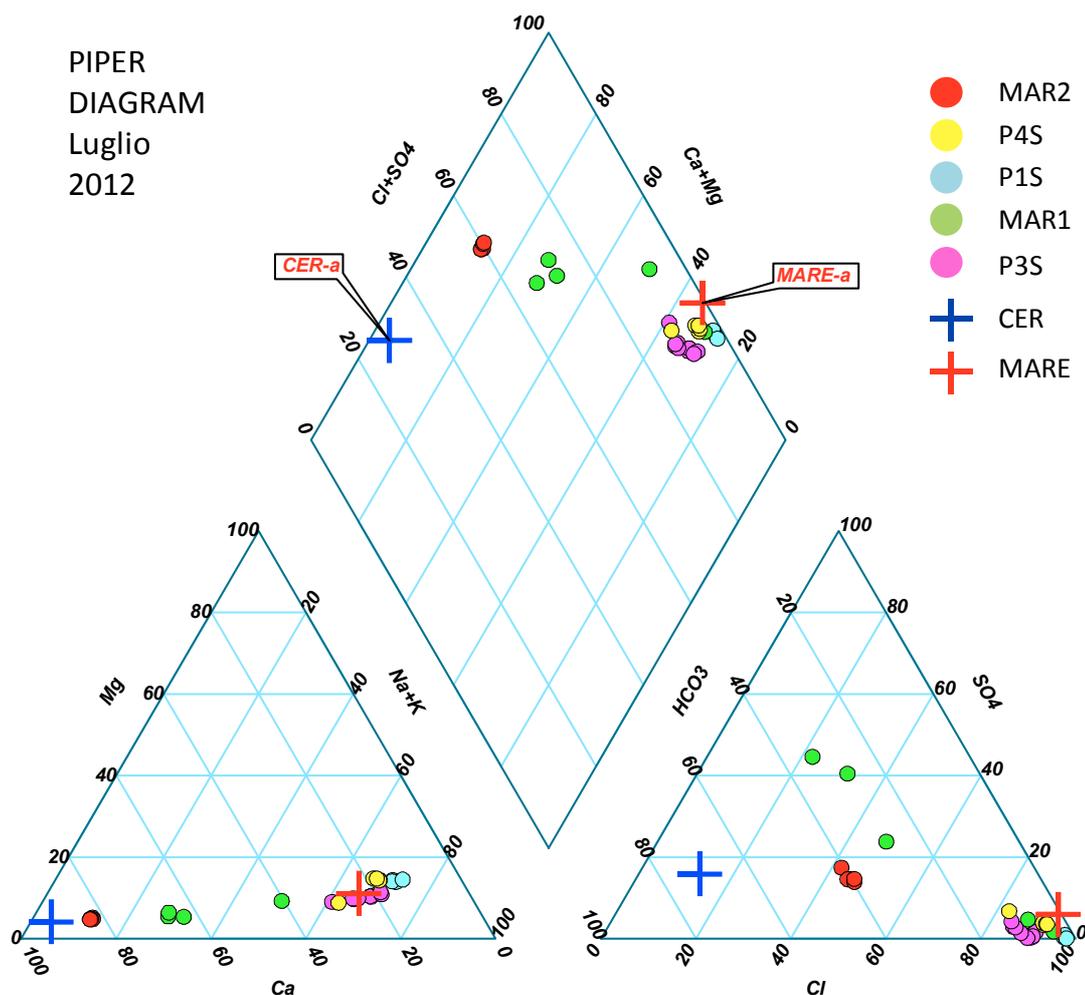


Figura 8.25 Diagramma di Piper per i piezometri monitorati nel luglio 2012.

8.5 Classificazione delle *Hydrofacies*

Stuyfzand nel 1988 ha sviluppato una classificazione idrochimica dei campioni di acqua basata sul contenuto di cloro, sull'alcalinità, sui principali anioni e cationi e sull'indice BEX (Stuyfzand 1993, 2006; Vandebøhede e Lebbe 2011).

La classificazione permette di associare ad ogni campione raccolto un codice alfa-numerico che rappresenta in ordine:

- la/le prima/e lettera/e la concentrazione di cloro;
- Il/i numeri seguenti indicano il grado di alcalinità;
- l'abbreviazione che segue indica la sigla del catione dominante;
- segue l'anione dominante
- infine, il simbolo "+", "-" o 0 rappresentano il valore dell'indice BEX.

Nel caso in cui non vi sia una netta prevalenza di un elemento sugli altri, apparirà la sigla “*Mix*” che significa, appunto, che nel campione nessun catione o anione prevale sugli altri.

In dettaglio, in funzione della concentrazione di cloro, sono distinte acque Oligoaline (G), oligoaline-dolci (g), dolce (F), dolci-salmastre (f), salmastre (B), salmastre-salate (b), salate (S) e iperaline (H) (Tabella 8.2).

In tale classificazione si tiene conto anche dell’alcalinità, così come dei principali anioni e cationi e un segno “+” o “-”, basato sul *BEX index*, indica se è in atto un trend di salinizzazione o di addolcimento di quel campione (Stuyfzand 1993, Vandebøhede, 2011). La Tabella 8.2 riporta per i diversi tipi di acqua le soglie di ciascun parametro utilizzato nella classificazione. Siccome nei sedimenti è contenuto il minerale dolomia è stata utilizzata, nel calcolo del *BEX index*, una formula riadattata a questo caso specifico (Stuyfzand 2006):

$$BEX_D = Na + K - 0.8768 Cl \text{ (meq/L)}$$

L’indice BEX non ci indica solo se è in atto un *freshening* (addolcimento) o una *salinization* (salinizzazione), ma ci restituisce anche il valore assoluto delle reazioni di scambio delle basi ed eventuali reazioni della $CaCO_3$. Durante i calcoli, l’indice BEX non è stato confrontato solo con il cloro, ma anche con tutti gli altri elementi monitorati (somma dei cationi e somma degli anioni) allo scopo di escludere valori falsi, negativi o positivi. In Tabella 8.2 sono riportate le condizioni in cui troviamo il *BEX index* positivo, negativo e uguale a zero. Quando siamo in fase di addolcimento il simbolo sarà “+” poiché la maggior parte dei cationi tipici di acque salate saranno in soluzione, sostituiti, nei legami con il substrato, da cationi peculiari di acque dolci. L’opposto si verifica quando è in atto il processo di salinizzazione.

Questa classificazione di Stuyfzand è molto conosciuta in ambito costiero per la distinzione delle diverse tipologie di acque e per una valutazione rapida dei processi geochimici che avvengono in acquifero. Utilizzando le diverse tipologie di acque sono stati identificati i principali idrosomi e le *facies* idrochimiche.

Come definito da Stuyfzand (1999), l’idrosoma è una unità tridimensionale di acqua sotterranea avente una specifica origine. All’interno dello stesso idrosoma la composizione chimica delle acque varia in funzione del tempo e dello spazio a causa della ricarica, dei flussi sotterranei e a causa delle reazioni chimiche che avvengono tra acqua e mezzo poroso.

Tabella 8.2 Soglie per la classificazione dei tipi d'acqua da Stuyfzand (1993). * e Ass(BEX +((Σc-Σa)/ass(Σc-Σa))*(0.5+0.02CL))> 1.5 ass (Σc-Σa)

Tipologie di acque basate sulla concentrazione di cloro (prima lettera del codice)				
Tipologia	lettera	Concentrazione di cloro (meq/l)	Concentrazione di cloro (mg/l)	
Oligoaline	G	<0.141	0-5	
Oligoaline-dolci	G	0.141-0.846	5-30	
Dolci	F	0.846-4.231	30-150	
Dolci-salmastre	F	4.231-8.462	150-300	
Salmastre	B	8.462-28.206	300-1000	
Salmastre-salate	B	28.206-282.064	1000-10 000	
Salate	S	282.064-564.127	10 000- 20 000	
ipersaline	H	>564.127	>20 000	
Tipologie di acqua in funzione dell'alcalinità (primo numero nel codice)				
Tipologia	Numero	Alcalinità espressa come concentrazione in meq/l di HCO ₃ ⁻	Alcalinità espressa come concentrazione in mg/l di HCO ₃ ⁻	
Molto bassa	*	<0.5	<31	
Bassa	0	0.5 – 1	31 – 61	
Moderatamente bassa	1	1 – 2	61 – 122	
Moderata	2	2 – 4	122 – 244	
Moderatamente alta	3	4 – 8	244 – 488	
Alta	4	8 – 16	488 – 976	
Molto alta	5	16 - 32	976 – 1953	
Piuttosto estrema	6	32 - 64	1953 – 3905	
Estrema	7	>64	>3905	
Tipologie di acqua in funzione dell'indice BEX (segno + o - o 0 nel codice)				
Tipologia	Simbolo	Solo processi di scambio tra le basi	Altri processi rilevanti in acquifero	Condizioni per il <i>BEX index</i> in meq/l
Negativo	-	salinizzato	Deficit di cationi marini	< -(0.5+0.02 Cl) e < 1.5 (Σc-Σa)
Zero	0	No scambio di basi	Equilibrio tra i cationi marini	> -(0.5+0.02 Cl) e < -(0.5+0.02 Cl) e *
Positivo	+	addolcito	Eccesso di cationi marini	>+(0.5+0.02 Cl) e > 1.5 (Σc-Σa)

8.5.1 *Hydrofacies* Acquifero completo

Abbiamo utilizzato questa classificazione per suddividere i 229 campioni raccolti nel dicembre 2010, basandoci sui risultati delle analisi geochimiche eseguite presso il laboratorio Acme Lab. (Canada)

In totale sono stati riconosciuti 26 diversi tipi d'acqua (Tabella 8.3). Per motivi di semplificazione, nella classificazione sono stati raggruppati campioni simili in termini di cationi ed anioni ma con un'alcalinità leggermente diversa e sono stati raggruppati, allo stesso modo, campioni aventi le stesse concentrazioni di cationi-anioni ma una salinità lievemente diversa.

Tabella 8.3 Tabella con i diversi tipi di acqua trovati (*Hydrofacies*) e le relative abbondanze percentuali.

	Tipo d'acqua	Percentuale dei campioni
1	(g-F)(2-4)CaHCO ₃	3.06
2	(f-F)(3-4)CaHCO ₃ -	1.31
3	f4CaHCO ₃ +	0.44
4	F4CaHCO ₃ o	0.44
5	b(2-5)NaCl-	12.66
6	S(3-5)NaCl-	7.86
7	H4NaCl-	3.06
8	(b-B)(3-5)NaCl+	11.79
9	b(4-5)NaCl o	3.06
10	S(2-5)NaCl o	2.62
11	(b-B)(2-4)NaCl	21.83
12	S(2-5)NaCl	14.85
13	H4NaCl	2.18
14	b(3-4)CaCl-	4.80
15	B4CaMix	0.44
16	(F-f)3CaMix	0.87
17	B(3-4)CaMix-	0.87
18	f(3-4)CaMix+	1.31
19	f(3-4)CaMix o	0.87
20	f4CaSO ₄ +	0.44
21	B4MgMix	1.31
22	B4MgMix-	0.44
23	B4MgMix+	0.44
24	B(4-5)NaMix+	1.31
25	f3NaMix+	1.31
26	f4NaHCO ₃ +	0.44

La maggior parte dei campioni (80%) contiene acque di tipo NaCl. Tra le quali il gruppo maggiormente presente è quello di acque salmastre (21%) senza un indice BEX: (b-B)(2-4)NaCl, seguito da S(2-5)NaCl (15%). Un'altra tipologia importante è il tipo b(3-4)CaCl- presente nel 5% dei campioni (Figura 8.26).

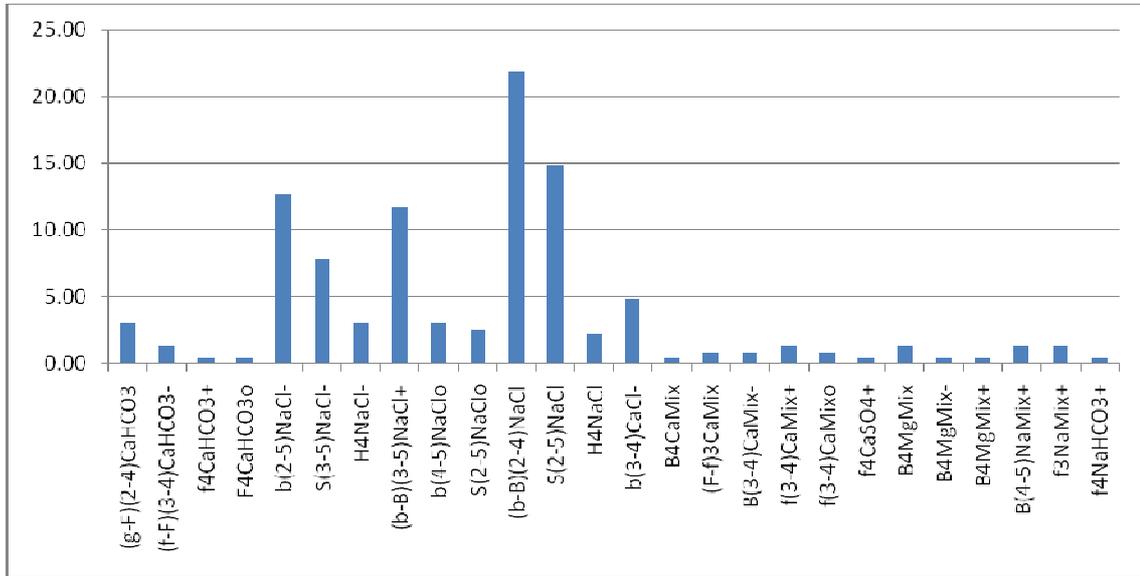


Figura 8.26 Istogramma con le percentuali di ciascun tipo di acqua per i 229 campioni raccolti.

Osservando solo l'indice BEX, un 17% dei campioni ha un BEX positivo (addolcimento in atto), 31% ha un BEX negativo (salinizzazione in atto) e 7 % ha un BEX zero (sostanziale equilibrio cationico)(Figura 8.27). Per una parte importante di campioni (45%) è stato impossibile calcolare l'indice BEX perché la composizione delle acqua o non fa superare le soglie minime per il calcolo o ha un bilancio ionico troppo sbilanciato (Figura 8.27). Fra i campioni per cui è stato possibile calcolare l'indice, il 56 % ha un BEX negativo. Quindi la tendenza alla salinizzazione si riscontra in più della metà dei campioni.

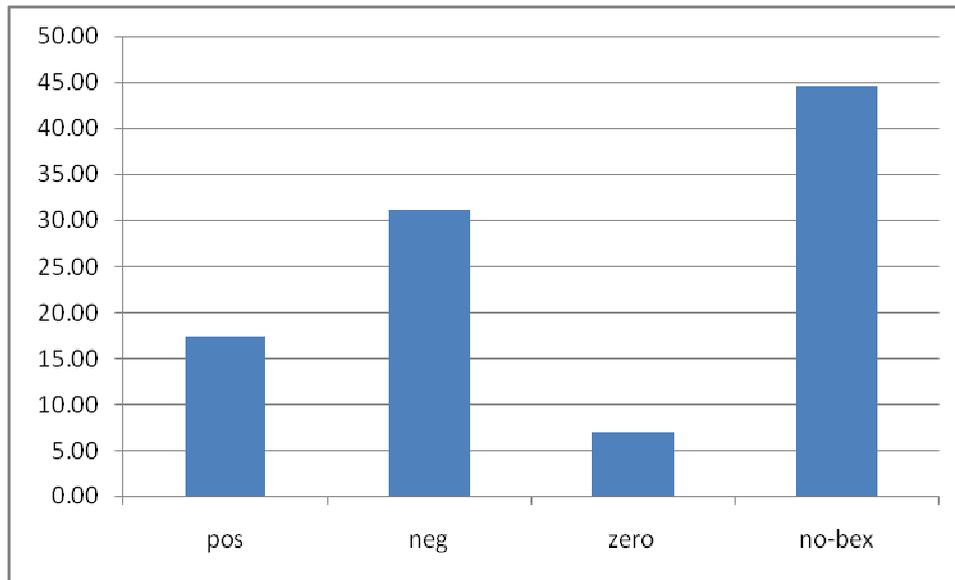


Figura 8.27 Percentuale dei campioni con indice BEX positivo, negativo, zero e senza BEX.

La maggior parte delle acque raccolte sono salmastre, 60%, (B-b) o saline (S-s) 25%, mentre il 5 % dei campioni è ipersalino. Nell'Europa del nord questo tipo d'acqua è di solito associato a diapiri di salgemma (Stuyfzand 1999) ma nella nostra zona di studio è più probabile associare tali tipologie di acqua all'evaporazione estrema che si registra nelle zone adiacenti le lagune odierne e le Piallasse.

Occorre notare che questa classificazione internazionale delle acque possiede, per il parametro salinità, soglie differenti da quelle usate nell'ambito di questo progetto e già trattate al paragrafo 8.3.

Continuando con la classificazione, la Figura 8.26 mostra che solo il 10% dei campioni ha acqua dolce (G-g-f-F) con meno di 300 mg/l di cloro. Fra questi campioni, la maggior parte proviene da acque superficiali (Fiumi e canali di bonifica) ma 10 campioni provengono anche da pozzi (acque sotterranee). Questi pozzi sono localizzati molto lontano dal mare all'interno di ambiti agricoli (P9S), adiacenti a fiumi o canali (P6S, P18S), nelle dune costiere (PR4, MF3-6) o nelle paleo dune come la pineta di San Vitale porzione settentrionale (PZSV18-1, PZSV10, PZSV11).

Per capire la distribuzioni dei diversi tipi d'acqua all'interno dell'area di studio e per riconoscere gli eventuali idrosomi presenti, ogni campione è stato inserito all'interno di una classe di appartenenza che restituisce una diversa origine o localizzazione (Tabella 8.4). Queste suddivisioni ci permetteranno di distinguere più facilmente diversi idrosomi.

Abbiamo individuato 10 classi di appartenenza:

- Dune recenti (Ramazzotti e Marina Romea)
- Paleo dune (San Vitale e Classe.)
- Canali di drenaggio
- Fiumi
- Cave
- Canali Irrigui (Canale Emilia Romagna CER)
- Ambiti agricoli
- Foresta idrofila (Punte Alberete)
- Lagune (acque superficiali delle Pialasse e pozzi vicini)
- Mare

Altri studi propongono altri due possibili idrosomi: acque provenienti da ricarica artificiale e acque di origine vulcanica e magmatica ma la geologia dell'area ci permette di escludere la presenza di queste tipologie.

Di seguito è riportato un esempio di come sono state associate le informazioni chimiche (codifica delle *hydrofacies*) con il dato spaziale e di possibile sorgente del campione. Il database completo è disponibile in allegato al capitolo in oggetto.

Tabella 8.4 Esempio di suddivisione dei campioni, relativo idrosoma e tipo d'acqua. Per la tabella completa vedi l'allegato al capitolo in questione.

Località	Origine dell'idrosoma	Nome campione	Acque superficiale (S) o sotterranea (G)	Tipo d'acqua (Hydrofacies)
Canale Emilia Romagna (Po)	Irrigazione	CER	S	g2CaHCO3
Fiume Savio	Fiume	SAVIO	S	g3CaHCO3
Lamone	Fiume	LAM	S	F3CaHCO3
Fosso Ghiaia	Bonifica	FG	S	F4CaHCO3
Pinete San Vitale	Paleo Dune San Vitale	PZSV11-1	G	F3CaHCO3-
Pinete San Vitale	Paleo Dune San Vitale	PZSV10-2	G	f4CaHCO3-
Punte Alberete	Foresta idrofila	PZSV18-1	G	f4CaHCO3+
Fiume Reno	Fiume	RE	S	B2NaCl
chiaro	Laguna	CHIARO NORD	S	b3NaCl
chiaro	Laguna	COMUNE	S	b3NaCl
Minifiltro	Dune Costiere Ramazzotti	MF2-7	G	b3NaCl
Cavallina cava	Cave	CAV	S	b4NaCl

I campioni raccolti all'interno delle paleodune (Pineta San Vitale e Classe), delle dune costiere e dei terreni agricoli mostrano una variazione più grande nelle tipologie d'acqua. Se facciamo un confronto fra le acque delle paleodune e delle dune costiere (Fig. 2.83), vediamo che le paleodune contengono 12 tipi d'acqua invece le dune costiere 9 tipi diversi.

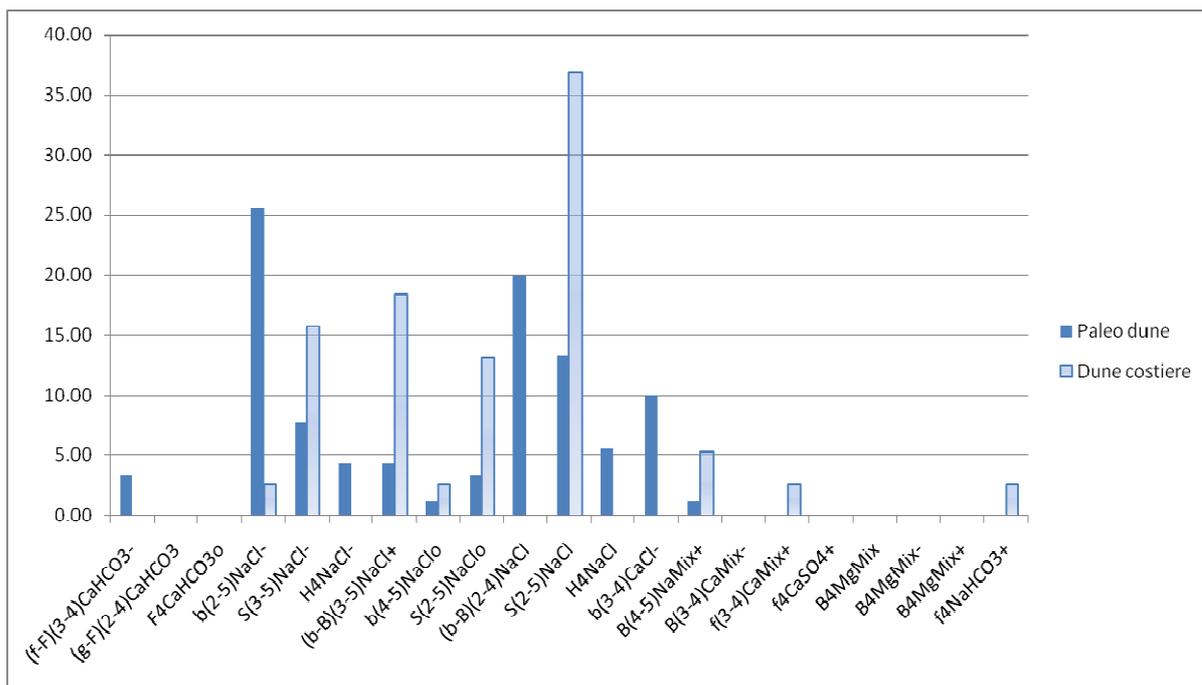


Figura 8.28 Istogramma dei diversi tipi d'acqua presenti nelle dune costiere e le paleo dune.

Nelle paleodune l'*hydrofacies* più presente è quella "NaCl salmastra (b-B)" con un 26 % dei campioni che registra un indice BEX negativo, quindi con un trend di salinizzazione in corso. Invece nelle dune costiere, l'acqua è generalmente più salata (S(2-5)NaCl) e l'indice BEX è molto più variabile, a volte è negativo (16%) altre positivo (18%) o neutro. Nelle paleodune però si osservano campioni con CaCl-, H4NaCl, H4NaCl-e f-F (3-4)CaHCO3- che non compaiono nelle dune costiere. Questi tipi d'acqua indicano un trend di salinizzazione e la composizione rappresenta tipi d'acqua che si formano durante la sostituzione degli elementi tipici di acque dolci con quelli marini (salinizzazione). Invece nelle dune costiere sono presenti anche campioni con codici f(3-4)CaMix+ e f4NaHCO3+ i quali indicano un trend di addolcimento che avviene quando l'acqua di mare si miscela con l'acqua dolce delle piogge.

Se aggiungiamo al confronto anche i campioni provenienti dai terreni agricoli (Figura 8.29) si nota rapidamente che sono presenti più tipi d'acqua (17). In particolare, acque ricche in magnesio e SO_4^- sono presenti solo nei terreni agricoli, ma anche in questo gruppo la maggior parte di campioni è del tipo NaCl. Guardando l'indice BEX: 23 % ha un indice BEX positivo invece 20% ha un BEX negativo. Questo è facilmente spiegabile nel contesto irriguo di questi appezzamenti agricoli. Durante il periodo estivo l'acqua dolce del CER è usata a scopo irriguo; questo dolcifica l'acqua salmastra presente nella falda. La presenza di magnesio come catione dominante nelle acque può essere spiegato dal fatto che nei sedimenti dell'acquifero è stata trovata la presenza di dolomite (Curzi et al, 2006); quando l'acqua dell'irrigazione ricca di Calcio va a contatto con questi sedimenti sono liberati in soluzione ioni magnesio.

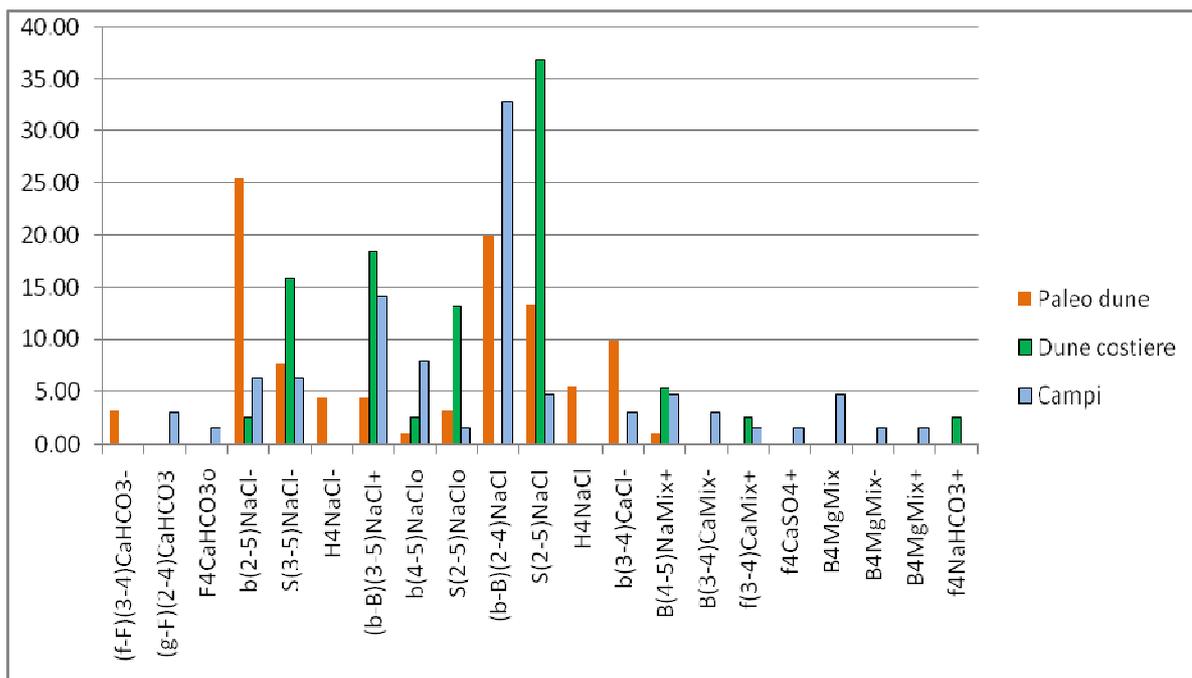


Figura 8.29: Istogramma dei tipi d'acqua presenti nelle Paleo dune, nelle dune costiere e nei campi.

Meno variabili risultano le altre possibili sorgenti (Figura 8.30). L'acqua proveniente da drenaggio è ricca in calcio come l'acqua d'irrigazione e dei fiumi. L'acqua d'irrigazione è dolce (g-F) ma l'acqua dei fiumi può essere anche salina come nel Reno e Lamone (Laghi 2010). I campioni presi vicino alle lagune o nelle lagune stesse, sono tutti molto salati. Anche i campioni dalle cave hanno delle impronte salmastre "b(4-5)NaCl" e la maggior parte mostra soprattutto un indice BEX positivo, che indica un trend di addolcimento.

	Drainage Canali drenaggio	Drowned Forest Foreste Idrofile	Fields Ambiti Agricoli	Irrigatio n Canali Irrigui	Lagoon Lagune	New dunes Dune Costiere	Old dunes Paleodune	Quarry Cave	River Fiumi	Sea Mare	TOT
H4NaCl	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	3,9	0,0	0,0	0,0	5,2
S(2-5)NaCl	0,0	0,0	3,5	0,0	3,1	8,7	9,6	0,0	0,0	0,4	25,3
(b-B)(2-5)NaCl	0,0	0,4	13,1	0,0	1,3	3,1	20,1	0,9	0,4	0,0	39,3
(b-B)(2-5)NaCl+	0,0	0,0	3,9	0,0	0,0	3,1	0,0	3,1	0,0	0,0	10,0
B(4-5)NaMix+	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	2,6
b(3-4)CaCl-	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	0,0	0,0	4,8
B(3-4)CaMix	0,4	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
B4MgMix	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
B4MgMix+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4
(f-F)(3-4)CaHCO3	0,4	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,4	0,0	3,5
(f-F)(3-4)CaMix	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,7
(f-F)(3-4)CaMix+	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
(f-F)(3-4)CaHCO3+	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
f4CaSO4+	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
f4NaHCO3+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
g(2-3)CaHCO3	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	1,3

Figura 8.30 Riassunto complessivo di tutte le hydrofacies presenti suddivise all'interno dei possibili idrosomi.

Nella Figura 8.31 è mostrata per ciascuna *hydrofacies* la percentuale all'interno delle classi di provenienza dei campioni presenti. L'ordine delle *hydrofacies* va da salinità maggiori a salinità inferiori (da sinistra verso destra); questo ci permette di notare come i tipi NaCl siano composti principalmente da campioni provenienti da Paleodune, dune costiere, lagune e ambiti agricoli. Le acque con caratteristiche continentali sono formate da campioni dei fiumi, dei canali di drenaggio e irrigui, da ambiti agricoli e in porzione minore da campioni raccolti nelle dune sia costiere che relitte.

Di seguito la Tabella 8.5 mostra le diverse tipologie di acque ritrovate nei campioni presenti in acque superficiali. Da notare come il nostro riferimento per le acque irrigue del transetto e della zona MAR, il Canale Emiliano Romagnolo, abbia una *hydrofacies* “g2CaHCO₃”, così come i Fiumi Uniti e il Savio, mentre il riferimento per le acque marine, il Mare Adriatico, evidenzia un codice “S2NaCl”.

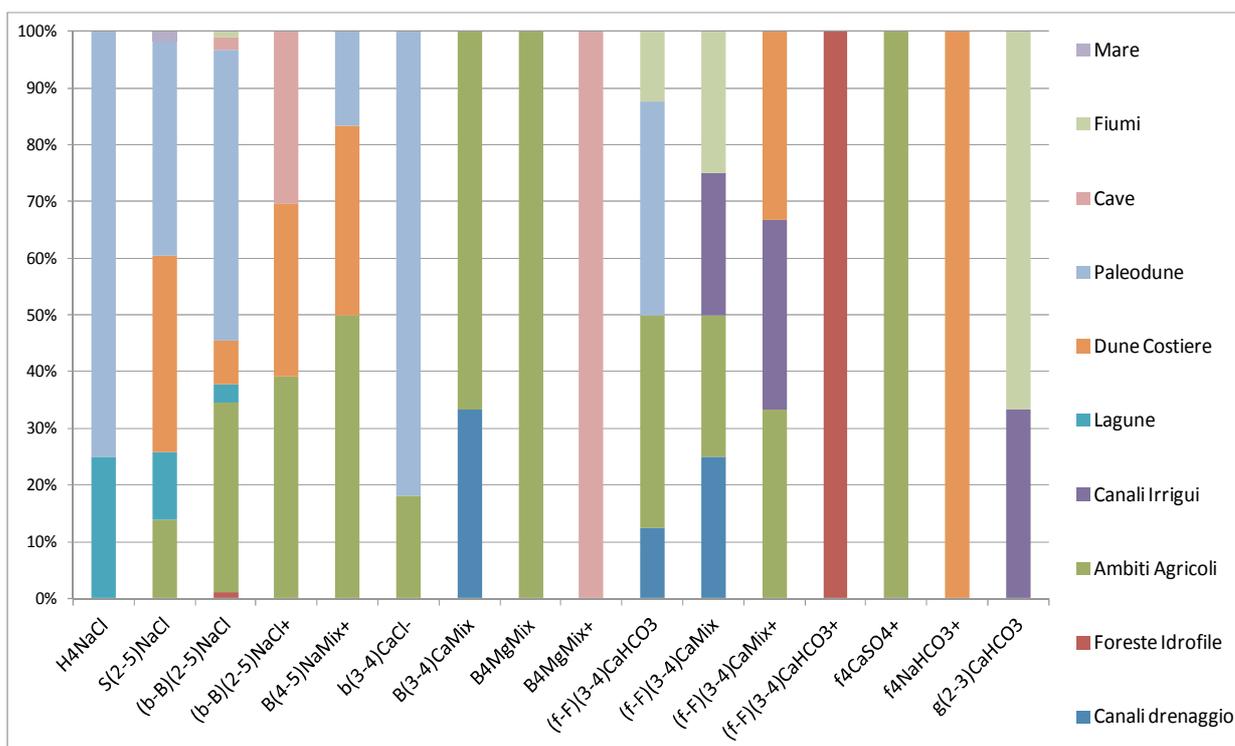


Figura 8.31 Istogramma delle percentuali di presenza di ciascuna classe di provenienza del campione per le principali *hydrofacies* rilevate.

Tabella 8.5 *Hydrofacies* rilevate nelle acque superficiali

Località	Origine dell'idrosoma	Nome campione	Acque superficiale (S) o sotterranea (G)	Tipo d'acqua (Hydrofacies)
Tre Ponti	Canale drenaggio	3P	S	B4CaMix
Fosso Ghiaia	Canale drenaggio	FG	S	F4CaHCO3
Destra Reno	CanaleIrriguo	DX RE	S	f4CaMix+
Canale Cerba	CanaleIrriguo	CE	S	f4CaMixo
Canale Emiliano Romagnolo (Po)	CanaleIrriguo	CER	S	g2CaHCO3
Marina Romea Pialassa Baiona	Laguna	P10N-2	G	H4NaCl-
Laguna	Laguna	BAIONA	S	S2NaCl
Cave	Cave	EMS 3	S	b4NaCl+
Fiume Reno	Fiume	RE	S	B2NaCl
Lamone	Fiume	LAM	S	F3CaHCO3
Torrente Bevano	Fiume	BEV	S	F3CaMix
Fosso Ghiaia	Canale	BEVANELL A	S	f3CaMixo
Fiumi Uniti	Fiume	FU	S	g3CaHCO3
Fiume Savio	Fiume	SAVIO	S	g3CaHCO3
Mare	Mare	MARE	S	S2NaClo

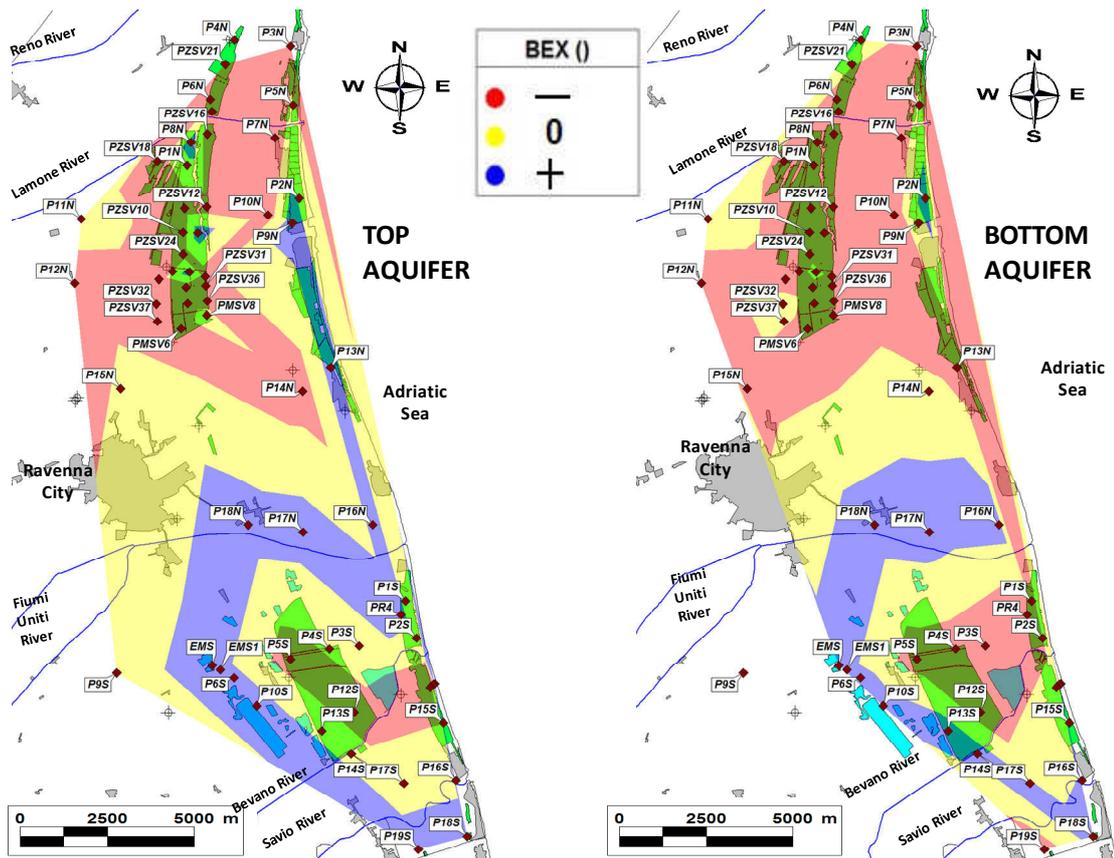


Figura 8.32 Mappe dell'Indice BEX per il monitoraggio di dicembre 2010. A sinistra la superficie dell'acquifero, a destra il fondo dell'acquifero.

La Figura 8.32 riporta le mappe create per l'indice BEX, ottenute sulla base dei dati del dicembre 2010. La mappa di sinistra riguarda la superficie dell'acquifero, mentre a destra troviamo quella del fondo dell'acquifero a circa -25m s.l.m.m.. Entrambe evidenziano come l'area a nord che circonda la Pineta di San Vitale mostri un trend generale di salinizzazione in corso, così come si ritrova la medesima condizione nella porzione centrale e costiera del V Bacino a sud di Ravenna. Le aree che possiedono BEX positivo sono quelle che si trovano sotto il corso dei Fiumi Uniti, l'intera fascia delle cave e i pozzi vicini alla foce del Fiume Savio. In queste zone tale tendenza si riscontra anche al fondo dell'acquifero. Anche il piezometro P9N a nord (interno alla Pineta costiera di Marina Romea), possiede un BEX positivo in superficie che scompare nella mappa del fondo acquifero.

8.5.2 Transetto

La medesima classificazione delle *hydrofacies* descritta per l'intero acquifero è stata eseguita all'interno del transetto del V Bacino in dicembre 2010 e in aprile 2011. In Figura 8.33 e Figura 8.34, sono mostrate le *hydrofacies* ottenute in entrambi i monitoraggi; la legenda riporta il codice del tipo di acqua e la scala cromatica indica, mediante colori caldi, le acque salate ed attraverso colori freddi, le acque tendenzialmente dolci.

In dicembre (Figura 8.33) le *hydrofacies* dominanti sono quelle a composizione cloruro-sodica, rinvenute in 24 dei 29 campioni analizzati, all'interno del transetto si dispongono principalmente alla base dell'acquifero e nei pozzi P2S, P3S, P4S e P5S a tutte le profondità campionate. Solamente nel primo campione del P4S l'indice BEX risulta positivo, sintomatico di una fase di dolciificazione. Il codice "NaCl+" si ritrova anche alla base dei pozzi EMS1 e P6S ed indica un'acqua a componente marina dominante ma che mostra una fase di dolciificazione in atto. Nei campioni superficiali dei medesimi pozzi sono presenti, rispettivamente, acque salmastre Mg dominanti e acque dolci con ione solfato dominante, in linea con quanto mostrato nei risultati delle analisi chimiche (paragrafo 8.4.2). Acque prettamente dolci e simili a quelle superficiali (CER, Canale Fosso Ghiaia e Fiumi Uniti) si trovano nel piezometro P9S, codice "f-gCaHCO3+". In V_S, il codice ritrovato è analogo a quello presente nelle acque del Torrente Bevano, che testimonia la forte interazione tra le acque dolci e il cuneo salino sottostante presente nei corpi idrici superficiali aperti a mare come il Bevano stesso (Laghi 2010).

Osservando la Figura 8.34, relativa all'aprile 2011, occorre fare notare che è cambiato il numero dei piezometri nella parte orientale del transetto: nel mese di febbraio 2011 sono stati messi a dimora 2 nuovi pozzi MAR1 e MAR2 per lo studio di dettaglio di quella porzione di acquifero (capitolo 10). A parte questo cambiamento strutturale si può notare come la situazione generale rimanga invariata, in quanto la componente marina dominante si riscontra in 26 dei 32 campioni. Risalta subito la scomparsa del BEX positivo al di sotto della pineta di Classe nel pozzo P4S e stessa situazione si osserva anche nel secondo campione del P6S. Il primo campione del P2S in Pineta Ramazzotti, passa da salmastro a salato, non variando la sua composizione, mentre alla superficie nel pozzo P6S si passa da acque dolci a salmastre, mantenendo la stessa composizione dominante.

Hydrofacies Dicembre 2010

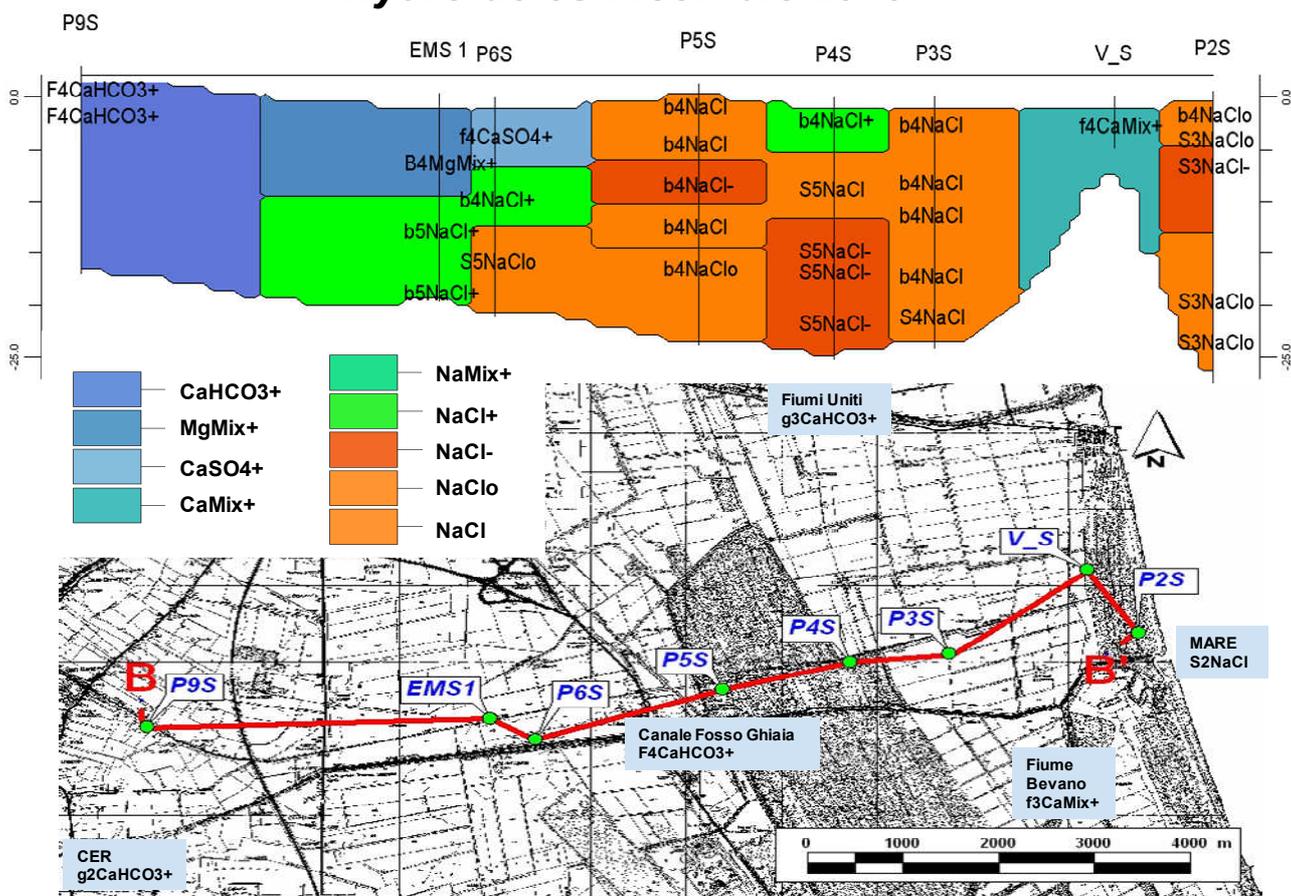


Figura 8.33 Hydrofacies rinvenute nei pozzi del transetto del V Bacino. Nella mappa sono rappresentate anche le Hydrofacies delle acque superficiali della zona, del Mare Adriatico e del CER. Campionamento di dicembre 2010.

Hydrofacies Aprile 2011

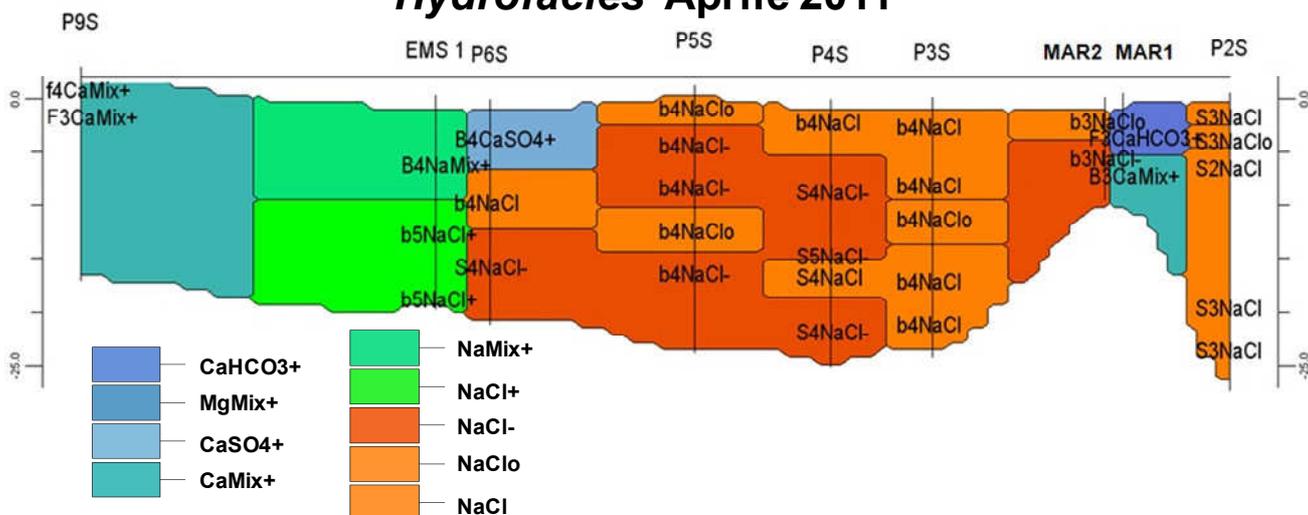


Figura 8.34 Hydrofacies rinvenute nei pozzi del transetto del V Bacino. Campionamento di aprile 2011.

Nella parte ovest del transetto, nel P9S, le acque rimangono dolci, diventando ad anione “Mix” e mantenendo un BEX positivo. Nella porzione orientale, nei pressi dei pozzi MAR, si nota come in superficie del MAR1 sia presente un’acqua dolce a composizione tipica delle acque superficiali (“f-gCaHCO3+”), mentre nel secondo campione l’acqua diventi salmastra “CaMix+”. Nel pozzo MAR2 adiacente al canale di stoccaggio, in aprile 2011 le acque sono salmastre a composizione marina dominante.

L’area adiacente ai pozzi MAR verrà trattata in dettaglio nel capitolo 10 relativo alla tecnica di ricarica dell’acquifero studiata per ridurre la salinizzazione delle acque sotterranee e dei suoli.

8.6 Conclusioni

Il monitoraggio della soggiacenza della falda a scala complessiva di acquifero evidenzia come nell’area costiera del comune di Ravenna la falda freatica si trovi ampiamente al di sotto del livello del mare. Fanno eccezione limitate porzioni di acquifero al di sotto della Pineta di San Vitale e Punta Alberete, a nord e alcuni pozzi come il P12S e il P15S, anch’essi interni alle Pinete, a sud di Ravenna. Nella parte occidentale dell’area considerata, dove la morfologia superficiale raggiunge quote di alcuni metri sul livello del mare (P9S), anche la falda freatica si mantiene costantemente sopra il livello del mare.

Un’altra considerazione che emerge è come la soggiacenza della falda sia fortemente dipendente dalla stagionalità, infatti, con il passaggio dal mese di giugno a quello di dicembre, le porzioni di acquiferi superiori al mare aumentano leggermente. Allo stesso modo, in anni come il 2011, molto scarsi in termini di precipitazioni, si ha un’estesa diminuzione del livello freatico, che si ripercuote sulla disponibilità idrica della vegetazione e sui gradienti dell’area. Osservando i gradienti si vede chiaramente come i vettori di flusso in acquifero siano orientati da mare verso l’entroterra in tutta l’area monitorata. Fanno eccezione alcune zone di Pinete costiere come Marina Romea e lido di Classe, in cui alcuni corpi di dune relitte mantengono un gradiente verso mare. I vettori orientati verso l’entroterra, convergono tutti verso le idrovore che drenano tutto il territorio. La maggiore evidenza si nota all’interno del V Bacino in cui l’idrovara omonima, localizzata nei pressi dell’abitato di Fosso Ghiaia, ad ovest della Pineta di Classe, appare il punto più depresso di tutta l’area. Proprio il transetto di approfondimento costruito all’interno del V bacino, mostra un gradiente costante da mare verso l’idrovara durante tutti i 18 mesi di monitoraggio; la soggiacenza massima si raggiunge nei periodi estivi, quando però si registra per alcuni pozzi (MAR e EMS1) una risalita della falda freatica, dovuta alla vicinanza di canali irrigui che mantengono o addirittura incrementano le portate nel periodo estivo.

Le mappe di salinità a scala generale rivelano come vi sia un'estesa salinizzazione in atto nell'acquifero freatico. Già 6 metri sotto la falda, le aree che presentano acque definibili "dolci" si limitano alle vicinanze dei Fiumi Uniti e del Fiume Savio e nella fascia delle cave. A fondo acquifero è assente acqua dolce e la salinità è ovunque superiore a 5g/l, con punte di salinità nei pressi delle Pialasse fino ad oltre 25g/l.

In superficie la situazione migliora leggermente, come per la soggiacenza della falda, anche le lenti di acqua dolce si ritrovano al di sotto delle pinete storiche dentro alle paleodune; sono presenti, infatti, nella porzione occidentale della Pineta di San Vitale e a sud nella Pineta di Classe. Ancora una volta le porzioni di acquifero adiacenti a fiumi e canali irrigui mostrano alla superficie acque dolci. Al di sotto del Fiume Savio, dei Fiumi Uniti e del torrente Bevano, sono presenti acque con salinità inferiori a 3g/l.

La salinità misurata nel transetto interno al V Bacino conferma quanto detto a scala di acquifero. La condizione del transetto risulta estremamente salinizzata, in tutti i pozzi fino al P5S, la salinità è superiore ai 5g/l a tutte le profondità e in tutte le stagioni. In questi pozzi è presente sola mente una piccola lente di acqua meno salata in superficie al termine della fase invernale, che scompare rapidamente con l'inizio della primavera.

Nei pozzi ad ovest del transetto la salinità si mantiene bassa in superficie nel P6S e nel EMS1, ma al fondo troviamo ancora acque molto salate. Nel P9S l'acqua presente è dolce durante tutte le stagioni campionate.

Le analisi chimiche ci disegnano un acquifero compromesso a causa del sale; oltre l'80% dei 229 campioni raccolti possiede una composizione dominante cloruro-sodica (Mollema *et al* 2012).

Sono presenti in acquifero campioni con salinità maggiori di quella dell'acqua di mare, che si ritrovano prevalentemente nei campioni lagunari e nei pozzi limitrofi alle Pialasse. Le acque con hydrofacies salina si riscontrano in un vasto numero di pozzi, principalmente quelli situati nelle paleodune, nelle dune costiere e nei campi agricoli. Le acque a composizione calcica si riscontrano nelle acque dei fiumi e dei canali di bonifica. Tale tipologia è presente nelle cave e in alcuni pozzi in cui l'acquifero superficiale risulta freatico (paleodune e dune costiere)

In funzione di questa classificazione dei tipi d'acqua e dell'evoluzione storica recente dell'area costiera di Ravenna, Mollema 2012, individua 6 differenti idrosomi (*hydrosomes*): acque appartenenti alla trasgressione olocenica, acque originarie del fiume Po, acque fluviali appenniniche, acque presenti nelle dune costiere e nelle paleodune e acque presenti nelle attuali lagune e in mare (Mollema 2012).

I profili disposti in ordine spaziale, di alcuni elementi come i solfati e l'alcalinità e la simultanea presenza in profondità di Eh fortemente negativi, sintomatici di scarse interazioni con le acque superficiali, propongono un fenomeno molto diffuso nell'acquifero: il consumo di solfati nelle reazioni di ossidazione di sostanza organica. L'utilizzo dei solfati nella normale

sequenza di ossidazione del materiale organico è ampiamente riconosciuta (Appelo and Postma, 2005). Dai dati raccolti in campo durante lo scavo dei piezometri emerge che sono frequenti nel nostro acquifero intercalazioni di materiale organico, testimoniate anche da Amorosi et al., 1999, in grado di garantire questo tipo di reazioni. Tutte queste circostanze portano frequentemente ad osservare in campioni di acque alti valori di salinità, basse concentrazioni di solfati e alcalinità elevata, che testimoniano queste reazioni (Appelo 2005). Un'altra reazione che si verifica in acquifero è la precipitazione di pirite; in condizioni fortemente alcaline, infatti, il ferro ferroso si lega con i solfati formando FeS_2 che causa un ulteriore impoverimento dei solfati dalle acque (Dellwig et al., 2001). All'interno del transetto, le reazioni sopra descritte si manifestano con entità minore rispetto a pozzi in Pineta a San Vitale, ma come nel caso dei piezometri P1S e P3S, giustificano gli andamenti di solfati e alcalinità.

Le mappe dell'indice BEX mostrano come la salinizzazione sia un processo dominante nella porzione nord di Ravenna e che nel transetto di dettaglio l'acqua di mare contaminò tutto l'acquifero fino alla Pineta di Classe; dalla fascia delle cave verso ovest un processo di dolcificazione è costantemente in atto, mentre solo nei punti più superficiali dei pozzi in acquifero freatico, appare il BEX positivo al termine della stagione invernale.

Dall'analisi fatta, possiamo concludere che l'acquifero è ampiamente salinizzato. Vi è una forte stagionalità nella porzione superficiale dell'acquifero e la maggiore influenza delle condizioni climatiche esterne si trova in corrispondenza delle porzioni di acquifero freatico. È evidente come il sistema superficiale sia legato direttamente agli andamenti climatici locali, ma già pochi metri sotto la tavola d'acqua il sistema sia statico e dia origine a reazioni acqua-sedimento. Le sottili e modeste lenti di acqua dolce presenti al di sotto delle pinete storiche sono effimere e a tale scala scompaiono rapidamente con l'arrivo della stagione primaverile.

9 TEMPERATURE DELL'ACQUIFERO

9.1 Introduzione

L'utilizzo della temperatura come tracciante le dinamiche idrologiche ha avuto inizio quando si è compreso che la temperatura segue i flussi delle acque, propagandosi in tutto il mezzo poroso (Bouyoucos, 1915). Già a metà del secolo scorso, gli idrologi presero in considerazione la possibilità di utilizzare misure di temperatura per stimare la velocità di flusso dell'acqua dalla superficie a grandi profondità (per esempio, vedere Rorabough, 1954, e Stallman, 1963). Da allora, i modelli di temperatura sono stati sfruttati per lo studio di sistemi di flusso sotterranei che vanno da acqua per l'irrigazione nelle risaie fino alla risalita di acque termali in zone vulcaniche (Suzuki, 1960; Sorey, 1971). Oggigiorno, i miglioramenti significativi nell'acquisizione dei dati e nei processi di calcolo hanno fatto diventare di routine l'applicazione del calore come tracciante idrologico e di conseguenza sono aumentate anche le indagini svolte attraverso questa metodologia (Vandenbohede, 2010 e 2011).

Rispetto all'applicazione dei classici traccianti chimici, l'utilizzo della temperatura ha innumerevoli vantaggi: questo parametro è registrato facilmente ed in ogni monitoraggio, la misura è robusta ed economica ed immediatamente utilizzabile.

Al fine di accrescere la comprensione delle dinamiche di flusso e l'interscambio fra acque superficiali e sotterranee dell'area di Ravenna, si è intrapreso uno studio basato sull'analisi delle temperature delle acque della falda freatica per valutare il grado di interazione fra acque superficiali e sotterranee. Contemporaneamente si è tentato di caratterizzare l'acquifero freatico dal punto di vista termico al fine di poterlo eventualmente sfruttare come "serbatoio di calore" nell'ambito della geotermia a "bassa entalpia", che prevede lo sfruttamento del sottosuolo come serbatoio termico dal quale estrarre calore durante la stagione invernale ed al quale cederne durante la stagione estiva.

La raccolta dei dati termici è avvenuta durante i monitoraggi e nei campionamenti per le analisi chimiche (paragrafo 5.3.1); Le metodologie utilizzate sono state descritte al paragrafo 5.2.2.

Lo studio della distribuzione delle temperature nell'acquifero freatico ha permesso di cartografare l'ampiezza della zona che risente delle variazioni stagionali di temperatura, nonché la temperatura alla sommità della zona geotermica.

9.2 Teoria

Esistono 3 meccanismi di trasferimento della temperatura: conduzione, convezione e irraggiamento. Per conduzione termica si intende la trasmissione di calore che avviene in un mezzo solido, liquido o gassoso dalle zone a temperatura maggiore verso quelle con temperatura minore per contatto diretto. Questa è la forma di trasferimento di calore più importante per la crosta terrestre (Turcotte e Schubert 2005).

Risale alla seconda metà del XX secolo l'inizio delle ricerche più approfondite sul comportamento della temperatura nel sottosuolo, anche se il capostipite di questi studi è sicuramente Jean Baptiste Joseph Fourier (Auxerre, 1768 – Parigi, 1830). La legge di Fourier mostra la relazione di base del trasporto di calore per la conduzione (Turcotte e Schubert 2005).

La formula unidimensionale della legge di Fourier assume la forma:

$$q = -k \frac{dT}{dy}$$

Equazione 1

dove:

q è il flusso del calore per unità di area per unità di tempo (W)

k è il coefficiente della conducibilità termica (W/m²°K)

y è la coordinata nella variazione della temperatura (m).

T è la temperatura (°K)

Il segno – che appare nell'

Equazione 1 indica che il flusso di calore avviene nella direzione dove la temperatura decresce. Con $dT/dy > 0$, la temperatura aumenta nella direzione y , e il calore fluisce nella direzione y (negativa).

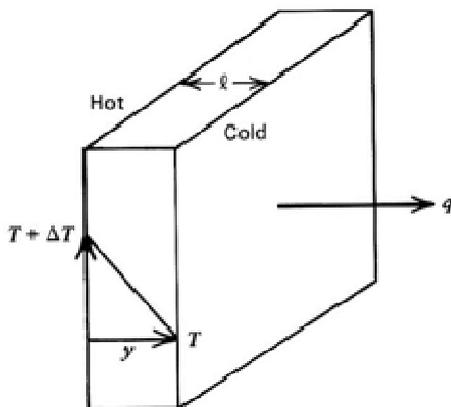


Figura 9.1 Trasferimento di calore (Turcotte e Schubert 2005)

La Figura 9.1 è un semplice esempio di come la legge di Fourier possa essere usata per studiare il flusso di calore attraverso una lastra di un materiale di spessore l , premesso che ΔT venga mantenuta costante.

In questo caso il gradiente di T è

$$\frac{dT}{dy} = - \frac{\Delta T}{l}$$

Equazione 2

E il flusso di calore, dalla legge di Fourier, è

$$q = \frac{k\Delta T}{l}$$

Equazione 3

La legge di Fourier è applicabile anche quando la distribuzione di temperatura non è lineare, come evidenziato in Figura 9.2. In questo caso, la pendenza locale del profilo di temperatura deve essere usata nella legge di Fourier, e per un k costante il flusso di calore è una funzione di y : $q=q(y)$.

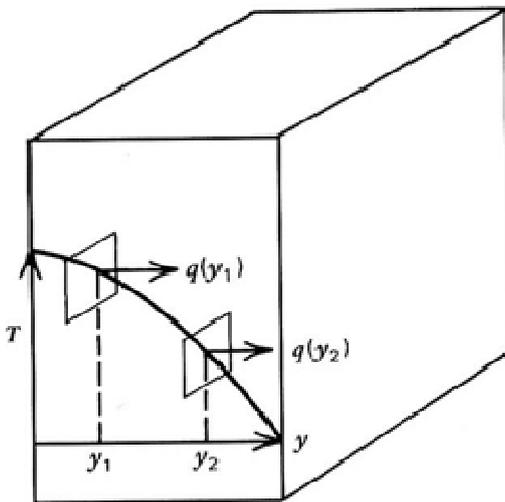


Figura 9.2 Flusso di calore e profilo di temperatura (Turcotte e Schubert 2005)

Successivamente a Fourier alcuni ricercatori (Turcotte and Schubert 2005) hanno permesso di ottenere formule in grado di studiare il riscaldamento periodico, giornaliero e stagionale, di un semi-spazio-infinito.

Sappiamo infatti che la temperatura di superficie della terra cambia regolarmente con il tempo seguendo le variazioni giornaliere-notturne e i cambiamenti stagionali. Analizzeremo pertanto la condizione del calore in un sistema monodimensionale in base alle variazioni temporali. L'equazione di conduzione di calore determina come al variare del tempo cambi la temperatura alla superficie. Per questo calcolo viene considerato uno spazio semi-infinito nella regione $y > 0$, la cui temperatura di superficie è una funzione periodica (che sarà anche la nostra condizione al contorno):

$$T_s = T_0 + \Delta T \cos \omega t$$

Equazione 4

la frequenza circolare ω è relativa alla frequenza f di:

$$\omega = 2\pi f$$

Equazione 5

in aggiunta, il periodo della variazione di τ è:

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Equazione 6

Se esso rappresenta la variazione giornaliera della temperatura superficiale, dove $\tau = 1$ giorno, allora $f = 1.157 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, e $\omega = 7.272 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$. Viene assunto $T \rightarrow T_0$ e $y \rightarrow \infty$, cioè è molto al di sotto della superficie e la temperatura è la media della temperatura superficiale.

La soluzione dell'equazione risulta:

$$T = T_0 + \Delta T \exp\left(-y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \times (\cos)\left(\omega t \cos y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} + \sin \omega t \sin y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)$$

Equazione 7

$$T = T_0 + \Delta T \exp\left(-y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \cos\left(\omega t - y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)$$

Equazione 8

L'Equazione 8 mostra che l'ampiezza delle fluttuazioni di temperatura periodiche decresce esponenzialmente con la profondità. Questa fluttuazione diminuisce di 1/e mano a mano che si scende in profondità d_ω secondo la seguente formula:

$$d_\omega = \left(\frac{2\kappa}{\omega}\right)^{1/2}$$

Equazione 9

per variazioni giornaliere di temperatura, la frequenza è $\omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$. Con $\kappa = 1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ la profondità dei cambiamenti giornalieri di temperatura, data dall'

Equazione 9, è di 0,17 m.

Dal momento che lo spessore del suolo interessato dalle variazioni di temperatura è inversamente proporzionale alla radice quadrata della frequenza, si deduce che più è rapida la fluttuazione della temperatura e meno il calore penetra sotto la superficie.

L'argomento del fattore trigonometrico nell'Equazione 8 mostra la differenza della fase tra temperatura fluttuante sulla superficie e quella in profondità y :

$$\phi = y\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}$$

Equazione 10

Se la profondità y è la profondità dello strato superficiale, la fluttuazione è fuori fase di 1 radiante ($57,3^\circ$).

La Figura 9.3 mostra come l'ampiezza della variazione di temperatura decade con la profondità e come la fase della fluttuazione si sposta con la profondità.

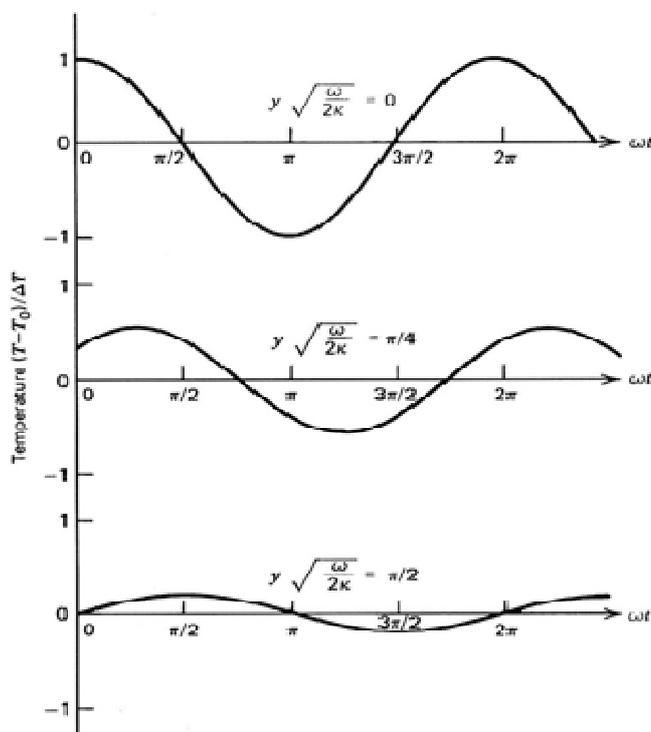


Figura 9.3 Lo sfasamento e l'ampiezza del decadimento con la profondità della variazione della temperatura superficiale. (Turcotte e Schubert 2005).

Negli anni 70 la comunità scientifica conferma il concetto secondo cui solo il primo strato di crosta terrestre risente effettivamente delle variazioni stagionali (e con quale entità) della temperatura atmosferica. Il ricercatore Parsons nel 1970 pubblica un articolo (*Groundwater thermal regime in a glacial complex*) in cui descrive precisamente il fenomeno affermando che il sottosuolo può essere suddiviso in due parti, la porzione superiore corrispondente ai primi 10-15 m e quella inferiore. Nella zona superiore la temperatura è soggetta a variazioni annuali che rispecchiano il trend delle temperature atmosferiche e degli influssi delle acque di ricarica dell'acquifero, mentre quella della zona inferiore (geotermica) segue il principio del gradiente geotermico. Inoltre, le fluttuazioni di temperatura delle zona superficiale diminuiscono e ritardano in funzione della profondità. In altre parole più ci si spinge in profondità e meno si avverte l'effetto dello scambio di calore tra crosta terrestre e atmosfera, e parallelamente si riduce il sincronismo tra le variazioni di temperatura dei due corpi. Infatti, il suolo a contatto con l'atmosfera subisce per primo l'influenza delle variazioni stagionali e, mano a mano che si scende in profondità, il fenomeno sembra ritardato, ciò vuol dire che gli orizzonti non superficiali risentono solo successivamente dei cambiamenti di temperatura atmosferica perché il passaggio di calore, da uno strato all'altro, presenta delle tempistiche che variano in funzione delle proprietà fisico-chimiche del stesso materiale roccioso. Pertanto prendendo un profilo

invernale e uno estivo, questi generalmente si intercettano una prima e una seconda volta delimitando in questo modo un intervallo con temperature più calde in inverno e più fredde in estate.

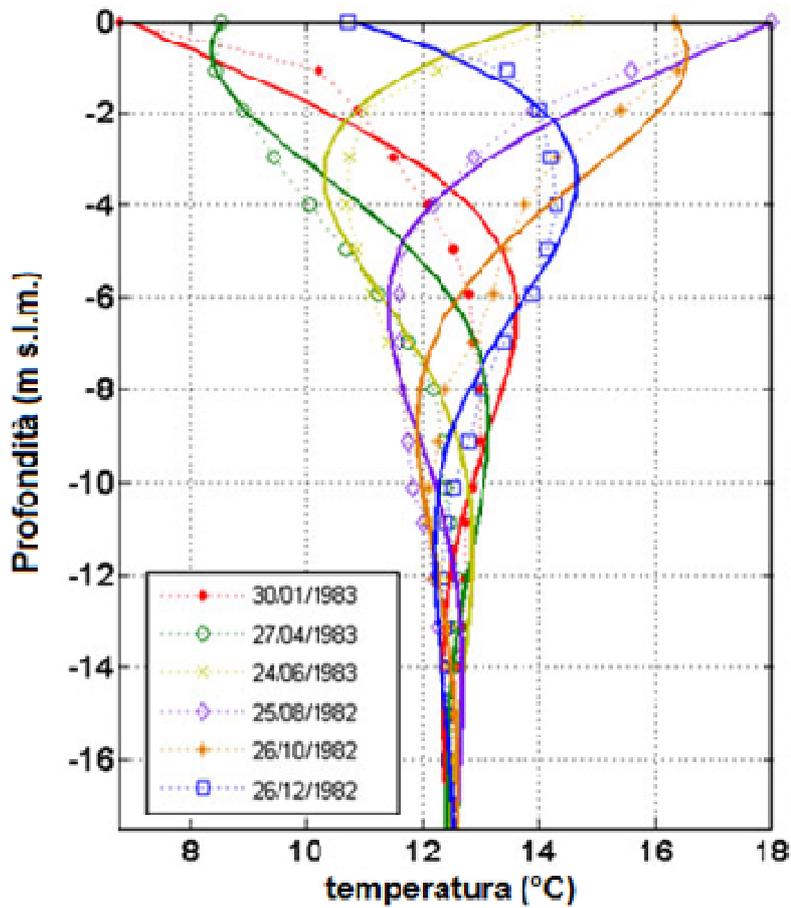


Figura 9.4 Profilo di temperatura pubblicato nel 1985 nello studio della temperatura di Taniguchi M (1985). Sei profili corrispondenti a sei differenti date dell'anno. Ogni profilo assume una colorazione differente che permetta una migliore leggibilità del grafico.

In Figura 9.4, l'intersezione tra i due profili origina un'area che in letteratura viene chiamata "tasca"; inoltre, la stessa figura mostra come i profili cambino vistosamente negli orizzonti superficiali, ma negli strati inferiori ai -10 metri i valori tendono a stabilizzarsi verso una temperatura ben definita, quella corrispondente alla temperatura media annua atmosferica. Il grado di cambiamento degli orizzonti superficiali è fortemente condizionato dallo spessore della zona vadosa, questa infatti è in grado di ridurre notevolmente la conduttività termica di un qualsiasi substrato (Figura 9.5) a seconda però delle caratteristiche chimico fisiche di quest'ultimo (Deming, 2002).

Representative Values of Thermal Conductivity of Porous Materials	
	Thermal Conductivity (W/m°C)
Dry sediments (e.g., sand, loam, clay)	0.18-0.26 ¹
Saturated sediments (e.g., sand, loam, clay)	1.4-2.2 ¹
Shale	1-2
Sandstone	2-4.5
Limestone	2-4
Granite	3-4
Basalt	1.5-2.5

¹Stonestrom and Blasch (2003); values are κ_s for saturated sediments and κ_d for dry sediments; all other values are from Denning (2002) and represent κ_p

Figura 9.5 Sono riportate le conduttività termiche di diverse litologie. I primi due valori confrontano un sedimento secco (con acqua assente) e un sedimento saturo di acqua. Nel primo caso i valori sono particolarmente bassi se confrontati con la seconda voce.

Negli ultimi decenni del XX secolo si è cercato di comprendere e di valutare come le variabili in gioco presenti in un sistema complesso, come un acquifero, possano andare ad influire sul profilo di temperatura. Nel 1990 Belsley analizza l'effetto, generato da diversi apporti d'acqua superficiali, sulle temperature. Variando il quantitativo d'acqua infiltrato nell'acquifero, i profili subisco delle precise deformazioni (Figura 9.6). È evidente come nel secondo grafico (b), dove l'apporto d'acqua è maggiore rispetto al primo grafico (a), le temperature variano in maniera più evidente, in particolare nelle porzioni mediamente profonde (tra -5 e -10), spostando in questo modo il punto di stabilità a quote ancora più basse.

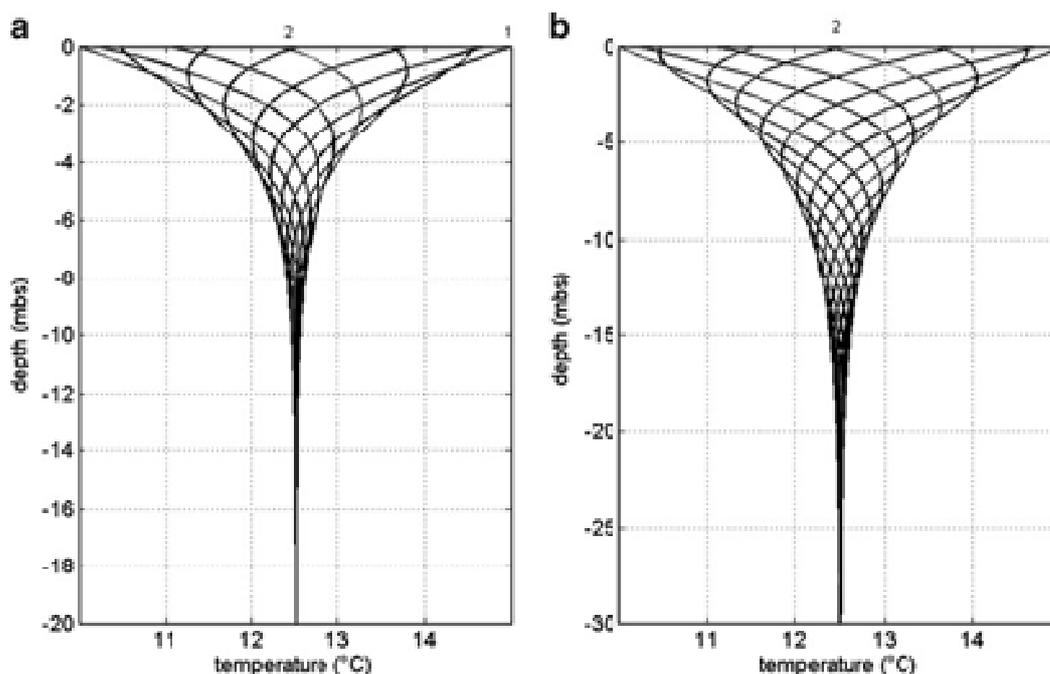


Figura 9.6 Due profili di temperatura pubblicati da Belsley (1990). Due situazioni differenti in cui gli apporti di acqua corrispondono ad una piovosità differente: a) 250 mm/anno; b) 5000 mm/anno

Va rimarcato però come i due quantitativi di ricarica siano particolarmente differenti, 250 mm/anno nel profilo (a), 5000 mm/anno nel (b).

Nel 1999 Tanaguchi analizza il comportamento del profilo di temperatura in funzione degli scambi reciproci d'acqua con la superficie. In assenza di flusso, la temperatura nella zona geotermica (porzione al disotto dei -10 m circa) segue normalmente il gradiente geotermico (Figura 9.7), corrispondente ad un aumento di 1 °C per ogni 20 - 40 m di profondità. Infatti, in questi strati così profondi il profilo di temperatura non mostra alcuna variazione stagionale risultando lineare per tutto l'arco dell'anno. In presenza di importanti afflussi d'acqua sotterranei anche la zona geotermica può però essere disturbata e far registrare temperature anomale.

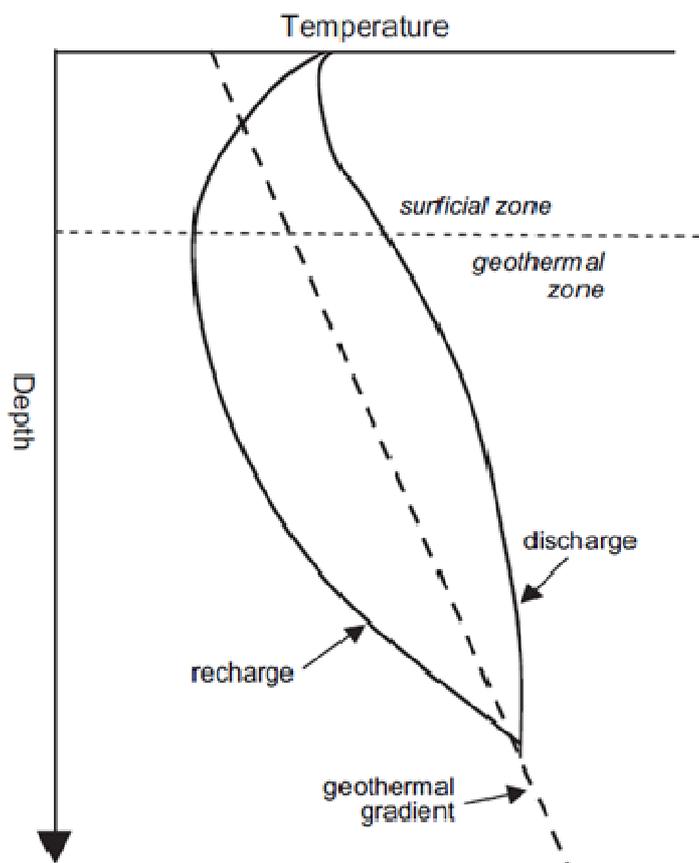


Figura 9.7 Schema di due profili di temperatura rappresentanti le variazioni del gradiente geotermico atteso (quello tratteggiato), queste alterazioni sono infatti generate da due flussi d'acqua opposti. Ricarica (movimento verso il basso delle acque sotterranee) si traduce in profili concavi verso l'alto, vice versa, scarico (movimento verso l'alto) corrisponde a profili convessi verso l'alto. (elaborazione di Tanaguchi et al. 1999).

Due sono i casi riscontrati: nel primo l'acquifero viene ricaricato dalle acque superficiali e il profilo risulta con la concavità rivolta verso l'alto (quasi ad indicare un'acquisizione di fluido freddo), nel secondo, invece, il flusso è opposto cioè l'acquifero riversa acqua nei corpi idrici superficiali e il profilo che si delinea compare speculare al precedente.

Come già riportato in precedenza, l'ampiezza delle fluttuazioni di temperatura diminuisce con la profondità e solo i primi orizzonti risentono marcatamente dei cambiamenti meteorologici. Lo studio dei profili di temperatura delle zone superficiali possono pertanto fornirci informazioni circa la stagione di ricarica / scarica degli eventi di precipitazione e di interscambio con l'acqua di superficie.

9.3 Simulazione dei profili di temperatura

Parallelamente alla caratterizzazione geotermica dell'acquifero, si è cercato di comprendere quali siano le dinamiche dei fluidi che caratterizzano l'acquifero costiero ravennate utilizzando come tracciante il calore. Nelle prossime pagine vengono riportate le simulazioni dei profili di temperatura condotte dal Prof. A. Vandenbohede nella ambito di una collaborazione tra l'Università di Gent e l'Università di Bologna.

Le simulazioni in 1D utilizzano il modello SEAWAT che è stato impostato per analizzare uno spessore di 40 metri considerando lo zero come il livello della falda freatica. La funzione secondo cui varia la temperatura della tavola d'acqua è la seguente:

$$T(t) = T_m + A \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \frac{\varphi}{365} 2\pi\right)$$

Equazione 11

Dove:

t è il tempo (giorni)

T_m è la temperatura media (°C)

A l'ampiezza (giorni)

φ la differenza di fase (giorni)

Una volta definiti i parametri opportunamente calibrati alla area di studio, tale funzione risulta:

$$T(t) = 13.5 + 6.5 \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \frac{210}{365} 2\pi\right)$$

Equazione 12

Questa funzione sostituisce la semplice condizione al contorno usata per la soluzione dell'equazione di Fourier (Equazione 8) prima discussa e viene qui adoperata per definire le condizioni al contorno superiori nei modelli di SEAWAT.

A questo punto le variabili che possono entrare in gioco nel modello sono: le precipitazioni, le ricariche artificiali, la litologia e le combinazioni di queste. Per quanto riguarda le precipitazioni questi sono i tre scenari proposti partendo da quelli che sono i valori di precipitazione del 2010:

- ricarica assente (a sinistra);
- ricarica di 300 mm/anno (al centro);
- ricarica di 900 mm/anno (a destra).

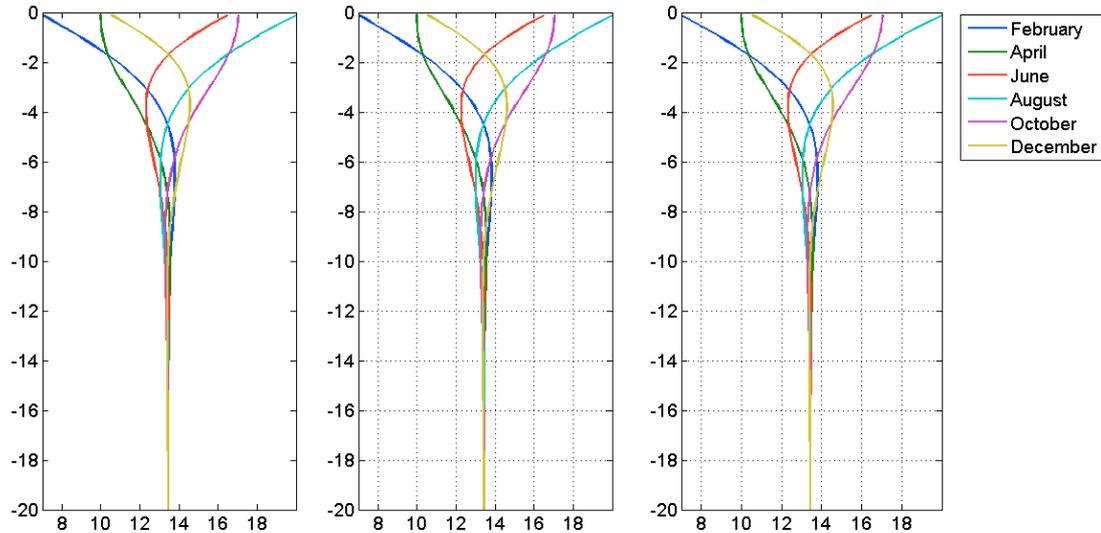


Figura 9.8 Profili di temperatura con diversi quantitativi di ricariche di pioggia (0mm/a, 300mm/a, 900mm/a).

E' evidente come, nonostante i cambiamenti apportati alle precipitazioni, le differenze nelle curve di temperatura siano veramente minime. Considerati i tassi di ricarica così ridotti, il calore trasportato dalle piogge (parliamo pertanto di avvezione) risulta quasi influente nei profili. La profondità della zona superficiale è di circa 9-10 metri, questa può ovviamente variare se si modificano l'ampiezza della funzione seno e i parametri di conduttività termica del sedimento (in questo caso si tratta di sabbia quarzosa).

Nei grafici seguenti è invece possibile osservare cosa cambierebbe nel profilo se venissero effettuate delle ricariche di grandi entità all'acquifero:

- Ricarica assente (a sinistra)
- Infiltrazione (per esempio da corsi d'acque superficiali) di 2500 mm/anno (a destra).
- Ricarica di 2500 mm/anno (al centro)

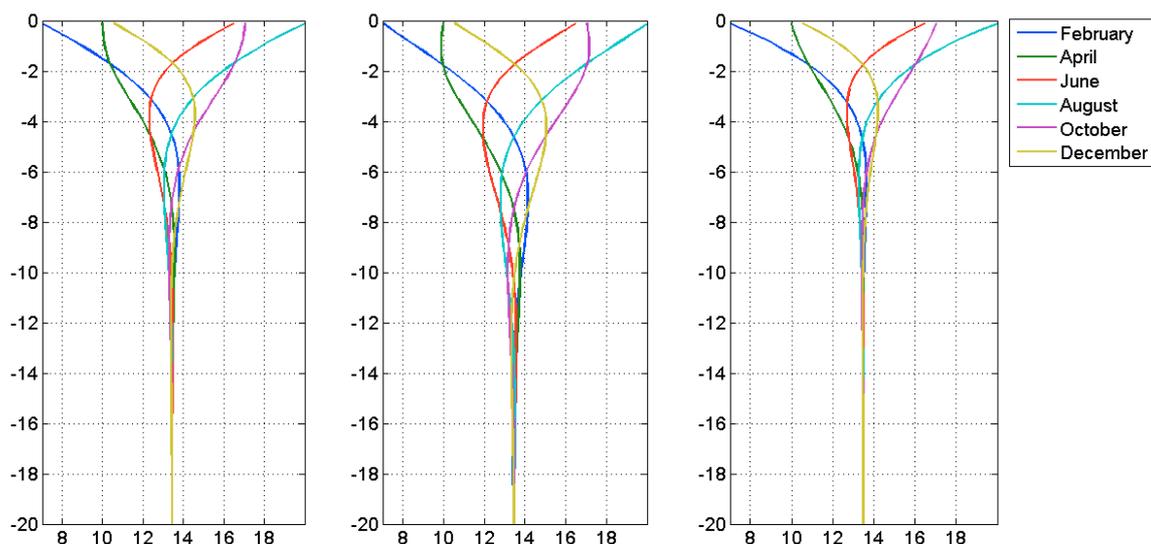


Figura 9.9 Profili di temperatura con diversi tipi di ricariche da pioggia e da corsi d'acqua superficiale

Si nota che nel grafico centrale la zona superficiale acquisisce dimensioni maggiori e le temperature subiscono variazioni maggiori tra -2 e -4 metri. Con le precipitazioni invece accade il contrario.

Passando invece alla litologia, è possibile comprendere l'importanza di avere informazioni precise sulla tessitura e la geochimica degli strati di roccia presenti nell'acquifero. È stata fatta un'analisi di sensitività dei parametri presenti nel modello. Nei tre grafici seguenti vengono infatti cambiati i componenti che costituiscono la componente minerale dell'acquifero:

- Sabbia quarzosa (a sinistra)
- Sabbia carbonatica (al centro)
- Argilla (a destra)

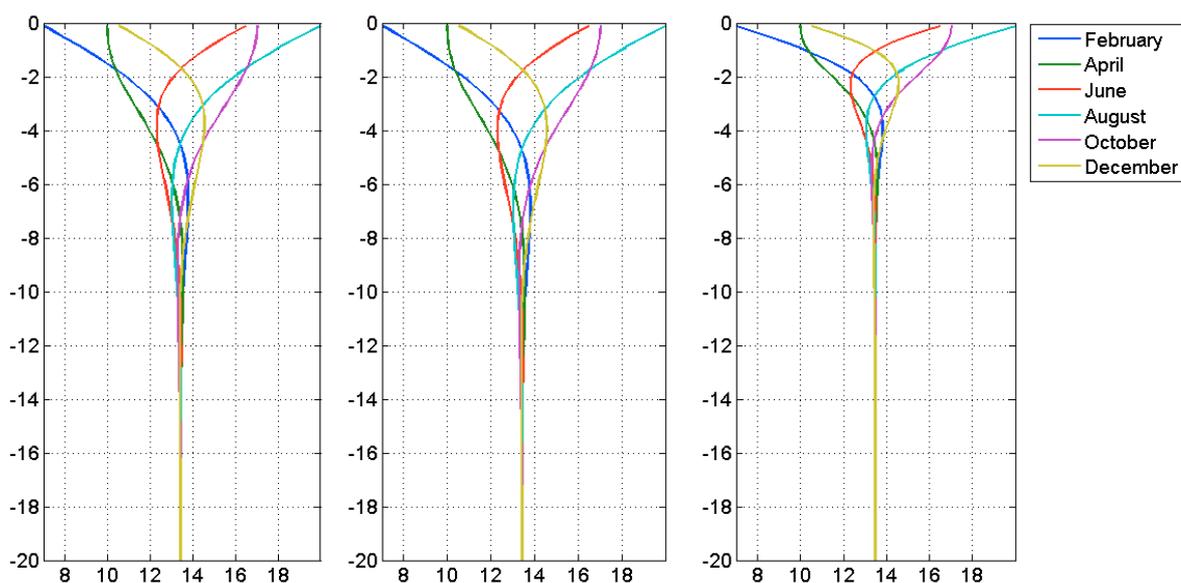


Figura 9.10 Profili di temperatura con diversi strati litologici

Quarzo e calcite sembrano comportarsi allo stesso modo in quanto hanno proprietà simili sia per quanto riguarda il calore specifico che per la conducibilità termica. L'argilla, invece, avendo una capacità termica specifica più alta e soprattutto, cosa più importante, una conducibilità termica minore (3 volte inferiore rispetto al quarzo e 3,6 volte inferiore rispetto alla calcite) origina un profilo che tende a stabilizzarsi a quote relativamente più superficiali. Questo perché il calore che dalla superficie si spinge verso gli strati più sotterranei (nel periodo estivo, mentre il processo opposto si ha in quello invernale) viene condotto con minor efficacia rispetto a quarzo e calcite, riducendo pertanto le dimensioni della zona superficiale (Figura 9.10).

Provando a creare combinazioni litologiche simili alle condizioni ritrovabili nell'acquifero sintetizzate dai tre casi seguenti, si osserva come l'argilla abbia particolare influenza sul profilo:

- 3 metri di argille e sabbia (a sinistra)
- 3 metri di sabbia e argille (al centro)
- Sabbia con uno strato di argilla tra 2,5 e 5 metri di profondità (a destra)

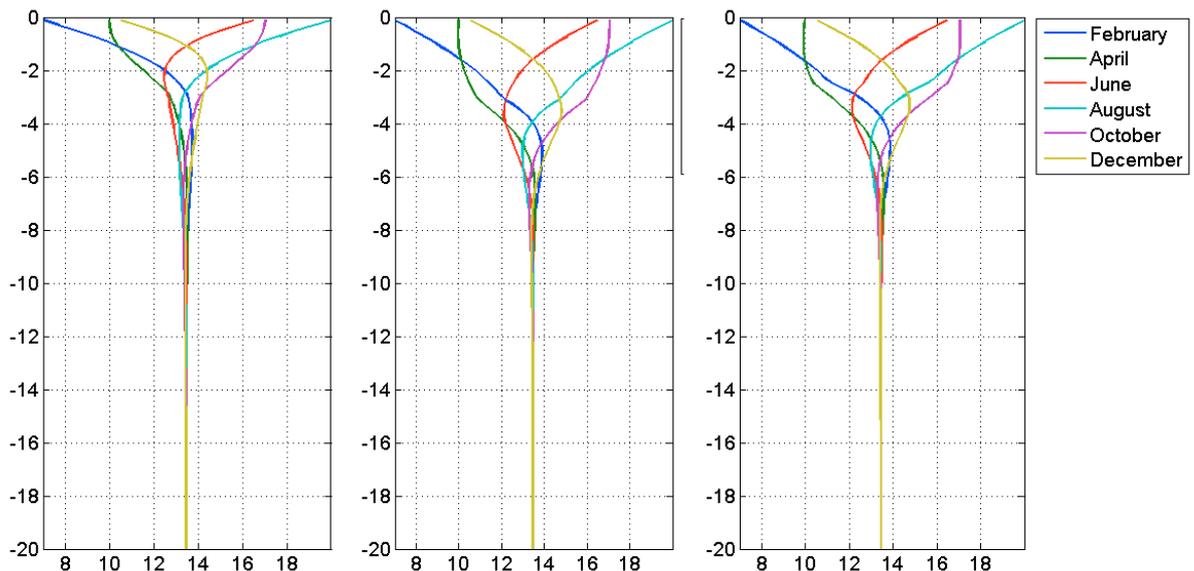


Figura 9.11 Profili di temperatura con diverse combinazioni di strati litologici

Dal confronto degli ultimi due grafici si nota come uno strato di argilla, a profondità intermedia (a destra), abbia quasi lo stesso effetto di uno strato di sabbia superficiale (al centro).

9.4 Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati è stata la fase che ha richiesto l'impegno maggiore. Infatti, una volta raccolti tutti i dati prelevati nella fase di monitoraggio dell'acquifero, è stato necessario omogeneizzare, estrapolare e rendere utilizzabili i dati raccolti. È stato costruito un database in cui, per ogni singolo pozzo, si sono immagazzinate le temperature raccolte nelle tre stagioni di monitoraggio (paragrafo 5.3.1) Tale database rappresenta il punto di partenza per le fasi successive dell'elaborazione dati.

Di seguito saranno mostrate le mappe ed i profili realizzati con il *software EnviroInsite*, il medesimo utilizzato per rappresentare i dati geochimici (paragrafo 8.1).

Ci si limiterà a presentare la situazione rilevata nella porzione meridionale dell'acquifero ravennate per motivi di spazio e soprattutto perché vi ricadono sia il transetto di approfondimento delle variabili geochimiche, sia l'area di ricarica MAR.

9.4.1 Mappe di temperatura all'interno del V Bacino

Prima di descrivere la mappa nelle figure seguenti, va fatta una precisazione a riguardo del sistema di riferimento, visto che tutti i prossimi elaborati cartografici utilizzeranno come *datum* la tavola d'acqua (attribuendogli un valore pari a zero) e non più il livello medio marino. Tale esigenza nasce dal fatto che il livello freatico a sud è spesso sotto il livello del mare raggiungendo, nelle zone più depresse, anche valori di -2,89m s.l.m., mentre nel piezometro P9S, che si trova a 10 km dalla linea di costa, il livello freatico si trova a 2,27m s.l.m. rendendo il *datum* precedentemente utilizzato inappropriato.

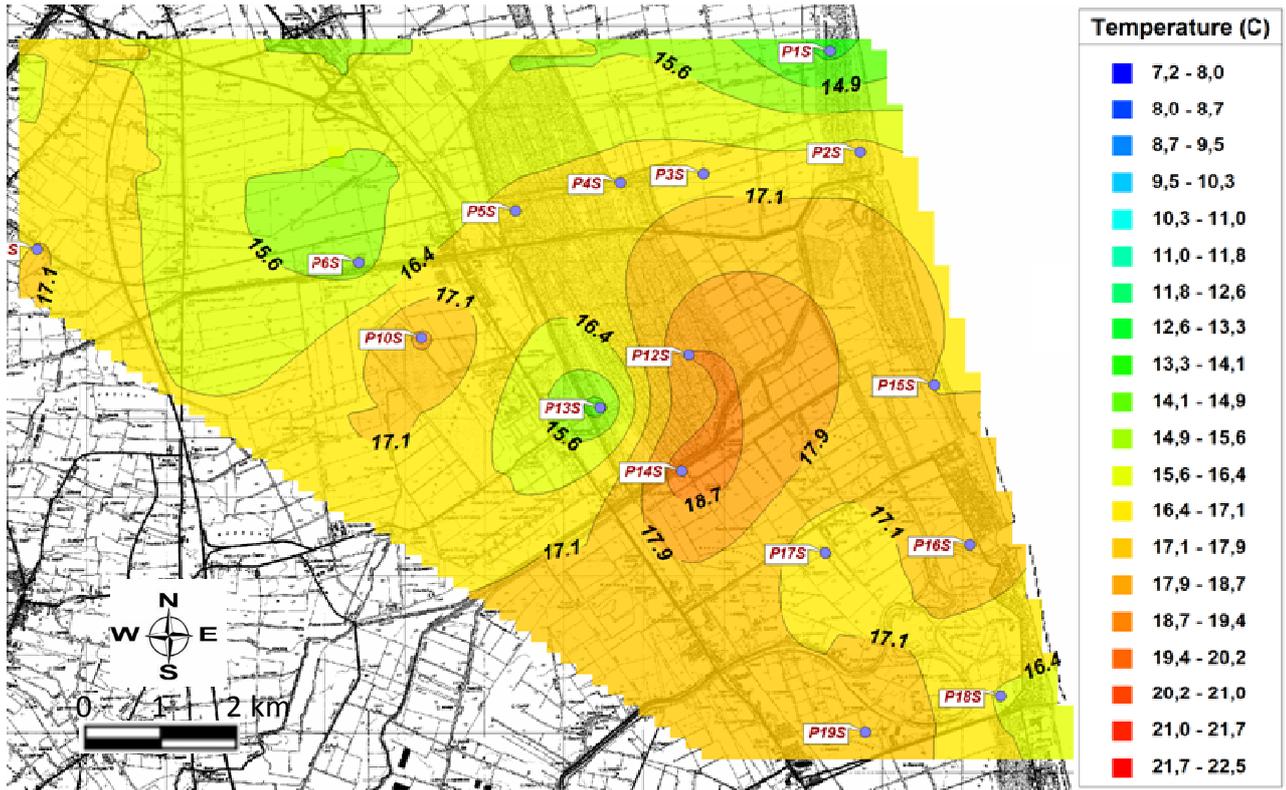


Figura 9.12 Zona Sud – Mappa temperatura da 0 a -1 m rispetto alla tavola d'acqua – Giugno 2010

La mappa in Figura 9.12 rappresenta le temperature superficiali (da 0 a -1m sotto la tavola d'acqua) dell'acquifero nel mese di giugno 2010. I colori tendenti al rosso, mostrano temperature dell'acquifero maggiori in corrispondenza di P12S e P14S e alcuni piezometri più freddi come il P1S.

L'intervallo entro cui le temperature si collocano va da un minimo di 14°C, del P1S ad un massimo di 19,4 °C, del P14S.

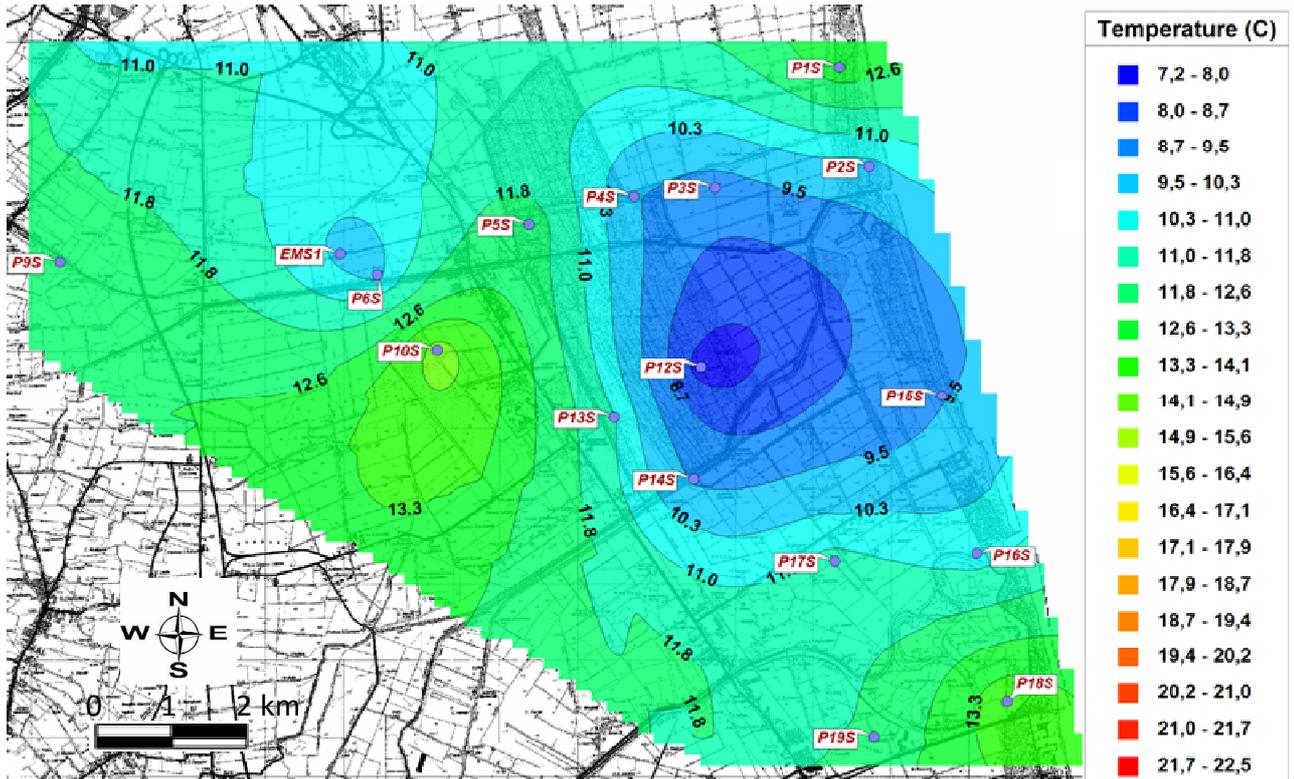


Figura 9.13 Zona Sud – Mappa temperatura da 0 a -1 m rispetto alla tavola d’acqua – Dicembre 2010.

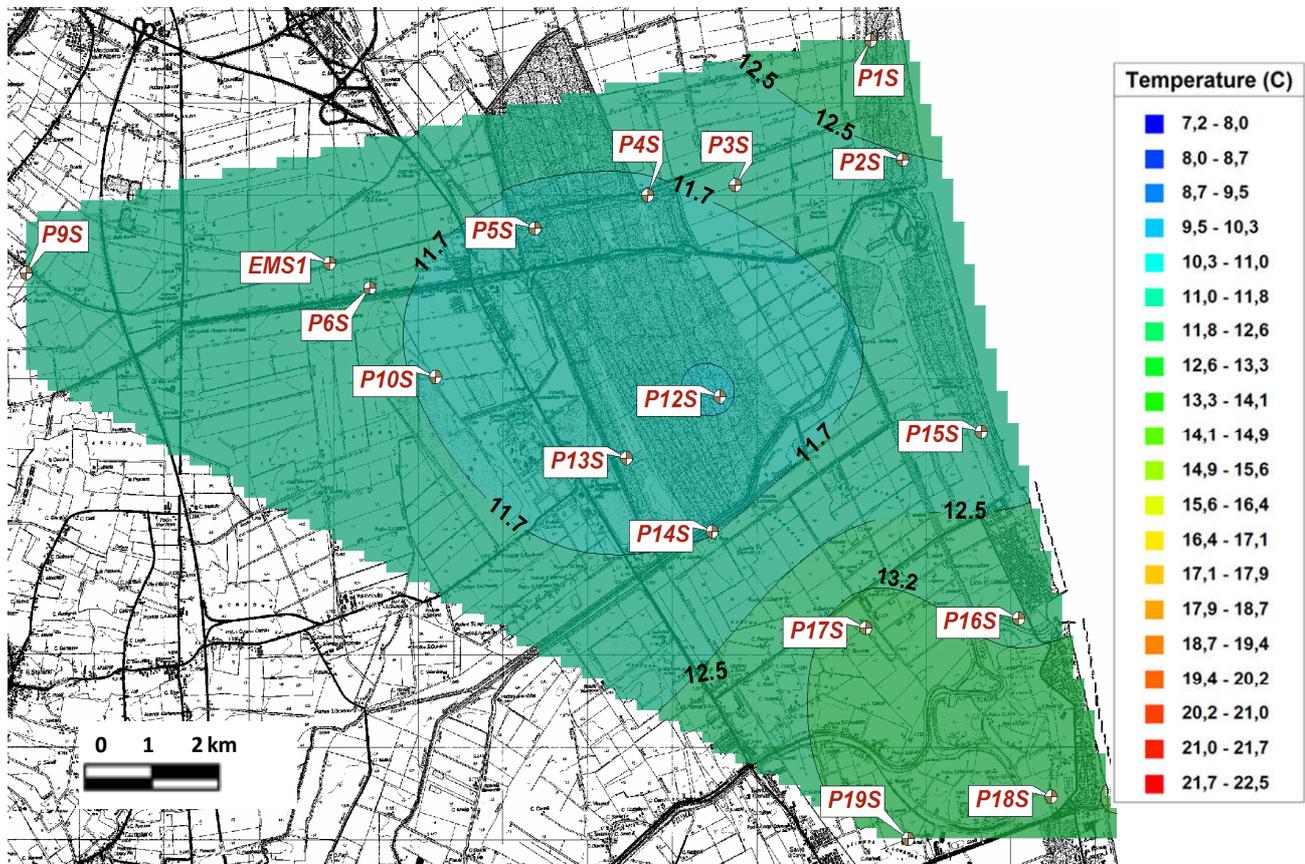


Figura 9.14 Zona Sud – Mappa temperatura da 0 a -1 m rispetto alla tavola d’acqua – Gennaio 2012.

Le 2 mappe seguenti, (Figura 9.13 e Figura 9.14) si riferiscono alle stagioni invernali del 2010 e del 2011; assumono tinte fredde corrispondenti a temperature basse. Le temperature raggiungono al massimo i 14,4°C (nel P10S) ed un minimo di 7,5°C (nel P12S), nel dicembre 2010, mentre, si mantengono mediamente superiori nel gennaio 2012, con valori che oscillano tra i 10,9°C nel P12S e i 13,6°C nel P16S.

Dal confronto delle due mappe di giugno e dicembre 2010 (Figura 9.12 e Figura 9.13) si nota come P12S e P14S siano i piezometri che assumono le colorazioni estreme, vale a dire le più calde in estate e le più fredde in inverno. L'escursione maggiore è rilevata nel piezometro P12S, con più di 10 °C di differenza tra dicembre e giugno, seguito dal P14S. Se vengono confrontate le mappe in Figura 9.13 e Figura 9.14 relative a due periodi invernali, si nota come nel gennaio 2012 le temperature siano più calde, pur mantenendo nei medesimi pozzi le temperature estreme.

Di seguito vengono riportate le mappe di temperatura per profondità crescenti, limitandoci al confronto tra giugno e dicembre 2010, in quanto le temperature di gennaio 2012 sono risultate molto omogenee.

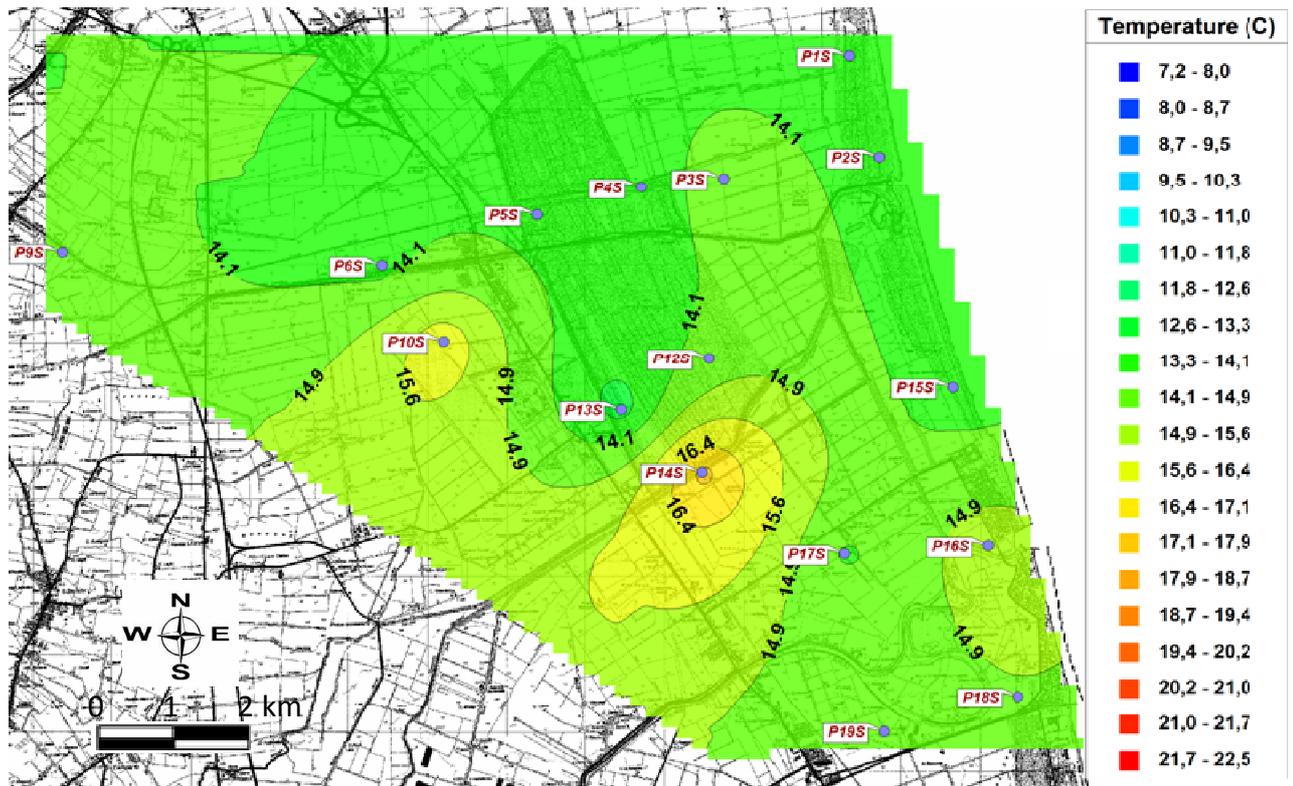


Figura 9.15 Mappa temperatura da -4 a -5 m rispetto alla tavola d'acqua – Giugno 2010.

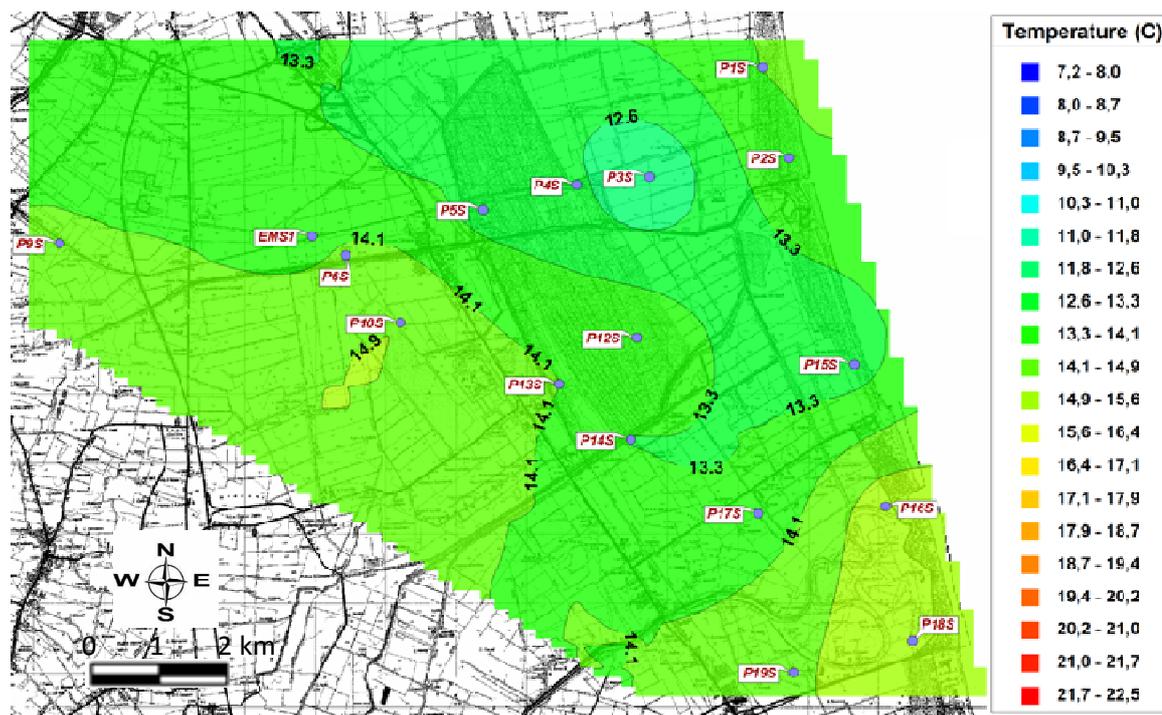


Figura 9.16 Mappa temperatura da -4 a -5 m rispetto alla tavola d'acqua – Dicembre 2010.

Nell'intervallo di profondità tra -4 e -5 metri dalla tavola d'acqua (Figura 9.15) la differenza tra le temperature nei vari piezometri diventa bassa e solo nei piezometri P14S e P10S sono presenti temperature elevate a sintomo di una forte interazione con i canali adiacenti i pozzi. La mappa di dicembre dello stesso anno (Figura 9.16) riporta una forte omogeneizzazione delle temperature in tutta l'area ad una profondità di -4m dalla tavola d'acqua.

Scendendo fino alla base dell'acquifero, nelle Figura 9.17 e Figura 9.18 sono raffigurate le mappe delle temperature presenti a circa -18m al di sotto della falda freatica. Si evince che a tali profondità non vi sono variazioni stagionali di temperatura, infatti i valori termici sono gli stessi sia in giugno che in dicembre. L'unica osservazione che emerge è il valore di temperatura molto alto che è costante che si registra nel piezometro P14S, sintomo di una forte influenza del canale Bevanella sull'acquifero sottostante.

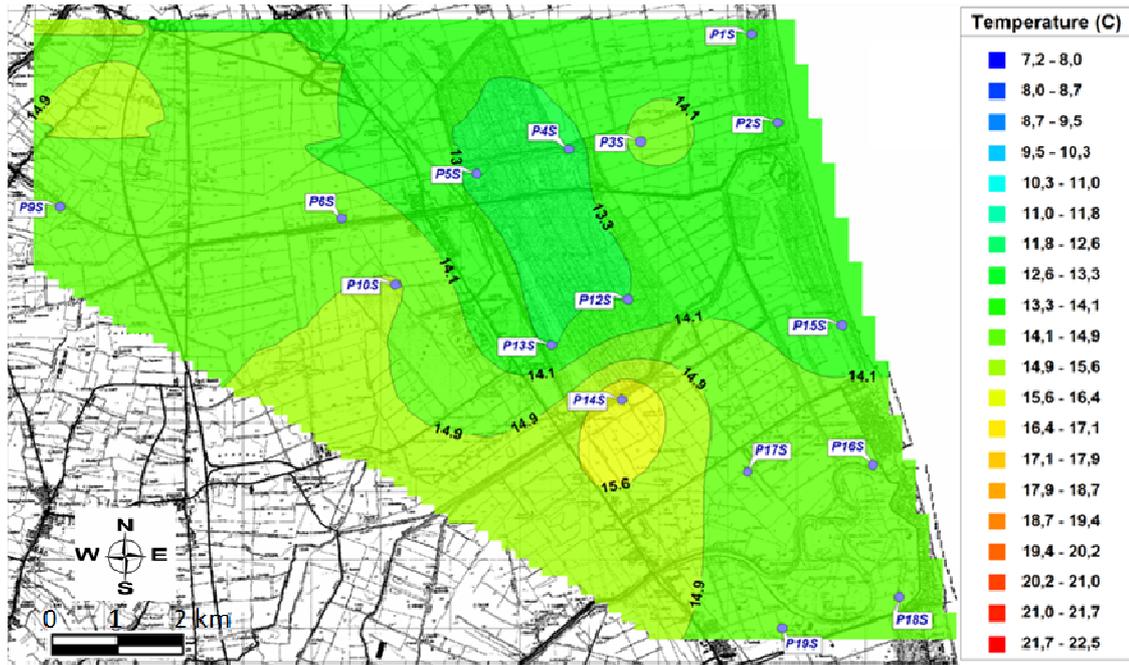


Figura 9.17 Mappa temperatura da -18 a -19 m rispetto alla tavola d'acqua – Giugno 2010.

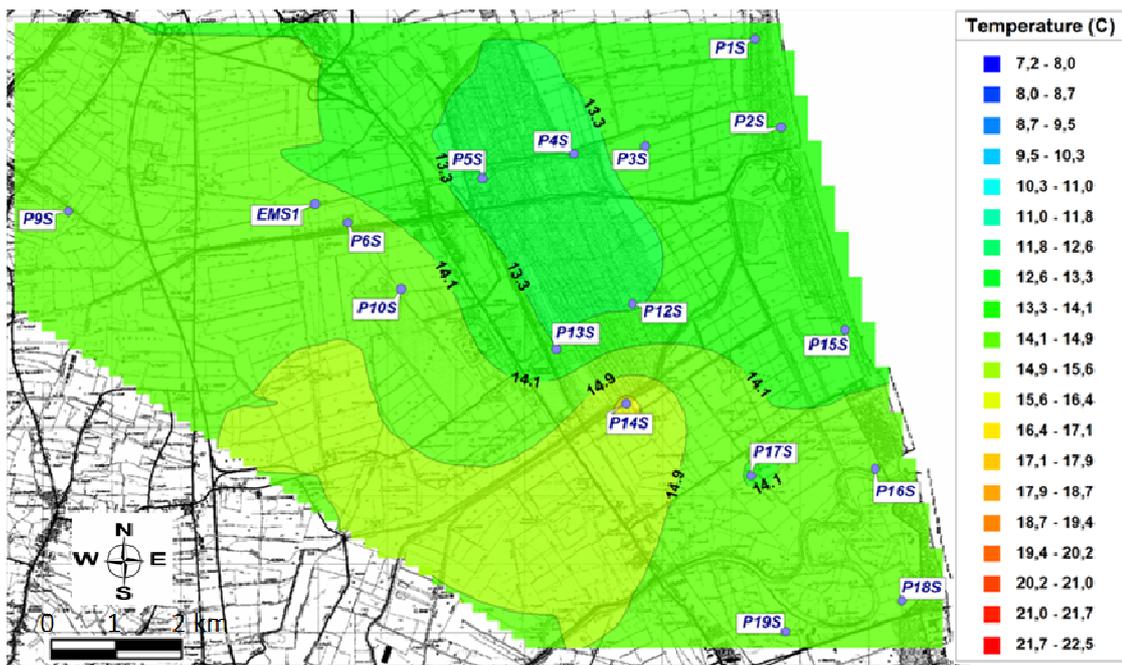


Figura 9.18 Mappa temperatura da -18 a -19 m rispetto alla tavola d'acqua – Dicembre 2010.

Le sezioni dell'acquifero (Figura 9.19) costruite per il transetto di approfondimento interno al V Bacino, indicano chiaramente come al di sotto dei 5-6m dalla tavola d'acqua (fascia di *skin*) la temperatura raggiunga la stabilità. Le isoterme subiscono delle variazioni (seppur di solo qualche grado) a profondità superiori ai -6m, esclusivamente in corrispondenza di quei piezometri che si trovano più vicini a canali drenanti (P3S e P4S) o canali irrigui P6S ed EMS1.

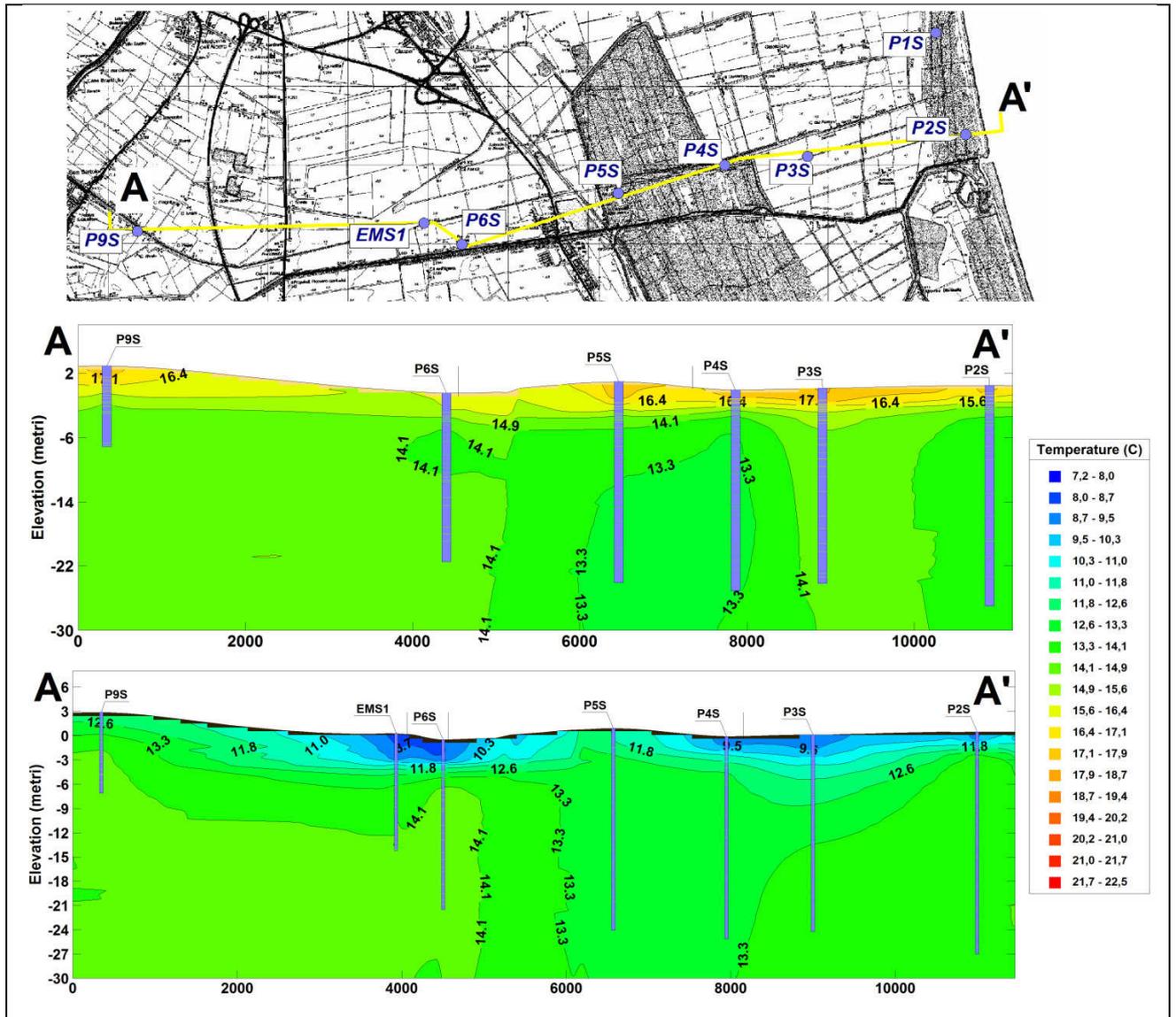


Figura 9.19 Sezioni acquifero – Temperatura – Giugno 2010 (sopra), Dicembre 2010 (Sotto).

Dopo questa trattazione dei dati è possibile individuare delle aree simili per caratteristiche termiche al di sotto della zona di *skin*:

- Dune dove i valori si aggirano attorno ai 14 °C nel caso di P1S, P2S e P15S, leggermente superiori nei due piezometri P16S e P18S
- Paleo-dune in cui si rinvencono i valori più freddi (da 12,9 °C, del P4S a 13,3 °C, del P13S);
- Aree agricole che mostrano mediamente valori di temperatura, superiori a 14 °C, con punte di oltre 15°C nel piezometro P14S

Anche se non sono stati riportati e trattati, questo comportamento differente delle temperature all'interno di diverse fasce si riscontra, con i medesimi valori anche per la zona nord.

9.4.2 Profili di temperatura

Osservando i profili di temperatura si possono dedurre le relazioni che si instaurano con le acque superficiali o le temperature di stabilizzazione. Nelle prossime pagine si cercherà di descrivere i profili più rappresentativi e quelli invece con le conformazioni più particolari.

Per ogni singolo piezometro sono stati realizzati almeno tre profili, uno estivo e due invernali e vengono rappresentati in un unico grafico.

Anche in questo caso saranno presentati e discussi solamente i profili relativi alla porzione meridionale dell'acquifero, per poi trarre delle conclusioni valide per tutta l'area.

I profili di temperatura realizzati mostrano due tipologie di andamenti dominanti: il primo del tutto simile con le informazioni di letteratura o con i profili teorici generati per l'area (paragrafo 9.3), nel secondo, invece, le temperature non si intersecano mai se non a fondo pozzo. Questa tipologia risulta anomala, in quanto, nel grafico i due profili (estivo e invernale) non si intersecano se non negli orizzonti più profondi.

Come già emerso nella trattazione delle mappe di temperatura, i piezometri che risultano essere più regolari da un punto di vista termico sono P1S, P18S e P13S, sia su scala stagionale che interannuale.

Andando a mostrare i singoli profili dei pozzi (Figura 9.20) si vuole evidenziare la presenza di due comportamenti dominanti.

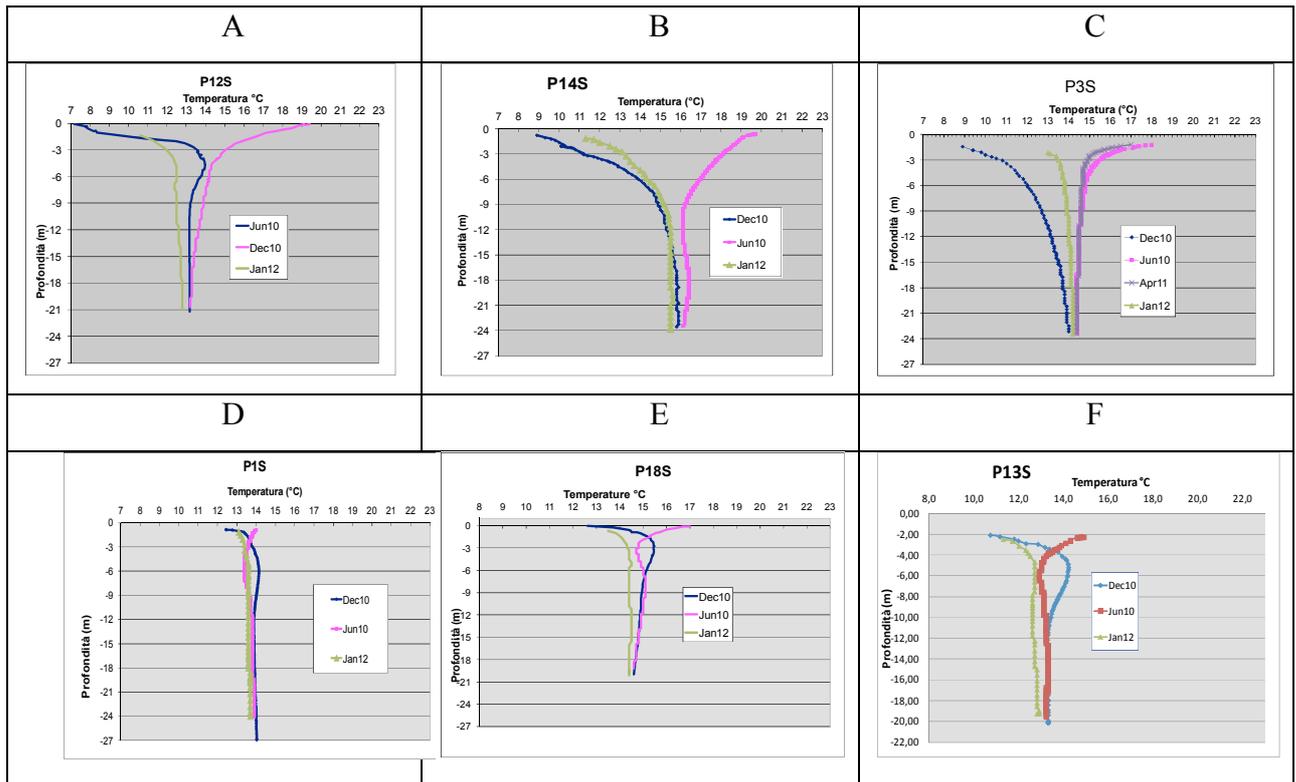


Figura 9.20 Profili di temperatura relativi ai pozzi in cui sono evidenti due andamenti diversi. Sopra, andamento anomalo, sotto andamento in linea con le previsioni per l'area.

Nel caso dei piezometri che registrano il maggiore divario estate inverno, A, B e C in Figura 9.20, i profili invernali e estivo non si intercettano se non alla base del piezometro. Questo caratteristico andamento si ritrova frequentemente nei profili di tutti i pozzi dell'acquifero anche nella porzione nord e risulta tipicamente attribuibile a piezometri siti in zone dove i gradienti idraulici sono particolarmente elevati.

I profili con scarse variazioni stagionali, invece, mostrano conformazioni "normali", come quelle riportate nel capitolo introduttivo (Figura 9.9), dove i profili di giugno intercettano una prima e una seconda volta il profilo di dicembre. Questa doppia intersezione origina quella che in letteratura viene chiamata "tasca" (Figura 9.20).

Per la porzione meridionale di acquifero 11 piezometri su 17 hanno profili marcatamente anomali rispetto a quelli proposti sia dalla equazione di Fourier (Turcotte e Schubert 2005) o dalle simulazioni per l'area.

Mediante i profili di temperatura sono state individuate le profondità di stabilizzazione e la temperatura che si registra in tale profondità e sono stati costruiti i rispettivi grafici per la zona nord e per la zona sud raggruppando i pozzi in base all'uso del suolo su cui si insediano i piezometri (Figura 9.21).

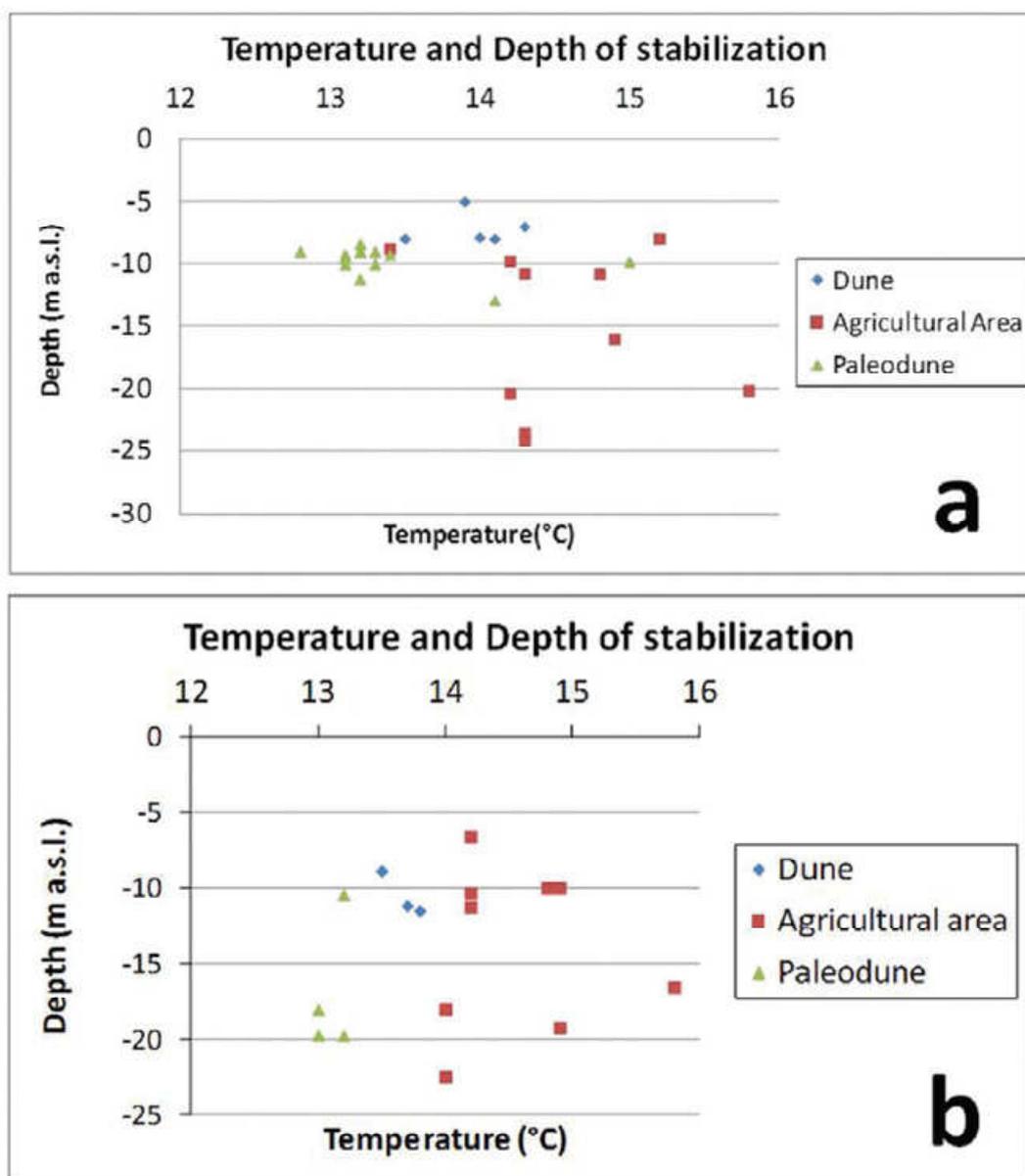


Figura 9.21 Grafico temperatura e quota di stabilizzazione per la zona nord dell'acquifero (a) e per la zona sud (b).

Grazie all'elevata profondità dei piezometri e alla completezza del database (di tutti i piezometri abbiamo i dati di entrambe le campagne di monitoraggio) è stato possibile introdurre nei grafici in Figura 9.21 tutti piezometri monitorati.

Come già rilevato dalla mappe di temperatura della zona sud, i pozzi si suddividono in funzione della temperatura di stabilizzazione in tre gruppi principali: i piezometri della paleoduna appaiono i più freddi, seguiti da quelli della duna ed infine i più caldi risultano essere quelli in ambito agricolo, che formano un unico gruppo.

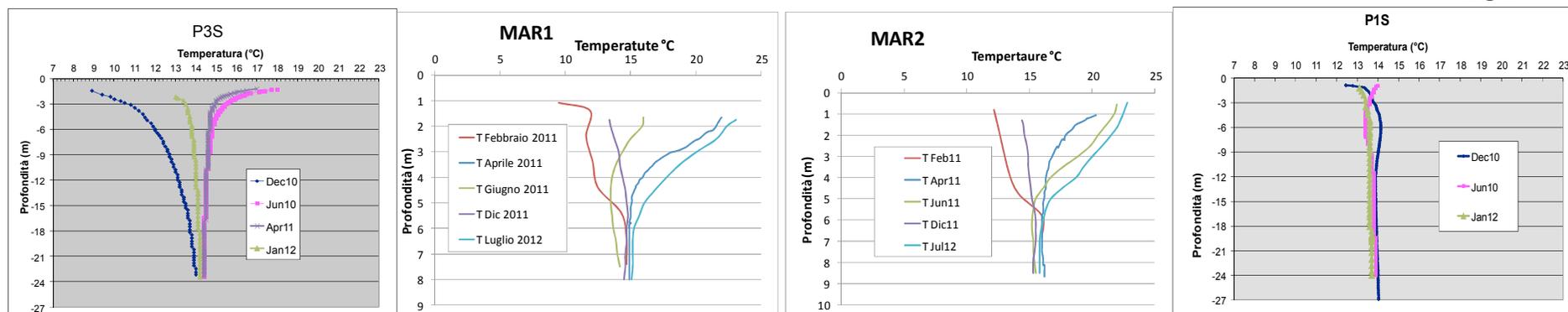
Se osserviamo i grafici precedenti, ponendo attenzione riguardo alla profondità di stabilizzazione si evince che i piezometri si distinguono in due categorie: i primi raggiungono la stabilizzazione a profondità attorno ai 10m sotto la falda, mentre nei secondi la zona di *skin*

raggiunge i -20m. appartengono alla prima categoria, i piezometri delle dune e delle paleodune, indistintamente tra zona nord e zona sud, mentre tra quelli che si stabilizzano a circa -20m troviamo i piezometri insediati in ambiti agricoli.

I valori riportati Figura 9.21 sono riassunti sottoforma di tabella nel paragrafo 15.11 in fondo alla tesi.

Dopo le considerazioni fatte a scala generale di acquifero, in Figura 9.22 sono riportati i grafici relativi ai profili di temperatura per i piezometri presenti nel transetto di dettaglio presenti all'interno del V bacino di drenaggio. Se diamo per assunte le due tipologie di comportamento rinvenute complessivamente in acquifero, nel transetto (ad esclusione di P1S, EMS1 e P6S) i profili sono anomali. In particolare, a conferma di quanto illustrato sinora, i pozzi MAR1 e MAR2 possiedono una grande variabilità delle temperature superficiali che giungono a stabilizzazione in corrispondenza del cambio litologico a circa -6m dal piano campagna (paragrafo 10.2).

EST



OVEST

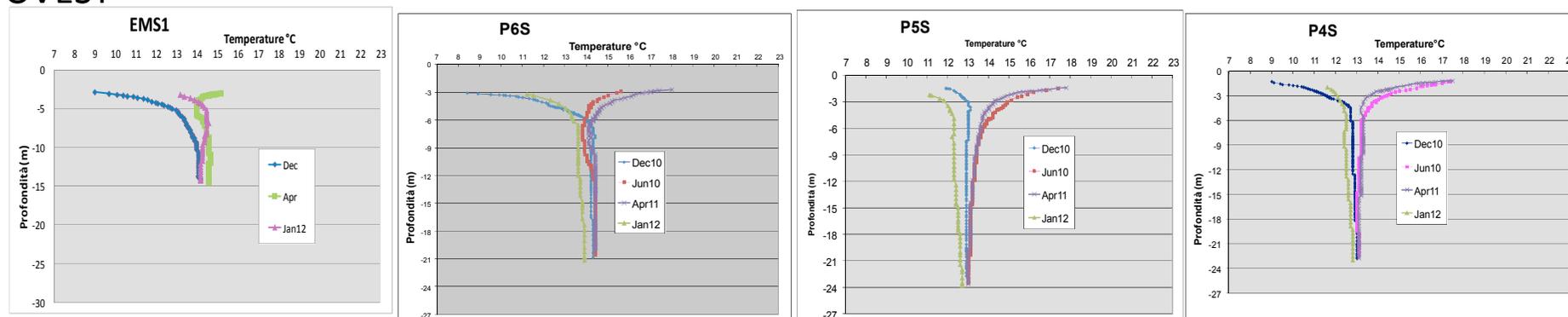


Figura 9.22 Profili di temperatura appartenenti ai pozzi del transetto di approfondimento presente all'interno del V Bacino. I pozzi sono riportati in ordine reale di presenza in campo da est (in alto a destra) a ovest (in basso a sinistra). I pozzi sono stati monitorati un diverso numero di volte in funzione dei sopralluoghi eseguiti per i monitoraggi dei parametri chimico-fisici.

9.5 Discussione

Nel seguente capitolo si discutono le osservazioni fatte nelle pagine precedenti ponendo particolare attenzione alle anomalie riscontrate.

Lo spessore della zona vadosa (che coincide con la soggiacenza della falda) subisce variazioni stagionali: tendenzialmente si riduce nel periodo invernale e aumenta nel periodo estivo; esso è uno dei parametri che incide maggiormente sulla temperatura dell'acquifero, così come l'uso del suolo e la distanza dai corpi idrici superficiali.

Sono state osservate, per la zona vadosa, alcune variazioni opposte alle attese: a nord, la pineta di San Vitale e la zona di Punta Alberete avendo delle pratiche di gestione idrologica superficiale diverse, generano riduzioni della zona vadosa in periodo estivo. Lo stesso discorso può essere fatto per la zona a nord del Lamone, dove è presente una seconda area umida protetta, quella dell'Oasi di Valle della Canna, gestita come l'Oasi di Punta Alberete, che genera andamenti anomali nella zona vadosa.

Nella zona sud si verifica lo stesso fenomeno sopra descritto nei piezometri P10S e P6S. dovuta alla loro vicinanza con corsi d'acqua superficiali. Le porzioni di territorio che mostrano le minori variazioni di spessore della zona vadosa tra estate e inverno sono quelle adiacenti alla fascia costiera (P2N, P1S, P2S, P15S, P16S e P18S). La causa è sicuramente la vicinanza all'Adriatico. Il mare, infatti, contribuisce a mantenere stabile nell'arco dell'anno il livello della tavola d'acqua, così come la temperatura, mediante i suoi costanti afflussi (Balugani, 2010).

In generale, risulta quasi scontato sottolineare che l'elemento che regola maggiormente il livello della tavola d'acqua, e di conseguenza lo spessore della zona vadosa, è il sistema drenante. Questo è particolarmente evidente nel transetto di dettaglio dove i tre piezometri P3S, P4S e P5S, seppur differenti in molteplici caratteri tra cui uso del suolo e litologia superficiale, hanno le medesime variazioni dei livelli della tavola d'acqua a causa del drenaggio superficiale mediante il medesimo canale (paragrafo 8.2.2).

Le mappe di temperatura più superficiali mostrano importanti variazioni di temperatura durante l'arco dell'anno. Come evidenziato dalla legge di Fourier (paragrafo 9.2) gli strati più superficiali del suolo risentono enormemente delle variazioni stagionali delle temperature atmosferiche, ed è questo il motivo dell'elevata discrepanza tra i valori estivi e quelli invernali nelle temperature del sottosuolo (Turcotte e Schubert 2005). Non a caso a giugno le temperature sono più calde e a dicembre più fredde.

Dal confronto delle mappe in Figura 9.13 e Figura 9.14, costruite sui dati di dicembre 2010 e gennaio 2012 a circa un anno di distanza, si nota come le temperature siano notevolmente più calde ed omogenee durante il secondo monitoraggio invernale. Una giustificazione plausibile a

questo grande discrepanza tra le due fasi invernali deriva dal notevole abbassamento della soggiacenza della falda riscontrato nel 2011 (paragrafo 8.2.1). La diminuzione della falda freatica porta ad un reciproco aumento della zona vadosa che funge da cuscinetto di isolamento negli scambi termici atmosfera-acquifero e determina quindi, temperature maggiori in acquifero nel periodo invernale 2012.

È stato notato che non tutti i piezometri subiscono le medesime variazioni di temperatura. Alcuni piezometri hanno escursioni stagionali anche molto elevate, altri quasi assenti. La causa discriminante è probabilmente la vicinanza ai corsi d'acqua superficiali che sono in grado di ricaricare l'acquifero. Infatti le temperature degli orizzonti più superficiali del sottosuolo risentono di tale afflussi d'acqua, che logicamente sono caldi in estate e freddi in inverno alterandone i profili di temperatura (Vandenbohede A. 2010). Questo è il caso di tutti i piezometri che registrano le maggiori variazioni: P12S, P14S, P10S e P3S (A, B, C Figura 9.20).

I piezometri che hanno valori quasi immutati durante l'arco dell'anno si localizzano invece in aree interne alle pinete (sulle dune costiere e sulle paleodune) dove gli apporti d'acqua dalla superficie si limitano alle sole precipitazioni. I piezometri P1S e P18S, inoltre, si trovano vicini al mare e quindi gli eventuali apporti di calore da questo serbatoio più caldo consentono di mitigare le variazioni stagionali. Il piezometro P13S ha una zona vadosa di circa 2 metri di spessore che si mantiene costante per tutto l'arco dell'anno. Questa consistente zona vadosa e la copertura vegetale isolano il terreno dagli scambi di calore con l'atmosfera riducendo, pertanto, le variazioni di temperatura nell'arco dell'anno.

Lo spessore della zona vadosa non sembra essere il fattore dominante nella suddivisione tra i piezometri con marcate variazioni di temperatura e quelli che invece hanno una temperatura quasi costante durante tutto il periodo dell'anno. Pure la litologia non sembra essere all'origine di questa discrepanza tra i piezometri con forti variazioni di temperatura superficiale e quelli invece con valori costanti. Infatti la litologia risulta omogenea in tutto il comparto delle paleodune ma il comportamento termico dei piezometri è diverso (P12S e P13S in Figura 9.12 e Figura 9.13).

L'analisi delle mappe di temperatura tra -4 e -5 m al di sotto della tavola d'acqua evidenziano variazioni stagionali minime. Questo è quello che ci potevamo attendere vista la teoria presentata nel paragrafo introduttivo (Parsons 1970).

Le temperature alla profondità tra -4 e -5 m s.l.m. appaiono inoltre più calde in inverno rispetto a quelle estive. La motivazione va ricondotta allo sfasamento temporale con cui il calore viene trasmesso agli strati più profondi (Turcotte e Schubert 2005).

Le temperature di stabilizzazione come riportato in Figura 9.21, non sono tutte uguali, ma sembrano variare in funzione dell'ambiente in cui il piezometro è dislocato. I diversi ambienti che si alternano nell'area (duna costiera, Pialassa/ambiti agricoli, paleoduna e ambiti agricoli) sembrano influire sensibilmente sulla temperatura dividendo, pertanto, il sistema in fasce parallele alla costa.

Tra i fattori che probabilmente regolano lo scenario sopra descritto abbiamo il mare specie per i piezometri costieri. Come dimostrato dai molteplici studi sul cuneo salino (Balugani e Antonellini 2011), la falda è soggetta a importanti incursioni d'acqua salata di origine marina, questo afflusso potrebbe influire anche sulle temperature dei piezometri costieri.

In generale per la porzione meridionale, alla profondità tra -4 e -5 metri dal livello della tavola d'acqua le temperature di dicembre e giugno sono molto simili. La peculiarità della zona sud è che, alla profondità di -4 -5 metri dal livello della tavola d'acqua, le temperature di giugno sono lievemente più calde di quelle di dicembre. I profili di temperatura nella zona sud con tale comportamento anomalo sono il 60%. La causa di questa diffusa anomalia è il sistema di canali di drenaggio esteso lungo tutta la zona sud, il quale crea un gradiente idraulico che drena l'acquifero, alterando gli equilibri dei profili di temperatura. Infatti il drenaggio dell'acquifero accelera le perdite (o le acquisizioni dall'atmosfera) di calore sotterraneo compromettendo, in tale modo, la forma teorica dei profili di temperatura.

Medesimo discorso può essere fatto per i fiumi o per i canali disconnessi dalla rete di drenaggio, i quali però ricaricano l'acquifero alterando i consueti scambi di calore con l'ambiente superficiale.

L'alterazione dei profili di temperatura originati dall'interazione dell'acquifero con i canali drenanti e i fiumi può essere analizzato anche sulla base delle profondità di stabilizzazione della temperatura (Figura 9.23). La sezione dell'acquifero mette in luce, infatti, i punti in cui le temperature di ogni singolo piezometro si assestano (riportata da frecce color magenta) e risentono solamente del gradiente geotermico.

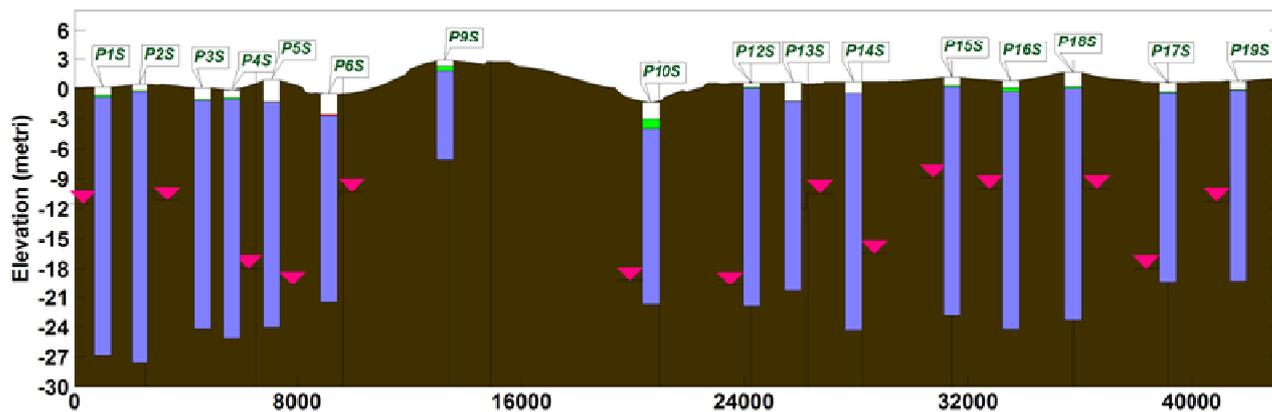


Figura 9.23 Sezione acquifero con le quote delle temperature di stabilizzazione per tutti i pozzi monitorati.

Le temperature di stabilizzazione non si dispongono lungo una quota ben definita, ma a seconda della vicinanza a corpi idrici superficiali, la quota si approfondisce. Esempi lampanti sono i pozzi P17S, P14S, P12S, P4S, P5S e P10S che si trovano tutti in adiacenza a canali o bacini in cui si hanno effetti dell'interazione tra acque superficiali e profonde (vedi paragrafo 10.7).

In conclusione, possiamo affermare che solo l'ambiente inteso come flora (pineta o colture agricole) e posizione geografica rispetto al mare, influiscano sulla temperatura di stabilizzazione. Uniche eccezioni sono dove l'interazione con acque superficiali nell'acquifero, è importante. Questo si verifica nelle zone limitrofe a fiumi e canali non drenanti in cui, la litologia sabbiosa del fondo rende possibile la comunicazione con l'acquifero (piezometri MAR e P14S).

9.6 CONCLUSIONI

Il lavoro esposto in questo capitolo ha avuto come obiettivo quello di descrivere la distribuzione spaziale e l'andamento temporale della temperatura all'interno dell'acquifero superficiale costiero della Provincia di Ravenna e di individuarne le anomalie termiche dovute alle interazioni tra le acque superficiali e quelle sotterranee.

In sintesi, possiamo affermare che le temperature degli orizzonti più superficiali dell'acquifero risentono marcatamente delle variazioni stagionali. Il divario tra estate e inverno appare però più accentuato se è ricaricato da acqua provenienti da corpi d'acqua superficiali, quali fiumi e canali. Secondariamente, anche il forte ricircolo d'acqua di falda, attivato dal sistema drenante, contribuisce ad alcune anomalie delle temperature tra giugno e dicembre rispetto ai profili teorici. Diversamente le aree centrali delle pinete registrano i valori più costanti durante l'intero corso dell'anno (specie se dispongono di una consistente zona vadosa). Questo è dovuto sia al microclima tipico di questi ambiti pinetali, sia dalle chiome sempre verdi della vegetazione che riducono l'incidenza della radiazione solare al suolo.

I piezometri che si trovano vicino a un canale drenante risentono di un gradiente idraulico in grado di tenere in una condizione di flusso la colonna d'acqua freatica alterando i consueti scambi di calore tra i diversi orizzonti dell'acquifero. Anche la ricarica dell'acquifero proveniente da un corpo fluviale è in grado di alterare i normali scambi di calore tra i diversi strati dell'acquifero generando, come nel caso del drenaggio, dei profili di temperatura anomali. Pertanto questi due processi, ricarica e drenaggio, originano la distinzione tra i piezometri con profilo di temperatura che segue la legge di Fourier e quelli con profilo anomalo.

L'entità delle precipitazioni dell'area di studio sembrano essere meno influenti sul profilo di temperatura rispetto agli effetti del drenaggio meccanico dell'acquifero.

Le temperature di stabilizzazione si dispongono geograficamente in maniera coerente in tutta l'estensione dell'area di studio. La duna attuale è caratterizzata da temperature comprese tra i 13,5 °C e i 14,3 °C. La paleo-duna invece registra i valori più bassi in assoluto, con una media complessiva di 13,3 °C. Infine, i restanti piezometri si assestano a temperature leggermente superiori ai 14 °C come ci si attende dai valori di temperatura media annuali atmosferici registrati dal Mareografo di Porto Corsini (14,9 °C nel bimestre 2009-2010) e quelli della centralina di Ravenna città (13,7 °C dal 2004 al 2010). Va sottolineato che la temperatura di quasi un grado superiore nella duna attuale, rispetto alla paleo-duna, è imputabile alla presenza del mare Adriatico (circa 2 °C più caldo rispetto alla media atmosferica a -1 m s.l.m. – dati Mareografo Porto Corsini 2010).

Per quanto riguarda, invece, la profondità di stabilizzazione della temperatura, le anomalie sono originate dall'alterazione dei normali scambi di calore tra i diversi strati dell'acquifero provocate sia da una ricarica fluviale che dal drenaggio meccanico ().

10 TECNICA DI GESTIONE IDRICA E AGRONOMICA: AREA DI RICARICA INVOLONTARIA (AREA MAR)

10.1 Introduzione

I risultati emersi dal monitoraggio del transetto, hanno permesso di focalizzare la parte terminale di questo dottorato su di una piccola area agricola nella porzione più orientale del transetto a sud di Ravenna. In quest'area è stato monitorato l'effetto di ricarica che una trincea di irrigazione, utilizzata come serbatoio di stoccaggio, genera sull'acquifero sottostante. Di seguito questa area di estremo dettaglio, ove avviene la ricarica dell'acquifero, verrà denominata area MAR (*Managed Aquifer Recharge*).

L'area di ricarica MAR, come già introdotto, si localizza nella porzione più orientale dei sopradescritto transetto. Essa ha una lunghezza di circa 1000m (N-S), una larghezza di circa 500m (E-W) e confina, con il suo bordo più orientale, con la pineta costiera di Ramazzotti (Figura 10.1). Questo appezzamento agricolo è gestito dalla Coop. Agricola Braccianti di Campiano, la quale nel 1981 realizza il canale oggetto di indagine, con il solo scopo di conservare un discreto volume idrico per l'irrigazione degli appezzamenti adiacenti.

La trincea di stoccaggio, ha una orientazione N-S, una lunghezza di 500m, una larghezza media di 5 ed una profondità di 2m. Tale dimensionamento ricorda lo schema classico dei canali di drenaggio tutto'ora presenti nell'area, ma il canale in questione risulta totalmente disconnesso della rete di drenaggio superficiale della zona.

A seconda dei piani colturali che i gestori realizzano, questo bacino di stoccaggio viene riempito e mantenuto costantemente pieno di acqua dolce irrigua, per un numero variabile di mesi che vanno da aprile a settembre. Durante la fase invernale, invece, l'acqua che si trova al suo interno è quella della falda freatica circostante.

La fornitura di acqua dolce, sin dagli inizi, era garantita da una captazione diretta dai Fiumi Uniti, ma col passare degli anni i gestori degli appezzamenti si sono resi conto del lento degrado della qualità della risorsa idrica, fino a dover rinunciare al prelievo. Dal 2009 ad oggi, grazie alle infrastrutture realizzate dal Consorzio del CER (CANALE EMILIANO ROMAGNOLO) e dal Consorzio di Bonifica della Romagna, vengono distribuite su questi appezzamenti acque del fiume Po, portate in loco attraverso una rete sotterranea facente parte di una pianificazione di forniture a scala regionale.

In pratica, mediante un'apertura regolabile, una tubatura sepolta riversa acqua derivante dal CER nel canale oggetto delle ricerche e mantiene il livello dell'acqua dentro il serbatoio irriguo

costantemente ad un livello prefissato. Da questo serbatoio la cooperativa che gestisce i terreni preleva acqua a scopo irriguo.

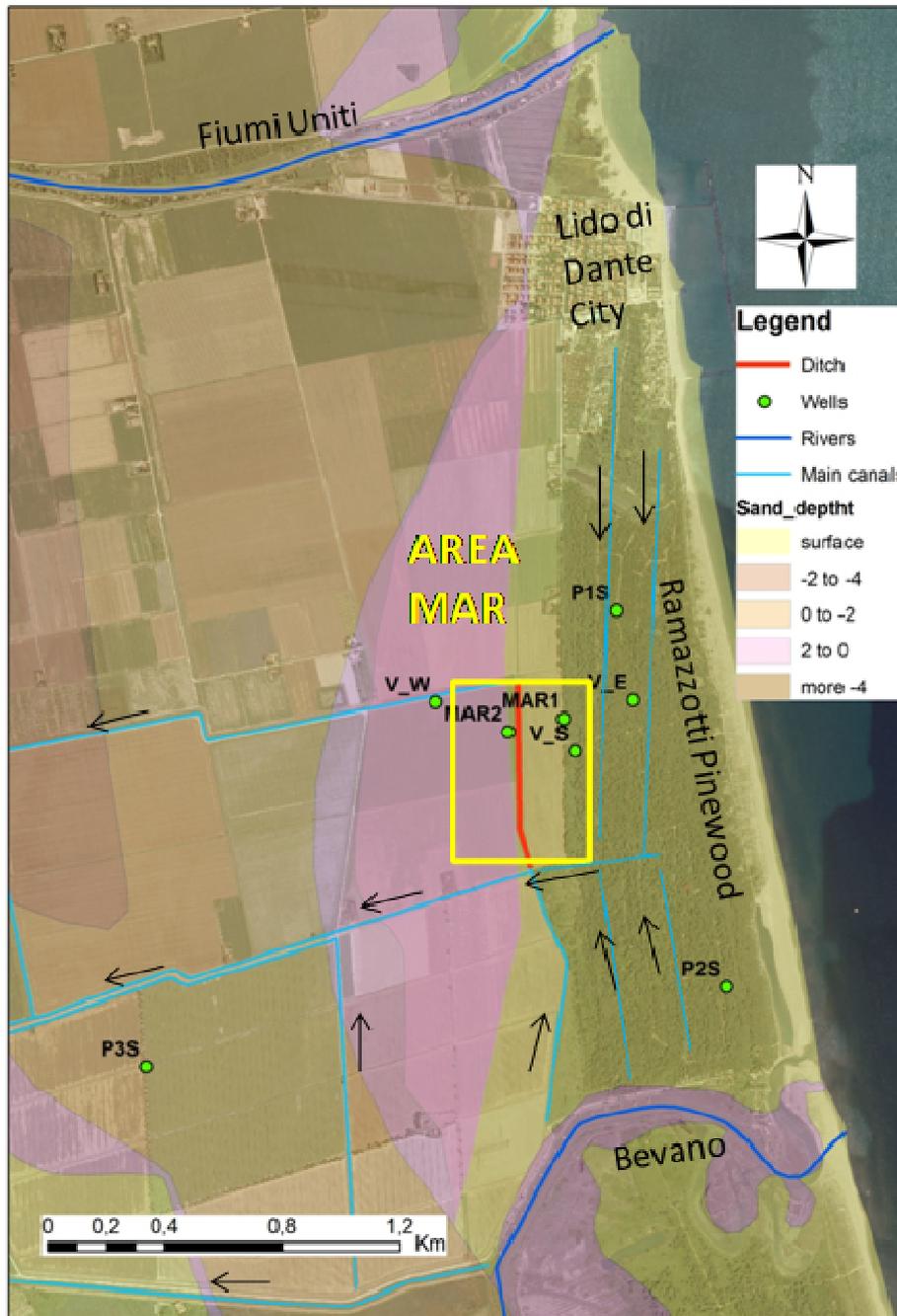


Figura 10.1 Mappa della localizzazione dell'area MAR. in rosso il bacino di stoccaggio e in azzurro la rete di drenaggio presente nella zona. È indicata anche la direzione dei flussi all'interno dei canali. La scala cromatica rappresenta la profondità delle sabbie.

Gli anni in cui è stato studiato questo contesto idrologico sono stati il 2011 e il 2012.

In entrambi gli anni, i gestori hanno scelto 2 colture diverse per le porzioni est e ovest dell'appezzamento analizzato. La situazione al 2011 vedeva coltivati pomodori nella parte a est ed erba medica (alfa alfa) ad ovest del canale di ricarica. Nel 2012, era ancora presente erba medica ad ovest (coltura pluriennale), mentre ad est è stato coltivato grano duro. L'unica coltura che necessita di irrigazione è il pomodoro e quindi nell'area è stata distribuita acqua irrigua unicamente da aprile a luglio del 2011 ed esclusivamente nell'appezzamento di circa 6 ha ad est del canale di ricarica, adiacente Pineta Ramazzotti.

Allo scopo di capire l'effetto che l'irrigazione esercita sul fenomeno della ricarica dell'acquifero sono state raccolte informazioni sulla quantità di acqua distribuita e sull'infiltrazione all'interno dell'appezzamento irriguo.

Anche se non è stato irrigato nessun appezzamento adiacente il canale, nel 2012 esso ha svolto ugualmente la sua funzione di stoccaggio di acqua per appezzamenti più distanti.

10.2 Contesto geologico superficiale

L'evoluzione geologica di quest'area di dettaglio è la medesima descritta per l'intera area costiera ravennate (paragrafo 2.2). Per la tipologia di studio eseguito, risulta fondamentale descrivere il contesto geologico superficiale presente nell'area MAR.

L'area agricola compresa tra le due Pinete (costiere Ramazzotti e Storica di Classe) giace in maggior parte su depositi limo argillosi derivati dalle attività di bonifica dell'ultimo secolo. A loro volta questi depositi fini di origine continentale coprono orizzonti di sabbie grossolane, ben cernite, di origine marina che si attribuiscono a corpi dunosi sepolti (acquifero in studio). Questo sistema di paleo dune sepolte risale alla fine del XVII secolo e inizio XVIII, quando la conoide fluviale dei Fiumi Uniti, all'epoca nei pressi dell'attuale Punta marina, è stata smantellata dalle correnti marine fino a formare il territorio che va dalla pineta di Classe all'attuale linea di costa (Stefani 2005).

Questi ambiti, che fino al secondo dopoguerra erano palustri, sono stati bonificati per colmata, fino al raggiungimento della situazione attuale.

In Figura 10.1 sono riportate anche le profondità delle sabbie di origine marina della sola area Mar, dalla quale emerge come muovendoci da mare verso l'entroterra le sabbie risultano affioranti sulla linea di costa attuale, sotto la Pineta Ramazzotti e per una porzione contigua alla pineta stessa che include l'appezzamento orientale in studio. Ad ovest del canale di ricarica, invece le sabbie risultano coperte da un orizzonte di circa 1m di spessore, costituito da materiale limo-argilloso derivante dalle bonifiche recenti. Allontanandoci dalla linea di costa le sabbie risultano via via più profonde fino a -4m di profondità nel punto centrale dell'area agricola.

Possiamo, in modo molto semplicistico, individuare un acquifero freatico ad est del canale e un acquifero confinato da sedimenti fini ad ovest. Da entrambi i lati del canale, in ogni caso, la profondità dell'acquifero non supera mai i -7m s.l.m. ed è delimitato inferiormente dal prodelta (capitolo 6).

10.3 Suolo

Diversi substrati danno ovviamente origine a diverse tipologie di suolo. All'interno dell'area MAR abbiamo visto essere presenti 2 tipologie di sedimenti: materiali sabbiosi e materiali limo argillosi.

I primi localizzati ad est del canale di ricarica originano suoli sabbiosi chiamati "Cerba" (CRB3 in Figura 10.2) in accordo con la classificazione della FAO 1990 per la *Soil taxonomy* (Soil Survey Staff, 1996) questi si definiscono Calcaric Arenosols e Mesic Aquic Ustipsamments. Questa tipologia di suoli sono adatti per seminativi o per colture orticole. A causa della loro elevata conduttività idraulica sono molto sensibili alla salinizzazione, ma allo stesso tempo possiedono un'ottima infiltrazione. (Rose, 2005 e Ilichev, 2008).

Sui sedimenti più fini di origine fluviale e legati alle recenti bonifiche, si insediano i suoli denominati "Cerba-Boschetto" (CRB1 in Figura 10.2) i quali sono mediamente coltivati a seminativi, ma con una propensione maggiore verso la coltivazione di pascoli e frutteti. La loro granulometria più fine li rende meno propensi alla salinizzazione causata dalla presenza di acque saline in acquifero, ma molto più sensibili all'accumulo di sali derivanti da acque irrigue rispetto ai "Cerba". Anche la capacità di infiltrazione superficiale risulta notevolmente inferiore ai precedenti (Rose 2005, Ilichev 2008).

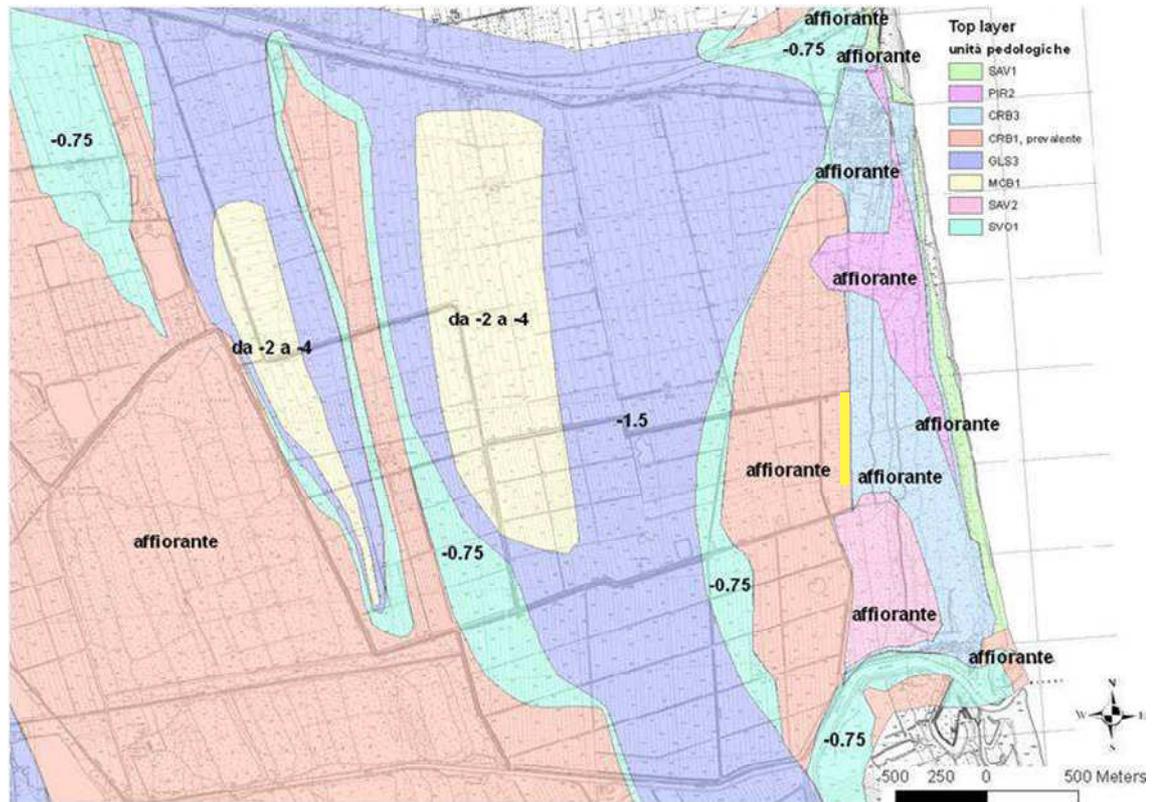


Figura 10.2 Carta pedologica dell'area di studio. In legenda sono indicati i tipi di suolo presenti; per ogni unità pedologica è indicata la profondità dell'acquifero rispetto al piano campagna. In giallo il canale di ricarica. (modificato da RER - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, 2005).

10.4 Morfologia, drenaggio e irrigazione

L'area MAR per tutti i suoi 12 ettari risulta completamente pianeggiante e con una quota di pochi centimetri al di sopra del livello del mare (Figura 10.3). L'unica porzione che mostra un'elevazione percepibile è la fascia di territorio che confina con la Pineta Ramazzotti; in questa porzione si arriva a circa 50cm sul livello del mare.

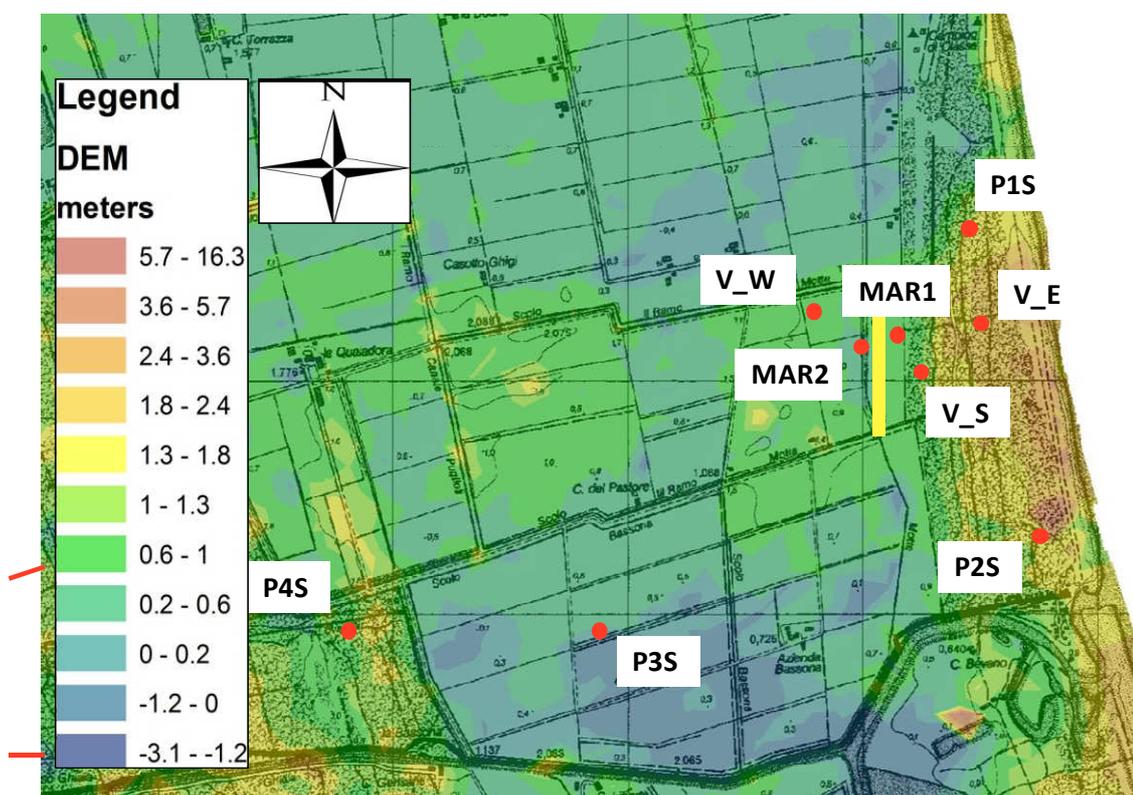


Figura 10.3 Immagine del modello digitale di elevazione (DEM) dell'area MAR in cui sono presenti i piezometri utilizzati nello studio (rosso) e il canale di ricarica (giallo).

Come già visto in precedenza, l'area MAR si colloca nella parte terminale del V Bacino e come tutto questo territorio è sottoposto a drenaggio meccanico grazie ad una fitta rete di canali che conferiscono all'idrovora omonima situata ad ovest della Pineta di Classe. In dettaglio, come si vede nella Figura 10.1, l'area MAR è drenata da 2 canali principali, diretti est-ovest, che si originano dalla pineta, delimitano a nord e a sud l'area in oggetto e costituiscono la dorsale principale di drenaggio. Anche la pineta costiera è drenata da canali secondari che confluiscono direttamente nei principali sopradescritti, i quali regolano e mantengono la falda freatica ad una profondità tale da garantire un franco di coltivazione sufficiente.

La metodologia irrigua utilizzata dai gestori degli appezzamenti è l'irrigazione per aspersione (a pioggia), la quale mediante degli irrigatori apporta su tutta la superficie da bagnare, importanti volumi di acqua ogni 2-3 giorni in piena stagione di sviluppo della coltura.

10.5 Monitoraggio

La scelta di orientare l'area di studio ad un ulteriore approfondimento è scaturita dall'elaborazione dei dati relativi ai monitoraggi eseguiti a scala di transetto. Dai dati chimici ottenuti dal monitoraggio di dicembre 2010, è emersa la presenza di un campione di acqua con una componente dominante calcio-carbonatica nel piezometro V_S. Tale pozzo, situato all'interno di quella che sarebbe poi diventata l'area MAR, era stato messo a dimora nell'ambito di un precedente progetto di ricerca e durante i monitoraggi dell'epoca aveva sempre mostrato caratteristiche geochemiche anomale rispetto al contesto della zona.

Partendo da queste considerazioni, nel gennaio 2011 sono stati messi a dimora nuovi piezometri, appositamente per raccogliere informazioni sul canale di stoccaggio. Tali pozzi denominati MAR1 e MAR2 si trovano rispettivamente al confine pineta-area MAR (MAR1) e pochi metri ad ovest del canale di ricarica (MAR2) (Figura 10.1). Per tipologia, metodologia costruttiva e tipo di rilievi eseguiti al momento dello scavo, sono comparabili con i pozzi C.S.I. (paragrafo 4.1). Allo scopo di aumentare i punti di ispezione dell'area MAR abbiamo anche rimesso in opera piezometri superficiali di un vecchio progetto eseguito sulla pineta costiera. I pozzi V_W e V_E sono stati spurgati, ripuliti e quotati nuovamente rendendoli di nuovo operativi. Abbiamo raggiunto un totale di 8 pozzi disponibili per monitorare l'area MAR di cui P1S, P2S, MAR1, MAR2 e P3S, interamente perforanti l'acquifero e completamente fenestrati, ideali per i campionamenti delle acque sotterranee, mentre V_E, V_W e V_S raggiungono solamente i -5m di profondità e sono stati utilizzati per le implementare i punti di misura della soggiacenza (Figura 10.1).

Una volta resa utilizzabile la rete piezometrica si è passati al monitoraggio. Già un mese dopo lo scavo dei piezometri, nel febbraio 2011 sono stati raccolti dati multilivello di conducibilità elettrica, temperatura, pH ed Eh.

Nel mese di aprile 2011, sia il transetto completo che la zona MAR sono stati interessati da un monitoraggio dei parametri chimico-fisici e da un campionamento e successive analisi di laboratorio di campioni di acque sotterranee (paragrafo 5.3.1).

Nel luglio 2012 è stato eseguito l'ultimo, ma più completo campionamento delle acque sotterranee per la componente chimica. Sono stati raccolti 29 campioni di acque in soli 5 piezometri, cercando di dare maggiore dettaglio alla porzione più superficiale dell'acquifero. Oltre a raccogliere i campioni per le analisi di laboratorio di cationi e anioni, al rilievo dei parametri chimico fisici, sono stati anche misurati in campo, mediante spettrofotometro portatile, le specie del ferro, dell'azoto, i fosfati e i solfuri. Tale scelta si è resa necessaria, in quanto, questi composti degradano rapidamente dalle concentrazioni in acquifero a causa di attività microbiche, precipitazioni di idrossidi di ferro e manganese e variazioni di temperatura ed Eh.

Parallelamente all'aspetto geochimico, sempre nel 2011, è stato eseguito un monitoraggio mensile della soggiacenza della falda in tutti gli 8 pozzi facenti parte dell'area MAR e con la stessa cadenza temporale una misura delle precipitazioni, della quantità di acqua apportata tramite l'irrigazione a pioggia e una misura diretta dell'infiltrazione dalla superficie verso la falda freatica. Le precipitazioni e l'irrigazione sono stati valutati attraverso dei pluviometri, mentre l'infiltrazione è stata misurata mediante un prototipo di infiltrometro sepolto nell'appezzamento di pomodori.

Per meglio comprendere il sistema presente nell'area MAR abbiamo eseguito un transetto di indagini geo-elettriche (paragrafo 5.2.6) con al centro il bacino di ricarica. Tali indagini hanno visto l'esecuzione di un primo transetto nel febbraio 2011, cioè prima della messa a dimora delle piante di pomodoro e dell'inizio della stagione irrigua. La ripetizione di tale sezione geo-elettrica è avvenuta al culmine della stagione irrigua nel mese di luglio dello stesso anno. Come prevede la tecnica stessa, ad ogni punto di indagine è stata eseguita una trivellata, con descrizione litologica e misura della salinità del top della falda freatica da utilizzare al momento dell'inversione dati. Con la descrizione litologica è stata costruita una sezione litologica di dettaglio mostrata in Figura 10.4 in cui sono presenti anche i punti di indagine geo-elettrica.

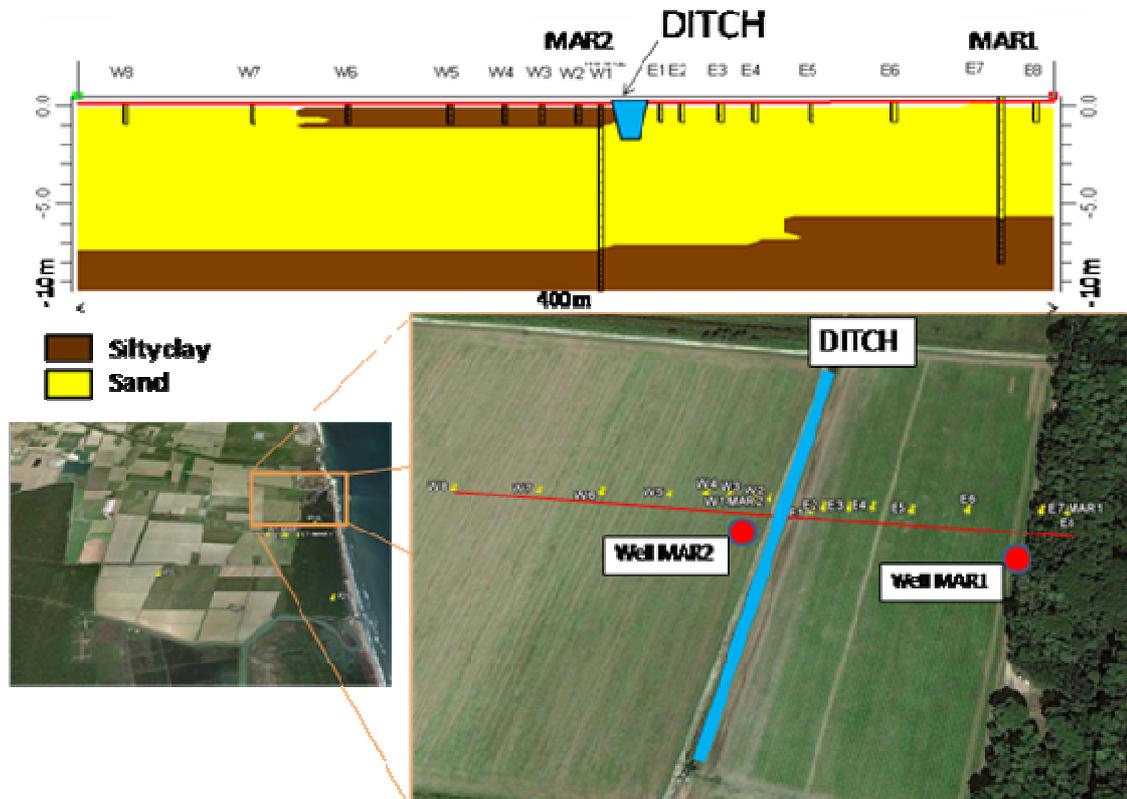


Figura 10.4 Dettaglio del modello litologico presente al di sotto del canale di ricarica, con in evidenza i pozzi principali, MAR1 e MAR2, le sedici posizioni in cui sono state eseguite le indagini geoelettriche.

10.6 Risultati

L'inquadramento climatico generale per l'area di Ravenna, negli ultimi anni mostra un trend di diminuzione delle precipitazioni (paragrafo 3.1). Nel 2011, anno in cui sono state approfondite le conoscenze dell'area MAR, sono piovuti meno di 400 mm complessivamente. Se per i primi mesi dell'anno le precipitazioni si sono assestate vicino alle medie climatiche, per i restanti mesi sono state abbondantemente al di sotto delle medie storiche. Allo stesso modo le temperature sono risultate al di sopra della media storica per l'area, in particolare quelle tardo estive ed autunnali (Figura 10.5).

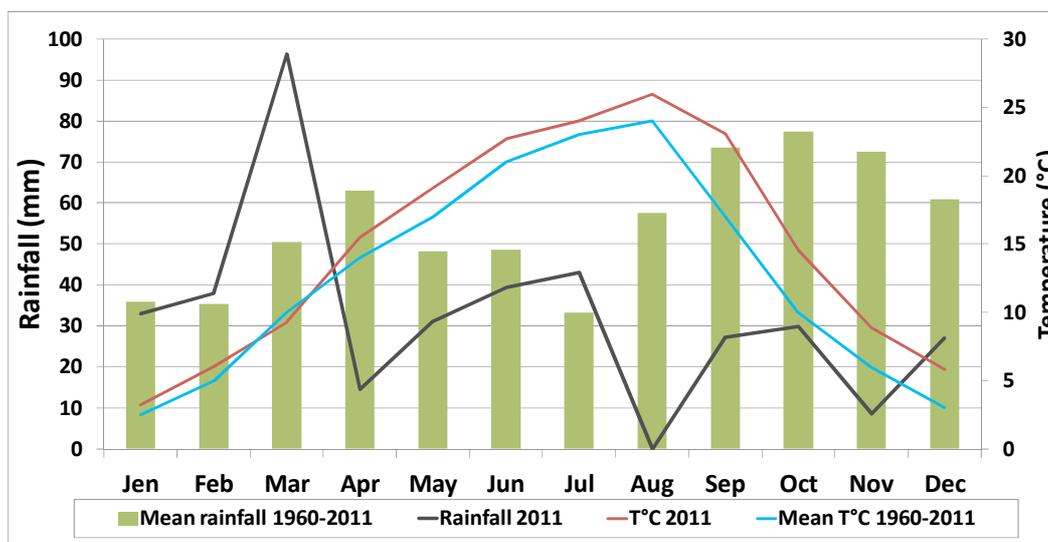


Figura 10.5 Resoconto climatico per l'anno 2011 e confronto con le medie climatiche dell'area.

Avendo quantificato la quantità di pioggia precipitata nell'area, manca, per l'appezzamento coltivato a pomodoro, il dato relativo all'irrigazione. Dagli incontri svolti con il personale della Cooperativa di Campiano è emerso che gli interventi irrigui sull'appezzamento venivano effettuati, a seconda dell'andamento climatico, mediamente due volte a settimana con un apporto di circa 25mm ad intervento. I risultati del pluviometro, dedicato a tale misura, ci confermano il quantitativo e ci rivelano che l'irrigazione è iniziata nel mese di aprile (periodo di messa a dimora delle piante di pomodoro in campo) e si è conclusa ad agosto. I quantitativi mensili sono variabili, ma raggiungono un picco nel mese di luglio (180mm somministrati tramite irrigazione a pioggia), mentre nel mese di agosto si attestano a circa 90mm a causa della conclusione della fase irrigua e della successiva raccolta del prodotto. A questo punto ci siamo posti la domanda di quanto influisca l'infiltrazione superficiale sulla ricarica dell'acquifero sottostante (Figura 10.6). La quantità di acqua che raggiunge la superficie di suolo deriva da due componenti: le precipitazioni e l'irrigazione. La somma delle due, specialmente nei mesi di giugno e luglio, supera i 200mm, ma i valori registrati dall'infiltrometro, mostrano che l'acqua precipitata e quella distribuita non raggiungono la falda, ma vengono interamente evapo-

traspirati dalla coltura presente. Infatti, la Figura 10.5 evidenzia come esclusivamente per i mesi di aprile e maggio vi sia una modesta infiltrazione in falda che raggiunge gli 8mm in aprile e si arresta a soli 2mm in maggio.

2011	Mesi	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Unità di misura mm	Pioggia	33	38	96	15	31	40	43	0	27
	Irrigazione	0	0	0	150	120	150	180	90	0
	Infiltrazione	n.d.	n.d.	n.d.	8	2	0	0	0	0

Figura 10.6 Riassunto degli apporti idrici e dell'infiltrazione misurati nell'area MAR

La soggiacenza della falda misurata all'interno dei pozzi dell'area mostra come, muovendoci su di un transetto ideale dal P2S (mare) verso l'entroterra (EMS1 cave) la profondità della falda diminuisca drasticamente fino a toccare il punto più profondo nei pressi del pozzo EMS1, localizzato nei pressi dell'idrovora del V Bacino (Figura 10.7). In Figura 10.7 sono stati riportati solamente i mesi del 2011 in cui il canale è stato utilizzato come bacino di stoccaggio; già da questa prima figura, si può notare come per tutti i pozzi vi sia un approfondimento della falda con l'avanzare della stagione estiva. L'unico ad avere una tendenza opposta e poi a mantenersi costante è il piezometro MAR2 (adiacente al canale di ricarica) che già nella seconda metà di aprile mostra una profondità di falda minore rispetto alla prima decade del mese. Nei mesi successivi la falda si abbassa ovunque lungo il transetto, ad esclusione del pozzo MAR2, dove il canale adiacente, garantisce una profondità di falda costante a circa -0.70m sul l.m.m. (Figura 10.8).

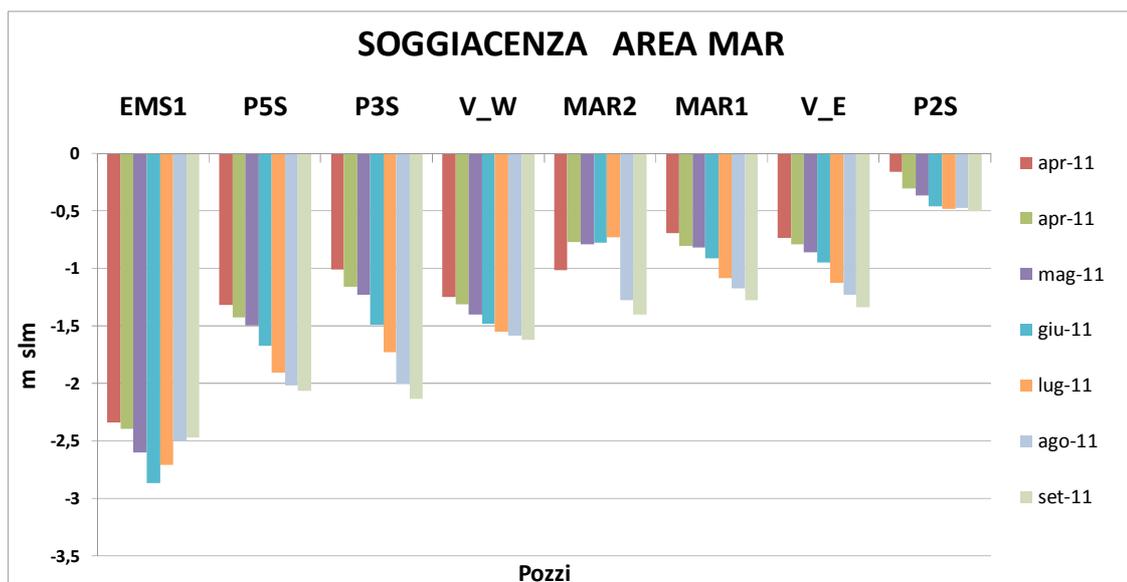


Figura 10.7 Soggiacenza della falda lungo il transetto, con dettaglio dell'area MAR, relativo ai mesi estivi del 2011.

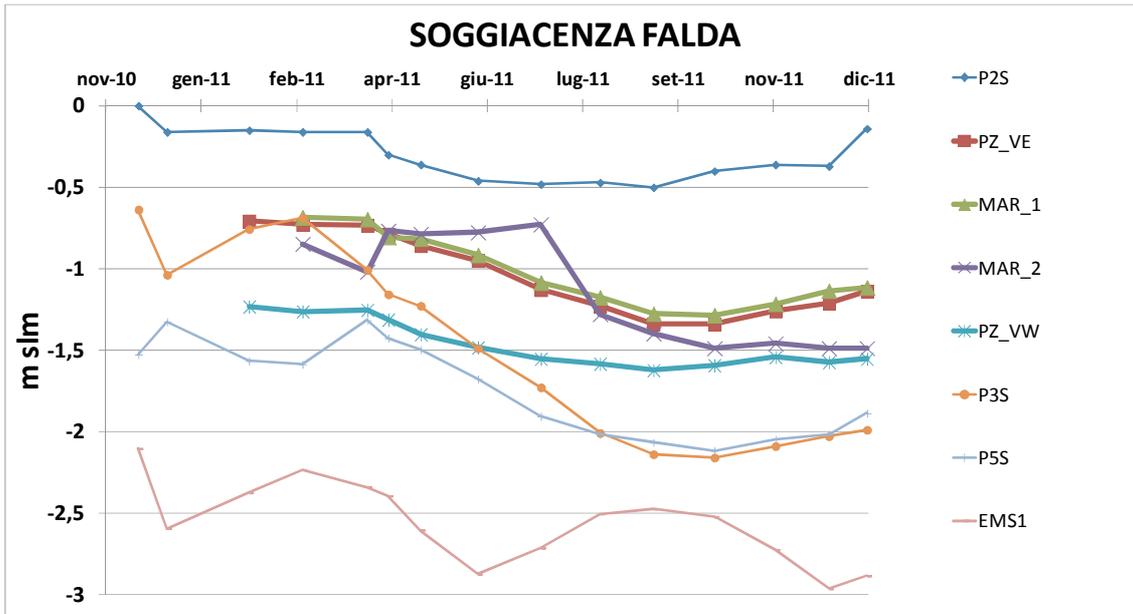


Figura 10.8 Soggiacenza della falda freatica nel transetto ricavato all'interno del V Bacino relativo al 2011. In viola l'andamento anomalo della falda freatica all'interno del pozzo MAR2.

Riportando la soggiacenza su mappa, in Figura 10.9 sono mostrate le profondità di falda nei mesi di aprile, giugno e settembre 2011. Possiamo perciò notare come, nel mese di aprile, prima dell'inizio della stagione irrigua, vi sia un gradiente lineare da mare verso l'entroterra, con una falda che trova il punto più profondo nei pressi del piezometro V_W con valori di -1.2m s.l.m.. Se osserviamo la mappa delle isofreatiche del mese di luglio, in piena attività irrigua e con il canale di stoccaggio al culmine, risulta evidente come la falda si approfondisca, ma nei dintorni del canale irriguo si generi un gradiente inverso che rende il canale stesso un punto di carico idraulico principale per l'area. Le isofreatiche di settembre, invece, mostrano che la falda continua a scendere e che terminata la stagione irrigua si ripristina il gradiente lineare da mare verso l'entroterra, presente anche in aprile.

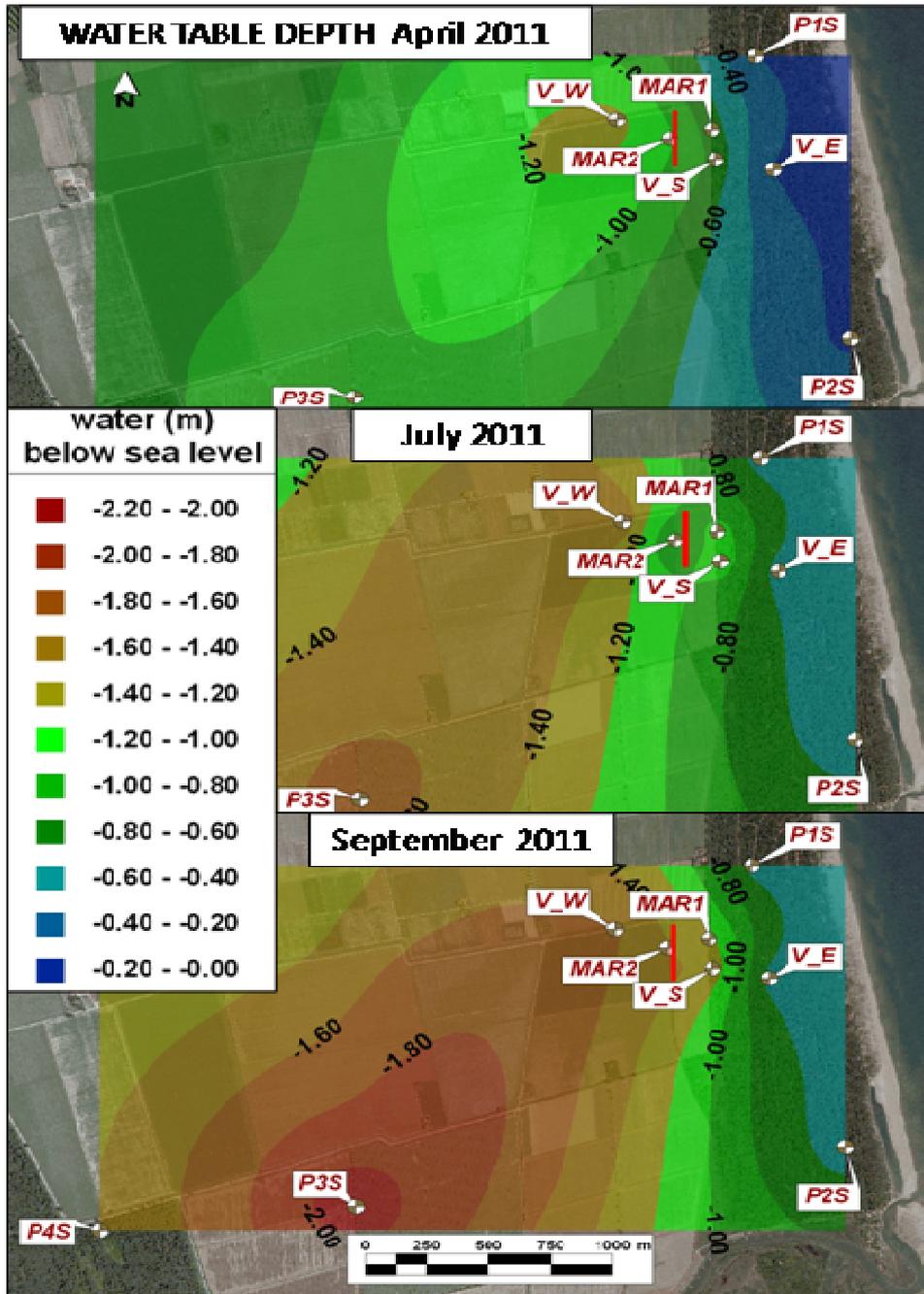


Figura 10.9 Confronto della soggiacenza della falda nell'area MAR per i mesi di aprile, luglio e settembre del 2011.

Dai dati raccolti mediante il metodo a campionamento multilivello sono stati ricostruiti dei transetti che mostrano le variazioni stagionali della salinità.

La Figura 10.10 rappresenta l'interpolazione del parametro salinità, ottenuta mediante i campionamenti multilivello eseguiti in febbraio e luglio 2011. La sezione di febbraio mostra come la maggior parte dell'acquifero sia salinizzata, con valori che quasi ovunque si trovano al di sopra dei 10g/L. Sono presenti acque salmastre esclusivamente nella porzione superficiale dell'acquifero, ma che spariscono rapidamente durante la stagione vegetativa. Nei pressi del pozzo MAR1 si trovano salinità al di sotto dei 3g/l fino ad una profondità di -4m s.l.m.. La base dell'acquifero, specialmente nella porzione adiacente la costa possiede salinità simili a quelle

marine. Il confronto con luglio dello stesso anno, evidenzia due fenomeni opposti: da una parte, nei pozzi P1S e P4S si vede un aumento della salinità dovuto probabilmente alla forte evapotraspirazione causata dalle pinete, mentre, dall'altra, nei pozzi intermedi MAR1, MAR2 e P3S la tendenza è quella verso una diminuzione dei valori di salinità. Per quanto riguarda i piezometri MAR, si nota una dolciificazione dominante nel pozzo MAR2, testimonianza di come la trincea di ricarica apporti una quantità di acqua dolce notevole in acquifero che fa passare la salinità dai 5-7g/l a valori al di sotto di 3g/l. La dolciificazione del piezometro P3S risulta meno accentuata rispetto alla zona MAR, ma si passa da valori superiori ai 10g/l per scendere fino ai 5g/l (Figura 10.10).

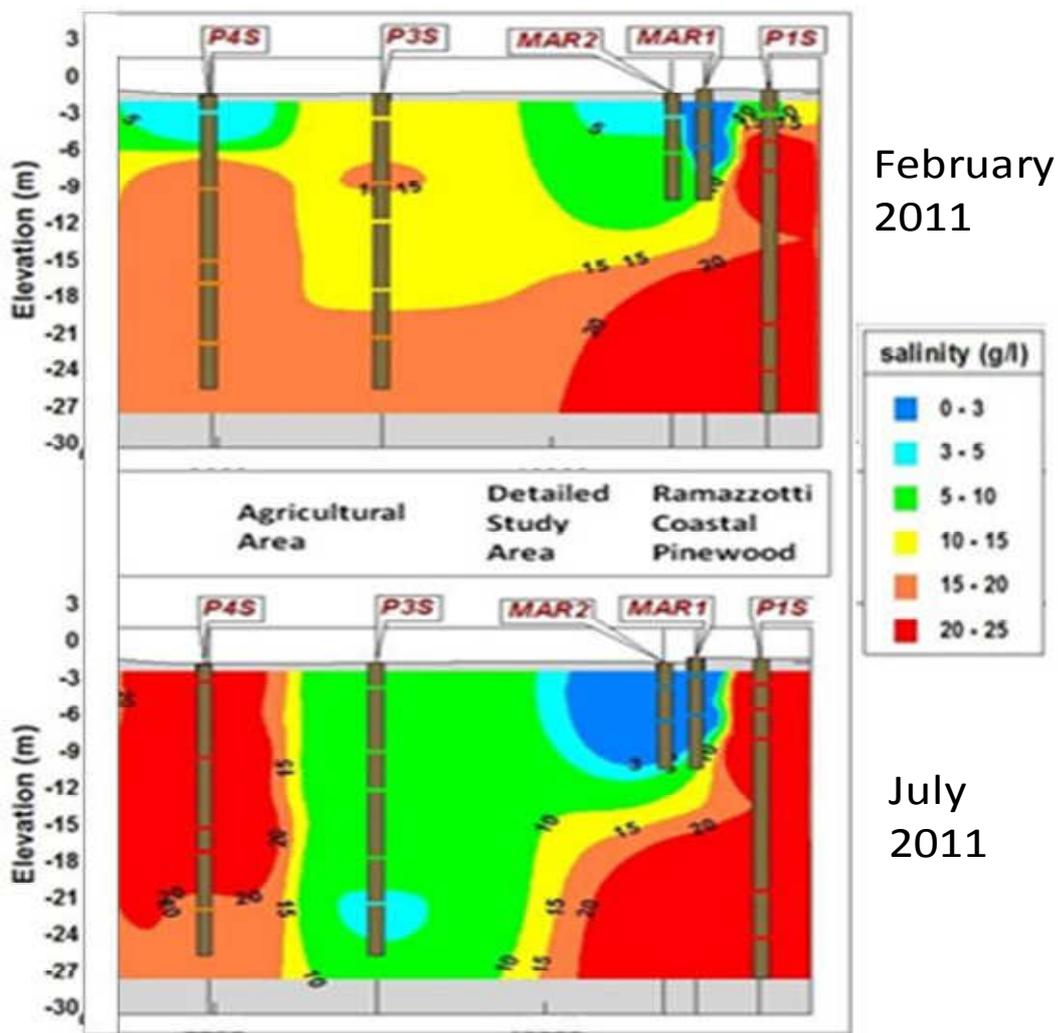


Figura 10.10 Confronto stagionale della salinità misurata mediante monitoraggio multilivello relativa alla sola area MAR le soglie di salinità sono coerenti con quelle adottate in (Antonellini 2010)

Se con i soli dati chimico-fisici del campionamento multilivello sono state costruite sezioni di salinità, con i dati di cationi e anioni sono stati costruiti i transetti riportanti informazioni relative alle *hydrofacies* (paragrafo 8.5).

La Figura 10.11 permette il confronto tra le *hydrofacies* ricavate dalle analisi chimiche eseguite sui campioni di acque sotterranee raccolte nel dicembre 2010 e nell'aprile 2011. La differenza principale che occorre far notare è la diversità dei pozzi campionati, in quanto, nel dicembre 2010 non si aveva ancora chiara l'intenzione di approfondire l'area MAR e di conseguenza non erano presenti i piezometri MAR. In quell'occasione è stato raccolto un campione superficiale nel piezometro V_S, il quale già mostrava l'unico campione d'acqua carbonato-calcica della zona e con classificazione di salinità "f" (*fresh*). Le restanti tipologie di acque presenti, nel dicembre 2010, sono drammaticamente a composizione cloruro-sodica e con BEX negativi o assenti. La prima lettera del codice, indicatrice della salinità, varia tra la "S" e la "b", rispettivamente "*saline*" e "*brackish*". Risulta evidente esclusivamente una colorazione verde (Figura 10.11) nella porzione superficiale del pozzo P4S all'interno della Pineta di Classe, il quale, nonostante la composizione cloruro-sodica possiede un BEX positivo, che rivela una fase di dolcificazione in atto. Quest'ultimo aspetto, conferma quanto mostrato in precedenza nella sezione di salinità che vedeva acque meno salate al *top* dell'acquifero in corrispondenza della pinete, durante il monitoraggio di febbraio.

Ad esclusione della sostituzione dei pozzi, il confronto delle *hydrofacies* di dicembre e quelle di aprile, chiarisce meglio cosa succede nei pozzi MAR; notiamo che in aprile 2011, prima dell'inizio della fase irrigua, il piezometro MAR1 possiede alla superficie dell'acquifero una composizione calcio-carbonatica con BEX positivo, mentre già a -5m non vi è un anione dominante, anche se il BEX rimane positivo. Il pozzo MAR2, seppure in febbraio, aveva salinità non troppo elevate, la tipologia di acqua è cloruro-sodica lungo tutto il profilo. Nei restanti pozzi, passando da dicembre ad aprile, anche le *hydrofacies* ci indicano un peggioramento della qualità della risorsa idrica (Figura 10.11).

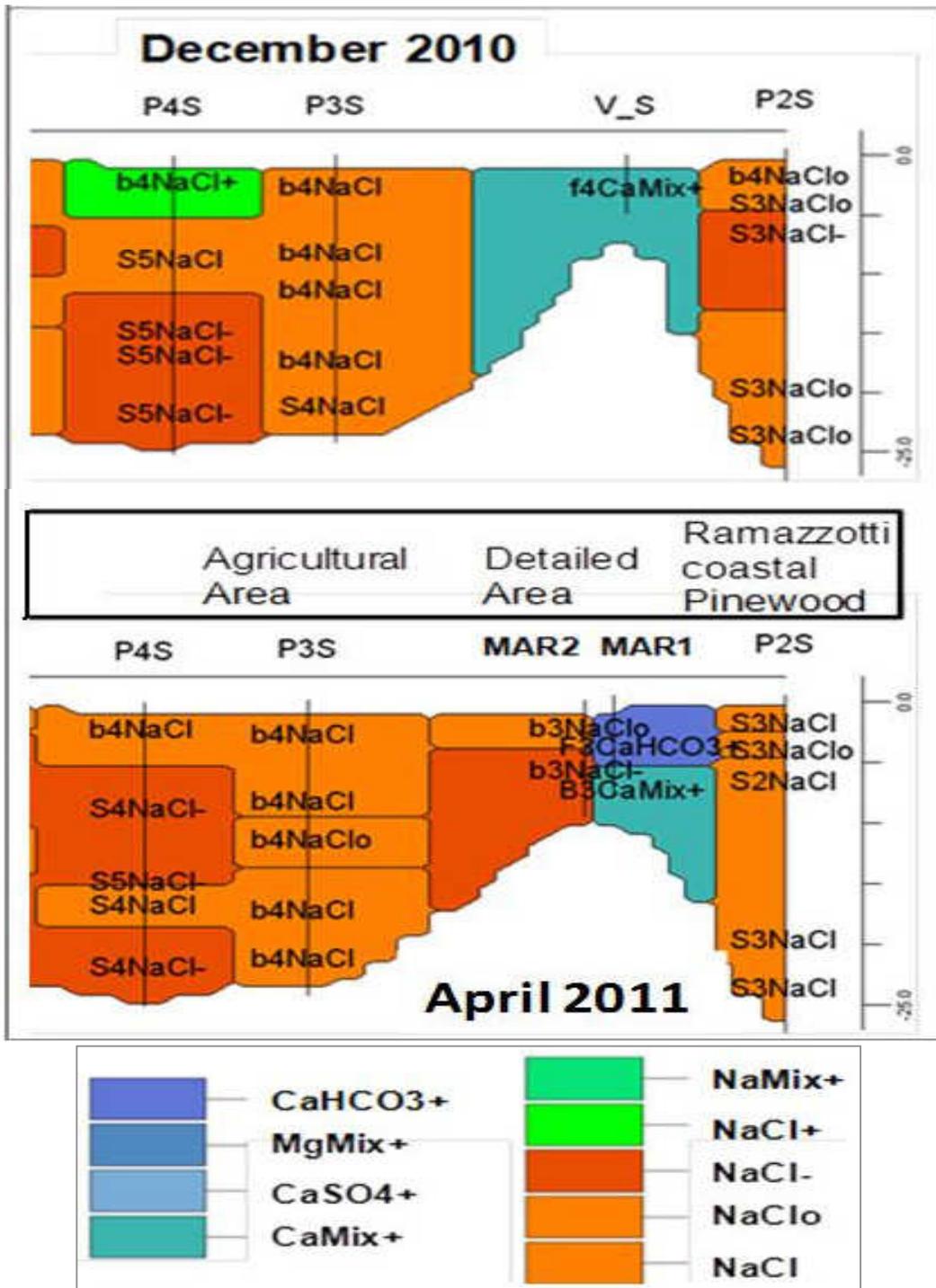


Figura 10.11 Confronto stagionale delle hydrofacies presenti nell'area Mar in accordo con Stuyfzand 1989.

Fino a questo punto sono state raccolte molte informazioni geochimiche nel periodo invernale e primaverile, ma non era ancora stato eseguito un campionamento, con successive analisi chimiche, in piena fase irrigua.

Il campionamento di luglio 2012 ha sopperito a questa lacuna, analizzando cationi e anioni dominanti e permettendoci inoltre di avere un maggiore dettaglio su di altri composti sinora tralasciati.

Saranno presentati per i risultati del campionamento di luglio 2012, un'analisi statistica mediante *boxplot* e una rappresentazione attraverso *piper diagram*.

La Figura 10.12 riporta l'analisi statistica mediante *boxplot* di cationi e anioni relativi al campionamento di luglio 2012. I cationi ad esclusione del calcio, individuano due comportamenti nettamente distinti: MAR1, MAR2 e P3S, hanno concentrazioni nettamente inferiori rispetto a P1S e P4S. MAR1 mostra un arricchimento deciso per il calcio, che lo porta a concentrazioni oltre i 200 ppm. Anche bromo e cloro confermano la separazione precedente in due gruppi distinti, mentre alcalinità e solfati mostrano andamenti speculari nei pozzi P1S e P3S, concentrazioni tipiche di acque marine in P4S e arricchimento in solfati nel MAR1. Il pH registra un incremento nel pozzo P3S e l'Eh possiede valori prossimi allo zero nei pozzi MAR.

Il *piper diagram* mostrato in Figura 10.13 riassume in un unico grafico cationi e anioni; le acque dei pozzi P1S, P3S e P4S possiedono una composizione identica a quella del mare Adriatico, solamente i piezometri MAR adiacenti al canale di ricarica hanno cloruri ridotti e solfati più abbondanti, separandosi nettamente dai 3 pozzi precedenti e avvicinandosi alla tipologia del campione CER. La somiglianza delle concentrazioni dei cationi del pozzo MAR2 con quelli CER ci indica una possibile interazione, che vede però i cloruri a concentrazioni intermedie, sintomatici di una recente contaminazione marina, visibile anche in Figura 10.10 nel monitoraggio di febbraio.

La Figura 10.14 mostra la sezione dell'area MAR costruita con i valori di Eh; essa ci mostra come in tutta l'area vi siano Eh fortemente negativi che indicano condizioni molto riducenti e di conseguenza, scarse interazioni con le acque superficiali. Le uniche porzioni in cui i valori di Eh tendono a salire si trovano nelle vicinanze dei pozzi MAR, dove si raggiungono anche valori leggermente positivi.

BOXPLOT Transetto luglio2012

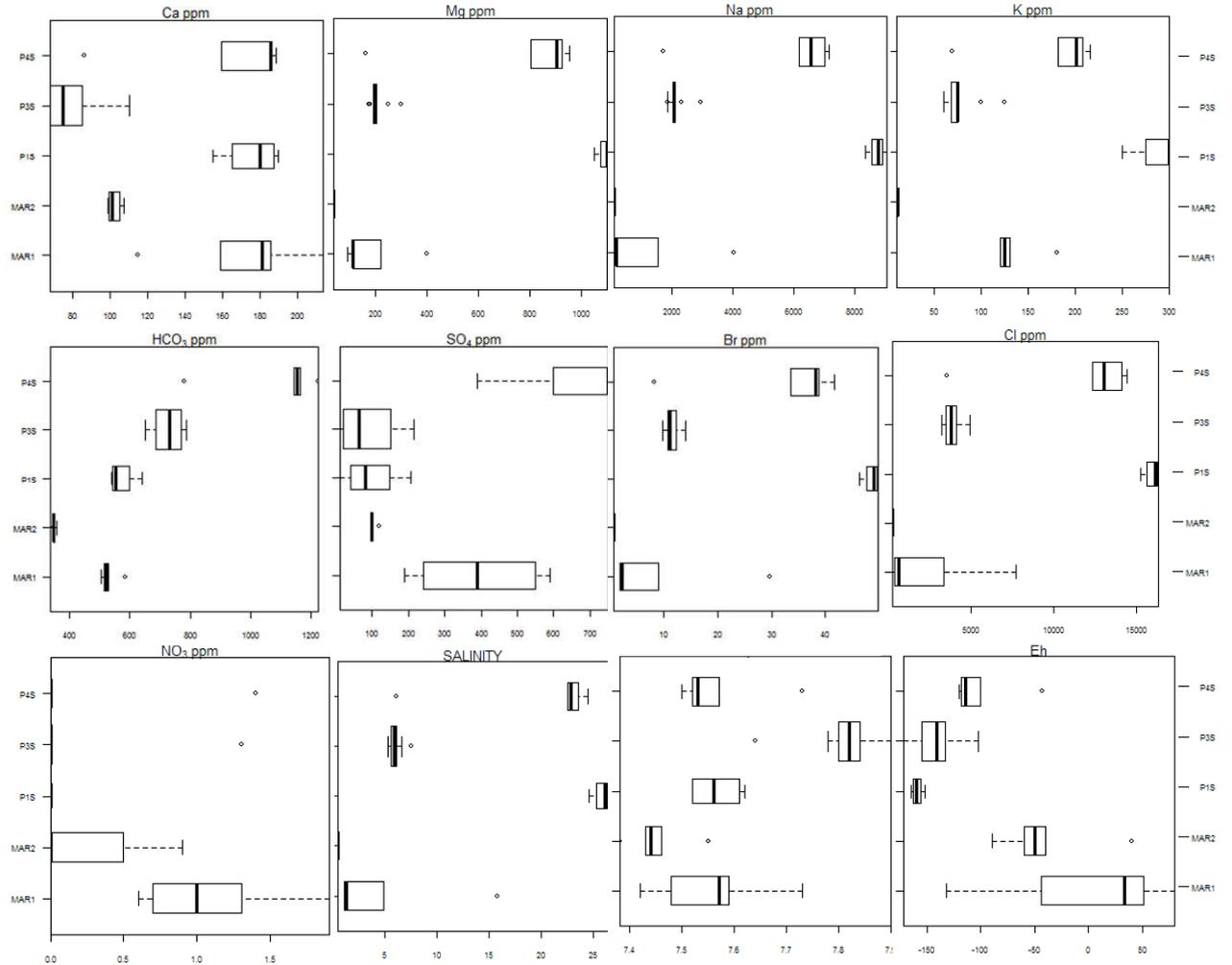


Figura 10.12 Rappresentazione statistica tramite *boxplot* dei risultati delle analisi chimiche e dei parametri multilivello, relativi alla zona MAR e ai piezometri circostanti, riferiti al campionamento di luglio 2012.

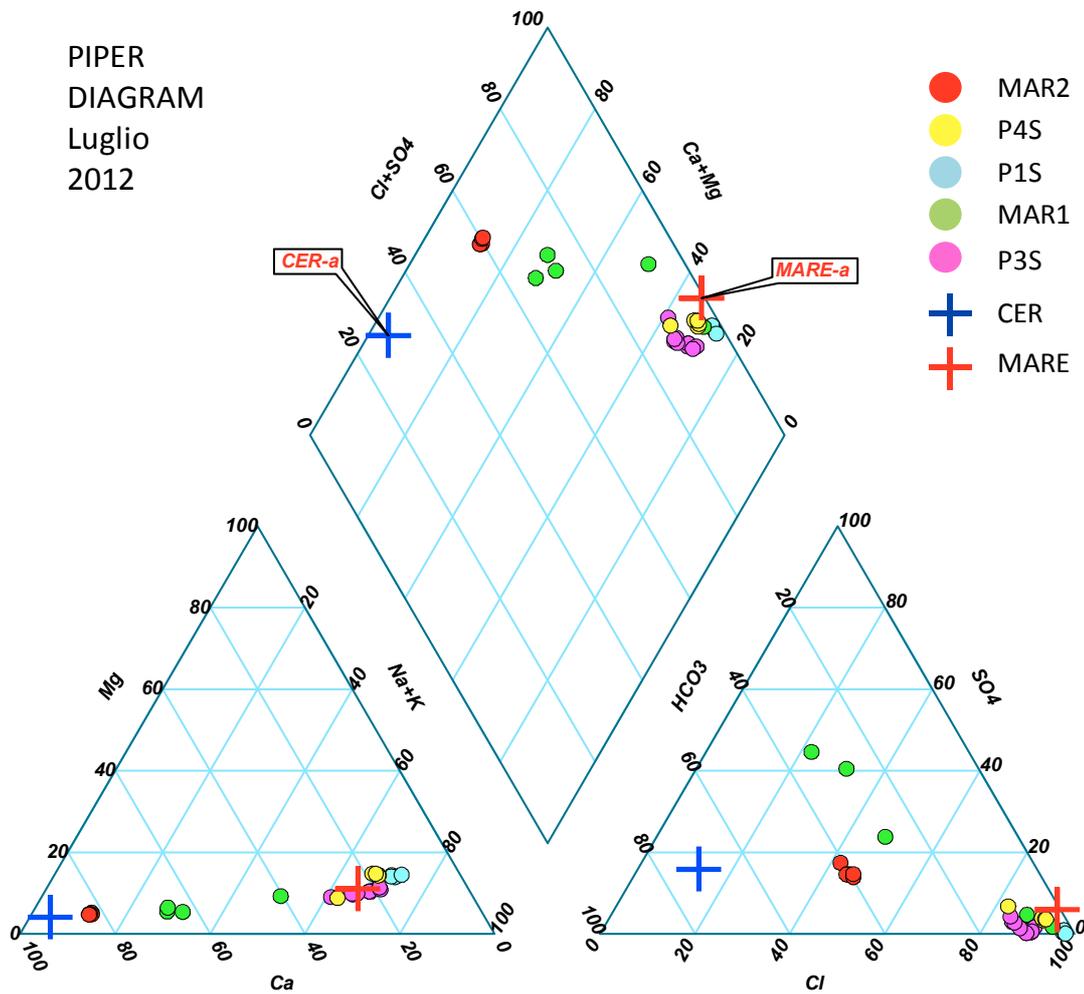


Figura 10.13 Rappresentazione *Piper Diagram* dei componenti principali dei campioni raccolti a luglio 2012 nell'area MAR e nei piezometri limitrofi.

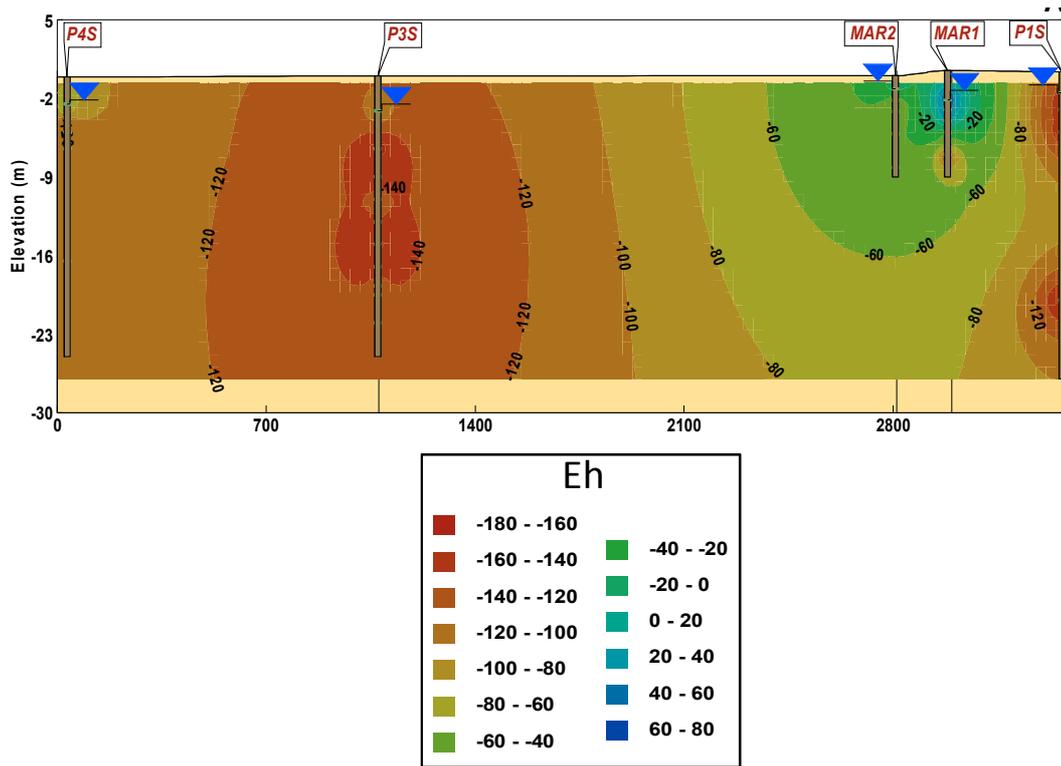


Figura 10.14 Sezione di Eh per i pozzi dell'area MAR relativa al monitoraggio di luglio 2012.

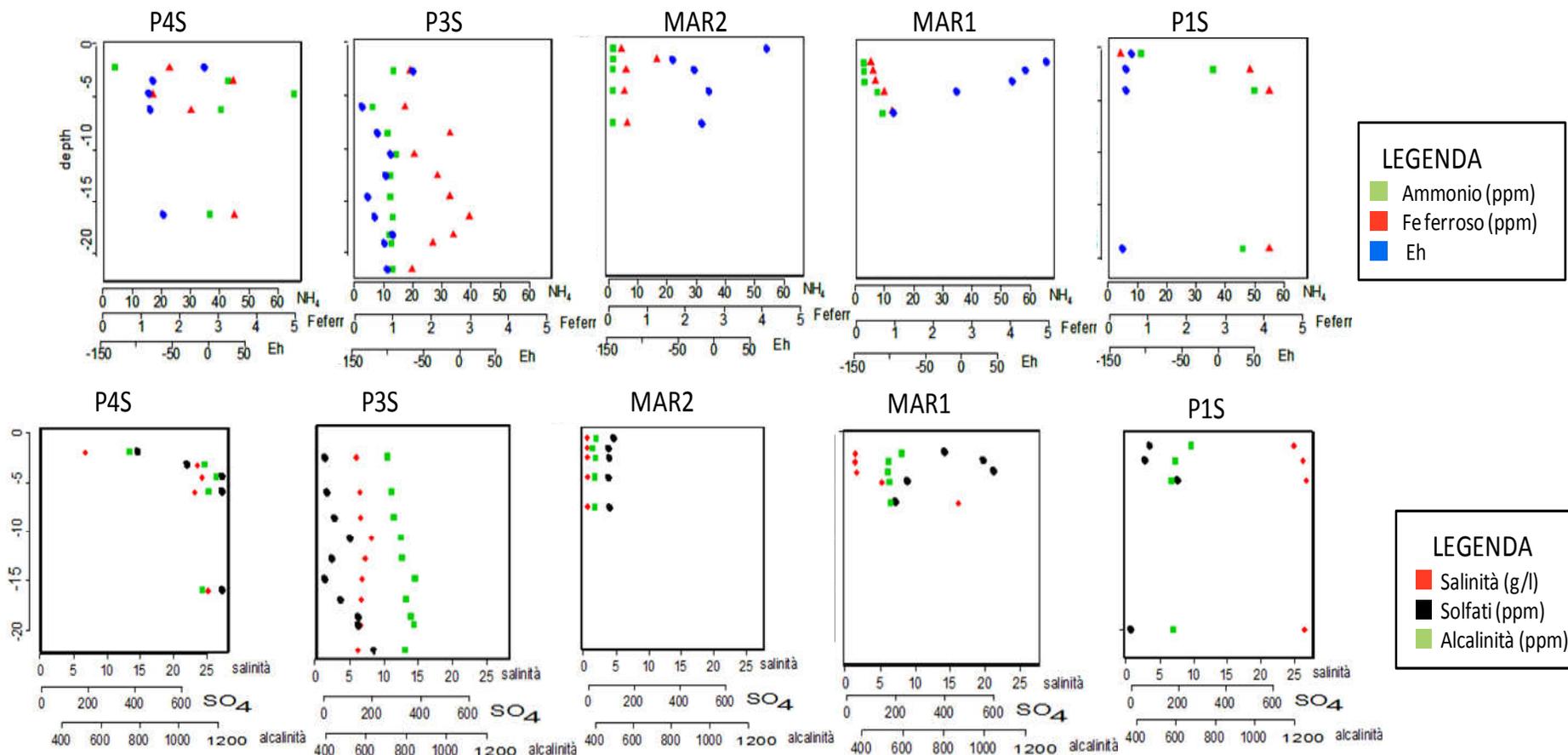


Figura 10.15 Transetti di grafici multipli, che evidenziano lo stato geochimico dell'acquifero nell'area MAR. La prima sezione presenta le concentrazioni di Eh ammonio e Ferro ferroso, il secondo transetto riguarda la salinità, i solfati e l'alcalinità.

In Figura 10.15 sono rappresentati i grafici relativi ai pozzi del transetto, posizionati nell'ordine di impianto in campo. La prima sezione di grafici mette in relazione l'Eh con lo ione ammonio e il ferro ferroso. Tali elementi risultano molto correlati e descrivono una condizione generale dell'acquifero che si può riassumere come la sua dinamicità. Infatti, le specie dell'ammonio e del ferro ferroso si sviluppano e sono stabili in condizioni molto riducenti ed indicano, in generale, una scarsa mobilità delle acque (Appelo 1991, 2005). Dai grafici in Figura 10.15 è possibile notare come in corrispondenza di Eh molto negativi, P1S, P3S e P4S si raggiungano le concentrazioni maggiori di ammonio e ferro ferroso; viceversa, come nel caso dei pozzi MAR, quando ci avviciniamo a condizioni ossidanti tali concentrazioni diminuiscono fino quasi a scomparire.

La serie di grafici successiva (Figura 10.15), relaziona la salinità e i solfati con l'alcalinità. In questo caso, salinità e solfati dovrebbero avere i medesimi comportamenti, dato che hanno la stessa origine marina, ma se si osservano i pozzi P1S e P4S si scopre che a parità di salinità i solfati sono rispettivamente assenti nel primo e in linea con le attese nel secondo. La scomparsa dei solfati ad alti valori di salinità, con simultaneo aumento dell'alcalinità, indica una reazione con il sedimento dell'acquifero mediante la quale i solfati vengono consumati come fonte di ossigeno per degradare la sostanza organica; a tale processo segue un'acidificazione delle acque che per dissoluzione di carbonati vanno ad aumentare l'alcalinità (Appelo 1991, 2005). Nei pozzi centrali invece si notano andamenti particolari per il piezometro MAR1, il quale possiede alti valori di solfati, specialmente nella parte alta dell'acquifero, nonostante la sua salinità molto bassa.

Anche durante questo monitoraggio di dettaglio dell'area MAR e grazie alle successive analisi chimiche eseguite nel laboratorio canadese, è stato possibile realizzare l'analisi delle *hydrofacies* che permette di sintetizzare tutta l'informazione chimica attraverso un singolo codice (Stuyfzand 1989).

La Figura 10.16 rappresenta la disposizione spaziale delle *hydrofacies* di luglio 2012 per la zona MAR. Fino a questo momento sono stati mostrati i risultati delle *hydrofacies* dei mesi di dicembre, in piena stagione invernale, ed aprile, inizio della stagione irrigua (Figura 10.11), grazie a questa sezione si completa il quadro stagionale relativo al culmine della stagione estive ed irrigua.

Data l'elevata densità di campioni raccolti, per efficacia grafica sono stati omessi i codici omonimi ove presenti in numero eccessivo.

Dal confronto stagionale con le *hydrofacies* di dicembre e aprile, si nota come la situazione per i piezometri P1S, P3S e P4S venga del tutto confermata anche nel luglio 2012. Le condizioni delle *hydrofacies* saline ed a composizione dominante cloruro-sodica, sono costanti durante tutto l'anno nei pozzi appena citati.

Il cambiamento più marcato, probabilmente legato al maggior numero di campioni, si rileva nei pozzi MAR. Nel luglio 2012, infatti, l'acquifero superficiale risulta interamente dolcificato all'interno del pozzo MAR2 con una composizione dominante "Ca-Mix" e un indice BEX sempre positivo in tutti e 5 i campioni raccolti (Figura 10.16). Nel piezometro MAR1, i primi 4 codici delle *hydrofacies* sono i medesimi del MAR2, mentre a fondo pozzo è presente un'acqua salmastra a composizione cloruro-sodica e BEX negativo (Figura 10.16.).

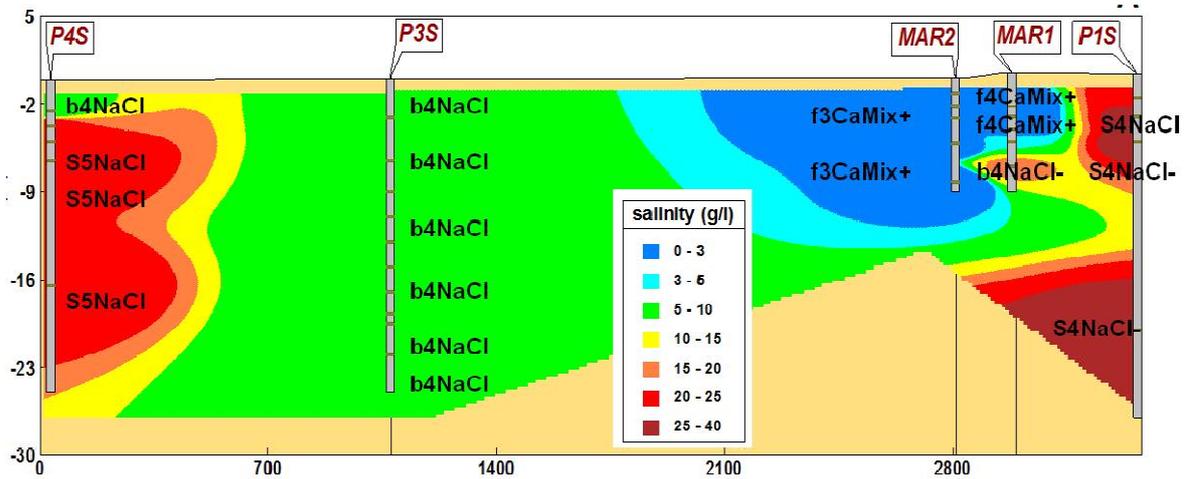


Figura 10.16 Transetto delle *hydrofacies* relative a cationi e anioni delle acque del campionamento del luglio 2012.

I risultati dei sondaggi elettrici verticali eseguiti nel febbraio 2011 suggeriscono che al di sotto della particella ad est del canale, dove l'acquifero è freatico, è presente già in febbraio, una lente di acqua dolce con uno spessore di 4m (Figura 10.17). Acqua dolce è presente anche ad ovest del canale di ricarica, ma con spessori di circa 1m. Durante entrambe le campagne di rilievi VES, sono state eseguite delle trivellate per misurare la soggiacenza della falda e la salinità superficiale; questi dati mostrano come in febbraio, il livello dell'acqua nel canale coincida con la falda sotterranea e tutto il sistema abbia un leggero gradiente verso ovest in direzione delle idrovore. Sempre dall'immagine relativa a febbraio si nota come la bolla d'acqua dolce sparisca rapidamente sotto la Pineta Ramazzotti, con l'isosalina 15g/l che sale in superficie (Figura 10.17).

Durante la stagione irrigua, il canale risulta pieno di acqua dolce proveniente dal CER e confrontato con la soggiacenza della falda, esso risulta avere un carico idraulico maggiore rispetto alle aree circostanti (Figura 10.17). A causa dell'irrigazione eseguita su pomodoro (particella d est del canale), il suolo risulta umido lungo tutto il suo profilo, cosa che invece non accade ad ovest del canale, dove alfa alfa, non necessita di irrigazione e la soggiacenza della falda aumenta a causa dell'evapotraspirazione. In luglio, al culmine della stagione irrigua, la lente di acqua dolce sotto il canale di ricarica, raggiunge la sua massima estensione andando ad interessare tutto l'acquifero superficiale anche ad ovest del canale stesso (Figura 10.17). Il massimo sviluppo si rileva proprio sotto la trincea di stoccaggio.

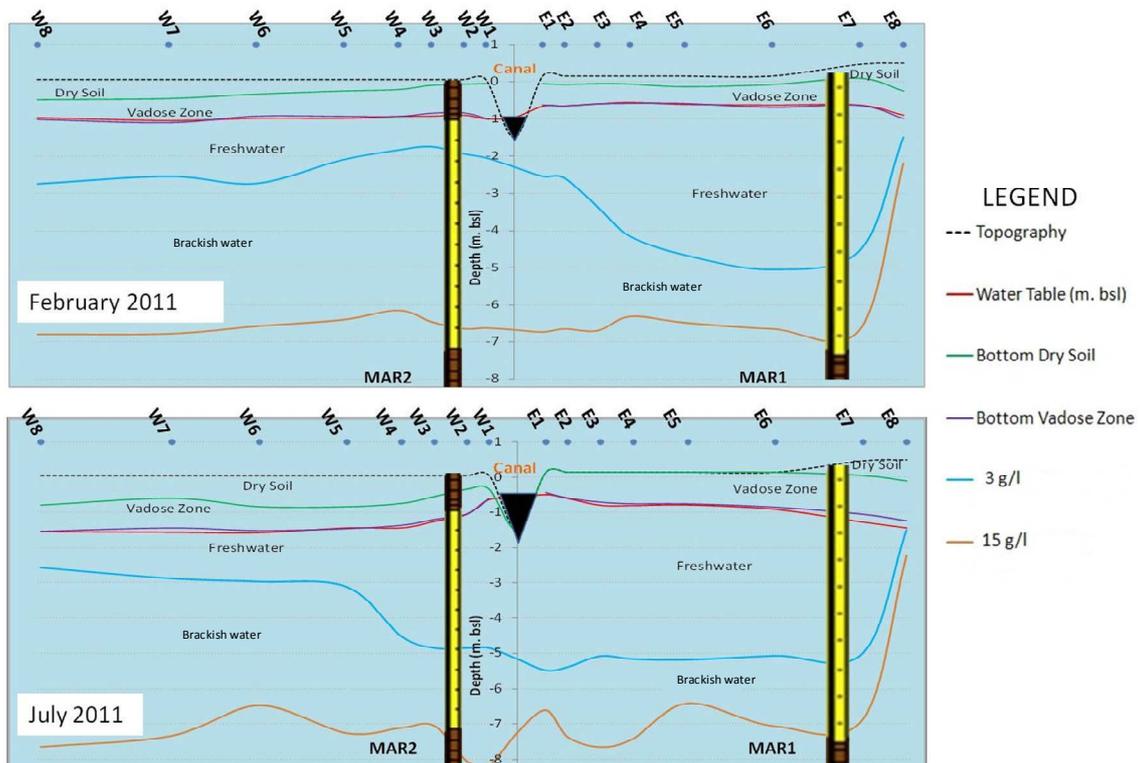


Figura 10.17 Confronto dei risultati delle indagini elettriche verticali (VES) condotte nei mesi di febbraio e luglio 2011. Le sigle nella parte alta corrispondono con quelle delle singole posizioni dei sondaggi.

10.7 Altre aree con interazioni acque superficiali-acquifero evidenti

Utilizzando i dati delle *hydrofacies*, ottenute dai dati chimici del dicembre 2010, abbiamo ricostruito altri profili in zone che mostravano avere una forte interazione tra le acque superficiali e quelle sotterranee. In Figura 10.18 sono raffigurati tre sezioni in cui queste interazioni sono state documentate mediante i profili di *hydrofacies* (Figura 10.19, Figura 10.20 e Figura 10.21).

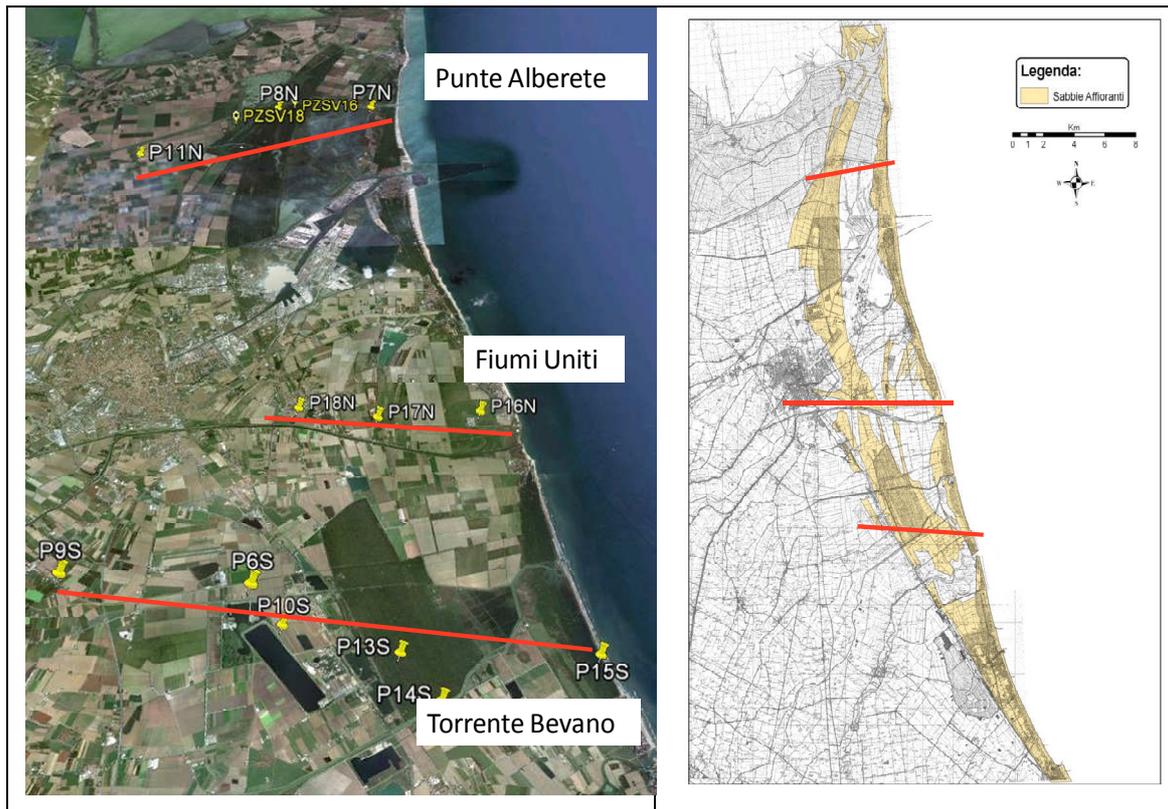


Figura 10.18 Localizzazione dei transetti in cui sono state riscontrate altre evidenti interazioni acque superficiali-acquifero. A sinistra un'estrapolazione da *Google Earth* e a destra i medesimi profili localizzati sulla mappa delle sabbie affioranti.

La prima delle tre aree è quella sottostante la foresta idrofila di Punta Alberete. Questa porzione di territorio situata a nord di Ravenna rappresenta, l'ultimo lembo residuo di foresta allagata che prima delle bonifiche crescevano nelle zone paludose ad acqua dolce. Ancora oggi, grazie ad una chiusa, viene immessa acqua dolce artificialmente prelevandola dal Fiume Lamone. Questo battente di acqua dolce costante al di sopra di sedimenti a granulometria sabbiosa, permette una infiltrazione in acquifero che ritroviamo nella *hydrofacies* superficiale del pozzo PZSV18 in Figura 10.19. La medesima composizione la ritroviamo nelle acque del fiume Lamone (paragrafo 8.5.1).

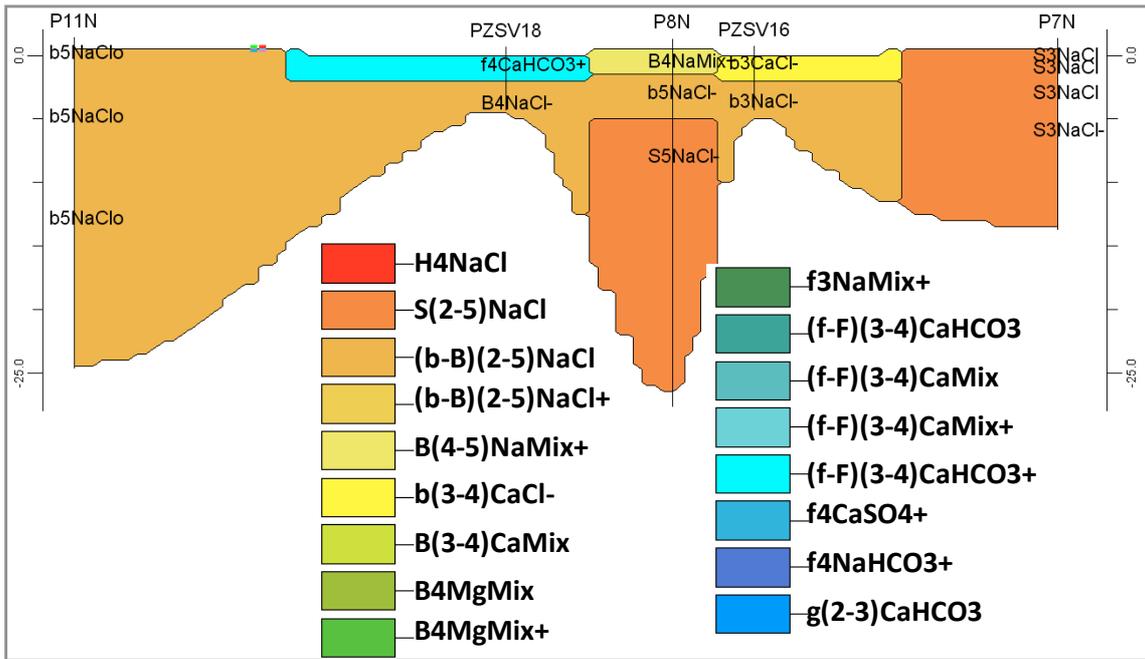


Figura 10.19 Profili delle *Hydrofacies* relative al campionamento di dicembre 2010 per l'area delle Punta Alberete.

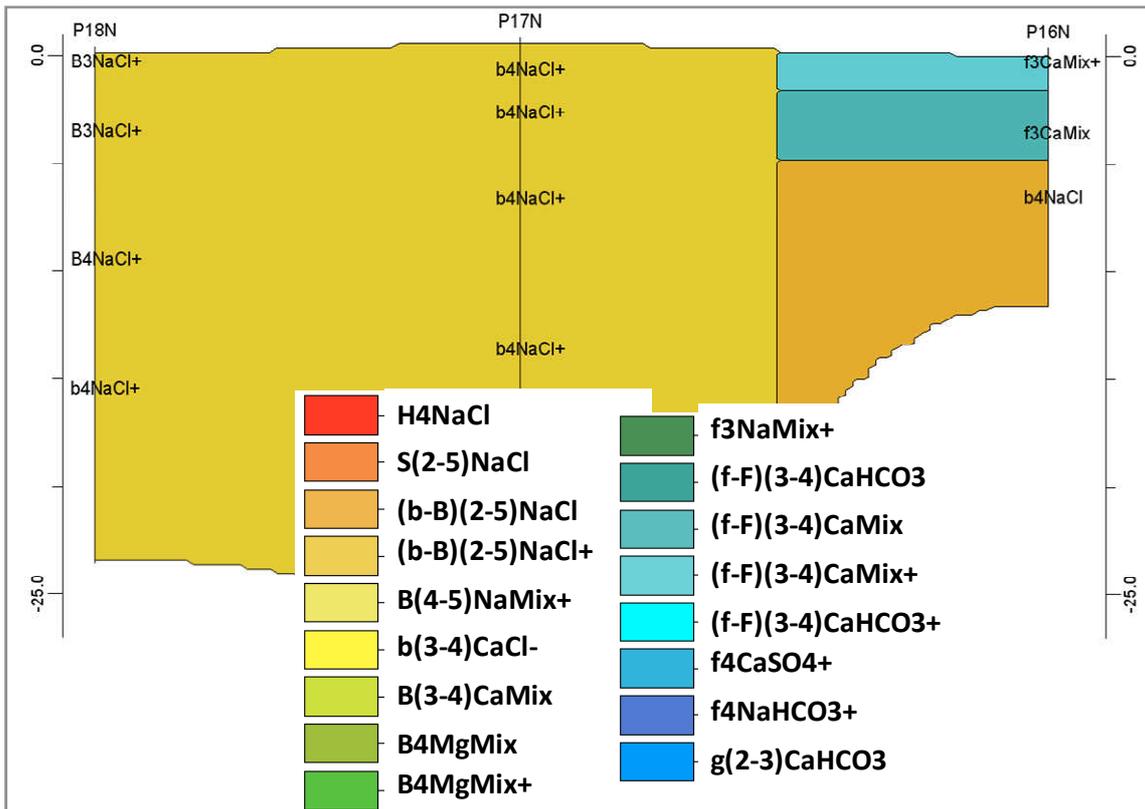


Figura 10.20 Profili delle *Hydrofacies* relative al campionamento di dicembre 2010 per l'area sottostante i Fiumi Uniti.

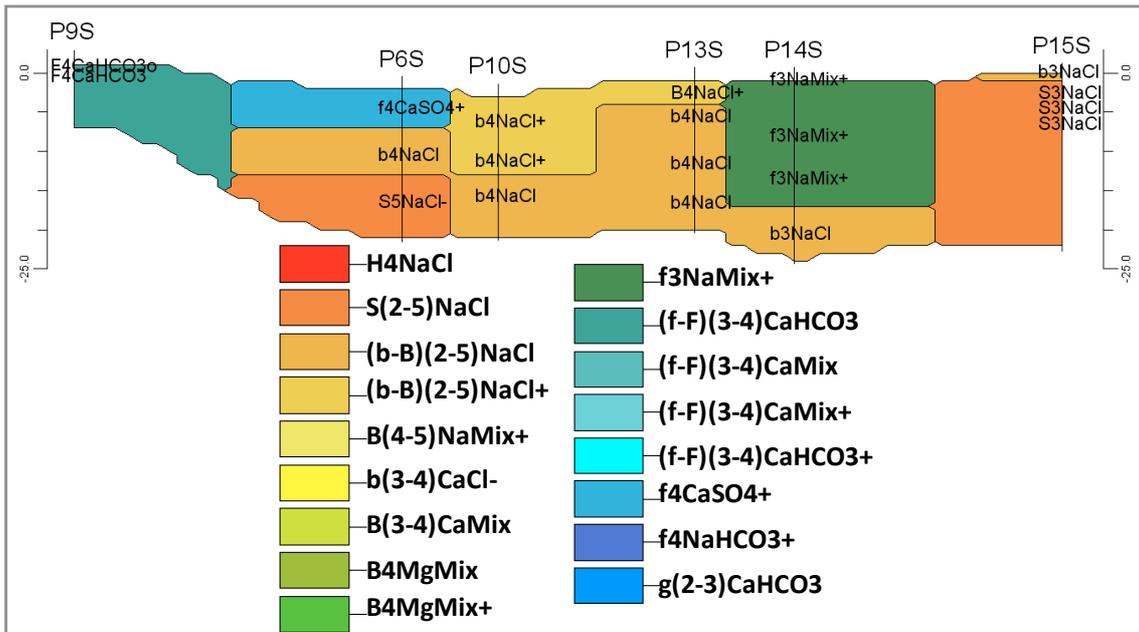


Figura 10.21 Profili delle *Hydrofacies* relative al campionamento di dicembre 2010 per l'area adiacente al torrente Bevano.

La seconda sezione esaminata è quella sottostante il tratto terminale dei Fiumi Uniti. Questa area, come mostrano i dati di salinità (paragrafo 8.3.1) possiede una bolla di acqua dolce (< 3g/l) con uno spessore importante. Questa presenza ci viene confermata anche dalla sezione delle *hydrofacies* che riportano un indice BEX positivo, in profondità fino alla base dell'acquifero, nei pozzi P18N e P17N e delle *hydrofacies* identiche alle acque dei Fiumi Uniti nel piezometro P16N (Figura 10.20).

Il terzo caso di interazione evidente tra acque superficiali e sotterranee è stato rinvenuto su di un transetto di pozzi passante a sud della Pineta di Classe (Figura 10.18); come riportato in Figura 10.21 nei pressi del pozzo P14S è presente una consistente bolla di acqua dolce (*hydrofacies* f3NaMix+) con uno spessore di oltre 15m. Anche se le acque rinvenute possiedono una composizione sodio-dominante, appartengono alla classe "fresh", e l'indice BEX risulta positivo nei primi tre punti campionati.

10.8 Discussione e conclusioni

L'attenzione riposta nell'approfondire gli effetti del canale di stoccaggio ha portato ad una grande mole di dati raccolti che testimoniano l'anomala presenza continuativa di una lente di acqua dolce, con spessori di oltre 4m, a soli 500m dal mare.

Se in una prima ipotesi, l'effetto dell'irrigazione sembrava essere la spiegazione naturale per la formazione della lente, le rotazioni agronomiche adottate dalla Cooperativa Agricola di Campiano sull'area MAR non hanno previsto irrigazione nel 2012, ma allo stesso tempo è rimasta la presenza della lente dolce sotto il bacino di stoccaggio.

Le misure eseguite relative alla quantità di acqua distribuita e a quella che realmente raggiunge l'acquifero, hanno mostrato come il contributo dalla superficie verso la falda sia nullo anche durante i periodi di maggiore apporto irriguo. Allo stesso tempo, nonostante il contributo nullo dalla superficie, durante i mesi estivi, la bolla di acqua dolce aumenta la sua estensione a causa dell'infiltrazione diretta dalla trincea.

La salinità monitorata stagionalmente evidenzia come all'interno della pinete e quindi nelle zone in cui l'acquifero risulta freatico, al termine della stagione invernale, vi sia una modesta tendenza all'addolcimento e nel migliore dei casi, alla formazione di una piccola lente di acqua salmastra che scompare immediatamente dopo la ripresa vegetativa. A ridosso della trincea di stoccaggio, nei pozzi MAR1 e MAR2 è presente acqua con salinità al di sotto dei 3g/l durante tutto l'anno, con variazioni legate all'utilizzo del bacino di stoccaggio.

L'analisi delle *hydrofacies* garantisce una rapida visualizzazione di tutti i dati chimici ottenuti in laboratorio (Mollema, 2012); le uniche *hydrofacies* che si modificano, tra dicembre e luglio, sono quelle adiacenti al canale di ricarica. Il cambiamento misurato va nell'ottica della dolcificazione sia per quanto riguarda la composizione (da Na-Cl a Ca-Mix) sia in base all'indice BEX.

La scarsa mobilità delle acque sotterranee dell'area e la conseguente forte interazione con il sedimento di cui si compone l'acquifero è testimoniata dalla presenza di alcune specie quali l'ammonio e il ferro ferroso che sono indicatori di reazioni fluido-substrato (Appelo, 2005). Allo stesso modo anche il calo dei solfati e l'accumulo dei carbonati ci conferma la staticità delle acque che riescono a generare reazioni di degradazione della sostanza organica nei sedimenti (Appelo, 1991).

Appare a questo punto importante, nel trovare una spiegazione alla presenza ed evoluzione della bolla dolce sotto il canale, il modesto gradiente che si genera tra il canale stesso e la falda circostante, nel periodo estivo. Questo gradiente, dell'ordine di poche decine di centimetri, misurato sia durante i monitoraggi della soggiacenza della falda sia mediante le trivellate per le VES, sembra essere la giustificazione all'addolcimento delle acque sotterranee (Greggio 2012).

Possiamo concludere che questo carico idraulico presente nel bacino di stoccaggio nel periodo estivo, esattamente in concomitanza con la fase di massima depressione della falda freatica, garantisce un gradiente dal canale verso l'acquifero adiacente, che genera un flusso in grado di estendere la lente di acqua dolce.

In molti paesi si cerca da anni di favorire la ricarica degli acquiferi allo scopo di ridurre la salinizzazione e la subsidenza e di stoccare le risorse idriche in forte e rapido declino. Esempi di metodologie disponibili possono essere: iniezione in pozzo (ASR e ASTR), infiltrazione in duna o in argine laterale, (*bank infiltration*), bacini di infiltrazione e raccolta-infiltrazione della acque di pioggia (Böhlke Jk 2002, Gale I., 2000). In molti paesi l'infiltrazione (*seepage*) da canali è considerata una perdita di risorsa idrica (Gale I., 2000).

Sebbene in questo capitolo ci si sia focalizzati su di un'area di dimensioni modeste, l'analisi delle *hydrofacies* a scala di acquifero, ha evidenziato in almeno tre sezioni (porzioni di acquifero) una forte interazione tra corpi idrici superficiali come canali, fiumi e foreste allagate. In questi casi, quello che emerge è la presenza stabile di lenti di acqua dolce che si sono formate involontariamente a causa di contesti litologici e idrologici favorevoli.

Come dimostrato in questo lavoro, l'infiltrazione dal canale di stoccaggio garantisce la formazione e la persistenza di una lente di acqua dolce con spessori ragguardevoli a poche centinaia di metri dal mare. La morfologia e il forte drenaggio a cui è sottoposta l'area risultano fattori sfavorevoli per questa tecnica. Uno dei grossi vantaggi di questa metodologia, invece, sono i bassissimi costi di messa in opera e di gestione. A tale proposito, nella porzione costiera del Comune di Ravenna, sono molte le aree che possiedono le medesime caratteristiche litologiche in cui poter esclusivamente modificare la destinazione e la gestione dei flussi idrici, allo scopo di generare lenti di acqua dolce permanenti a contrasto dell'intrusione salina.

11 MODELLO AREA MAR

11.1 Introduzione

In questo capitolo viene discusso il modello creato per l'area MAR dal prof. Alexander Vandenbohede nell'ambito della collaborazione tra l'Università di Gent (Belgio) e l'Università di Bologna (Lab. I.G.R.G.). Con il consenso del Prof. Vandenbohede seguiranno una presentazione del modello e i primi risultati ottenuti per la sezione mostrata in Figura 11.1.

Con i dati raccolti nell'ambito di questa tesi di Dottorato è stato messo a punto un modello bidimensionale dell'area di ricarica. Una volta calibrato sui dati di campagna, sono stati svolti alcuni scenari gestionali diversi dall'attuale, per ipotizzare applicazioni della ricarica mediante trincea irrigua con diverse tecniche di gestione.

Il modello utilizzato per i flussi delle acque sotterranee è *MOCDENS3D* (Oude Essink, 1998) e *Visual MOCDENS3D* (Vandenbohede, 2002 e 2007) che sono usati come *pre e post processor*. L'equazione di flusso delle acque sotterranee è risolta dal codice *MODFLOW*, tenendo conto delle differenze di densità utilizzando un termine di galleggiamento sull'equazione di base (McDonald e Harbaugh, 1988). L'equazione *advection-dispersion* è risolta dal metodo Konikow e Bredehoeft, 1978 (Vandenbohede, 2010).

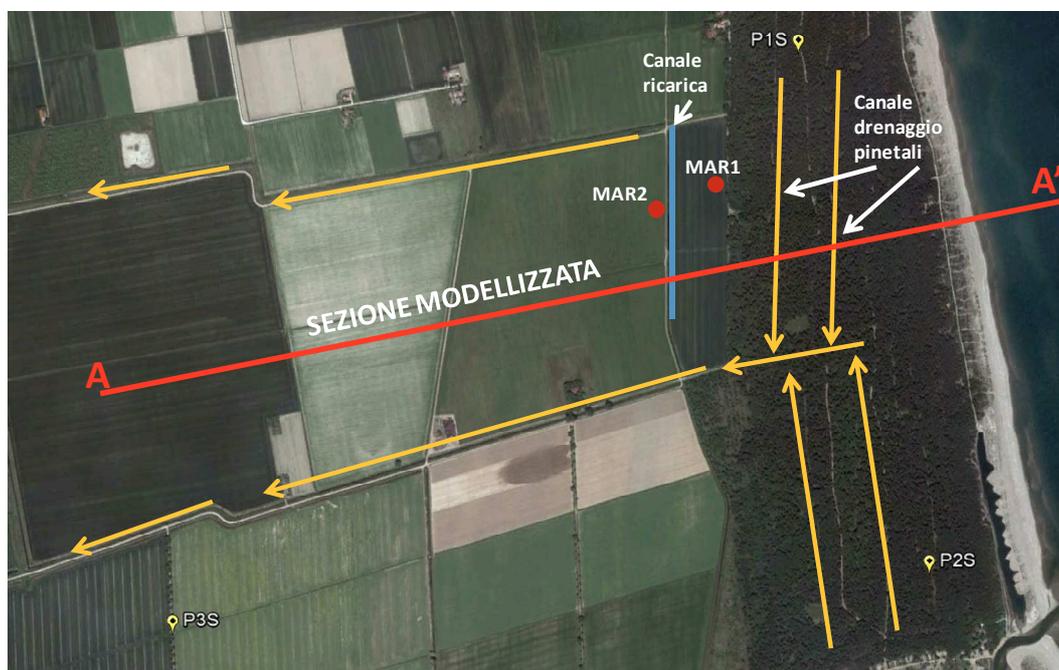


Figura 11.1 Sezione modellizzata dal Prof. A. Vandenbohede (Università di Gent). In dettaglio: in azzurro il canale di ricarica e in arancio i canali di bonifica nell'area MAR.

11.2 Geometria del modello

Il modello costruito è orizzontale e possiede una lunghezza di 3km. Si suddivide in 3 zone (Figura 11.2):

- ✓ area agricola lunga 1950m di cui:
 - 1650m con acquifero freatico con le sabbie che dalla superficie arrivano fino al prodelta (-8m);
 - 150m con depositi fini in superficie che rendono l'acquifero confinato;
 - 150m di area agricola irrigua (la nostra area MAR).
- ✓ Pineta costiera lunga 570m;
- ✓ Spiaggia e mare per 520m di cui:
 - 20m di spiaggia
 - 500m di mare.

Verticalmente il modello inizia alla quota della tavola d'acqua (circa -1m s.l.m.) e termina a -25m s.l.m. dove i sedimenti argillosi, alla base della trasgressione olocenica, isolano inferiormente l'acquifero. In questo spessore sono stati inserite due tipologie di depositi:

- zona 1 depositi sabbiosi con conduttività idraulica orizzontale $K_h = 20$ m/d e verticale $K_v = 6.6$ m/d
- zona 2 depositi di prodelta (alternanze centimetriche di materiali sabbiosi siltosi e argillosi) aventi conduttività idraulica orizzontale pari a $K_h = 0.1$ m/d, e verticale $K_v = 0.01$ m/d (Figura 11.1).

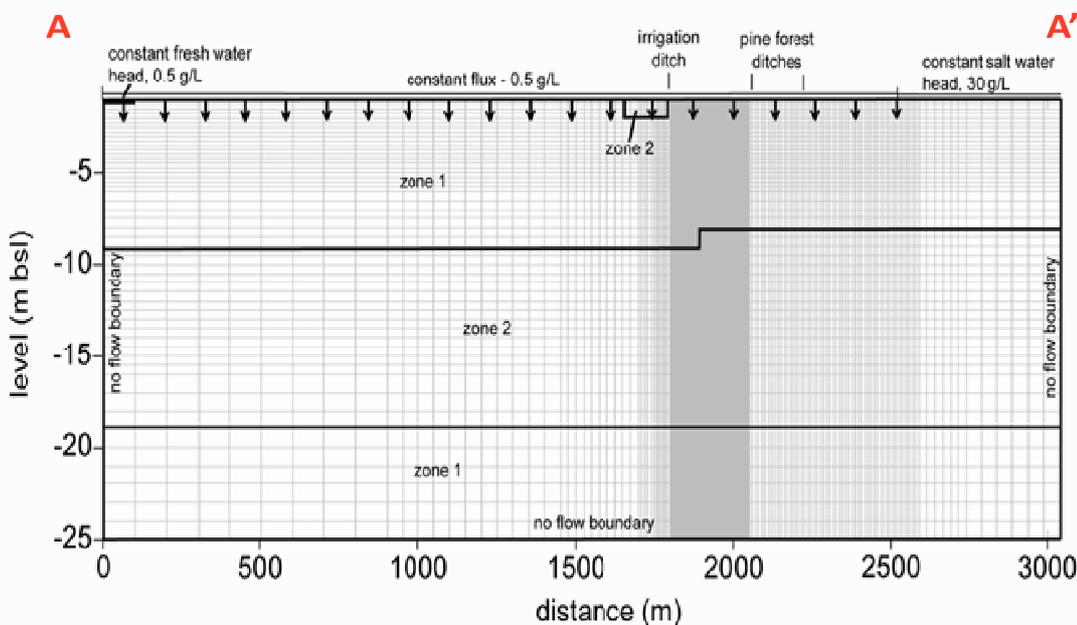


Figura 11.2 Modello concettuale dell'area.

La griglia utilizzata è più fitta in superficie e all'interno dell'area agricola, tra il canale di ricarica e la pineta costiera. Nel modello troviamo:

- 211 colonne: 9 da 100m, 11 da 50m, 10 da 25m, 5 da 10m, 10 da 5m, 100 da 2,5m, 54 da 10m, 6 da 25m e 6 da 50m.

- 49 righe, dall'alto verso il basso: 11 da 0,25m, 20 da 0,5m e 9 da 1m.

Sono stati inseriti nel modello, oltre al canale di ricarica, anche i due canali di drenaggio presenti nella Pineta Costiera Ramazzotti.

Tempi di discretizzazione: sono stati simulati 30 anni con periodi di *stress* di 1 mese. Ogni mese si modificano i carichi idraulici nei canali e la ricarica dell'acquifero. Anche se nel trasporto dei soluti non vi è alcuna differenza tra un modello stazionario o transitorio, per la simulazione in questione è stato scelto quello transitorio. Il coefficiente di immagazzinamento specifico è stato stimato mediante l'approssimazione di Van Der Gun e l'immagazzinamento (acqua gravifica) è stato assunto pari a 0.1.

11.3 Condizioni al contorno

I valori per la condizioni al contorno si basano sulle misure raccolte in campo nell'ambito di questa tesi (Figura 11.3) e per la ricarica sui dati pubblicati da Mollema *et al* (2012) derivanti dal bilancio idrologico del V Bacino.

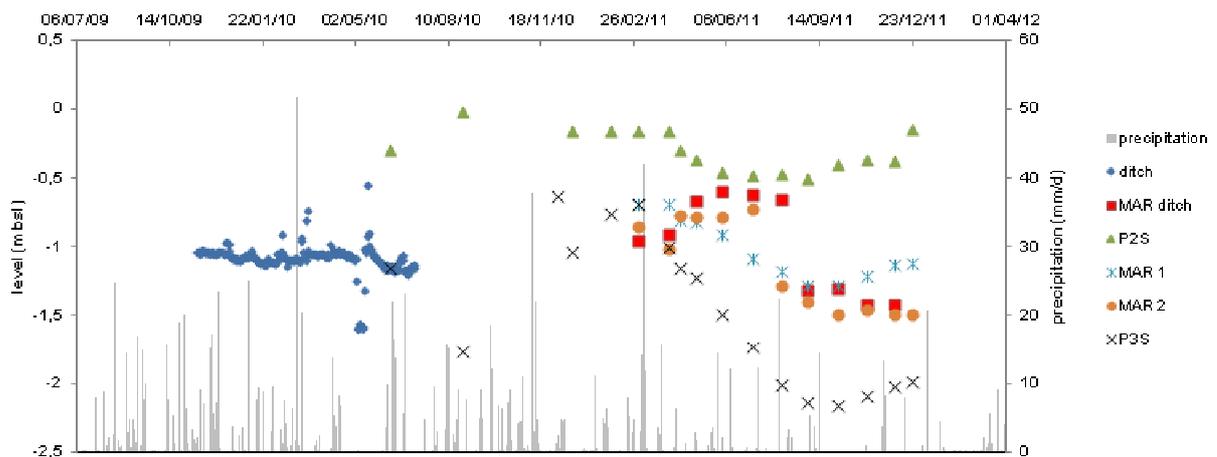


Figura 11.3 Piezometrie osservate nei pozzi presenti nell'area MAR e nei canali adiacenti. In grigio le precipitazioni rilevate nel triennio 2009-2012.

In dettaglio:

- ✓ Confine a flusso costante di ricarica nella zona agricola e in pineta costiera che cambia mensilmente come riportato in Figura 11.4 Non viene fatta alcuna distinzione per la ricarica in funzione dell'orizzonte superficiale presente, in quanto il valore è già di per sé molto basso.
 - 1 mm/anno di ricarica nell'ambito agricolo con una salinità di 0.5 g/l;
 - 10 mm/anno di ricarica in pineta Ramazzotti con una salinità di 0.5 g/l
- ✓ Confine a carico costante, in superficie nel limite occidentale del modello, con un livello medio di -1.3m s.l.m. e con variazioni stagionali di circa 0.15m. Questo valore

proviene dai dati raccolti nel piezometro P3S e serve per regolare la variazioni stagionali della falda nel modello.

- ✓ Confine a carico costante a mare, fissato a 0m s.l.m. con delle variazioni di circa 0.3m legate alle maree. La ricarica con acqua di mare ha una salinità di 30 g/l.
- ✓ I canali in pineta costiera sono inclusi nel modello mediante il *drain-package*. Le quote dell'acqua al loro interno sono rispettivamente -1.25m s.l.m. per il canale vicino alle zone agricole e -1.35m s.l.m. per quello più vicino al mare. Ai canali è stata assegnata una variazione stagionale di 0.1m (come quella registrata nel P2S). I livelli utilizzati derivano da dati di campagna raccolti mediante sonde *Diver* alla confluenza tra i canali pinetali e la rete principale dei canali di drenaggio. La capacità di drenaggio dei canali (*drain conductance*) è stata assunta essere di 100 m²/g.
- ✓ Il canale di drenaggio è modellizzato mediante *riv-package*. Il livello assunto deriva dai monitoraggi mensili eseguiti in zona MAR (paragrafo 10.6) ed è -1.3m s.l.m. da settembre a marzo, mentre diventa -0.6m s.l.m. da aprile ad agosto (Figura 11.3). Il fondo del canale ha una quota di -2m s.l.m. e la *river conductance* è uguale a quella dei canali (100m²/g). la salinità dell'acqua nel canale è assunta essere 0.5 g/l.

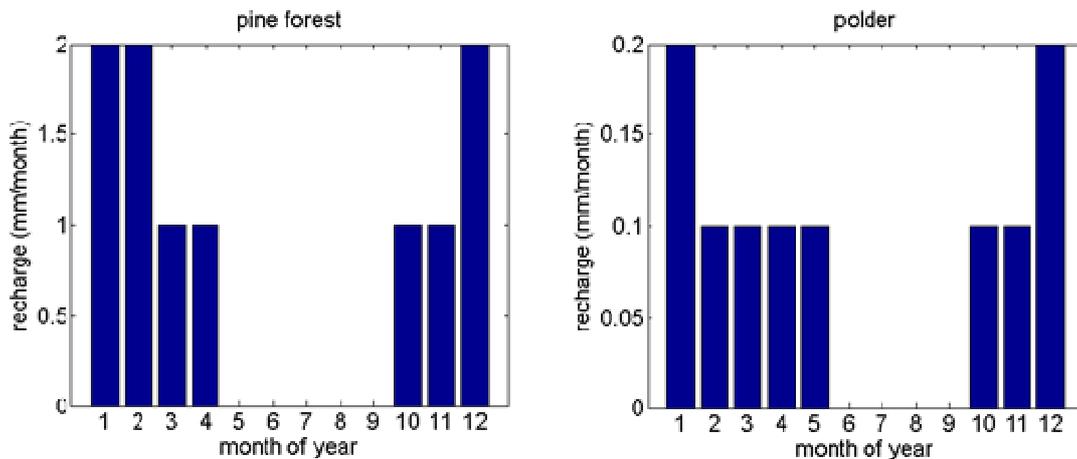


Figura 11.4 Ricarica mensile utilizzata in ambito agricolo e in pineta.

11.4 Condizioni iniziali

Le condizioni iniziali di carico idraulico sono state calcolate dal modello considerando il primo mese come stato stazionario; così facendo i carichi nel dominio del modello sono stati calcolati ed utilizzati come dati iniziali del secondo periodo di *stress* calcolato in modalità transitoria (come poi tutti i seguenti).

Determinare le condizioni iniziali della salinità, non è stata una cosa semplice, come confermato anche da Mollema (2012), le dinamiche idrologiche dell'area non ci permettono di conoscere con esattezza la condizione di partenza per la salinità.

È stato scelto di utilizzare 20g/l di salinità nelle acque presenti in acquifero al di sotto dell'area agricola con un'interfaccia sotto la pineta costiera che va fino ai 30g/l dell'acqua di mare (Figura 11.5).

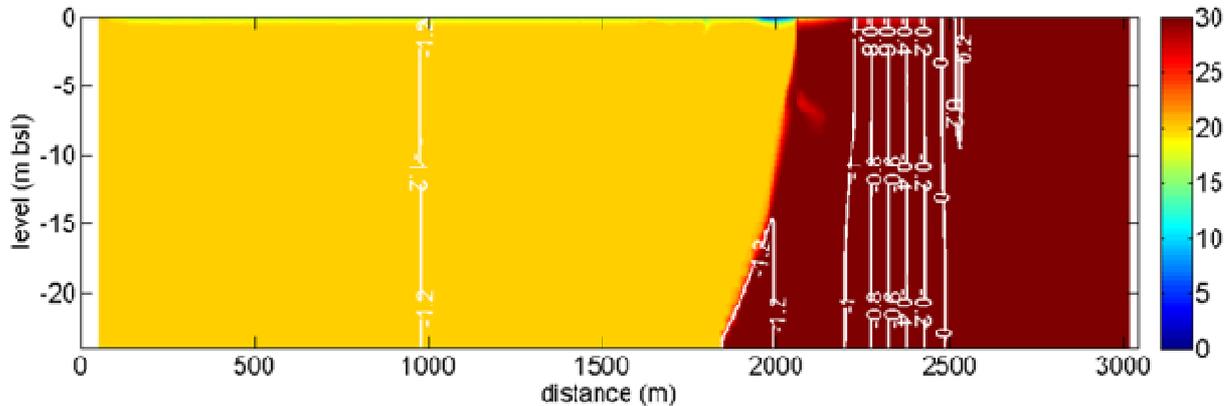


Figura 11.5 Distribuzione iniziale di salinità

11.5 Risultati

La Figura 11.6 mostra l'evoluzione della distribuzione di acqua dolce dopo 5, 10, 20, 30 anni di funzionamento del canale di ricarica. Dai dettagli in Figura 11.6 si evince che la bolla di acqua dolce si estende già ampiamente dopo 5 anni di ricarica nel canale su ambo i lati del bacino stesso e raggiunge, almeno in superficie, la pineta costiera che ancora mostra una sottile lente di acqua dolce al *top* dell'acquifero. Proseguendo con la modellizzazione, si vede come la bolla continui a crescere (pur a fronte di periodi invernali in cui il canale risulta vuoto) e viceversa i canali di drenaggio della vicina pineta tendano a fare scomparire l'acqua dolce sotto la pineta stessa (Figura 11.6). La lente di acqua dolce continua ad estendersi anche verso ovest, guidata dal gradiente presente nell'area. Dopo 30 anni di modellizzazione l'acqua dolce ha occupato tutto l'acquifero freatico al di sopra del prodelta, nella zona sottostante il canale di ricarica.

In Figura 11.7 sono riportati due profili di salinità estrapolati dalla simulazione di 30 anni di attività del canale di ricarica per il mese di marzo (prima dell'inizio del periodo irriguo) e agosto al termine della stagione irrigua. Il profilo di sinistra, relativo ad un pozzo fittizio al di sotto del canale, simula in modo corretto la stagionalità della ricarica; si nota efficacemente che acqua dolce viene individuata nei sedimenti al di sopra del prodelta alla fine di agosto (oltre 6m) e l'interfaccia che si genera risulta molto marcata. Alla fine di marzo, invece, è presente dell'acqua salmastra e l'interfaccia diventa molto più ampia. Nella

stessa Figura 11.7, il profilo di destra, simulato in un pozzo al limite tra la pineta ed i campi coltivati, mostra che non vi sono differenze tra agosto e marzo e l'interfaccia rimane molto stretta durante entrambi i mesi.

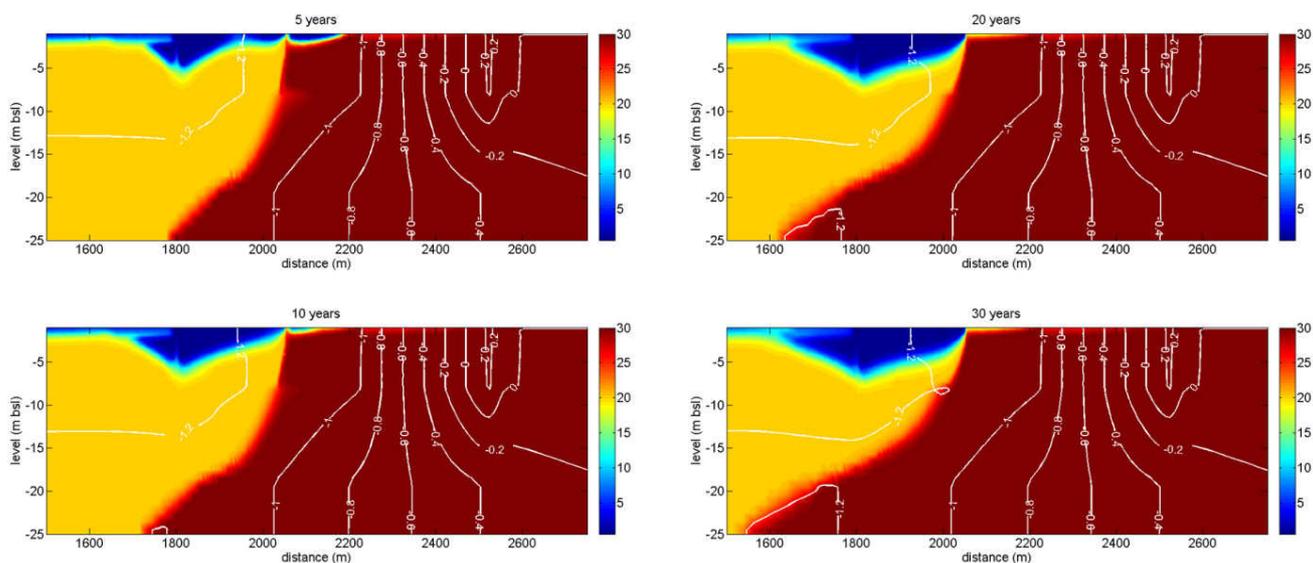


Figura 11.6 Evoluzione della distribuzione di acqua dolce dopo 5, 10, 20 e 30 anni di presenza del canale di stoccaggio.

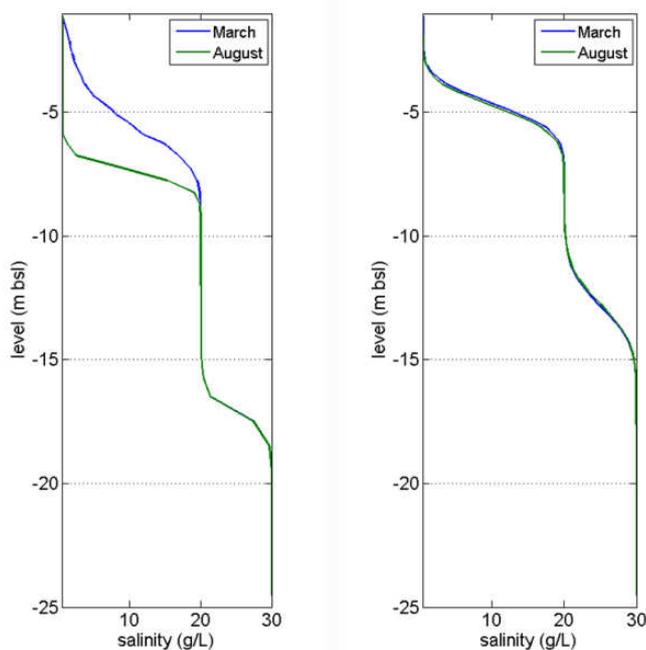


Figura 11.7 Profili di salinità calcolati dal modello al di sotto del canale di ricarica (sinistra) e al confine pineta/ambito agricolo (destra) dopo 30 anni di presenza del canale irriguo.

Possiamo assumere che in Figura 11.7 venga simulato l'andamento della salinità nei pozzi MAR1 e MAR2 ed in tal senso, il confronto con i dati reali (paragrafo 10.6) confermano la comprensione delle dinamiche idrologiche dell'area.

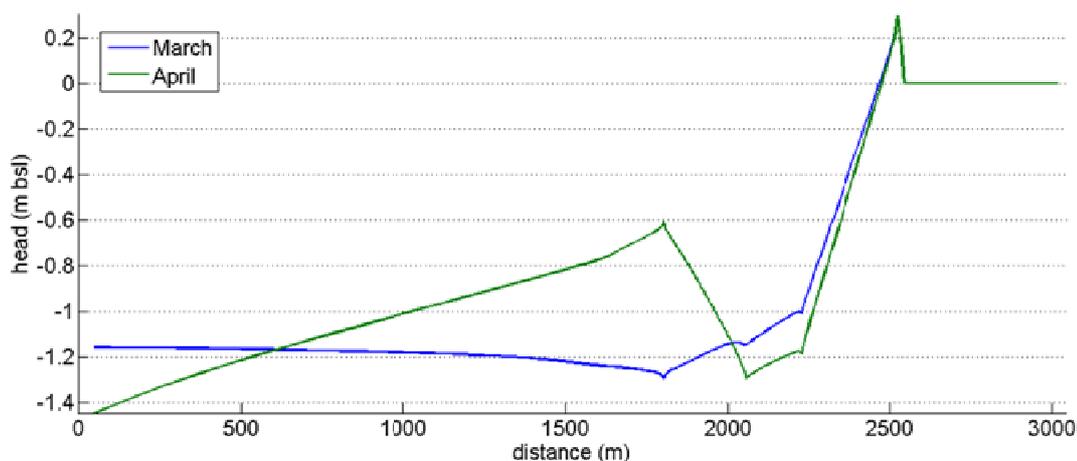


Figura 11.8 Profilo di carico idraulico nell'area modellizzata, estrapolata per i mesi di marzo e agosto.

La Figura 11.8, riporta i carichi idraulici presenti nell'area modellizzata, come nel caso precedente, per il mese di marzo, prima del riempimento del canale e per il mese di agosto, al culmine della stagione irrigua. In questa simulazione si nota come i livelli nei canali non siano sincronizzati; quando con l'avanzare della stagione estiva, i livelli nei canali di drenaggio della pineta scendono, l'acqua nel canale di ricarica raggiunge i livelli massimi, (Figura 11.8, linea verde).

L'opposto accade nel mese di marzo (linea blu in Figura 11.8), quando i livelli nei canali di drenaggio sono superiori rispetto al canale di ricarica.

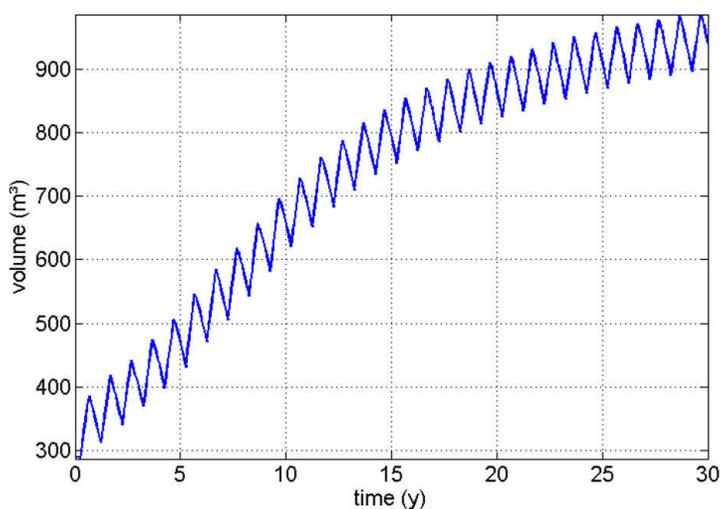


Figura 11.9 Volume della bolla di acqua dolce (m^3 per metro lineare di acquifero perpendicolare alla sezione del modello) presente tra il canale di stoccaggio e il canale più vicino all'interno della pineta costiera.

Al termine di questa fase di modellizzazione si è cercato di quantificare l'acqua dolce presente nell'area MAR. In Figura 11.9 viene riportata l'evoluzione della lente di acqua dolce

nei 30 anni di simulazione, in cui sulle ordinate vengono rappresentati i m³ di acqua dolce presenti per metro lineare di acquifero ortogonale alla sezione del modello. Il volume in grafico si riferisce alla porzione che va dal canale di ricarica verso est. Dal grafico si notano due processi: la perfetta simulazione della stagionalità della ricarica e, che dopo 30 anni di simulazione, non è stato raggiunto l'equilibrio in quanto la curva appare ancora in accrescimento. In ogni caso, dopo 30 anni di simulazione il quantitativo di acqua presente, si aggira attorno ai 900m³ per metro lineare; se moltiplicato per la distanza tra i due canali otteniamo che, solamente per l'area tra il canale di ricarica e la pineta, sono presenti 180.000 m³ di acqua dolce.

11.6 Scenari alternativi per incrementare la bolla di acqua dolce

Allo scopo di comprendere se vi siano tecniche in grado di incrementare la ricarica, sono stati simulati 3 scenari gestionali diversi per l'area del canale di stoccaggio.

Utilizzando il modello discusso fino ad ora, sono stati simulati:

- ✓ caso 1: canale sempre pieno di acqua dolce con livello costante durante tutto l'anno a -0.6m s.l.m.;
- ✓ caso 2: livello costante a -0.9m s.l.m.;
- ✓ caso 3: andamento stagionale identico all'attuale, sia nel canale di stoccaggio sia nel canale di drenaggio, presente in pineta costiera, più vicino all'ambito agricolo.

Dopo la simulazione, in Figura 11.10 sono riportati i risultati per i tre diversi casi presi in considerazione. In entrambi i primi 2 casi si osserva una completa dolcificazione dell'acquifero sopra il prodelta, con la differenza più marcata che si riscontra con una maggiore estensione verso ovest rispetto alla simulazione del sistema attuale. Il limite dell'estensione verso mare della bolla è, in entrambi i primi 2 casi, il canale pinetale più vicino agli ambiti agricoli. Il terzo caso analizzato, invece, si dimostra completamente differente ai precedenti con due canali di infiltrazione vicini, uno in zona agricola e uno in area pinetale. Anche la distribuzione di salinità si mostra completamente differente; la bolla d'acqua dolce si estende tra i due canali di infiltrazione con uno spessore modesto non superiore ai 2m di profondità, mentre in direzione ovest si ha uno sviluppo della lente di acqua dolce modesto ed esclusivamente superficiale.

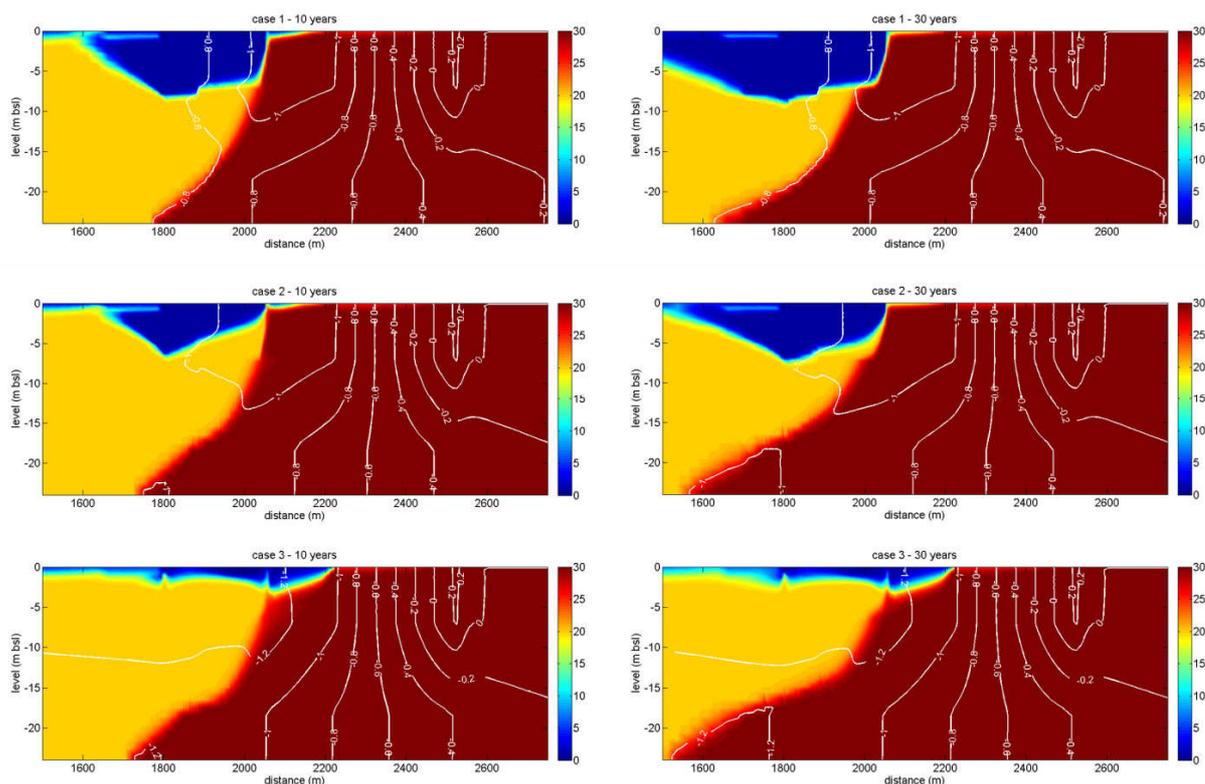


Figura 11.10 Distribuzione delle salinità dopo 10 e 30 anni di simulazione per i tre casi descritti.

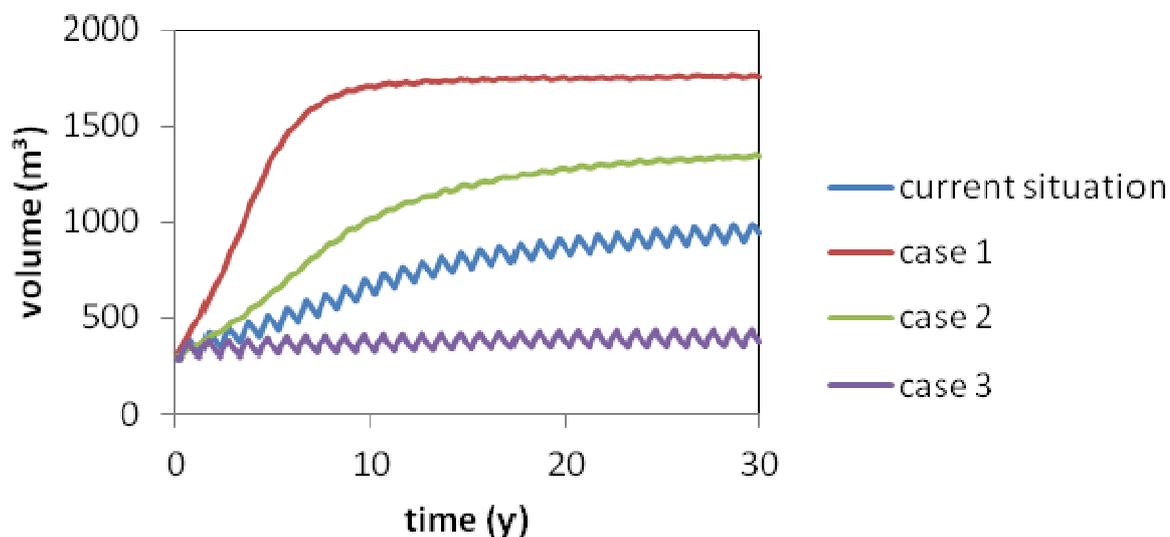


Figura 11.11 Confronto tra i volumi della bolla di acqua dolce (m^3 per metro lineare di acquifero perpendicolare alla sezione del modello) presente tra il canale di stoccaggio e il canale più vicino all'interno della pineta costiera, nei tre casi analizzati.

Se si osservano le evoluzioni dei volumi delle bolle di acqua dolce presenti nei tre casi considerati in Figura 11.11, si evince che il caso 1, il quale prevede la presenza permanente di acqua dolce dentro la trincea di ricarica, porta alla formazione di una bolla di acqua dolce con volumi nettamente superiori agli altri casi. In questa prima situazione si raggiunge il punto di

equilibrio, già dopo 8-9 anni. Il secondo caso simula una media tra la gestione attuale (blu in Figura 11.11) e il caso precedente, in quanto raggiunge l'equilibrio solo dopo 20-25 anni e come volumetria dolce si colloca in una situazione intermedia (colore verde in Figura 11.11), a causa del minore gradiente tra il canale di ricarica e le zone agricole. Il caso 3, come già evidenziato in precedenza, appare il peggiore in quanto origina una bolla di acqua dolce molto modesta; questo perché lo scolo pinetale è a sua volta riempito con acque dolci e non permette la creazione del gradiente tra la trincea di ricarica e la pineta, mostrato in Figura 11.8.

Nelle Figura 11.12, Figura 11.13 e Figura 11.14 sono riportati un bilancio dei flussi da canale ad acquifero (positivo) e da acquifero verso canale (negativo) per tutti e tre i canali considerati nel modello (canale di ricarica e i due canali di drenaggio della pineta Ramazzotti). Osservando i flussi dal canale di ricarica verso le zone agricole circostanti (Figura 11.12, linea blu), emerge una portata di 0.1 m^3 al giorno per metro lineare di acquifero ortogonale alla sezione, come flusso in uscita dal canale di ricarica, per la situazione attuale. In fase invernale, lo stesso canale mostra un drenaggio pari a $0.07 \text{ m}^3/\text{d}$. Negli altri scenari analizzati, i primi due mostrano esclusivamente flussi dal canale all'acquifero garantiti carico idraulico presente nel canale stesso, il terzo, mostra flussi equivalenti da e per il canale, dando origine ad un bilancio pressoché nullo (bolla di acqua dolce molto modesta Figura 11.10).

Il canale di drenaggio occidentale interno alla pineta (Figura 11.13), mostra come, sia nella situazione attuale che nei primi due casi analizzati, esso possieda dei flussi esclusivamente da acquifero verso il canale (valori negativi); nel terzo caso invece, essendo sfruttato come canale di ricarica, in alcuni periodi dell'anno mostra flussi dal canale all'acquifero (valori positivi).

Il canale, interno alla pineta, più vicino alla linea di costa, presenta costantemente flussi da acquifero verso il canale stesso (attività drenante); esso mostra una dinamica stagionale che si accentua nello scenario 3 in cui il l'altro canale svolge funzione di ricarica (Figura 11.14).

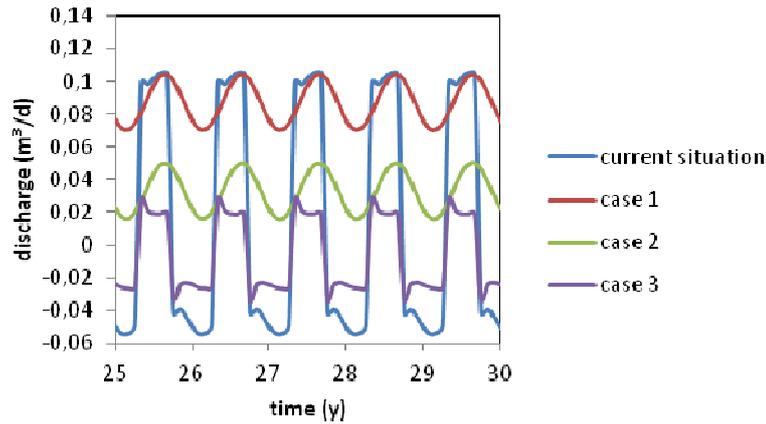


Figura 11.12 Portate in m^3 al giorno dal canale di ricarica alla zona agricola, per metro di acquifero ortogonale alla sezione modellizzata. Valori positivi indicano flussi dal canale all'acquifero, viceversa, valori negativi indicano flussi dall'acquifero al canale (drenaggio).

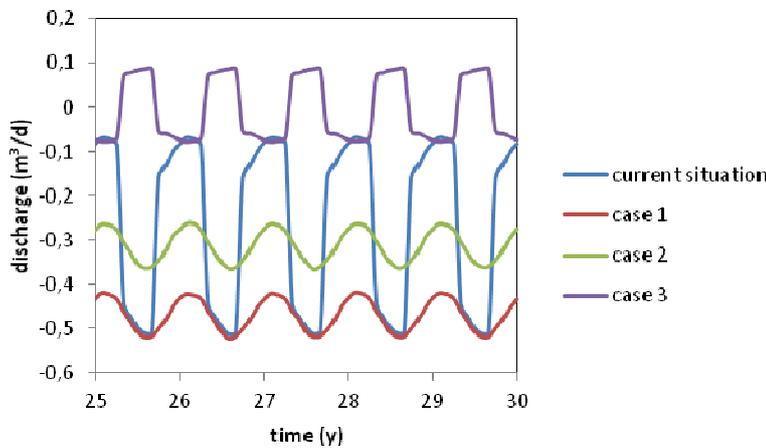


Figura 11.13 Portate in m^3 al giorno dal canale pinetale più occidentale alla pineta, per metro di acquifero ortogonale alla sezione modellizzata. Valori positivi indicano flussi dal canale all'acquifero, viceversa, valori negativi indicano flussi dall'acquifero al canale (drenaggio).

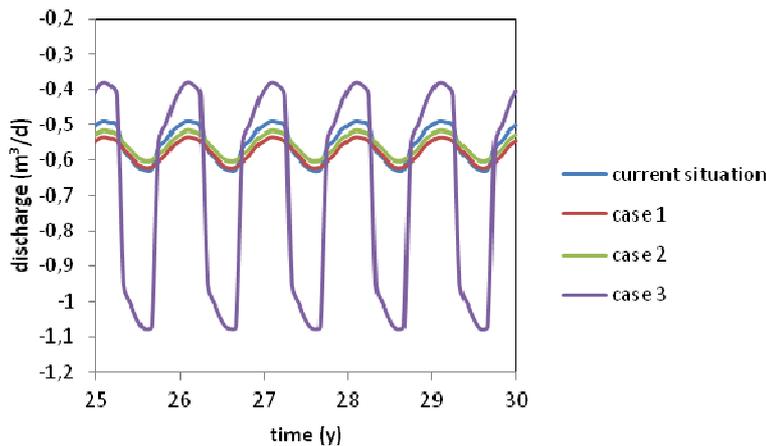


Figura 11.14 Portate in m^3 al giorno dal canale pinetale più orientale alla pineta, per metro di acquifero ortogonale alla sezione modellizzata. Valori positivi indicano flussi dal canale all'acquifero, viceversa, valori negativi indicano flussi dall'acquifero al canale (drenaggio).

11.7 Conclusioni

La realizzazione del modello dell'area MAR eseguita dal Prof. A. Vandenbohede utilizzando i dati raccolti nell'ambito di questo Dottorato di Ricerca ha portato alla luce le dinamiche che governano il sistema di ricarica dell'area.

La modellistica del canale di ricarica simula in modo appropriato le dinamiche stagionali di ricarica dell'acquifero rilevati dal monitoraggio dei parametri fisici e dalle analisi chimiche eseguite nell'area. Dal modello emerge che il forzante che permette la creazione e l'esistenza della lente è il gradiente che si forma tra il canale stesso e la falda sotterranea presente nei dintorni del canale. Se questo gradiente è presente verso ovest a causa dei gradienti della depressione della falda generata dalle idrovore, verso mare, tale gradiente è garantito dai due canali di drenaggio interni alla pineta Ramazzotti. Il drenaggio della pineta, infatti permette la propagazione della bolla verso est. Quest'ultima osservazione viene confermata dall'analisi del caso 3 in cui l'utilizzo del canale di drenaggio per la ricarica non origina la bolla di dimensioni ragguardevoli ottenuta quando il medesimo canale è esclusivamente di drenaggio. A tal proposito, i tre scenari alternativi proposti (paragrafo 11.6) mostrano come un carico idraulico permanente durante tutto l'anno nel canale di ricarica, permetta la creazione di una bolla dolce che interessa tutta la parte superficiale dell'acquifero freatico; tale bolla possiede estensioni ragguardevoli in direzione ovest, mentre si ferma in prossimità del primo canale di drenaggio in direzione est. Tra i due scenari con carico permanente, il caso 1, con carico idraulico maggiore, porta in tempi molto più rapidi ad un equilibrio della bolla di acqua dolce. L'utilizzo di due canali adiacenti di ricarica, con la conseguente diminuzione di drenaggio pinetale, riduce fortemente l'effetto di ricarica diminuendo i gradienti in gioco.

12 CONCLUSIONI GENERALI

Come recentemente riportato dall'IPCC (IPCC, 2007), per i prossimi 100 anni, nell'area studio, sono previste una riduzione della disponibilità di acqua dolce e un aumento dei periodi siccitosi. Un incremento della temperatura con un contemporaneo aumento di evaporazione, richiederebbe un maggior consumo di risorsa idrica, ma in sua assenza, la salinizzazione del suolo e la perdita di produzione agricola sono inevitabili. Nell'area costiera di Ravenna oltre 7000 ettari di terreni agricoli sono a rischio di salinizzazione dei suoli a causa dell'intrusione di acqua salata nella falda acquifera costiera e lungo i principali fiumi e canali aperti a mare (Greggio, 2012).

Nel 2000 la direttiva quadro sulle acque dell'UE (WFD) ha adottato per la prima volta un approccio globale verso rischi cui sono esposte le acque dell'Unione. Il documento ha affermato chiaramente che la gestione delle acque va oltre il semplice concetto di distribuzione e trattamento, richiedendo anche un uso del suolo e una gestione che tengano conto degli aspetti qualitativi e quantitativi delle acque stesse. La direttiva ha inoltre stabilito l'obiettivo di raggiungere, entro il 2015, un buono stato di qualità di tutte le acque, compresi laghi, fiumi, torrenti e falde acquifere (Comunità Europea, 2000).

In questo contesto, gli studi precedenti eseguiti sulle acque sotterranee di Ravenna avevano affrontato il problema dell'intrusione salina limitatamente alle zone naturali (Pinete Storiche) o in ambiti prettamente costieri. Le metodologie di indagine erano strettamente dipendenti da una rete piezometrica obsoleta e non adatta a monitorare l'acquifero nella sua intera profondità. Seppure su aree di modeste dimensioni, quello che emergeva era un quadro di salinizzazione estesa in tutto l'acquifero sottostante le aree naturali e costiere, in cui solamente la stagionalità poteva permettere la formazione di bolle di acqua dolce di spessori modeste al di sotto delle zone di acquifero freatico (Giambastiani, 2007a e 2007b; Kralj, 2011; Marconi, 2008 e 2011; Antonellini, 2008 e 2010b; Mollema 2012a e 2012b). In questo progetto di dottorato si è cercato inizialmente di inquadrare il problema della salinizzazione da un punto di vista complessivo di acquifero e una volta valutata la situazione globale, di cercare una metodologia in grado di limitare e contrastare questa problematica. A tale scopo il transetto di dettaglio e l'area MAR hanno permesso di evidenziare che, nel quadro complessivo della gestione idrica, un semplice bacino di stoccaggio è in grado di limitare la problematica e di incrementare la ricarica dell'acquifero (Greggio, 2012).

La storia geologica dell'area che ha portato alla formazione dell'acquifero e le recenti vicende evolutive della porzione costiera, mostrano come il territorio in questione sia "giovane" e per tale motivo suscettibile di cambiamenti come la subsidenza naturale dei sedimenti che causa un abbassamento generale dell'area, alla quale si aggiunge quella antropica, dovuta

all'estrazione di gas naturale e allo sfruttamento degli acquiferi artesiani (Amorosi, 2002). Principalmente per ottenere nuovi terreni coltivabili e poi anche per fare fronte a questi abbassamenti del terreno, tutta l'area risulta drenata meccanicamente da una fitta rete di canali che porta acqua alle idrovore. La peculiarità di questo sistema è che gli impianti di sollevamento sono in maggior parte localizzati ad alcuni chilometri dalla linea di costa, generando di conseguenza, un cono di depressione centrato nell'idrovora con flussi dominanti da mare verso terra (capitolo 3). Come già riportato in altri lavori eseguiti nella stessa zona, l'effetto del drenaggio superficiale riduce la ricarica dell'acquifero e richiama acque salate dalle porzioni profonde dell'acquifero stesso (Marconi, 2011; Antonellini, 2008; Giambastiani, 2009; Mollema 2012a). Risulta allo stesso tempo evidente come il drenaggio sia irrinunciabile per garantire lo sfruttamento agricolo di queste aree con una topografia assente.

La rete piezometrica, disomogenea e obsoleta, è stata incrementata piezometri interamente fenestrati, completamente penetranti l'acquifero e senza *gravel pack* per evitare di flussi preferenziali durante le fasi di campionamento (capitolo 4)

I dati litologici raccolti in campo durante la messa in opera dei piezometri, hanno confermato e integrato le conoscenze riguardanti l'acquifero. Esso è formato da depositi sabbiosi grossolani di origine marina, la sua estensione è di 3-4 km nelle porzione meridionale, ed aumenta salendo verso la base del bacino padano. Al suo interno, presenta una discontinuità rappresentata dai depositi di pro-delta che presentano una permeabilità minore rispetto alle sabbie (Amorosi, 1999) e dividono l'acquifero in due parti dal punto di vista idraulico nei primi km dal mare. La parte più superficiale freatica, la parte più profonda risulta essere semi-confinata dai depositi di pro-delta. Nella porzione meridionale vi è la graduale scomparsa dei depositi di pro-delta e le sabbie di cordone litorale si presentano senza interruzioni raggiungendo spessori di oltre 20m (capitolo 6). Non tutto l'acquifero è freatico, ma depositi argillosi continentali legati alle bonifiche recenti possono confinare l'acquifero superficialmente.

Data l'importanza della fase di monitoraggio e di campionamento delle acque sotterranee, si è cercato di realizzare una serie di procedure che appaiono le più indicate per il contesti in studio e le tipologie di piezometri installati (*multilevel sampling*).

Il monitoraggio della soggiacenza della falda a scala complessiva di acquifero evidenzia come nell'area costiera del comune di Ravenna la falda freatica si trovi ampiamente al di sotto del livello del mare e sia fortemente dipendente dalla stagionalità. Il confronto tra 2010 e 2011 evidenzia un'estesa diminuzione del livello freatico, che si ripercuote sulla disponibilità idrica della vegetazione, sui gradienti dell'area e sulle temperature dell'acquifero stesso (aumento della zona vadosa).

Proprio il transetto di approfondimento costruito all'interno del V bacino, mostra un gradiente costante da mare verso l'idrovora durante tutti i 18 mesi di monitoraggio; la soggiacenza massima si raggiunge nei periodi estivi, quando però si registra per alcuni pozzi

(MAR e EMS1) una risalita della falda freatica, dovuta alla vicinanza di canali irrigui che mantengono o addirittura incrementano le portate nel periodo estivo (paragrafo 8.2.2).

Le mappe di salinità a scala generale rivelano come vi sia un'estesa salinizzazione in atto nell'acquifero freatico. Già 6 metri sotto la falda, le aree che presentano acque definibili "dolci" si limitano alle vicinanze dei Fiumi Uniti e del Fiume Savio e nella fascia delle cave. In superficie la situazione migliora leggermente, infatti lenti di acqua dolce si ritrovano al di sotto delle pinete storiche dentro alle paleodune. Al di sotto del Fiume Savio, dei Fiumi Uniti e del torrente Bevano, sono presenti acque con salinità inferiori a 3g/l.

Il transetto interno al V Bacino risulta estremamente salinizzato, in tutti i pozzi fino al P5S, la salinità è superiore ai 5g/l a tutte le profondità e in tutte le stagioni. In questi pozzi è presente solamente una piccola lente di acqua meno salata in superficie al termine della fase invernale, che scompare rapidamente con l'inizio della primavera. Anche le analisi chimiche ci disegnano un acquifero compromesso a causa del sale; oltre l'80% dei 229 campioni raccolti possiede una composizione dominante cloruro-sodica (Mollema et al 2012b).

Le acque con *hydrofacies* salina si riscontrano in un vasto numero di pozzi, principalmente quelli situati nelle paleodune, nelle dune costiere e nei campi agricoli. Le acque a composizione calcica si riscontrano nelle acque dei fiumi e dei canali di bonifica e confermano l'effetto del drenaggio superficiale. Tale tipologia è presente anche nelle cave e in alcuni pozzi in cui l'acquifero superficiale risulta freatico (paleodune e dune costiere) In funzione di questa classificazione dei tipi d'acqua e dell'evoluzione storica recente dell'area costiera di Ravenna, Mollema (2012) individua 6 differenti idrosomi (*hydrosomes*): acque appartenenti alla trasgressione olocenica, acque originarie del fiume Po, acque fluviali appenniniche, acque presenti nelle dune costiere e nelle paleodune e acque presenti nelle attuali lagune e in mare (Mollema 2012b) (paragrafo 8.5.1).

Tra le reazioni che si innescano in un acquifero con bassi gradienti idraulici e ricarica quasi assente, il consumo di solfati nelle reazioni di ossidazione di sostanza organica è quella rinvenuta maggiormente (Appelo and Postma, 2005). Un'altra reazione che si verifica in acquifero è la precipitazione di pirite; in condizioni fortemente alcaline, infatti, il ferro ferroso si lega con i solfati formando FeS_2 che causa ulteriore allontanamento di solfati dalle acque (Dellwig et al., 2001). All'interno del transetto, le reazioni sopra descritte si manifestano con entità minore rispetto a pozzi in Pineta a San Vitale, ma come nel caso dei piezometri P1S e P3S, giustificano alcuni andamenti.

L'indice BEX, ampiamente negativo, mostra come la salinizzazione sia un processo dominante in acquifero. Processi di dolcificazione sono in atto solo nei punti più superficiali dei pozzi al termine della stagione invernale, in corrispondenza delle porzioni freatiche dell'acquifero.

Le temperature degli orizzonti più superficiali dell'acquifero risentono marcatamente delle variazioni stagionali. Il divario tra estate e inverno appare però più accentuato dove vi sono scambi tra acquifero e acque superficiali, quali fiumi e canali. Secondariamente, anche il drenaggio, contribuisce ad alcune anomalie termiche. Ricarica e drenaggio, originano la distinzione tra i piezometri con profilo di temperatura che seguono l'andamento teorico previsto dalla legge di Fourier e quelli con profilo anomalo. Così come i profili, anche le profondità di stabilizzazione termica risentono degli effetti di drenaggio e ricarica, imputabili alla vicinanza del piezometro a corsi d'acqua. L'entità delle precipitazioni dell'area di studio sembrano essere meno influenti sul profilo di temperatura rispetto agli effetti del drenaggio meccanico dell'acquifero.

Le temperature di stabilizzazione si dispongono geograficamente in maniera coerente, in quanto, la duna costiera possiede temperature tra i 13,5 °C e i 14,3 °C. La paleo-duna, invece, registra i valori più bassi in assoluto, con una media complessiva di 13,3 °C. Infine, i restanti piezometri si assestano a temperature leggermente superiori ai 14 °C in linea con le medie atmosferiche di temperatura. Il mare adriatico, oltre ad avere per la zona costiera il carico idraulico dominante, risulta anche un serbatoio di calore per l'acquifero (Antonellini, 2012) (capitolo 9).

Dall'analisi fatta, possiamo concludere che a vasta scala l'acquifero è fortemente salinizzato. Vi è una forte stagionalità nelle dinamiche delle acque sotterranee e che la maggiore influenza si trova in corrispondenza delle porzioni di acquifero freatico. È evidente come il sistema superficiale sia legato direttamente agli andamenti climatici locali, ma già pochi metri sotto la tavola d'acqua il sistema sia statico e dia origine a reazioni acqua-sedimento. Le sottili e modeste lenti di acqua dolce presenti al di sotto delle pinete storiche sono effimere e a tale scala scompaiono rapidamente con l'arrivo della stagione primaverile.

L'obiettivo della tesi di individuare ed analizzare una tecnica idrico/agronomica in grado di limitare questo esteso fenomeno è stato raggiunto grazie alle indagini svolte sull'area MAR. I dati raccolti nell'area adiacente il canale di stoccaggio testimoniano l'anomala presenza permanente di una lente di acqua dolce, con spessori di oltre 4m, a soli 500m dal mare Adriatico. In questa porzione di territorio priva di topografia positiva, sottoposta a forte drenaggio e completamente antropica, questa completa dolcificazione della porzione superficiale dell'acquifero rappresenta un'anomalia.

Se inizialmente, l'effetto dell'irrigazione sembrava essere la spiegazione naturale per la formazione della lente, le rotazioni agronomiche adottate dalla Cooperativa Agricola di Campiano sull'area MAR hanno confutato questa ipotesi. La misura degli apporti irrigui sull'area hanno mostrato come il contributo dalla superficie verso la falda sia nullo anche durante i periodi di maggiore apporto irriguo. Contemporaneamente durante i mesi estivi, la

bolla di acqua dolce aumenta la sua estensione. L'evoluzione delle sezioni di salinità le indagini VES e delle *hydrofacies* confermano questa presenza e la sua dinamica stagionale. In quanto nei piezometri MAR si rinviene acqua dolce avente composizione carbonato-calcica, del tutto comparabile a quella riscontrata nei fiumi e nel CER (Greggio, 2012).

Appare a questo punto importante, nel trovare una spiegazione alla presenza ed evoluzione della bolla di acqua dolce sotto il canale, il modesto gradiente che si genera tra il canale stesso e la falda circostante, nel periodo estivo. Questo gradiente, dell'ordine di poche decine di centimetri, misurato sia durante i monitoraggi della soggiacenza della falda sia mediante le trivellate per le VES, sembra essere la causa dominante per la formazione della lente di acqua dolce presente nell'area MAR (Greggio, 2012). Il modello creato utilizzando tutti i dati raccolti nel corso di questo Dottorato di Ricerca, nell'ambito della collaborazione con il Prof. Vandenbohede (Università di Gent), convalida e dimostra questa teoria e ci fornisce anche un ventaglio di possibili metodi che possono incrementare questa ricarica (capitolo 11).

Possiamo concludere che questo carico idraulico presente nel bacino di stoccaggio nel periodo estivo, esattamente in concomitanza con la fase di massima depressione della falda freatica, garantisce un gradiente dal canale verso l'acquifero adiacente, che genera un flusso in grado di estendere la lente di acqua dolce.

In molti paesi si cerca da anni di favorire la ricarica degli acquiferi allo scopo di ridurre la salinizzazione e la subsidenza e di stoccare le risorse idriche in forte e rapido declino. Esempi di metodologie disponibili possono essere: iniezione in pozzo (ASR e ASTR), infiltrazione in duna o in argine laterale, (*bank infiltration*), bacini di infiltrazione e raccolta-infiltrazione della acque di pioggia (Böhlke, 2002; Gale, 2000).

Tutte le tecniche di cui sopra hanno un costo che a volte può non essere sostenibile per l'economia locale. In paesi come l'India, la Cina e Pakistan la ricarica artificiale mediante canali è fondamentale per la coltivazione del riso e causa notevoli infiltrazioni nelle acque sotterranee, di solito lontano dalla costa (Gale, 2000; Meijer, 2000 e 2006 Liqiang, 2012). Questi canali di stoccaggio, d'altra parte, possono anche svolgere un ruolo ecologico: alcuni autori riportano che queste trincee sostengono la biodiversità e i servizi ecologici connessi (Bradbury, 2006) e sono in grado di garantire la rimozione di sostanze chimiche, ridurre l'erosione del suolo nonché garantire gli habitat di sviluppo di stadi iniziali della vita di pesci, anfibi e rettili (Herzon, 2008). Un altro aspetto da considerare è il basso costo per la loro costruzione e gestione (taglio e rimozione della vegetazione in eccesso e risagomatura per garantire i volumi) (Herzon, 2008).

Negli ultimi anni vi è una tendenza a sviluppare pratiche irrigue sempre più efficienti spreco meno risorse idriche per percolazione o evaporazione e in quest'ottica le acque immagazzinate in canali di irrigazione rischiano di essere considerate perdite (Gale I., 2000). Una delle sfide principali che attendono i gestori delle aree costiere assimilabili a quelle in studio è quella di definire gli usi prioritari della risorsa idrica, ma questi sono strettamente

dipendenti del contesto dell'area. Se in aree interne la percolazione di acque da canali non produce effetti di contrasto alla salinizzazione (ma in ogni caso garantirebbe alle falde ipodermiche una ricarica specie dopo anni siccitosi come quelli appena trascorsi) in ambiti costieri si può pensare di gestire in modo diverso la fitta rete di canali di drenaggio tutt'ora presente. Come avviene nell'area MAR, si garantirebbe un approvvigionamento idrico alle aziende agricole costiere e allo stesso tempo si permette una ricarica a costi bassissimi dell'acquifero.

Se la topografia e il forte drenaggio a cui è sottoposta l'area risultano fattori sfavorevoli per questa tecnica. Uno dei grossi vantaggi di questa metodologia, invece, sono i bassissimi costi di messa in opera e di gestione di questi bacini di stoccaggio. A tale proposito, nella porzione costiera del Comune di Ravenna, sono molte le aree che possiedono le medesime caratteristiche litologiche in cui poter esclusivamente modificare la destinazione e la gestione dei flussi idrici, allo scopo di generare lenti di acqua dolce permanenti a contrasto dell'intrusione salina. In Figura 12.1 è riportata la distribuzione dei canali principali e la profondità del tetto delle sabbie, relativa alla zona meridionale del Comune di Ravenna. Si evince rapidamente come vi sia una potenzialità enorme di aree in cui attuare questa gestione diversificata dei canali.

Coscienti che ci sono molti fattori che intervengono su tali decisioni gestionali come la fornitura idrica, le scelte agronomiche, i fattori economici e che la lunghezza dello studio è stata breve e meriterebbe ulteriori approfondimenti, questa metodologia appare una buona tecnica di contrasto alla salinizzazione dei suoli e alla ricarica dell'acquifero.

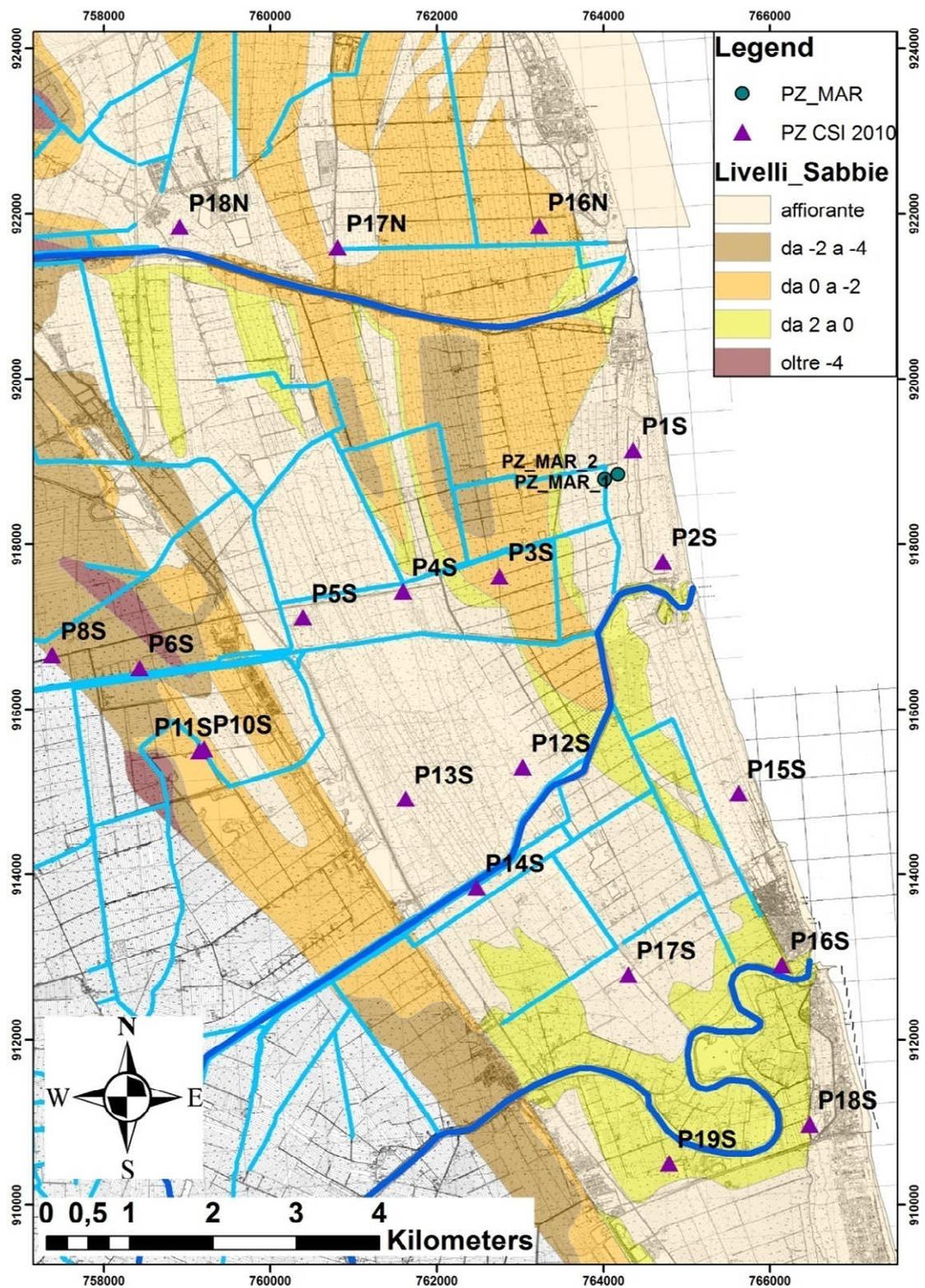


Figura 12.1 Mappa dei principali canali di drenaggio. La scala cromatica rappresenta la profondità del tetto delle sabbie che compongono l'acquifero.

12.1 Recenti evoluzioni delle strategie comunitarie e regionali per la gestione idrica.

A chiusura di questo lavoro mi preme mostrare come la gestione della risorsa idrica stia diventando una materia concreta che cerca di coinvolgere il mondo agricolo dando delle opportunità importanti a coloro che realmente gestiscono il territorio.

La Commissione europea ha recentemente presentato un Piano di salvaguardia per le risorse idriche (Bruxelles, 15 novembre 2012) che, mantenendo inalterati i principi riportati sulla WFD, si pone l'obiettivo strategico di garantire che la disponibilità di acqua di buona qualità sia sufficiente a soddisfare le esigenze dei cittadini, dell'economia e dell'ambiente (http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-1216_it.htm). In questo campo il settore agricolo gioca un ruolo determinante. Infatti oltre il 90% dei piani di gestione dei bacini idrografici sottoposti a valutazione preventiva evidenzia che da un lato, l'agricoltura rappresenta un elemento di pressione significativa, dando origine a inquinamento e impattando inevitabilmente sull'idromorfologia del territorio. Dall'altro lato gli stessi agricoltori, coscienti del ruolo di gestori finali e reali della risorsa, evidenziano una forte partecipazione al processo previsto dalla direttiva quadro sulle acque. Le proposte della Commissione per la riforma della PAC (Politica Agricola Comunitaria: http://europa.eu/pol/agr/index_it.htm) riportano una serie di elementi in grado di migliorare considerevolmente l'interazione tra agricoltura e politica delle risorse idriche mediante i Piani di Sviluppo Rurali (PSR) Il principale cardine di queste proposte è l'aumento delle misure di ritenzione naturale delle acque, come il ripristino di zone umide e pianure alluvionali. Ne consegue che questo progetto di ricerca ha dimostrato come le scelte agronomiche degli agricoltori possono, a loro insaputa, determinare notevoli benefici per l'ambiente e per la risorsa idrica in particolare.

13 RINGRAZIAMENTI

I ringraziamenti vanno, *in primis*, ai Professori Gabbianelli e Antonellini, per l'opportunità concessami e per i preziosi consigli che mi sono serviti per indirizzare il mio lavoro. Grazie a loro, mi sono sentito immediatamente parte del un gruppo e la loro fiducia ha agevolato enormemente questa esperienza.

Un ringraziamento va anche ad Eni ed al Comune di Ravenna, per lo stanziamento dei fondi indispensabili per realizzare queste ricerche.

Ringrazio tutti i colleghi, che in questi anni sono diventati soprattutto amici, che mi hanno aiutato nelle giornate trascorse in campagna per la raccolta dati, e hanno allietato le ore passate insieme in laboratorio.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia per il sostegno morale e materiale e agli amici che riempiono le mia giornate.

Per concludere, a Francesca va il mio più grande ringraziamento per questi anni indimenticabili e la promessa di passare tutto il resto della vita insieme.

14 BIBLIOGRAFIA

- ADEPELUMI A.A., AKO B. D., AJAYI T. R., AFOLABI O., OMOTOSO E. J., 2009 *Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria*; Environ Geol 56:927–933 DOI 10.1007/s00254-008-1194-3
- AGRICOLTURA N°12 dicembre 2012. Mensile della Regione Emilia Romagna Pagg 18 e 26-27.
- AMOROSI A, CENTINEO MC, COLALONGO ML, FIORINI F. 2005. *Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po plain, Italy*. Marine geology 222-223 : 7-18.
- AMOROSI A, COLALONGO ML, FIORINI F, FUSCO F, PASINI G, VAIANI SC, SARTI G. 2004. *Palaeogeographic and palaeoclimatic evolution of the Po Plain from 150-ky core records: Global and planetary change* 40 : 55-78.
- AMOROSI A, COLALONGO ML, PASINI G, PRETI D. 1999. *Sedimentary response to late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (Northern Italy)*: Sedimentology 46 : 99–121.
- AMOROSI A, MILLI S. (2001). *Late Quaternary depositional architecture of Po and Tevere river deltas (Italy) and worldwide comparison with coeval deltaic successions*: Sedimentary geology 144 : 357-375
- AMOROSI A., ASIOLI A., BONDESAN M., CIBIN U., COLALONGO M. L., CORREGGIARI A., PASINI G., PRETI D., ROVERI M., SARTI G., SEVERI P., STEFANI M., TRINCARDI F., VAIANI S. C., VINCENZI S., 2002. *Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quaternaria dell'Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola*. Le pianure: conoscenza e salvaguardia. Il contributo delle Scienze della Terra, Ferrara.
- AMOROSI A., COLALONGO M.L., FUSCO F., PASINI G., FIORINIA F., 1999. *Glacio-eustatic control of continental–shallow marine cyclicity from late quaternary deposits of the southeastern Po Plain, Northern Italy*. Quaternary Research, Vol. 52, Issue 1, pp. 1-13.
- AMOROSI, A., COLALONGO, M.L., PASINI, G., PRETI, D., 1999. *Sedimentary response to late quaternary sea-level changes in the Romagna Coastal Plain (Northern Italy)*. Sedimentology 46, 99–121.
- ANDERSON WP JR, EVANS DG, SNYDER SW. 2000. *The effects of Holocene barrier-island evolution on water-table elevation: Hatteras Island North Carolina, USA*: Hydrogeology journal 8 : 390-404
- ANTONELLINI M, MOLLENA P, GIAMBASTINI B, BISHOP K, CARUSO L, MINCHIO A, PELLEGRINI L, SABIA M, ULAZZI E, GABBIANELLI G. 2008. *Salt water intrusion in the coastal aquifer of southern Po Plain, Italy*: Hydrogeology journal 16 : 1541–1556, DOI 10.1007/s10040-008-0319-9
- ANTONELLINI M., BALUGANI E., GABBIANELLI G., LAGHI M., MARCONI V., AND MOLLEMA P. 2010b. *Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola*. Studi costieri, 17, 83-104.
- ANTONELLINI M., PANDOLFINI M., GREGGIO N., MOLLEMA P. N. 2012 *Geothermal characterization of the coastal aquifer near Ravenna (Italy)*. Caratterizzazione geotermica dell'acquifero costiero di Ravenna. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater. Pagg 41-53 DOI 10.7343/AS-012-12-00XX
- ANTONELLINI, M. AND MOLLEMA, P., 2010. *Impact Of Groundwater Salinity On Vegetation Species Richness In The Coastal Pine Forests And Wetlands Of Ravenna, Italy*. Ecological Engineering. 236 (9), 1201-1211, Doi:10.1016/J.Ecoleng.9.12.007
- APPELO C. A. J, & GREINAERT W. 1991 *Processes accompanying the intrusion of salt water*. In: Breuck WD (ed) Hydrogeology of salt water intrusion --- a selection of SWIM papers. Heise, Hannover, 291–303
- APPELO C. A. J. & POSTMA D. L. 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. Rotterdam. Balkema. 649 p.
- APPELO, C. A. J. 1994. *Cation and proton exchange, pH variations, and carbonate reactions in a freshening aquifer*. Water Resources Research, 30(10), 2793–2805.
- BALUGANI E, ANTONELLINI M., 2010 *Measuring Salinity within Shallow Piezometers: Comparison of Two Field Methods*. Journal of Water Resource and Protection (JWARP). Scientific Research Publishing, Inc..
- BARROCU G 2003 *Seawater intrusion in the coastal aquifers of Italy*. In: Calaferra J (ed) State of seawater intrusion in coastal aquifers of the Mediterranean Coast. SWIM-SWICA, Alicante, Spain
- BARROCU G, MUSCAS L, SCIABICA MG. 2001 *GIS and modeling for studying saltwater intrusion in the Capoterra Alluvial plain (Sardinia, Italy)*. Proc. SWICA-M3, Essaouira, Morocco, April 2001

- BEAR J., CHENG A.H.-D., SOREK S., OUAZAR D., HERRERA I., 1999. *Theory and applications of transport in porous media – Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, 625 pp.
- BELSLEY DA, 1990. *Conditioning diagnostics: collinearity and weak data in regression*. Wiley, New York.
- BERTONI W., BRIGHENTI G., GAMBOLATI G., GATTO P., RICCIERI G., VUILLERMIN E., 1988, *Risultati degli Studi e delle Ricerche sulla Subsidenza di Ravenna*. Comune di Ravenna.
- BÖHLKE JK 2002 *Groundwater Recharge And Agricultural Contamination*. Hydrogeology Journal 10:153–179 Doi 10.1007/S10040-001-0183-3
- BONDESAN M, CASTIGLIONI GB, ELMI C, GABBIANELLI G, MAROCCO R, PIRAZZOLI PA, TOMASIN A. 1995b. *Coastal areas at risk from storm surges and sea level rise in north-eastern Italy*: Journal of Coastal Research 11 : 1354–1379.
- BONDESAN M., FAVERO V., VIÑALS M. J., 1995a. *New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene*. Quaternary International Vol 29/30, 105-110.
- BOUYOCOS, G., 1915, *Effects of temperature on some of the most important physical process in soils*: Mich. Coll. Ag. Tech. Bull. 24, 63 p
- BRADBURY R.B., KIRBY W.B., 2006 *Farmland Birds And Resource Protection In The Uk: Cross-Cutting Solutions For Multi-Functional Farming?* Biological Conservation, 129, Pp. 530–542
- BULTER D. K. 2005 *Near-surface Geophysics*, (SEG Investigations in geophysics series ; n°13), Library of congress ; pag. 46
- BURGER D. C., AND BURGER H. R., 1992a *Macintosh Computer Programs to accompany Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*. Prentice-Hall, 9 Macintosh computer programs and 48 spreadsheet templates.
- BURGER H. R. 1992, *Exploration geophysics of the shallow subsurface*. Prentice Hall pagg. 291-295
- BURROUGH, P.A. & R.A. MCDONNELL (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- CALASTRI A., CERVI O., SPAGNESI M., STINCHI E., 1976. *Contributo alla conoscenza dell'Oasi faunistica di Punta Alberete (RA)*. Scritti in memoria di Augusto Toschi, suppl. Ric. Biol. Selvaggina, VII, pp. 121-153.
- CAPACCIONI B, DIDERO M, PALETTA C, DIDERO L. 2005 *Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, southern Italy)*: dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwater. J Hydrol 307:1–16
- CAPO D. 2011 *Caratterizzazione della falda freatica costiera ravennate*. Tesi di Dottorato in Conservazione delle risorse naturali.
- CARBOGNIN L. E TOSI L. 2003 *Il progetto ises per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di Padova e Venezia*; Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Consiglio Nazionale delle Ricerche Venezia; ISES 2003 pagg. 32
- CARBOGNIN L., GATTO P., MOZZI G., 1984. *Case history no. 9.15: Ravenna, Italy*. In: Poland JF (ed) *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO, Paris, 291-305.
- CARMINATI E., MARTINELLI G., 2002. *Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation*. Engineering Geology n.66, 241 – 255.
- CAU P, LECCA G, MUSCAS, BARROCU G, URAS G 2002 *Saltwater intrusion in the plain of Oristano (Sardinia)*, 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 435–444
- CELICO P. 1998 *Prospezioni Idrogeologiche*. Vol I, Liguori editore, V° ristampa 1998 pag 243
- CHENG ALEXANDER H.-D., LEONARD F. KONIKOW AND DRISS OUAZAR (2001) *Special Issue of Transport in Porous Media on 'Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*. *Transport in Porous Media* 43: 1–2.
- CIAVOLA P, ARMAROLI C, CHIGGIATO J, VALENTINI A., DESERTI M., PERINI L, LUCIANI P. 2007. *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*: Journal of coastal research SI 50 : 540-544.
- CIMINO A. COSENTINO C., OIENI A., TRANCHINA L. 2007 *A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquedolci coastal aquifer (Northern Sicily)*. Environ Geol (2008) 55:1473–1482
- COLLINS WH, EASLEY DH. 1999. *Freshwater Lens Formation in an unconfined barrier island aquifer*. Journal Am. Water Resour. Assoc., 35 : 1–2
- COMUNITÀ EUROPEA 2000 *Water Framework Directive 2000/60/CE* del Parlamento europeo e del Consiglio che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque, GU L 327 del 22.12.2000
- COOPER H. H. JR., 1959. *A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer*. Journal of Geophysical Research 64: 461-67.

- CORREGGIARI A, ROVERI M, TRINCARDI F. 1996. *Late-Pleistocene and Holocene evolution of the north Adriatic sea. Late-Glacial and early Holocene climatic and environmental changes in Italy: II Quaternario: Italian Journal of Quaternary Sciences* 9 : 697–704.
- CORTECCI G., DINELLI E., MUSSI M., 2008. *Isotopic composition and secondary evaporation effects on precipitation from the urban centre of Bologna, Italy*. *Periodico di Mineralogia* 77, 55-63.
- CORTICELLI S. 2003 *Carta Del Uso Del Suolo (Land Use Map)*. Copertura Vettoriale. Stampata Dalla Regione Emilia Romagna, Italy.
- CURZI P.V., DINELLI E., RICCI LUCCHI M. & VAIANI S.C. 2006 *Palaeoenvironmental control on sediment composition and provenance in the late Quaternary deltaic successions: a case study from the Po delta area (Northern Italy)*. *Geological Journal*, 41, 591-612
- CUSTODIO, E., 2010. *Coastal Aquifers Of Europe: An Overview*. *Hydrogeology Journal*, 18(1): 269 - 280 DOI: 10.1007/S10040-009-0496-1
- DE BREUCK W. 1991. *Hydrogeology of Salt Water Intrusion*. Vol. 11 of International contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, Hannover, Germany
- DE LUCA A, PREZIOSI E, GIULIANO G, MASTROIANNI D, FALCONI F 2005. *First evaluation of the saltwater intrusion in the Tiber delta area (Rome, central Italy)*. 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May–3 June 2004, 34 pp
- DECRETO LEGISLATIVO 16 MARZO 2009, N. 30 "Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. (09G0038)".
- DELLWIG O, BOTTCHE M. E. LIPINSKI, M. BRUMSACK H. J. 2001 *Trace metals in Holocene coastal peats and their relation to pyrite formation NW Germany/* *Chemical Geology* 182, 423-442
- DEMING D., 2002. *Introduction to hydrogeology*. New York: McGraw-Hill.
- EPA 2007 *Guidelines Regulatory monitoring and testing Groundwater sampling* http://www.epa.sa.gov.au/xstd_files/Water/Guideline/guide_gws.pdf
- FAO 1992 *The use of saline waters for crop production - FAO irrigation and drainage paper* 48
- FAO 2002 *Agricultural Drainage Water Management In Arid And Semi-Arid Areas* [Ftp://Ftp.Fao.Org/Docrep/Fao/005/Y4263e/Y4263e11.Pdf](http://Ftp.Fao.Org/Docrep/Fao/005/Y4263e/Y4263e11.Pdf)
- FAO. 1990. *Guidelines For Soil Profile Description*. Third Edition (Revised). Soil Resources, Management And Conservation Service, Land And Water Development Division, Fao, Rome.
- FETTER C.W., 2001. *Applied Hydrogeology*. Ed. Prentice Hall, Fourth Edition; 691 pp.
- FETTER CW. 1972. *Position of the saline water interface beneath oceanic islands: Water Resour Res* 8 : 1307–1315
- FILIPPI N 1994 *Carta Pedologica (Soil Map)* 1: 250.000. Stampata Dalla Regione Emilia Romagna, Italy
- GALE I., 2000 *Strategies For Managed Aquifer Recharge (Mar) In Semi-Arid Areas* International Association Of Hydrogeologists Commission On Management Of Aquifer Recharge Iah - Mar International Hydrological Programme (Ihp) Unesco Division Of Water Sciences www.iah.org/recharge
- GAMBOLATI G., TEATINI P., 1998. *Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin*. In: Gambolati g. (ed) CENAS, Coastal evolution of the upper Adriatic sea due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence. Kluwer Academic Publishing, Water Science & Technology Library n. 28, 103-131.
- GAMBOLATI, G., RICCIERI, G., BERTONI, W., BRIGHENTI, G., VUILLERMIN, E., 1991. *Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna*. *Water Resour. Res.* 27, 2899–2918.
- GIAMBASTIANI B.M.S. 2007A. *Evoluzione idrologica ed idrogeologica della pineta di San Vitale (Ravenna)*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XIX Ciclo, Università di Bologna.
- GIAMBASTIANI B.M.S., ANTONELLINI M, OUDE ESSINK GHP, STUURMAN RJ. 2007b. *Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model: Journal of Hydrology* 340 : 94-104.
- GIAMBASTIANI B.M.S., MOLLEMA P.N., ANTONELLINI M., 2009. *Groundwater Management in the Northern Adriatic Coast (Ravenna, Italy): New Strategies to Protect the Coastal Aquifer From Saltwater Intrusion*. In: *Groundwater: Modelling, Management and Contamination*. Authors: König L.F. and Weiss J.L.; Nova Publishers.p. 167-193.
- GREGGIO N., MOLLEMA P., ANTONELLINI M. AND GABBIANELLI G., 2012. *Irrigation Management in Coastal Zones to Prevent Soil and Groundwater Salinization*, Resource Management for Sustainable Agriculture, ISBN: 978-953-51-0808-5, InTech, DOI: 10.5772/50534. Available from: <http://www.intechopen.com/books/resource-management-for-sustainable-agriculture/>.
- HAMZAH U., RAHIM S., MALIM E., 2006. *Groundwater investigation in Kuala Selangor using vertical electrical sounding (VES) surveys*. *Environ Geol* 51:1349–1359
- HANTUSH M. S., 1964 *Hydraulics of wells*, in *Advances in Hydroscience*, Vol. 1, Ed.: V. T. Chow, Academic Press, New York, pp. 281–432.

- HARRIS WH. 1967. *Stratification of fresh and saltwater on barrier islands as a result of differences in sediment permeability*: Water Resour. Res. 3 : 89–97
- HERZON I., HELENIUS J. 2008 *Agricultural Drainage Ditches, Their Biological Importance And Functioning Biological Conservation* 141, 1171–1183
http://www.knmi.nl/klimatologie/geografische_overzichten/index.cgi.
- HUTCHINSON, I., 1991. *Salinity Tolerances Of Plants Of Estuarine Wetlands And Associated Uplands*. Washington State Department Of Ecology Report, Washington, USA.
- ILICHEV, A. T., TSYPKIN, GEORGE G., PRITCHARD, D. R. CHRIS N. 2008 *Instability Of The Salinity Profile During The Evaporation Of Saline Groundwater*. Journal Of Fluid Mechanics, 614. Pp. 87-104. Issn 0022-1120
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 1993 – ISO 5667-11 *Water quality. Sampling Guidance on sampling of groundwater*, International Organization For Standardization, Geneve Switzerland, pp. 1-10.
- IPWEA, 2001. *The Local Government Salinity Management Handbook*. Institute Of Public Works Engineering Australia (IPWEA), Australia.
- ISTAT 2000 5° *Censimento Generale Dell'agricoltura* <http://www.census.istat.it>
- KNMI (R. Sluiter) 2009. *Interpolation methods for climate data literature review*.
- KONIKOW, L.F., BREDEHOEFT, J.D., 1978. *Computer Model of Two-dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater*. USGS Tech. of Water-Resources Investigations (Book 7, Chapter C2).
- KRALJ M. 2011 *Effects of resources exploitation on water quality: case studies in salt water intrusion and acid mine drainage* Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali: Tutela e Gestione delle Risorse Naturali
- KUNETZ G 1966. *Principles of direct current resistivity prospecting*. Geoexploration monographs, Gebruder-Borntraeger, Berlin. 103 pp
- LAGHI M, ANTONELLINI M, MINCHIO A., STECCHI F. (2009). *The salt water encroachment along the Lamone river artificial estuary: an issue for the coastal management in the Southern Po Plain Adriatic Coast (Italy)*: Geophysical Research Abstracts 11 : EGU2009-9583
- LAGHI M. 2010. *L'interazione tra acque fluviali superficiali e acque sotterranee in zona costiera: Il sistema dell'estuario del Fiume Lamone*. Dottorato di ricerca in Scienze ambientali: tutela e gestione delle risorse naturali, Ciclo XXII. Università di Bologna
- LAGHI M., MOLLEMA P. AND ANTONELLINI M.. 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*. World Environmental and Water Resources Congress 2010: 1124 Challenges of Change. 2010 ASCE pp 1124-1135
- LERNER D.N. AND TEUTSCH G., 1995, *Recommendations for level-determined sampling in wells*. Journal of Hydrology, v. 171, pp 355-377
- LEWIS E.L., PERKIN R.G., 1981. *The Practical Salinity Scale 1978: conversion of existing data*. Deep-Sea Res., 28A, 307-328.
- LIQIANG Y., SHAOYUAN F., XIAOMIN M., ZAILIN H., SHAOZHONG K., BARRY D.A. 2012 *Coupled Effects Of Canal Lining And Multi-Layered Soil Structure On Canal Seepage And Soil Water Dynamics*. Journal Of Hydrology 430-431, 91–102
- LOMBARDI, T., LUPI, B., 2006. *Effect Of Salinity On The Germination And Growth Of Hordeum Secalinum Schreber (Poaceae) In Relation To The Seeds After Ripening Time*. Atti Della Società Toscana Di Scienze Naturali, Memorie, Serie B 113, 37–42.
- LONGINELLI, A., ET AL., 2006. *Isotopic composition of precipitation in northern Italy: Reverse effect of anomalous climatic events*. Journal of Hydrology 329 (3–4), 471–476.
- LOUW, P.G.B., DE, EEMAN, S., SIEMON, B., VOORTMAN, B.R., GUNNINK, J., BAAREN, E.S., VAN AND G.H.P. OUDE ESSINK. 2011. *Shallow Rainwater Lenses In Deltaic Areas With Saline Seepage*, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 8, 7657-7707.
- LUPPIS A., 1940. *Proposta di una nuova inalveazione del fiume Lamone con immissione nel Reno presso la Torre di Primaro*. Ann. Lavori Pubblici, 78, pp. 1005-1018.
- MAAS E.V., HOFFMAN G.J.. 1977 *Crop Salt Tolerance*, Current Assessment J. Irrig. Drain. Div., 103, Pp. 115–134
- MAAS K. 2007. *Influence of climate change on a Ghyben-Herzberg lens*: Journal of hydrology, 347 : 223-228.
- MARCHESINI L, AMOROSI A, CIBIN U, ZUFFA GG, SPADAFORA E, PRETI D. 2000. *Sand composition and sedimentary evolution of a late Quaternary depositional sequence, Northwestern Adriatic Coast, Italy*. Journal of Sedimentary Research 70 (4) : 829–838.

- MARCONI V., ANTONELLINI M., BALUGANI E., DINELLI E.. 2011 *Hydrogeochemical Characterization Of Small Coastal Wetlands And Forests In The Southern Po Plain (Northern Italy)*. *Ecohydrol*. Vol.4, 597-607
- 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 Researches Abstract* 10 : EGU2010-05761
- MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., 1988. *A Modular Three-dimensional Finite difference Ground-water Flow Model*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations (Book 6, Chapter A1), 586 p.
- MEIJER, K., BOELEEE, E., AUGUSTIJN, D., VAN DER MOLEN, I., 2006. *Impacts Of Concrete Lining Of Irrigation Canals On Availability Of Water For Domestic Use In Southern Sri Lanka*. *Agric. Water Manage.* 83, 243–251.
- MEIJER, K.S., 2000. *Impacts Of Concrete Lining Of Irrigation Canals, Uda Walawe, Sri Lanka*. M.Sc. Thesis, University Of Twente, The Netherlands.
- MITCHELL, J. (2008). *Home of Ensembles-eu.org*. [14/11/2008] <http://www.ensembleseu.org/>.
- MOLLEMA P, ANTONELLINI A, DINELLI E, GABBIANELLI G, GREGGIO, N, STUYFZAND P J. 2012b *Identification Of Fresh And Salt Water Intrusion Types In The Upper Ravenna Coastal Aquifer (Italy)* Via Hydrochemical Systems Analysis. Submitted to *Applied Geochemistry*.
- MOLLEMA P., ANTONELLINI M., GABBIANELLI G. AND GALLONI E.. 2012 *Water budget management of a coastal pine forest in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy)* *Environ Earth Sci* DOI 10.1007/s12665-012-1862-1
- MOLLEMA, P., ANTONELLINI, M., GABBIANELLI, G., LAGHI, M., MARCONI, V., MINCHIO, A., 2012a. *Climate And Water Budget Change Of A Mediterranean Coastal Watershed, Ravenna, Italy*. *Environmental Earth Sciences*. 65:257–276 Doi: 10.1007/S12665-011-1088-7..
- OUDE ESSINK, G.P., 1998. *MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow*. In: *Proc. of MODFLOW '98 Conference*, October, 4e8, 1998, Golden, Colorado, USA, vol. I, pp. 291e303.
- OWEN G. HOLLOWAY AND JONATHAN P. WADDELL 2008 *Design and Operation of a Borehole Straddle Packer for Ground-Water Sampling and Hydraulic Testing of Discrete Intervals at U.S. Air Force Plant 6, Marietta, Georgia*. Open-File Report 2008 –1349 U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey
- PARSONS, M.L., 1970. *Groundwater thermal regime in a glacial complex*. *Water Resources Research* 6, no. 6: 1701–1720.
- POST VEA 2005. *Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead?* *Hydrogeol J* 13:120–123
- PRANZINI G 2002. *Groundwater salinization in Versilia (Italy)*. 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 412–421
- PRETI M., 2000. *Eustatismo, subsidenza e linee di intervento per la difesa del territorio costiero in Emilia-Romagna*. Mare e cambiamenti globali, ICRAM, ARPA – Ingegneria Ambientale, Bologna, 167-179.
- PROVINCIA DI RAVENNA 2006 *Piano Territoriale Di Coordinamento Provinciale*
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP, 1998. *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. Relazione tecnica a cura di Di Dio G.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 1999. *Note illustrative Carta Geologica d'Italia – Scala 1:50000 – Ravenna*. A cura di A. Amorosi, pp. 144, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato Ed., Roma.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2003. *Definizione del DMV analisi a livello regionale del criterio messo a punto dall'autorità di bacini del fiume Po e sua caratterizzazione ed eventuale adeguamento*. Relazione Quadro conoscitivo – Attività I.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2005. *Piano di tutela delle acque. Relazione generale comprensiva del quadro conoscitivo, Regione Emilia-Romagna*, Arpa – Ingegneria Ambientale.
- 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
- RIZZINI A. 1974. *Holocene sedimentary cycle and heavy-mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy*: *Sedimentary geology* 11 (1) : 17-37.
- RORABAUGH, M.I., 1954, *Streambed percolation in development of water supplies*, U.S. Geological Survey Groundwater Notes on Hydraulics No. 25, 13 p
- ROSE D. A., KONUKCU F. & GOWING J. W. 2005 *Effect Of Water table Depth On Evaporation And Salt Accumulation From Saline Groundwater*. *Aust. J. Soil Res.* 43, 565-573.

- SCHEIDLEGER A, GRATH J, LINDINGER H 2004. *Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation EEA inventory throughout Europe*. In: 18th Saltwater Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May–3 June 2004, 125 pp
- SCHNEIDER JC, KRUSE SE. 2005. *Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier Islands: Dog Island and St. George Island, Florida, USA*: Hydrogeol J 14 : 131–145.
- SCHOT PP, DEKKER SC, POOT A. 2004. *The dynamic form of rainwater lenses in drained fens*: Journal of Hydrology 293 : 74-84.
- SCHUURMANS, J.M., M.F.P. BIERKENS & E.J. PEBESMA (2007). *Automatic Prediction of High-Resolution Daily Rainfall Fields for Multiple Extents: The Potential of Operational Radar*. Journal of Hydrometeorology 8, pp. 1204 - 1224.
- SELLI R., CIABATTI M., 1977, *L'abbassamento del suolo della zona litoranea ravennate*, Giornale di geologia, 42/1, Bologna: 1-47
- SESTINI G., 1992, *Implication of climatic changes for the Po Delta and Venice lagoon*, in: Climatic Change and the Mediterranean, 429-491.
- SHALEV E, LAZAR A, WOLLMAN S, KINGTON S, YECHIELI S, GVIRTZMAN H. 2009. *Biased monitoring of fresh water-salt water mixing zone in coastal aquifers*. Ground Water 47 (1): 49-56
- SIMEONI U., CORBAU C., 2009 *A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts*, Geomorphology, Volume 107, Issues 1–2, Pages 64-71, ISSN 0169-555X, 10.1016/j.geomorph.2008.11.004.
- SIMMONS DL. 1986. *Geohydrology and ground-water quality on Shelter Island, Suffolk County, New York, 1983–84*: US Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 85-4165.
- SOIL SURVEY STAFF. 1996. *Keys To Soil Taxonomy*. Seventh Edition. United States Department Of Agriculture, Washington D.C.
- SOREY, M.L., 1971, *Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in a well*: Water Resources Research, v. 7, p. 963–970.
- STALLMAN, R.W., 1963, *Methods of collecting and interpreting ground-water data, u.s. geological survey water-Supply Paper 1544-H*, p. 36–46.
- STEFANI M, VINCENZI S. 2005. *The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system*: Marine Geology 222-223 : 19-48
- STUYFZAND P. J. (1993) *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands*. Ph.D. Thesis Free Univ. Amsterdam, publ. by KIWA ltd. Research and Consultancy Nieuwegein The Netherlands. ISBN 90-74741-01-0 366 pp.
- STUYFZAND P. J., AND STUURMAN R. J. (2006). *Origin, distribution and chemical mass balances of non anthropogenic, brackish and (hyper)saline groundwater in the Netherlands*. In Proceedings 1ST SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari Italy 2006.
- STUYFZAND P.J. (1999) *Pattern in groundwater chemistry resulting from groundwater flow*. Hydrogeology Journal 7 p 15-27.
- STUYFZAND, P.J. 1983. *Belangrijke foutenbronnen bij bemonstering van grondwater via peil- en minifilters*. H2O 16, 87-94
- STUYFZAND, P.J., 1989. *A New Hydrochemical Classification Of Watertypes*. Iahs Publ. 182, 89–98.
- SUNG-HO SONG, JIN-YONG LEE, NAMSIK PARK 2007. *Use of vertical electrical soundings to delineate seawater intrusion in a coastal area of Byunsan, Korea*. Environ Geol 52:1207–1219
- SUZUKI, S., 1960, *Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields*: Journal of Geophysical Research, v. 65, p. 2883–2885.
- TANIGUCHI, M., D.R. WILLIAMSON, AND A.J. PECK. 1999. *Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate and subsurface water flow: 2. an effect of step increase in surface temperature caused by forest clearing in southwest western Australia*. Water Resources Research 35, no. 5: 1519–1529.
- TEATINI P., FERRONATO M., GAMBOLATI G., BERTONI W., GONELLA M., 2005. *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol, 47, 831-846.
- TOTH G., MONTANARELLA L., RUSCO E., 2008 *Updated Map Of Salt Affected Soils In The European Union. Threats To Soil Quality In Europe*, Office For Official Publications Of The European Communities, Luxembourg (2008), Pp. 61–74
- TURCOTTE E SCHUBERT, 2005. *Geodynamics*. Second Edition. Cambridge University Press
- ULAZZI E., ANTONELLINI M. AND GABBIANELLI G. 2008. *Saltwater Intrusion in a Unconfined Coastal Aquifer: The Case Study of Cervia (North Adriatic Sea, Italy)*. P. Meire et al (eds), Integrated Water Management: Practical Experience and case studies, 295-308

- UNESCO, 1983. *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. Unesco technical papers in marine science 44, Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.
- VAN HUSEN D., 2004. *Quaternary glaciations in Austria*. In: Mangerud, J., J. Ehlers, and P. Gibbard, 2004, Quaternary Glaciations: Extent and Chronology, Part I - Europe. Elsevier, Amsterdam, 488 pp.
- VANDENBOHEDE A., LEBBE L., ADAMS R., COSYNS E., DURINCK P., ZWAENEPOEL A. 2010 *Hydrogeological study for improved nature restoration in dune ecosystems—Kleyne Vlakte case study, Belgium*, Journal of Environmental Management, Volume 91, Issue 11, Pages 2385-2395, ISSN 0301-4797, 10.1016/j.jenvman.2010.06.023.
- VANDENBOHEDE, A., LEBBE, L., 2011. *Groundwater chemistry patterns in the phreatic aquifer of the central Belgian coastal plain*. Applied Geochemistry. Doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.08.012
- VANDENBOHEDE, A., LEBBE, L., 2002. *Numerical modelling and hydrochemical characterization of a fresh water lens in the Belgian coastal plain*. Hydrogeology Journal 10 (5), 576e586.
- VANDENBOHEDE, A., LEBBE, L., 2007. *Effects of tides on a sloping shore: groundwater dynamics and propagation of the tidal wave*. Hydrogeology Journal 15, 645e658.
- VANDENBOHEDE, A.; LEBBE, L. (2010). *Recharge assessment by means of vertical temperature profiles: analysis of possible influences* Hydrol. Sci. J. 55(5): 792-804. hdl.handle.net/10.1080/02626667.2010.490531
- VANDENBOHEDE, A.; LEBBE, L. (2011). *Heat transport in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium* Hydrogeol. J. 19(6): 1225-1238. hdl.handle.net/10.1007/s10040-011-0756-8
- VEGGIANI A., 1974. *Le ultime vicende geologiche del Ravennate*. In: *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale*. Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna. Ed. Compositori, Bologna, 48-58.
- VENTURINI S., 1996, *Dati preliminari sulla stratigrafia e sulla subsidenza naturale nel Quaternario dell'area Ravennate e Veneziana*, T.R., AGIP DIRA/GERA, Marina di Ravenna.
- WEI-JUN CAI, YONGCHEN W., KREST J., MOORE W.S., 2003 *The geochemistry of dissolved inorganic carbon in a superficial groundwater aquifer in North Inlet, South Carolina, and the carbon fluxes to the coastal ocean*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 67, Issue 4, Pages 631-639,
- WERNER A., BAKKER M., POST V. E. A., VANDENBOHEDE A., LU C., ATAIE-ASHTIANI B., SIMMONS C.T., BARRY D.A. 2012 *Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges*, Advances in Water Resources, Available online 19 March 2012, ISSN 0309-1708, 10.1016/j.advwatres.2012.03.004.
- WHITICAR M.J. 1999, *Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane*. Chem. Geol, 161, pp. 291–314.

15 ALLEGATI

15.1 Pozzi e PdC acquifero completo

Di seguito l'elenco dei pozzi e dei PdC monitorati per quanto riguarda l'acquifero completo.

Tabella 15.1 Dettaglio dei Punti di Campionamento relativi ai piezometri della zona Sud di Ravenna

Nome piezometro	Quota campionamento da P.C. (m)	Numero campioni	Tipologia di acquifero
P1S	-2,-7,-19,-21	4	freatico
P2S	-2,-5, -7, -20, -24	5	freatico
P3S	-2, -8,-11,-17, -21.5	5	confinato
P4S	-1,-8,-14,-16, -21	5	freatico
P5S	-2,-6,-10,-14,-18	5	freatico
P6S	-3,-9,-15	3	confinato
P9S	Top falda, -2.5	2	fuori acquifero
P10S	-2, -7, -12	3	conf. o semiconf.
P12S	-2,-5,-9,-13.5	4	freatico
P13S	-3,-6,-12,-17	4	freatico
P14S	-2,-9,-14,-21	4	freatico
P15S	-1, -4, -6, -8	4	freatico
P16S	-4, -6, -8, -15	4	conf. o semiconf.
P17S	-2, -7,-11, -15	4	freatico
P18S	-4, -6, -8, -10	4	confinato
P19S	-3, -5, -8, -11	4	confinato
EMS 1	-6, -10, 13	3	freatico
MF1	-2.2,-2.7,-4.7	3	freatico
MF2	-1.7,-2.2,-4.7	3	freatico
MF3	-1.8,-2.8,-5.3	3	freatico
PR4	-1.5	1	freatico
Tot.		77	

Tabella 15.2 Dettaglio dei Punti di Campionamento relativi ai piezometri interni alla Pineta di San Vitale

Nome piezometro	Quota campionamento da P.C. (m)	Numero campioni	Tipologia di acquifero
PZSV9	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV10	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV11	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV12	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV16	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV18	Top falda, -5	2	confinato
PZSV19	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV21	Top falda, -5	2	Freatico
PZSV23	Top falda, -6, -9, -10	4	Freatico
PZSV24	Top falda, -6, -9, -11	4	Freatico
PZSV26	Top falda, -6, -9	3	semiconf.
PZSV28	Top falda, -6, -12	3	Freatico
PZSV30	Top falda, -5, -9, -13	4	Freatico
PZSV31	Top falda, -6, -9, -13	4	Freatico
PZSV32	Top falda, -6, -9	3	semiconf.
PZSV34	Top falda, -6, -9, -12	4	Freatico
PZSV36	Top falda, -6, -9, -10	4	Freatico
PZSV37	-2.5, -6, -10	3	confinato

PMSV6	Top falda, -5, -8, -12.5	4	Freatico
PMSV6P	-15.5	1	confinato
PMSV7	Top falda, -5, -8, -12.5	4	Freatico
PMSV7P	-24.5	1	confinato
PMSV8	Top falda, -5,- 8, -14	4	Freatico
PMSV8P	-21	1	confinato
Tot.		67	

Tabella 15.3 Dettaglio dei Punti di Campionamento relativi ai piezometri della zona Nord di Ravenna.

Nome piezometro	Quota campionamento da P.C. (m)	Numero campioni	Tipologia di acquifero
P1N	Top falda, -3, -6, -8, -10	5	freatico
P2N	Top falda, -4, -8	3	freatico
P3N	-4,-8	2	confinato
P4N	Top falda, -4, -9, -12, -30	5	freatico
P5N	Top falda, -5,-9	3	freatico
P6N	Top falda, -5, -10	3	freatico
P7N	Top falda, -3, -5, -8	4	freatico
P8N	Top falda,-5, -10	3	freatico
P9N	Top falda,-5, -10	3	freatico
P10N	Top falda, -4,-8	3	freatico
P11N	Top falda, -7,-15	3	conf.o semiconf.
P12N	Top falda, -5, -10, -15	4	conf.o semiconf.
P13N	-3, -9	2	freatico
P14N	Top falda, -4, -6, -24	4	conf.o semiconf
P15N	Top falda, -2.5, -5, -10,-15	5	conf. o semiconf
P16N	Top falda, -4, -6.5	3	freatico
P17N	Top falda, -4, -8,-15	4	conf. o semiconf
P18N	Top falda, -5, -10,-16	4	conf. o semiconf
Tot.		63	

Tabella 15.4 Dettaglio dei Punti di Campionamento relativi alle acque superficiali.

Nome	Quota campionamento	Numero campioni	Note
Tre Ponti (3P)	\	1	Canale Bonifica
Baiona	\	1	Chiaro Piallassa
Bevano(BEV)	\	1	Torrente
Bevanella	\	1	Canale Bonifica
Cavallina (CAV)	Top lago	1	Bacino di cava
Cerba (CE)	\	1	Canale Bonifica
Canale Emiliano-Romagnolo (CER)	\	1	Canale irriguo
Chiaro Nord	\	1	Chiaro Piallassa
Chiaro Comune (Comune)	\	1	Chiaro Piallassa
Destra Reno (DXRE)	\	1	Canale Bonifica
Ems 1	Top lago	1	Bacino di cava
Ems 2	-5	1	Bacino di cava
Ems 3	-12	1	Bacino di cava
Fosso Ghiaia (FG)	\	1	Canale Bonifica
Fiumi Uniti (FU)	\	1	Fiume
Lamone (LAM)	\	1	Fiume
Mare	\	1	Mare
Piombone	\	1	Chiaro Piallassa
Pontazzo	\	1	Chiaro Piallassa
Reno (RE)	\	1	Fiume
Risega	\	1	Chiaro Piallassa
Savio	\	1	Fiume
Tot		22	

15.2 Pozzi e PdC del Transetto

Di seguito l'elenco dei pozzi e dei PdC monitorati nel transetto nella porzione meridionale.

Tabella 15.5 Dettaglio dei pozzi e dei Punti di Campionamento relativi al transetto a Sud di Ravenna

Nome piezometro	Quota campionamento da P.C. (m)	Numero campioni	Tipologia di acquifero
P1S	-2,-7,-19,-21	4	freatico
P2S	-2,-5, -7, -20, -24	5	freatico
P3S	-2, -8,-11,-17, -21.5	5	confinato
P4S	-1,-8,-14,-16, -21	5	freatico
P5S	-2,-6,-10,-14,-18	5	freatico
P6S	-3,-9,-15	3	confinato
P9S	Top falda, -2.5	2	fuori acquifero
EMS 1	-6, -10, 13	3	freatico
MAR1	-2,-5	2	freatico
MAR2	-2, -5	2	freatico
Tot.		36	

15.3 Pozzi e PdC dell'area di ricarica MAR

Di seguito l'elenco dei pozzi e dei PdC monitorati nella zona di ricarica MAR nel luglio 2012; evidente l'incremento dei PdC nella porzione superiore dell'acquifero, allo scopo di scendere nel dettaglio della ricarica.

Tabella 15.6 Dettaglio dei pozzi e dei Punti di Campionamento relativi alla zona di ricarica MAR.

Nome piezometro	Quota campionamento da P.C. (m)	Numero campioni	Tipologia di acquifero
P1S	-1.5, -3, -5, -20	4	freatico
P3S	-3, -6, -9, -11, -13, -15, -17, -8.7, -19.5, -22	10	confinato
P4S	-2.5, -3.75, -5, -6.5, -16.5	5	freatico
MAR1	-2.1, -3, -4, -5, -7	5	freatico
MAR2	-1.1, -2.1, -3.1, -5.1, -8.1	5	freatico
Tot.		29	

15.4 Materiale utilizzato durante la raccolta dei campioni

Materiale utilizzato in ogni singola campagna in campo (paragrafo 5.2):

- 1 *Stradlle packer*, due *packer* separati da un distanziatore di lunghezza variabile con il quale si isolano e si campionano porzioni di acquifero predefinite.
- 1 Sonda multiparametrica XS PCD650 per pH, Eh, Conduttività elettrica, Ossigeno disciolto e temperatura.
- 1 Cella di flusso in grado di mantenere il campione di acqua isolato dall'ossigeno atmosferico durante le operazioni di misura dei dati da campo.
- 1 Sistema filtrante con filtri monouso da 0.45 µm.
- 1 Sonda AquaTroll™ o CTD-Diver - *Schlumberger Water Services* per ottenere il profilo di conduttività elettrica (CE) e di temperatura all'interno del pozzo.
- Pompa peristaltica per l'estrazione del campione dal pozzo.
- Contenitori in PET di diverse volumetrie e acido nitrico per la raccolta e il trattamento dei campioni.
- 1 Spettrofotometro da campo per le analisi dei solfuri (in tutte le campagne) e degli altri elementi deperibili (nel monitoraggio di luglio 2012).

15.5 Raccolta dei campioni

Terminata la misura dei parametri chimico-fisici si è proceduto con la raccolta dei campioni. L'acqua presente nella cella di flusso è stata filtrata a 0.45 μm allo scopo di rimuovere le particelle in sospensione e l'eventuale presenza di alghe in grado di fissare NH_3 e SO_4 ed ostruire gli strumenti impiegati nell'analisi. Il volume complessivo dell'acqua filtrata è stato di circa 600ml di cui 100ml per i cationi, 100ml per i metalli e 250 ml di scorta sono stati stabilizzati con acido nitrico al 12% in modo tale da raggiungere un pH inferiore a 2, onde evitare processi di flocculazione (Figura 5.13).

Il campione per la determinazione degli anioni e quello destinato alle analisi isotopiche, sono stati solamente filtrati, mentre agli altri è stata aggiunta un'aliquota di acido nitrico, pari a circa 1% del volume, sufficiente ad abbassare il pH fino a 2 e stabilizzare il campione.

Nel caso, a discrezione degli operatori, si percepisse un forte odore sgradevole proveniente dal campione, è stata eseguita l'analisi dello ione solfuro mediante lo spettrofotometro da campo, che ci ha restituito i mg/l di HS^- del campione.

Di seguito un elenco dei tipi di campioni raccolti:

- 1 campione da 100 ml destinati all'analisi degli anioni, filtrato a 0.45 μm ,
- 1 campione da 100 ml destinati all'analisi dei cationi filtrato e stabilizzato con acido nitrico
- 1 campione da 100 ml filtrato e stabilizzato, destinato ad eventuali analisi di approfondimento per la determinazione dei principali metalli
- 1 campione da 100 ml filtrato e non stabilizzato, destinato all'analisi isotopica
- 1 campione da 250 ml filtrato e stabilizzato, destinato a campione di controllo conservato in caso di ulteriori approfondimenti.

15.6 Metodologie analitiche

Di seguito la Tabella 15.7 mostra le date di raccolta e la provenienza del campione, il tipo di indagine e l'ente presso cui è stata svolta.

Tabella 15.7 Riassunto delle analisi svolte. Tipo di indagine, ente presso cui è stata svolta l'analisi, data di raccolta e area di provenienza del campione.

Date	Area		
	Acquifero completo	Transetto	Area MAR
Dicembre 2010	Alcalinità CRSA Med-Ingegneria Cationi e anioni CRSA Med-Ingegneria Università Bologna Acme Lab. (Canada) Isotopi Università Amsterdam	Alcalinità CRSA Med-Ingegneria Cationi e anioni CRSA Med-Ingegneria Università Bologna Acme Lab. (Canada) Isotopi Università Amsterdam	
Aprile 2011		Cationi e anioni Università Bologna Acme Lab. (Canada)	Cationi e anioni Università Bologna Acme Lab. (Canada)
Luglio 2012			Cationi e anioni Acme Lab. (Canada)

15.6.1 Metodologie di analisi C.R.S.A. Med Ingegneria

L'alcalinità è stata analizzata attraverso una titolazione complessometrica con EDTA.

I cationi sono stati analizzati mediante spettrometria di assorbimento atomico con atomizzazione in fiamma (F-AAS); tale tecnica ricava la concentrazione dell'analita mediante un confronto tra i valori di assorbanza di una curva di taratura, ottenuta con soluzioni a concentrazione nota e quelli del campione, compresi nel campo di indagine (metodi APAT – IRSA 2003).

Gli anioni sono stati analizzati mediante cromatografia ionica (IC), una tecnica che si basa sulla separazione degli analiti mediante colonna di scambio anionico in base alla loro affinità per la fase stazionaria. Il riconoscimento degli analiti, rivelati mediante conduttimetro in linea, viene effettuato confrontando il tempo di ritenzione dei picchi del campione con il tempo di ritenzione di soluzioni di riferimento. La concentrazione viene determinata confrontando l'area del picco con la curva di taratura dell'analita costruita mediante una serie di soluzioni di riferimento a diverse concentrazioni (metodi APAT – IRSA 2003).

Riassunto totale dei parametri analizzati dal Centro Ricerche e Servizi Ambientali (C.R.S.A.) Med Ingegneria.

Tabella 15.8 Riassunto dei metodi utilizzati dal Centro Ricerche e Servizi Ambientali (C.R.S.A.) Med Ingegneria per le analisi geochimiche.

DESCRIZIONE/PARAMETRO	METODO
Calcio	F-AAS (APAT – IRSA 2003)
Magnesio	F-AAS (APAT – IRSA 2003)
Sodio	F-AAS (APAT – IRSA 2003)
Potassio	F-AAS (APAT – IRSA 2003)
Cloruri	IC (APAT – IRSA 2003)
Fluoruri	IC (APAT – IRSA 2003)
Bromuri	IC (APAT – IRSA 2003)
Nitrati	IC (APAT – IRSA 2003)
Fosfati	IC (APAT – IRSA 2003)
Solfati	IC (APAT – IRSA 2003)
Alcalinità Totale	Titolazione complesso metrica (APAT – IRSA 2003)

15.6.2 Metodologie di analisi campioni Acme Analytical Laboratories Vancouver Ltd. (Canada)

Le analisi svolte presso i laboratori *Acme*, hanno richiesto una diluizione dei campioni eseguita direttamente nei nostri laboratori del C.I.R.S.A., per portare il contenuto totale di sali disciolti al di sotto del 0,1% (TDS < 0.1%).

I fattori di diluizione sono stati ottenuti partendo dai valori di conduttività misurati in campo e vanno da 0 a 25. Una volta diluiti, è stato aggiunto 1 ml di acido nitrico per mantenere il pH sotto 2, sigillati in contenitori di polietilene (HDPE) e inviati in Canada.

Oltre ai 105 campioni prescelti per le analisi di conferma, sono stati aggiunti anche 3 standard interni preparati partendo da soluzioni multi-elemento standard, 6 campioni ripetuti come controllo interno, e 2 campioni di acqua deionizzata utilizzata per le diluizioni, come bianco analitico.

Le analisi sono state eseguite mediante ICP-AES/ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry / Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*) la prima tecnica sfrutta la somministrazione di energia relativamente elevata, tanto da provocare la dissociazione in atomi e l'eccitazione di questi ultimi. In base alla lunghezza d'onda emessa è possibile risalire alla specie incognita, dato che gli spettri di ciascuna sostanza sono caratteristici, mentre misurando l'intensità dell'emissione si può effettuare anche l'analisi quantitativa. La seconda (Mass Spectrometry) sfrutta un analizzatore di massa a quadrupolo che separa gli ioni in base al loro rapporto massa/carica e produce un segnale proporzionale alla concentrazione.

Gli elementi analizzati sono stati: Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, Ca, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, In, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, S, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. Il laboratorio canadese ha intercalato alla serie dei campioni (che già conteneva elementi di controllo), 6 propri standard di controllo, 4 repliche dei campioni e 10 letture del bianco.

I risultati ottenuti sono stati da noi moltiplicati per i fattori di diluizione.

15.6.3 Metodologie di analisi Università di Bologna: laboratori C.I.R.S.A. e Dipartimento di Geologia

Come controllo ulteriore sono state ripetute le analisi chimiche dei principali anioni e cationi nei laboratori dell'Università di Bologna verificando il bilancio ionico di ogni singolo campione. In particolare, gli anioni sono stati analizzati presso il laboratorio di Geochimica del Dipartimento di Geologia dell'Università di Bologna, mentre i cationi presso il laboratorio di Chimica Inorganica del C.I.R.S.A..

Tale confronto è stato condotto solo sugli ultimi 38 campioni, comunque rappresentativi della gamma di acque campionate nell'ambito dell'intero progetto.

Ca, Mg, Na e K, sono stati analizzati mediante assorbimento atomico (*Thermo S-series spectrometer*), diluendo ogni singolo campione acidificato ad un *range* di concentrazione compreso tra 0.4 - 5 ppm per magnesio, sodio e potassio, e da 1 -20 ppm per il calcio. I fattori di diluizione variano da 10 a 1250 per i campioni più conduttivi; per questi ultimi, sono stati creati degli intermedi a fattori di diluizione 50. Una volta diluiti i campioni, sono stati preparati gli standard necessari alla taratura dello strumento, partendo da reagenti di grado analitico. Sia nei matracci con i campioni che negli standard sono stati aggiunti un'aliquota di soluzione 1M di lantanio (per rendere minima l'interferenza dei fosfati) e un'aliquota 1M di acido nitrico (per evitare la precipitazione di idrossidi di ferro e manganese). I valori di concentrazione ottenuti sono stati moltiplicati per il fattore di diluizione raggiungendo la concentrazione reale del campione. I campioni che al controllo del bilancio ionico risultavano essere distanti oltre il 5% dalla neutralità ($\sum \text{meq anioni} + \sum \text{meq cationi} \approx 0$) sono stati ripetuti fino a controlli accettabili.

Gli anioni (Cl, Br, SO₄ e NO₃) sono stati analizzati, come già detto, partendo dai campioni raccolti e non stabilizzati con acido nitrico. Anche in questo caso, per portare i valori degli elementi all'interno della retta di calibrazione si è resa necessaria una diluizione dei campioni analoga alla precedente, ma non è stata fatta nessuna aggiunta.

Lo strumento utilizzato è un cromatografo ionico *Metrohm 850 Professional*. I valori di soluzione ottenuti sono stati, anche in questo caso, moltiplicati per il fattore di diluizione e utilizzati nel calcolo del bilancio ionico. I campioni che restituivano valori sopra il 5% di scarto sono stati ripetuti fino a percentuali accettabili.

15.6.4 Metodologie di analisi isotopiche (Università di Amsterdam)

I campioni di acquifero raccolti per le analisi isotopiche non sono stati sottoposti a nessuna fase di preparazione o diluizione.

Gli isotopi stabili di idrogeno e ossigeno ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) sono stati analizzati sui 229 campioni di acque sotterranee e superficiali raccolte nel mese di dicembre, presso il laboratorio isotopico VU-FALW della *Vrije Universiteit Amsterdam* (Olanda), attraverso il metodo TC-EA. I campioni sono stati analizzati con uno spettrometro di massa *Thermo Finnigan Delta XP* fornito del forno per la pirolisi. Un volume di campione pari a 0.2 microlitri, una volta iniettato nello strumento, viene trasportato mediante il *gas carrier* di He, all'interno della fornello ad una temperatura di 1400°C. In tali condizioni, nel reattore si ha l'immediata gassificazione di H e O; L'idrogeno diventa H_2 , mentre l'O reagisce rapidamente con una graniglia vetrosa di carbonio per dare CO.

A questo punto H_2 e CO sono separati dagli altri prodotti di pirolisi, mediante la colonna gas cromatografica e di seguito analizzato con lo spettrometro di massa. La separazione in GC dei gas è sufficiente per analizzare, ad ogni singola iniezione, entrambi gli elementi, applicando un rapido spostamento di un magnete che modifica le impostazioni di lavoro.

I risultati ottenuti hanno riproducibilità migliore di 1.5 per mille (1SD) per $\delta^2\text{H}$ e 0.15 per mille (1SD) per $\delta^{18}\text{O}$. Tutti i risultati sono relativi al V-SMOW (*Vienna - Standard Mean Ocean Water*).

I campioni sono stati misurati in triplice copia e intercalati da standard con valori da -156‰ a -6.5‰ per l'idrogeno e da -21.2‰ a -1.1 ‰ per l'ossigeno.

15.7 Tabelle dati

Tabella 15.9 Dati del campionamento relativo al dicembre 2010 per l'intero acquifero.

sample	E	N	POZZO	Quot a BP (m)	depth	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	HCO 3 ppm	SO4 ppm	Cl ppm	NO 3 ppm	Br ppm	T °C	CE mS/c m	SALI NITY g/l	pH	Eh mV	O2 mg/l	H2S ppm	BI
3P	755407	4927697	Sup	0,00	-0,10	169	86	196	8	531	231	434	49	1	3,6	2,7	1,1	8,12	38,4	12,0	#	-4,5
BAIONA	759673	4935495	lagoon	0,00	-0,10	332	996	7695	296	225	199 8	1515 5	2	51	2,7	41,9	21,9	8,27	125,0	#	#	-3,6
BEV	761602	4913346	Sup	0,00	-0,10	151	51	53	8	465	112	170	42	1	2,4	1,5	0,6	8,35	24,5	10,6	#	-4,1
BEVANELLA	762360	4913799	Sup	0,00	-0,10	128	51	57	4	435	239	126	26	1	2,1	1,8	0,7	8,25	-34,4	11,4	#	-10,1
CAV	749304	4927967	Sup	0,00	-0,10	117	288	2007	53	727	218	4048	1	16	6,8	15,7	7,5	7,88	60,0	5,7	#	-5,1
CE	752822	4930325	Sup	0,00	-0,10	205	120	231	8	579	472	289	22	1	1,4	3,4	1,5	8,14	40,3	12,5	#	4,3
CER	747703	4907413	Sup	0,00	-0,10	42	11	11	2	188	33	20	4	1	2,7	0,4	0,1	8,40	186,0	#	#	-10,7
CHIARO NORD	757560	4934025	lagoon	0,00	-0,10	85	184	1101	47	349	516	2283	1	8	2,6	8,6	3,9	8,65	12,2	#	#	-8,4
COMUNE	757527	4932815	lagoon	0,00	-0,10	61	243	1561	67	336	534	3053	1	10	0,8	11,2	5,2	9,88	70,0	#	#	-5,2
DX RE	751938	4935849	Sup	0,00	-0,10	137	55	95	37	517	188	177	53	1	2,1	1,7	0,7	8,18	45,2	10,5	#	-5,1
EMS1-1	757954	4916761	EMS1	0,50	-6,00	138	115	283	25	801	392	390	4	1	12,6	3,2	1,4	7,70	-129,0	2,6	#	-4,9
EMS1-2	757954	4916761	EMS1	0,50	-9,50	104	257	2319	87	1468	600	3641	1	14	12,7	15,2	7,2	7,65	-157,1	2,5	#	-3,7
EMS1-3	757954	4916761	EMS1	0,50	-18,50	116	265	2151	77	1361	429	3631	1	13	12,8	14,3	6,8	7,55	-156,6	2,9	#	-4,2
EMS-1	757675	4916916	Sup	0,00	-0,10	58	259	1607	51	780	283	2725	1	10	5,6	11,3	5,3	8,69	-2,8	9,7	#	-0,2
EMS-2	757675	4916916	Sup	0,00	-0,10	58	262	1633	51	812	286	2718	1	9	5,6	11,3	5,2	8,68	-0,9	10,2	#	0,4
EMS-3	757675	4916916	Sup	0,00	-0,10	58	257	1595	51	781	290	2735	1	10	5,9	11,2	5,2	8,74	7,9	10,2	#	-0,7
FG	759215	4916511	Sup	0,00	-0,10	170	59	32	4	557	174	100	34	1	2,2	1,5	0,6	8,27	-1,5	10,4	#	-4,2
FU	756154	4921279	Sup	0,00	-0,10	96	30	2	2	326	95	28	9	1	4,3	0,7	0,3	8,36	22,5	10,4	#	-5,2
LAM	752195	4933007	Sup	0,00	-0,10	81	25	27	6	418	86	35	6	1	3,5	0,7	0,3	8,38	41,5	11,5	#	-13,4
MARE	761437	4932632	MARE	0,00	-0,10	292	837	6386	240	242	167 2	1230 2	4	44	4,8	38,9	20,2	8,26	51,0	10,7	#	-2,5
MF1-1	765361	4916283	MF1	2,04	-3,16	405	115 0	9497	328	235	228 1	1868 2	1	67	12,0	47,9	25,4	7,69	-163,0	#	#	-3,8
MF1-5	765361	4916283	MF1	2,04	-1,16	230	640	5750	217	274	178 5	1089 4	1	38	13,3	30,3	15,3	7,80	-131,1	#	#	-4,4

MF1-6	765361	4916283	MF1	2,04	-0,66	42	65	950	41	285	251	1338	4	6	12,5	6,0	2,7	8,12	-144,0	#	#	2,0
MF2-2	765306	4916250	MF2	1,62	-3,08	338	968	6500	250	219	179	1321	1	46	12,5	36,5	18,8	7,45	-158,0	#	#	-3,6
MF2-7	765306	4916250	MF2	1,62	-0,61	458	464	3580	91	306	131	7189	1	25	12,0	23,0	11,3	7,64	-85,6	#	#	-3,6
MF2-8	765306	4916250	MF2	1,62	-0,11	335	71	516	10	303	165	1384	1	5	10,3	4,7	2,0	7,66	-44,7	#	#	-2,5
MF3-1	765206	4916144	MF3	1,15	-4,01	534	114	5101	209	293	185	1128	1	37	12,8	33,0	16,9	7,29	-159,0	#	#	-2,0
MF3-6	765206	4916144	MF3	1,15	-1,51	53	71	1340	23	743	356	1898	1	6	12,5	8,0	3,7	7,81	-171,6	#	#	-4,2
MF3-8	765206	4916144	MF3	1,15	-0,51	40	33	441	14	958	70	297	3	1	9,7	2,9	1,2	7,77	-133,4	#	#	-2,7
P10N-1	759592	4932644	P10N	0,55	-0,42	571	149	1111	374	507	224	2111	5	72	12,6	52,3	28,0	7,33	-38,0	8,1	#	-0,5
P10N-2	759592	4932644	P10N	0,55	-4,02	542	150	1116	368	548	197	2147	1	69	15,0	52,3	28,0	7,43	-136,1	5,7	#	-0,9
P10N-3	759592	4932644	P10N	0,55	-8,02	381	167	1269	390	657	73	2491	1	75	15,0	58,1	31,6	7,43	-166,0	5,4	#	0,2
P10S-1	759209	4915518	P10S	-1,70	-3,90	238	318	1865	73	577	106	3177	1	11	12,4	14,2	6,7	7,38	-180,0	3,2	0,02	-0,2
P10S-2	759209	4915518	P10S	-1,70	-8,90	234	310	1824	70	580	115	3103	1	11	12,9	14,0	6,6	7,47	-149,0	6,2	0,00	-1,2
P10S-3	759209	4915518	P10S	-1,70	-13,40	258	389	2401	86	660	110	4214	1	14	13,6	17,5	8,4	7,36	-186,0	4,6	0,03	-0,4
P11N-1	753140	4932514	P11N	1,98	-0,61	178	623	5114	157	1515	1	9345	6	27	14,0	28,1	14,1	7,31	-118,5	4,2	#	-0,4
P11N-2	753140	4932514	P11N	1,98	-5,61	202	611	4779	166	1618	4	8723	1	24	14,4	26,1	13,0	7,32	-408,9	6,8	0,14	-0,1
P11N-3	753140	4932514	P11N	1,98	-13,61	121	619	5500	180	1509	1	9819	1	28	14,4	28,6	14,4	7,63	-276,0	0,7	0,00	-0,2
P12N-1	752920	4930257	P12N	1,28	-1,73	263	130	91	3	838	290	387	1	1	15,6	2,1	0,9	7,12	-184,2	1,4	#	-4,8
P12N-2	752920	4930257	P12N	1,28	-4,58	230	214	708	30	922	457	1456	1	5	14,9	6,4	2,9	7,24	-183,0	1,8	#	-4,1
P12N-3	752920	4930257	P12N	1,28	-9,58	150	663	5068	125	839	38	9807	3	27	14,3	27,0	13,5	7,53	-182,0	1,0	0,00	-1,0
P12N-4	752920	4930257	P12N	1,28	-14,58	134	721	6766	146	857	5	1147	21	31	14,4	29,8	15,0	7,63	-187,0	1,8	#	3,6
P12S-1	762568	4915303	P12S	1,00	-0,88	126	121	428	22	456	160	997	4	4	10,1	4,8	2,1	6,12	200,0	2,2	#	-4,9
P12S-2	762568	4915303	P12S	1,00	-4,38	142	207	722	36	504	240	1717	1	6	12,4	7,3	3,3	6,16	31,4	2,4	#	-4,5
P12S-3	762568	4915303	P12S	1,00	-8,38	102	192	1348	55	556	316	2588	1	10	12,2	10,6	4,9	6,14	-50,0	1,7	#	-4,7
P12S-4	762568	4915303	P12S	1,00	-12,88	157	448	3612	110	794	821	6733	1	26	12,3	23,7	11,7	6,12	-39,5	1,5	#	-3,7
P13N-1	761766	4927310	P13N	2,17	-0,89	332	272	2422	37	422	669	4752	4	17	12,8	15,9	7,6	7,65	-24,0	6,2	#	-3,3

P13N-2	761766	4927310	P13N	2,17	-6,49	308	892	6051	138	404	846	1253 7	1	44	11,9	33,8	17,3	7,60	-171,3	6,8	#	-3,1
P13S-1	761463	4914638	P13S	1,17	-2,33	125	61	585	16	658	279	865	1	3	12,9	4,7	2,1	7,45	-18,4	3,0	#	-5,0
P13S-2	761463	4914638	P13S	1,17	-5,33	171	157	736	31	535	355	1585	1	5	12,6	7,2	3,2	7,49	-139,5	2,5	#	-5,8
P13S-3	761463	4914638	P13S	1,17	-11,33	176	148	738	30	535	364	1507	1	5	12,5	7,0	3,1	7,47	-139,5	2,5	#	-4,5
P13S-4	761463	4914638	P13S	1,17	-16,33	144	473	2718	90	838	482	5396	1	18	12,5	20,2	9,9	7,42	-223,5	2,8	0,05 3	-2,8
P14N-1	760792	4926497	P14N	0,51	-1,03	212	126	767	59	793	97	1523	1	6	10,5	5,5	2,4	7,46	-113,5	7,5	#	-2,0
P14N-2	760792	4926497	P14N	0,51	-4,13	184	306	2350	97	751	64	4382	1	16	12,9	13,0	6,1	7,58	-160,3	3,5	#	0,6
P14N-3	760792	4926497	P14N	0,51	-6,13	161	378	2982	112	749	57	5991	1	20	13,8	16,5	7,9	7,64	-173,9	2,4	#	-3,1
P14N-4	760792	4926497	P14N	0,51	-24,13	118	715	5983	157	565	1	1171 5	1	45	13,9	30,6	15,5	7,63	-176,5	1,6	#	-1,7
P14S-1	762477	4913842	P14S	1,60	-0,70	31	25	175	11	356	110	154	30	1	10,3	1,7	0,7	8,30	-33,6	2,9	#	-6,0
P14S-2	762477	4913842	P14S	1,60	-7,80	32	33	200	11	323	105	191	24	1	13,9	2,0	0,8	8,27	-34,8	3,0	#	0,1
P14S-3	762477	4913842	P14S	1,60	-13,30	30	31	191	12	342	103	175	23	1	14,7	1,9	0,8	8,33	-36,8	2,0	#	-1,3
P14S-4	762477	4913842	P14S	1,60	-20,30	137	265	2021	2	446	594	3691	10	12	14,6	16,5	7,9	7,84	-42,8	3,1	0,00 7	-3,1
P15N-1	754506	4926583	P15N	0,20	-1,55	193	431	2924	59	962	190	4922	1	18	12,3	19,0	9,2	7,67	-153,4	6,2	0,00 0	4,5
P15N-2	754506	4926583	P15N	0,20	-3,05	213	523	3520	75	970	122	6262	1	22	13,1	23,7	11,7	7,69	-169,2	6,0	#	3,3
P15N-3	754506	4926583	P15N	0,20	-5,55	244	643	4425	99	1042	53	8148	1	28	12,8	27,4	13,8	7,77	-169,9	8,2	#	2,3
P15N-4	754506	4926583	P15N	0,20	-10,55	214	863	5915	143	983	8	1084 9	1	36	13,0	32,4	16,5	7,82	-188,7	5,4	#	3,0
P15N-5	754506	4926583	P15N	0,20	-15,55	217	872	5840	144	993	3	1102 4	1	38	13,4	34,0	17,4	7,80	-191,1	7,3	0,00 2	1,9
P15S-1	765657	4914924	P15S	1,54	-0,21	376	678	4809	163	421	182 0	9095	1	29	12,3	25,5	12,7	7,35	-116,0	0,6	#	-2,3
P15S-2	765657	4914924	P15S	1,54	-2,81	503	110 3	8135	198	277	208 7	1677 1	1	57	13,7	43,6	22,9	7,31	-172,0	0,5	#	-4,7
P15S-3	765657	4914924	P15S	1,54	-4,81	561	115 5	8113	179	275	222 9	1688 0	1	58	13,2	45,1	23,8	7,27	-174,5	1,2	#	-4,7
P15S-4	765657	4914924	P15S	1,54	-6,81	532	113 0	8096	191	280	211 5	1676 9	1	52	13,3	43,2	22,7	7,32	-177,3	1,1	#	-4,6
P16N-1	763214	4921836	P16N	0,88	-0,32	144	54	139	6	484	167	276	5	1	12,6	1,9	0,8	7,50	-120,4	3,5	#	-4,0
P16N-2	763214	4921836	P16N	0,88	-3,62	125	52	156	7	454	137	230	3	1	14,1	1,8	0,7	7,44	-155,0	3,7	#	1,8
P16N-3	763214	4921836	P16N	0,88	-6,62	97	169	1260	32	494	60	2059	1	9	14,3	8,9	4,1	7,66	-180,0	4,8	#	4,8
P16S-1	766100	4912892	P16S	1,11	-3,21	350	380	2313	59	868	118 3	4442	1	16	12,2	17,1	8,2	5,92	360,5	1,9	#	-4,3

P16S-2	766100	4912892	P16S	1,11	-5,21	352	386	2357	58	834	114 3	4652	1	16	12,6	17,2	8,3	6,00	185,0	1,7	#	-4,8
P16S-3	766100	4912892	P16S	1,11	-7,21	342	382	2339	57	845	117 2	4581	1	16	12,5	17,2	8,3	6,06	135,0	1,7	#	-5,0
P16S-4	766100	4912892	P16S	1,11	-14,21	335	382	2323	59	850	116 1	4660	1	16	13,0	17,3	8,3	6,01	140,0	1,9	#	-5,9
P17N-1	760806	4921583	P17N	1,32	-1,14	17	52	822	26	638	3	1137	1	4	14,3	5,2	2,3	8,64	-147,6	4,4	#	-1,3
P17N-2	760806	4921583	P17N	1,32	-3,14	18	52	826	27	641	0	1147	1	5	14,7	5,1	2,3	8,63	-205,0	1,5	#	-1,3
P17N-3	760806	4921583	P17N	1,32	-7,14	27	102	1380	40	714	4	2138	1	8	14,2	8,4	3,8	8,46	-184,3	3,5	#	-1,0
P17N-4	760806	4921583	P17N	1,32	-14,14	39	174	2185	59	670	6	3632	1	13	14,3	13,1	6,1	8,38	-173,6	4,2	#	-0,4
P17S-1	764292	4912790	P17S	1,17	-1,06	131	33	45	4	483	88	92	47	1	10,3	1,3	0,5	7,80	-33,1	3,2	#	-7,7
P17S-2	764292	4912790	P17S	1,17	-5,86	226	162	1036	34	722	216	2175	1	7	13,3	10,4	4,8	7,55	-34,3	1,9	#	-4,9
P17S-3	764292	4912790	P17S	1,17	-9,86	225	188	1250	41	790	246	2506	1	9	13,1	11,9	5,5	7,53	-34,7	2,5	#	-4,0
P17S-4	764292	4912790	P17S	1,17	-14,36	226	202	1395	44	805	261	2675	1	9	13,2	12,8	6,0	7,54	-35,5	2,6	#	-2,4
P18N-1	758918	4921833	P18N	0,84	-0,34	34	56	270	33	475	55	421	1	1	15,3	1,9	0,8	8,26	-146,8	3,0	#	-5,0
P18N-2	758918	4921833	P18N	0,84	-3,54	35	54	271	33	488	57	405	1	1	14,9	2,0	0,8	8,35	-194,8	2,5	#	-4,6
P18N-3	758918	4921833	P18N	0,84	-9,54	19	65	615	31	506	62	941	1	4	14,6	4,2	1,8	8,52	-184,9	3,5	#	-3,3
P18N-4	758918	4921833	P18N	0,84	-15,54	22	129	1424	43	583	16	2398	1	9	14,4	9,3	4,2	8,51	-177,4	4,8	#	-1,9
P18S-1	766485	4910965	P18S	2,07	-2,34	120	112	598	81	735	350	929	1	1	13,4	3,8	1,7	6,20	-129,3	3,4	0,01 2	-2,6
P18S-2	766485	4910965	P18S	2,07	-4,34	141	121	485	44	716	565	705	1	1	13,2	4,4	1,9	5,90	-126,0	4,9	#	-5,1
P18S-3	766485	4910965	P18S	2,07	-6,34	146	316	3118	81	904	102 4	4874	1	17	13,2	16,9	8,1	5,92	-133,5	5,0	#	-0,8
P18S-4	766485	4910965	P18S	2,07	-8,34	124	398	4166	102	931	867	6682	1	24	13,3	21,9	10,8	5,91	-142,8	4,5	#	0,1
P19S-1	764794	4910510	P19S	1,17	-2,26	145	163	128	37	504	396	479	1	1	12,0	2,2	0,9	6,19	-94,1	2,7	#	-5,1
P19S-2	764794	4910510	P19S	1,17	-4,26	130	153	115	35	510	394	382	1	1	13,0	2,2	0,9	5,88	-129,9	4,1	#	-4,5
P19S-3	764794	4910510	P19S	1,17	-7,26	129	156	138	37	508	396	428	1	1	12,7	2,2	0,9	5,90	-131,1	3,1	#	-4,6
P19S-4	764794	4910510	P19S	1,17	-10,26	74	89	607	28	475	370	732	1	1	12,8	3,9	1,7	5,90	-170,1	1,7	#	2,6
P1N-1	756807	4934366	P1N	1,94	-0,15	131	142	620	10	1003	48	1076	3	4	13,2	5,2	2,3	7,69	-66,2	2,1	#	-2,6
P1N-2	756807	4934366	P1N	1,94	-1,65	134	145	607	9	964	44	1056	1	4	13,5	10,4	4,8	7,76	-125,2	1,5	#	-1,4
P1N-3	756807	4934366	P1N	1,94	-4,65	142	247	1522	30	971	49	2444	1	8	13,5	11,0	5,1	7,74	-120,0	2,3	#	4,6
P1N-4	756807	4934366	P1N	1,94	-6,65	154	274	1466	34	941	41	2557	1	8	13,3	11,0	5,1	7,74	-120,0	1,8	#	3,5
P1N-5	756807	4934366	P1N	1,94	-8,65	153	274	1465	35	965	39	2499	1	7	13,0	11,0	5,1	7,71	-126,0	1,4	#	4,2
P1S-1	764351	4919175	P1S	0,36	-1,64	176	809	5673	192	431	35	1032 7	1	47	10,2	35,8	18,4	6,01	-160,5	4,8	#	4,4

P1S-2	764351	4919175	P1S	0,36	-6,64	167	969	7220	211	828	13	1475 1	1	53	11,6	38,8	20,2	6,80	-133,8	6,2	#	-2,8
P1S-3	764351	4919175	P1S	0,36	-18,64	170	101 1	7447	226	857	1	1521 9	1	51	12,2	38,9	20,2	7,02	-168,6	3,5	#	-2,6
P1S-4	764351	4919175	P1S	0,36	-21,14	177	100 4	7255	211	853	1	1489 8	1	50	12,5	38,6	20,0	7,03	-177,1	2,4	#	-2,7
P2N-1	760668	4933233	P2N	1,64	-0,76	42	253	2577	81	999	465	4348	1	17	12,9	17,3	8,4	9,36	-79,6	5,2	#	-4,1
P2N-2	760668	4933233	P2N	1,64	-3,01	57	473	4923	144	857	235	9113	1	36	13,4	28,8	14,5	9,44	-96,4	6,8	#	-3,1
P2N-3	760668	4933233	P2N	1,64	-7,01	55	453	4672	136	872	248	8602	1	35	13,4	28,4	14,3	9,52	-97,5	6,0	#	-3,1
P2S-1	764729	4917882	P2S	1,03	-1,74	335	505	4010	123	509	113 5	7143	1	25	8,4	22,2	10,9	5,91	-28,0	4,5	#	0,4
P2S-2	764729	4917882	P2S	1,03	-4,04	422	112 7	8833	304	367	216 8	1664 0	1	61	11,1	43,7	23,0	5,98	-125,5	2,3	#	-1,5
P2S-3	764729	4917882	P2S	1,03	-6,54	418	112 4	8835	307	297	204 1	1674 8	1	59	11,7	44,1	23,2	6,03	-140,5	2,1	#	-1,5
P2S-4	764729	4917882	P2S	1,03	-19,54	417	114 9	9036	309	296	218 3	1719 9	1	57	12,3	43,9	23,0	6,02	-146,2	3,6	#	-1,9
P2S-5	764729	4917882	P2S	1,03	-23,54	409	112 4	8825	308	291	207 5	1715 6	1	54	12,6	43,7	23,0	6,00	-156,5	1,0	#	-2,7
P3N-1	760381	4938527	P3N	0,93	-3,47	419	166	617	16	612	323	1701	1	5	13,2	7,0	3,2	7,05	-127,7	2,7	#	-2,4
P3N-2	760381	4938527	P3N	0,93	-7,47	420	153	559	15	612	348	1620	1	5	13,6	7,0	3,1	7,16	-113,0	5,0	#	-4,0
P3S-1	762751	4917607	P3S	0,51	-2,00	157	475	3632	118	767	777	7144	1	26	10,4	27,0	13,5	7,57	-170,0	6,6	#	-5,2
P3S-2	762751	4917607	P3S	0,51	-7,50	179	573	4467	145	786	888	8597	1	31	11,0	29,9	15,1	7,66	-170,1	5,7	#	-3,8
P3S-3	762751	4917607	P3S	0,51	-10,70	136	456	3632	119	762	649	7036	1	26	11,3	26,7	13,4	7,65	-171,9	5,8	#	-4,5
P3S-4	762751	4917607	P3S	0,51	-16,50	154	460	3376	103	745	646	6423	1	23	12,3	24,4	12,1	7,62	-183,2	4,4	#	-3,0
P3S-5	762751	4917607	P3S	0,51	-20,50	240	753	5596	174	655	121 9	1133 9	1	39	12,4	37,9	19,6	7,47	-165,2	3,6	#	-5,1
P4N-1	758447	4938727	P4N	2,40	-1,18	339	210	1548	37	612	975	2808	48	9	12,9	12,0	5,6	7,33	13,5	5,5	#	-3,7
P4N-2	758447	4938727	P4N	2,40	-2,28	306	276	1969	53	612	106 6	3655	45	12	13,1	15,0	7,1	7,45	-3,5	6,1	#	-4,3
P4N-3	758447	4938727	P4N	2,40	-7,28	180	685	5690	151	974	281	1119 1	65	39	13,1	33,7	17,2	7,60	-33,2	6,4	#	-3,4
P4N-4	758447	4938727	P4N	2,40	-9,78	162	692	6905	160	991	225	1276 8	59	42	13,1	34,7	17,8	7,65	-32,9	7,0	#	-1,7
P4N-5	758447	4938727	P4N	2,40	-28,28	117	884	7638	219	1164	8	1479 1	1	50	13,5	43,2	22,7	7,51	-157,6	3,4	#	-2,4
P4S-1	761715	4917496	P4S	0,29	-1,11	327	146	986	41	852	511	1515	1	6	10,0	7,4	3,3	7,40	-33,1	2,7	#	3,5
P4S-2	761715	4917496	P4S	0,29	-8,11	229	836	6507	197	1081	472	1194 0	1	37	11,3	32,8	16,7	7,44	-177,3	1,3	#	0,5

P4S-3	761715	4917496	P4S	0,29	-14,11	211	863	6719	208	1139	386	1309 0	1	40	12,4	34,0	17,4	7,48	-179,3	1,1	#	-2,2
P4S-4	761715	4917496	P4S	0,29	-16,11	204	872	6790	203	1163	339	1316 1	1	40	12,2	34,6	17,8	7,50	-177,8	1,0	#	-2,0
P4S-5	761715	4917496	P4S	0,29	-21,11	203	888	6669	193	1168	231	1262 7	1	36	12,6	34,8	17,9	7,47	-179,6	1,1	#	-0,3
P5N-1	760460	4936489	P5N	0,77	-0,33	345	812	6120	189	415	119 3	1046 3	1	30	11,8	34,8	17,8	8,09	-138,0	5,5	#	4,1
P5N-2	760460	4936489	P5N	0,77	-4,73	371	104 3	7939	239	330	139 6	1357 0	1	39	13,3	41,7	21,8	7,95	-146,0	5,2	#	4,4
P5N-3	760460	4936489	P5N	0,77	-8,73	362	102 7	8037	235	364	122 3	1399 1	1	36	13,3	39,7	20,6	8,03	-151,0	6,2	#	3,6
P5S-1	760383	4917138	P5S	1,20	-1,57	231	313	1491	56	534	433	2907	56	9	11,6	11,1	5,1	7,63	-129,4	6,1	#	1,4
P5S-2	760383	4917138	P5S	1,20	-5,07	237	589	3244	110	662	575	6238	4	19	12,5	20,4	10,0	7,45	-142,7	1,9	#	1,3
P5S-3	760383	4917138	P5S	1,20	-9,07	227	583	3211	113	648	566	6505	1	20	13,0	20,4	9,9	7,51	-145,6	1,9	#	-1,1
P5S-4	760383	4917138	P5S	1,20	-13,07	235	616	3380	118	656	586	6707	1	20	12,6	21,0	10,3	7,46	-145,8	1,8	#	0,0
P5S-5	760383	4917138	P5S	1,20	-17,07	247	683	3584	130	647	679	7269	1	23	13,2	22,2	10,9	7,51	-143,8	1,4	#	-0,5
P6N-1	757600	4936679	P6N	2,20	-0,57	156	89	712	5	665	118	1276	1	4	13,0	5,8	2,6	7,68	-70,7	7,0	#	-3,3
P6N-2	757600	4936679	P6N	2,20	-3,57	365	312	2012	51	881	169	4360	1	13	13,6	15,8	7,6	7,22	-150,5	5,8	#	-3,1
P6N-3	757600	4936679	P6N	2,20	-8,57	350	436	2500	81	1102	43	5240	1	16	12,7	19,7	9,6	7,40	-170,0	6,5	#	-0,9
P6S-1	758429	4916490	P6S	-0,12	-3,10	349	173	206	39	580	147 8	170	2	1	12,0	3,7	1,6	7,35	-10,0	2,6	#	-4,1
P6S-2	758429	4916490	P6S	-0,12	-9,10	440	552	2705	111	833	157 8	5264	2	19	12,7	17,6	8,5	6,80	-70,0	1,4	0,01 7	-1,9
P6S-3	758429	4916490	P6S	-0,12	-15,10	503	120 3	7792	231	1073	185 7	1473 3	1	51	12,7	44,1	23,2	7,21	-190,0	0,3	0,01 5	-0,4
P7N-1	759833	4935328	P7N	1,83	0,73	547	804	6145	216	408	138 2	1091 3	1	25	11,0	35,4	18,2	8,24	20,0	3,4	#	3,2
P7N-2	759833	4935328	P7N	1,83	-1,67	541	100 2	7630	271	413	156 1	1368 0	1	34	14,6	40,3	21,0	7,78	-93,7	5,2	#	2,6
P7N-3	759833	4935328	P7N	1,83	-3,67	514	879	6635	236	387	139 2	1221 1	1	31	14,6	36,7	19,0	7,79	-98,8	5,6	#	1,6
P7N-4	759833	4935328	P7N	1,83	-6,67	505	963	7423	259	402	153 5	1385 0	1	37	14,6	40,7	21,2	7,71	-101,0	4,8	#	0,5
P8N-1	756932	4935172	P8N	1,93	-1,19	120	117	371	13	604	288	521	5	1	10,8	3,5	1,5	7,32	-33,3	5,2	#	2,2
P8N-2	756932	4935172	P8N	1,93	-3,69	310	750	4232	161	1269	777	8533	1	34	12,6	27,2	13,6	6,94	-108,3	7,9	0,00 2	-2,3
P8N-3	756932	4935172	P8N	1,93	-8,69	398	989	4989	112	1285	822	1049 5	1	35	12,9	28,0	14,1	7,70	-136,8	4,2	#	-2,1

P9N-1	760437	4932363	P9N	0,96	-0,82	50	67	709	34	1126	204	740	1	1	12,8	4,4	1,9	9,51	-89,1	3,9	#	-4,7
P9N-2	760437	4932363	P9N	0,96	-4,82	65	120	924	46	814	159	1494	1	4	13,4	7,1	3,2	9,62	-156,3	5,0	#	-3,9
P9N-3	760437	4932363	P9N	0,96	-9,82	93	504	5485	148	519	16	1043 5	1	43	13,1	32,3	16,5	9,62	-173,0	4,8	0,01 9	-2,6
P9S-1	754369	4916655	P9S	2,89	1,09	178	52	51	11	661	120	100	1	1	11,2	1,3	0,5	8,70	-71,4	4,8	#	-1,7
P9S-2	754369	4916655	P9S	2,89	0,39	178	52	57	10	650	115	107	1	1	11,8	1,4	0,6	8,55	-70,5	6,7	#	-0,6
PIOMBONE	761065	4928476	lagoon	0,00	-0,10	319	936	7244	273	250	190 8	1444 0	1	46	1,8	40,8	21,2	8,42	125,5	#	#	-4,2
PMSV6-1	756590	4928675	PMSV6	0,62	-0,53	853	510	3722	84	640	147 5	6865	1	17	14,1	21,0	10,3	7,03	-119,1	6,5	#	2,8
PMSV6-2	756590	4928675	PMSV6	0,62	-4,53	438	100 5	7980	294	351	174 9	1439 5	1	37	13,8	37,6	19,4	7,24	-156,0	8,2	#	1,2
PMSV6-3	756590	4928675	PMSV6	0,62	-7,53	366	104 7	8073	277	421	174 6	1334 0	1	41	13,1	41,8	21,8	7,37	-157,5	8,5	#	4,8
PMSV6-4	756590	4928675	PMSV6	0,62	-12,03	390	116 6	9064	287	470	154 8	1530 8	1	39	13,1	42,1	22,0	7,39	-147,3	9,6	#	4,5
PMSV6P	756590	4928675	PMSV6	0,62	-14,88	142	911	7867	228	1111	1498 3	1	44	13,3	36,6	18,9	7,70	-148,0	8,3	0,02 0	-1,3	
PMSV7-1	756882	4930638	PMSV7	0,44	-0,77	48	39	560	23	645	158	701	1	5	13,7	3,0	1,3	7,93	-140,5	2,2	#	-4,9
PMSV7-2	756882	4930638	PMSV7	0,44	-4,77	406	114 1	9003	294	451	220 5	1753 2	1	68	13,8	43,3	22,7	7,89	-181,3	4,1	#	-3,3
PMSV7-3	756882	4930638	PMSV7	0,44	-7,77	403	113 2	8884	289	457	207 3	1687 6	1	65	14,0	43,8	23,0	7,88	-192,4	1,7	#	-2,0
PMSV7-4	756882	4930638	PMSV7	0,44	-11,97	457	132 6	1028 0	338	497	198 8	1902 4	1	63	13,8	44,2	23,2	7,93	-185,2	3,6	#	0,1
PMSV7P	756882	4930638	PMSV7	0,44	-24,23	174	752	5975	120	1092	1175 8	1	41	14,5	31,4	16,0	7,80	-180,8	2,7	#	-2,4	
PMSV8-1	757484	4929151	PMSV8	1,00	-0,17	69	70	1213	53	1037	1	1857	1	43	13,0	7,6	3,4	7,71	-90,0	1,0	#	-5,0
PMSV8-2	757484	4929151	PMSV8	1,00	-4,17	89	218	2593	112	601	78	4110	1	6	13,8	14,3	6,8	7,73	-162,0	1,0	#	4,0
PMSV8-3	757484	4929151	PMSV8	1,00	-7,17	391	101 4	7974	348	436	1451 4	1	11	13,3	40,4	21,0	7,41	-155,5	1,3	#	3,8	
PMSV8-4	757484	4929151	PMSV8	1,00	-13,17	513	169 8	1447 0	564	659	223 5	2460 0	1	34	13,4	61,0	33,3	7,48	-165,0	2,3	#	3,7
PMSV8P	757484	4929151	PMSV8	1,00	-20,15	89	100 9	9759	334	1052	1683 4	1	63	14,3	43,3	22,7	7,59	-145,2	6,3	0,00 9	2,7	
PONTAZZO	757711	4930671	lagoon	0,00	-0,10	163	193	1032	40	474	670	2180	14	7	1,6	8,5	3,9	7,96	130,0	#	#	-8,9
V S	764193	4918702	V S	0,41	-1,15	166	54	91	168	687	357	227	117	4	9,5	2,9	1,2	7,70	-37,0	3,1	#	-12,6
PZSV10-1	756657	4932041	PZSV10	1,62	-0,01	207	51	29	2	531	35	264	1	1	12,8	1,4	0,6	7,10	-136,0	6,1	#	-3,3
PZSV10-2	756657	4932041	PZSV10	1,62	-3,51	242	52	34	2	632	1	277	1	1	13,9	1,1	0,4	7,03	-160,5	5,4	#	-0,9

PZSV11-1	756713	4932885	PZSV11	1,78	-0,45	81	13	1	1	245	8	31	1	1	12,7	0,5	0,2	7,94	-7,0	6,9	#	1,2
PZSV11-2	756713	4932885	PZSV11	1,78	-3,35	680	109	207	21	642	31	1391	1	4	14,1	4,5	1,9	7,06	-145,3	8,6	#	1,9
PZSV12-1	757478	4932938	PZSV12	1,47	-1,10	131 5	597	4801	75	389	146 2	9947	2	33	11,0	27,6	13,8	5,61	-123,3	4,6	#	1,2
PZSV12-2	757478	4932938	PZSV12	1,47	-3,80	407	111 6	9631	349	449	167 9	1616 6	1	52	13,1	42,3	22,1	6,67	-226,4	0,2	#	3,9
PZSV16-1	757499	4935466	PZSV16	1,33	-0,78	631	193	1044	9	383	256	2942	1	9	10,8	9,3	4,3	5,86	-143,6	6,1	#	-0,9
PZSV16-2	757499	4935466	PZSV16	1,33	-3,78	284	744	4517	89	360	473	9537	1	32	12,8	25,1	12,5	6,47	-204,9	3,4	#	-2,0
PZSV18-1	755774	4934517	PZSV18	1,20	-0,84	145	75	177	13	815	15	240	3	1	11,7	2,0	0,8	7,35	-121,5	4,3	#	2,2
PZSV18-2	755774	4934517	PZSV18	1,20	-3,84	142	109	427	21	674	18	827	3	1	13,4	2,7	1,2	6,86	-185,5	2,1	#	0,5
PZSV19-1	757664	4936256	PZSV19	1,83	-0,81	169	173	1309	52	441	531	2472	3	7	12,0	8,5	3,9	6,10	-172,9	6,3	#	-4,3
PZSV19-2	757664	4936256	PZSV19	1,83	-3,31	180	500	3195	159	158	662	6377	5	19	13,1	19,2	9,3	6,11	-162,3	3,4	#	-0,9
PZSV21-1	758121	4937890	PZSV21	1,54	-2,45	161	61	65	3	448	14	306	1	1	13,1	1,3	0,5	7,69	157,4	7,2	#	-1,0
PZSV21-2	758121	4937890	PZSV21	1,54	-3,65	175	84	200	7	368	2	632	1	1	13,2	3,0	1,3	7,04	169,1	6,6	#	1,2
PZSV23-1	756298	4930656	PZSV23	0,65	-2,35	80	101	359	25	411	173	707	1	1	14,2	2,8	1,2	7,63	68,4	3,4	#	-3,0
PZSV23-2	756298	4930656	PZSV23	0,65	-5,35	59	174	517	51	385	197	1162	1	5	13,8	4,4	1,9	7,98	-154,5	6,7	0,02 0	-2,6
PZSV23-3	756298	4930656	PZSV23	0,65	-8,35	69	202	805	66	379	281	1703	4	6	13,7	6,2	2,8	8,04	-168,1	7,0	#	-2,9
PZSV23-4	756298	4930656	PZSV23	0,65	-9,85	128	377	2702	118	417	716	4513	1	14	13,5	14,5	6,9	7,90	-168,2	8,3	#	2,8
PZSV24-1	756660	4931262	PZSV24	0,65	-1,35	788	377	1319	103	583	27	4259	9	14	16,6	11,9	5,6	7,26	-171,0	0,2	#	-0,1
PZSV24-2	756660	4931262	PZSV24	0,65	-5,35	865	436	1614	117	628	22	5140	4	16	16,1	15,2	7,2	7,49	-152,2	5,0	#	-1,2
PZSV24-3	756660	4931262	PZSV24	0,65	-8,35	865	457	1641	123	594	32	5274	1	17	15,7	15,5	7,4	7,42	-143,5	4,5	#	-1,3
PZSV24-4	756660	4931262	PZSV24	0,65	-10,35	776	455	1592	174	607	30	5138	4	16	15,0	15,3	7,3	7,65	-165,5	5,1	#	-1,9
PZSV26-1	755821	4930393	PZSV26	0,07	-2,00	193	81	82	2	449	249	336	1	1	12,1	1,5	0,6	7,48	-98,8	6,0	#	-5,1
PZSV26-2	755821	4930393	PZSV26	0,07	-6,00	162	139	332	13	665	367	612	1	1	12,7	3,5	1,5	7,71	-177,6	4,1	#	-2,2
PZSV26-3	755821	4930393	PZSV26	0,07	-9,00	264	455	3099	73	1106	8	5885	1	18	12,8	17,6	8,5	7,34	-163,3	6,3	#	0,7
PZSV28-1	756772	4930125	PZSV28	0,69	-1,06	374	271	1017	7	587	356	2604	1	7	12,5	8,7	4,0	7,20	-124,1	2,4	#	-3,0
PZSV28-2	756772	4930125	PZSV28	0,69	-5,56	716	922	3803	68	675	894	8917	1	26	12,8	25,2	12,5	7,18	-161,6	3,2	#	-0,5
PZSV28-3	756772	4930125	PZSV28	0,69	-11,56	737	945	4001	63	642	109 8	9187	1	27	12,6	26,4	13,2	7,16	-155,9	3,7	#	-0,5
PZSV30-1	757429	4930482	PZSV30	0,85	-1,07	899	425	3430	23	512	135 5	6493	1	22	12,1	22,5	11,1	6,90	-19,6	3,8	#	2,1
PZSV30-2	757429	4930482	PZSV30	0,85	-4,27	415	139 1	1149 5	338	597	186 5	1905 9	1	73	12,2	51,9	27,8	7,52	-152,2	3,2	#	4,6
PZSV30-3	757429	4930482	PZSV30	0,85	-8,27	537	139 3	1105 0	256	639	151 4	2022 2	172	70	12,2	54,4	29,3	7,24	-140,2	1,9	#	1,0

PZSV30-4	757429	4930482	PZSV30	0,85	-12,27	418	155 4	1241 0	362	679	162 9	2074 9	170	65	12,6	55,5	30,0	7,40	-158,7	1,8	#	4,8
PZSV31-1	757451	4930176	PZSV31	0,72	-1,19	525	978	7319	212	537	154 7	1309 8	4	37	12,8	38,2	19,8	7,25	-141,7	2,4	#	2,3
PZSV31-2	757451	4930176	PZSV31	0,72	-5,39	420	152 0	1173 0	354	642	180 6	2018 3	131	58	12,7	54,4	29,3	7,54	-234,8	5,8	0,05 6	3,5
PZSV31-3	757451	4930176	PZSV31	0,72	-8,39	319	184 4	1444 0	448	684	204 1	2592 9	184	63	12,5	63,1	34,6	7,36	-209,5	3,2	0,00 3	1,2
PZSV31-4	757451	4930176	PZSV31	0,72	-12,39	372	170 3	1321 0	399	666	187 5	2361 6	153	61	12,8	58,3	31,7	7,35	-242,4	1,5	0,07 9	1,7
PZSV32-1	755740	4929538	PZSV32	0,46	-1,67	278	334	2078	46	723	270	3693	1	10	11,9	14,6	6,9	7,82	-242,5	8,8	#	4,4
PZSV32-2	755740	4929538	PZSV32	0,46	-5,67	305	569	3856	89	1047	262	6777	1	18	12,1	22,4	11,0	7,87	-302,5	6,9	6,70 0	4,0
PZSV32-3	755740	4929538	PZSV32	0,46	-8,67	284	853	6173	143	1200	648	1224 2	1	28	12,3	32,6	16,6	7,77	-204,6	4,5	#	-3,0
PZSV34-1	756816	4929558	PZSV34	1,40	-1,42	652	272	1137	14	579	207	3444	1	11	12,3	12,0	5,6	7,54	-97,5	3,3	#	-3,0
PZSV34-2	756816	4929558	PZSV34	1,40	-4,92	637	292	1467	20	612	74	4034	1	13	12,4	13,9	6,5	7,61	-143,0	3,3	#	-2,2
PZSV34-3	756816	4929558	PZSV34	1,40	-7,92	429	393	2293	63	708	27	5242	1	18	12,2	17,6	8,5	7,77	-168,2	2,6	#	-1,6
PZSV34-4	756816	4929558	PZSV34	1,40	-10,92	158	509	3359	110	882	1	6877	1	24	12,2	22,6	11,1	8,36	-196,8	2,4	#	-2,5
PZSV36-1	757502	4929649	PZSV36	0,82	-1,29	420	808	5969	181	552	285 3	1094 6	1	33	12,1	34,9	17,9	7,85	-110,2	2,8	#	-3,5
PZSV36-2	757502	4929649	PZSV36	0,82	-5,49	581	136 1	1085 0	351	563	371	2291 4	1	72	12,8	54,8	29,5	7,67	-161,7	2,4	#	-3,3
PZSV36-3	757502	4929649	PZSV36	0,82	-8,49	555	150 2	1220 0	386	612	300	2555 9	1	71	12,8	59,4	32,3	7,78	-160,6	2,2	#	-3,2
PZSV36-4	757502	4929649	PZSV36	0,82	-9,99	556	149 6	1210 0	378	597	283	2520 4	1	69	12,7	59,3	32,2	7,88	-163,1	2,3	#	-2,9
PZSV37-1	755776	4928940	PZSV37	0,47	-2,07	91	156	686	18	547	118	1229	1	4	12,0	5,6	2,5	7,99	-223,7	2,9	0,04 7	1,6
PZSV37-2	755776	4928940	PZSV37	0,47	-5,57	198	763	5561	120	1262	5	9694	1	27	12,4	30,0	15,2	7,84	-235,0	2,8	0,49 6	3,8
PZSV37-3	755776	4928940	PZSV37	0,47	-9,57	206	782	5762	128	1300	6	1043 2	1	28	12,2	31,1	15,8	7,87	-219,4	3,1	0,03 4	1,9
PZSV9-1	757177	4932025	PZSV9	1,83	-0,73	212	145	1393	8	393	344	2715	1	8	11,8	8,1	3,7	5,89	-154,2	3,9	#	-4,0
PZSV9-2	757177	4932025	PZSV9	1,83	-3,43	129	370	3749	27	729	533	6152	5	23	12,7	19,7	9,6	6,42	-220,8	2,4	#	0,9
RE	758437	4941589	Sup	0,00	-0,10	72	42	221	9	230	103	449	7	1	4,0	2,2	0,9	8,40	7,4	11,0	#	-5,1
RISEGA	757618	4930944	lagoon	0,00	-0,10	343	102 1	7967	299	246	199 5	1504 7	1	51	4,6	42,1	22,0	8,23	100,0	#	#	-1,7
SAVIO	762937	4911294	Sup	0,00	-0,10	105	30	5	2	338	117	25,0	4	1	3,7	0,8	0,3	8,43	1,1	11,4	#	-4,4

Tabella 15.10 Dati campionamento Dicembre 2010 Transetto

sample	POZZO	depth ground	BI	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	HCO3 ppm	SO4 ppm	Cl ppm	NO3 ppm	Br ppm	T° C	CE mS/cm	SALINITY g/l	pH	Eh mV
P2S-1	P2S	-1,7	0,7	4010,0	123,0	334,7	504,8	509,0	1135,2	7142,6	1,3	24,5	8,4	22,2	10,9	5,9	-28,0
P2S-2	P2S	-4,0	-1,3	8833,0	304,0	421,7	1127,0	367,0	2168,1	16639,9	1,3	61,2	11,1	43,7	23,0	6,0	-125,5
P2S-3	P2S	-6,5	-1,2	8835,0	307,0	417,5	1124,0	297,0	2040,8	16748,0	1,3	58,5	11,7	44,1	23,2	6,0	-140,5
P2S-4	P2S	-19,5	-1,7	9036,0	309,0	417,0	1149,0	296,0	2182,6	17199,5	1,3	56,7	12,3	43,9	23,0	6,0	-146,2
P2S-5	P2S	-23,5	-2,5	8825,0	308,0	409,0	1124,0	291,0	2074,9	17155,9	1,3	54,4	12,6	43,7	23,0	6,0	-156,5
EMS1-1	EMS1	-6,0	-4,5	283,2	25,2	138,0	115,3	801,0	392,4	389,5	4,4	1,3	12,6	3,2	1,4	7,7	-129,0
EMS1-2	EMS1	-9,5	-3,5	2319,0	87,0	104,0	257,0	1468,0	600,0	3641,4	1,4	14,4	12,7	15,2	7,2	7,7	-157,1
EMS1-3	EMS1	-18,5	-3,9	2151,0	77,0	116,0	265,0	1361,0	429,0	3630,8	1,4	13,5	12,8	14,3	6,8	7,6	-156,6
P1S-1	P1S	-1,6	4,6	5672,9	192,1	175,5	809,5	431,0	34,7	10327,1	1,3	46,9	10,2	35,8	18,4	6,0	-160,5
P1S-2	P1S	-6,6	-2,6	7220,0	211,1	166,6	969,1	828,0	12,8	14751,0	1,3	52,6	11,6	38,8	20,2	6,8	-133,8
P1S-3	P1S	-18,6	-2,4	7447,0	226,4	170,2	1011,0	857,0	1,3	15219,0	1,3	51,3	12,2	38,9	20,2	7,0	-168,6
P1S-4	P1S	-21,1	-2,5	7255,0	210,7	176,6	1004,0	853,0	1,3	14898,0	1,3	50,1	12,5	38,6	20,0	7,0	-177,1
P3S-1	P3S	-2,0	-4,7	3632,0	118,0	157,0	475,0	767,0	776,8	7144,1	1,3	26,0	10,4	27,0	13,5	7,6	-170,0
P3S-2	P3S	-7,5	-3,4	4467,0	144,7	179,1	573,0	786,0	888,1	8596,6	1,3	30,7	11,0	29,9	15,1	7,7	-170,1
P3S-3	P3S	-10,7	-4,1	3632,0	119,0	136,4	456,3	762,0	648,7	7036,2	1,3	25,5	11,3	26,7	13,4	7,7	-171,9
P3S-4	P3S	-16,5	-2,5	3376,0	103,4	154,3	460,0	745,0	646,0	6422,6	1,3	22,7	12,3	24,4	12,1	7,6	-183,2
P3S-5	P3S	-20,5	-4,7	5596,0	173,5	240,0	753,0	655,0	1219,2	11338,8	1,3	38,7	12,4	37,9	19,6	7,5	-165,2
P4S-1	P4S	-1,1	4,6	985,5	40,5	326,9	146,2	852,0	510,8	1514,6	1,3	5,7	10,0	7,4	3,3	7,4	-33,1
P4S-2	P4S	-8,1	0,8	6507,0	197,3	228,9	835,6	1081,0	471,6	11939,7	1,3	37,4	11,3	32,8	16,7	7,4	-177,3
P4S-3	P4S	-14,1	-1,9	6719,0	208,3	211,2	862,8	1139,0	386,4	13090,2	1,3	40,4	12,4	34,0	17,4	7,5	-179,3
P4S-4	P4S	-16,1	-1,6	6790,0	203,2	204,0	872,0	1163,0	338,5	13161,1	1,3	39,7	12,2	34,6	17,8	7,5	-177,8
P4S-5	P4S	-21,1	0,0	6669,0	193,1	202,8	888,2	1168,0	230,7	12627,1	1,3	35,8	12,6	34,8	17,9	7,5	-179,6
P5S-1	P5S	-1,6	2,3	1491,0	55,5	230,8	312,8	534,0	432,5	2906,5	56,1	9,4	11,6	11,1	5,1	7,6	-129,4
P5S-2	P5S	-5,1	1,8	3244,0	110,0	236,8	588,9	662,0	574,6	6238,4	4,4	19,4	12,5	20,4	10,0	7,5	-142,7
P5S-3	P5S	-9,1	-0,5	3211,0	113,4	226,6	582,9	648,0	566,4	6504,8	1,3	19,6	13,0	20,4	9,9	7,5	-145,6
P5S-4	P5S	-13,1	0,6	3380,0	117,5	235,1	616,4	656,0	585,7	6707,4	1,3	20,0	12,6	21,0	10,3	7,5	-145,8
P5S-5	P5S	-17,1	0,0	3584,0	129,7	246,8	683,0	647,0	678,6	7268,9	1,3	23,4	13,2	22,2	10,9	7,5	-143,8
P9S-1	P9S	1,1	5,1	50,9	10,5	177,5	52,0	661,0	119,9	99,7	1,3	1,3	11,2	1,3	0,5	8,7	-71,4
P9S-2	P9S	0,4	6,3	56,8	10,1	178,4	52,2	650,0	115,1	107,3	1,3	1,3	11,8	1,4	0,6	8,6	-70,5
P6S-1	P6S	-3,1	-1,6	206,0	39,0	349,0	173,0	580,0	1478,0	170,0	2,4	1,3	12,0	3,7	1,6	7,4	-10,0
P6S-2	P6S	-9,1	-1,3	2705,0	111,0	440,0	552,0	833,0	1577,7	5263,9	2,5	19,3	12,7	17,6	8,5	6,8	-70,0
P6S-3	P6S	-15,1	-0,1	7792,0	231,0	503,0	1203,0	1073,0	1856,9	14732,6	1,3	51,0	12,7	44,1	23,2	7,2	-190,0
PR4	PR4	-1,15	-7,239	91	168	166	54	687	357	227	117	4	9,5	2,9	1,2	7,70	-37,0

Tabella 15.11 Dati campionamento aprile 2011 transetto

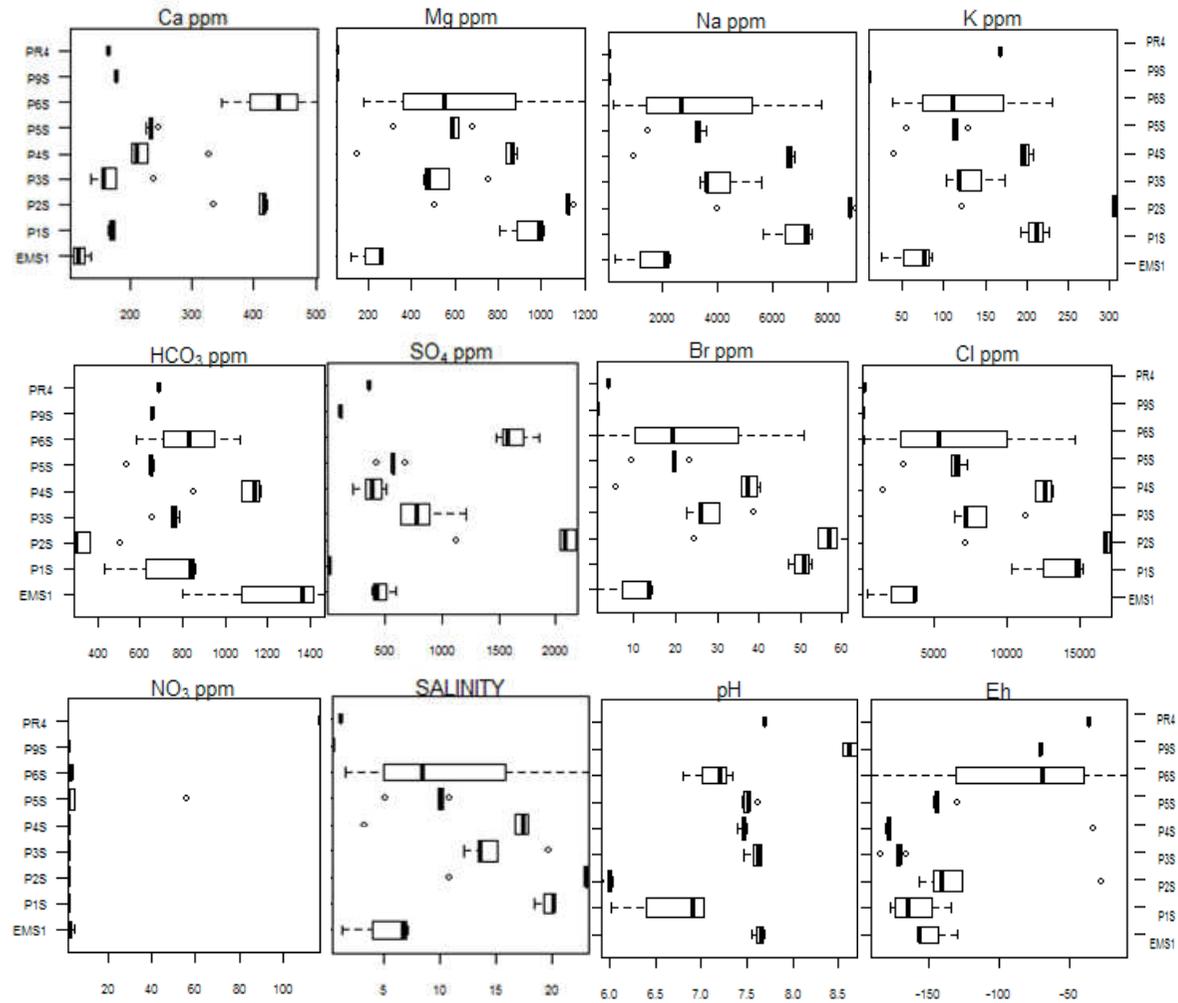
WELL	POZZO	depth_ground	BI	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	HCO3 ppm	SO4 ppm	Cl ppm	NO3 ppm	Br ppm	T° C	CE mS /cm	SALINITY g/l	pH	Eh mV
P9S-1	P9S	1	5	159	23	186	62	572	167	244	15	1	13	2	1	8	-18
P9S-2	P9S	0	5	216	18	156	58	445	145	357	6	1	13	2	1	8	-72
P6S-1	P6S	-3	-2	472	74	333	190	540	1658	492	1	3	15	4	2	7	-68
P6S-2	P6S	-9	-2	5014	186	496	800	900	1644	9915	1	33	16	26	13	7	-133
P6S-3	P6S	-15	0	8255	280	990	1197	956	1998	16063	4	52	16	40	21	7	-210
P5S-1	P5S	-2	-1	2414	96	165	345	692	324	4611	25	15	13	13	6	7	-55
P5S-2	P5S	-5	-1	3196	125	210	483	680	430	6240	1	21	13	17	8	7	-62
P5S-3	P5S	-9	-1	3250	123	207	523	576	442	6476	1	21	14	17	8	7	-75
P5S-4	P5S	-13	-3	3108	119	206	475	652	435	6390	1	21	14	17	8	8	-72
P5S-5	P5S	-17	-1	3247	127	206	503	568	445	6425	1	22	14	17	8	7	-80
P4S-1	P4S	-1	-5	3308	128	228	395	824	370	6787	0	21	13	17	8	7	-96
P4S-2	P4S	-8	-3	7032	241	186	876	936	185	14129	1	48	15	34	18	8	-142
P4S-3	P4S	-14	-4	7079	242	184	878	1036	189	14467	1	47	15	35	18	8	-193
P4S-4	P4S	-16	-6	7058	247	186	881	924	1240	14203	1	48	15	35	18	8	-179
P4S-5	P4S	-21	-4	6837	228	190	868	900	135	14264	1	47	15	34	17	8	-161
P2S-1	P2S	-2	-6	6213	248	346	680	376	1594	12474	1	38	13	31	16	7	-92
P2S-2	P2S	-4	0	8799	362	400	1061	276	1994	15937	1	51	14	43	22	7	-157
P2S-3	P2S	-7	-3	8770	358	389	1053	244	2153	17104	0	56	15	43	22	7	-160
P2S-4	P2S	-20	-3	9072	368	414	1079	288	2283	17654	0	57	15	43	23	7	-170
P2S-5	P2S	-24	-3	9453	365	409	1076	252	2315	18099	1	60	14	43	23	7	-153
P3S-1	P3S	-2	-3	2742	103	99	281	692	180	5066	1	18	15	14	7	8	-141
P3S-2	P3S	-7	-3	2691	100	96	274	712	168	4998	1	18	15	14	6	8	-130
P3S-3	P3S	-11	0	3188	120	110	304	704	242	5561	1	20	15	15	7	8	-80
P3S-4	P3S	-16	-2	2050	78	78	182	704	20	3674	1	14	15	11	5	8	-95
P3S-5	P3S	-20	-3	2009	69	76	187	640	55	3663	0	14	15	10	5	8	-60
EMS1-1	EMS1	-6	-5	472	40	158	136	720	575	734	1	3	17	3	1	7	-160
EMS1-2	EMS1	-10	0	1381	61	38	84	1043	351	1634	1	6	17	7	3	8	-120
EMS1-3	EMS1	-19	-3	2524	71	115	266	1168	403	4263	0	16	17	13	6	7	-127
MAR2_1	MAR2	-2	-1	1348	46	75	124	404	73	2362	1	9	19	7	3	8	-180
MAR2_2	MAR2	-5	-1	3232	85	129	291	350	59	6061	0	21	19	16	8	8	-157
MAR1_1	MAR1	-2	4	64	33	113	20	360	43	117	6	1	16	1	0	8	-12
MAR1_2	MAR1	-5	4	203	63	134	50	360	213	317	15	4	15	2	1	7	-46

Tabella 15.12 Dati campionamento luglio 2012

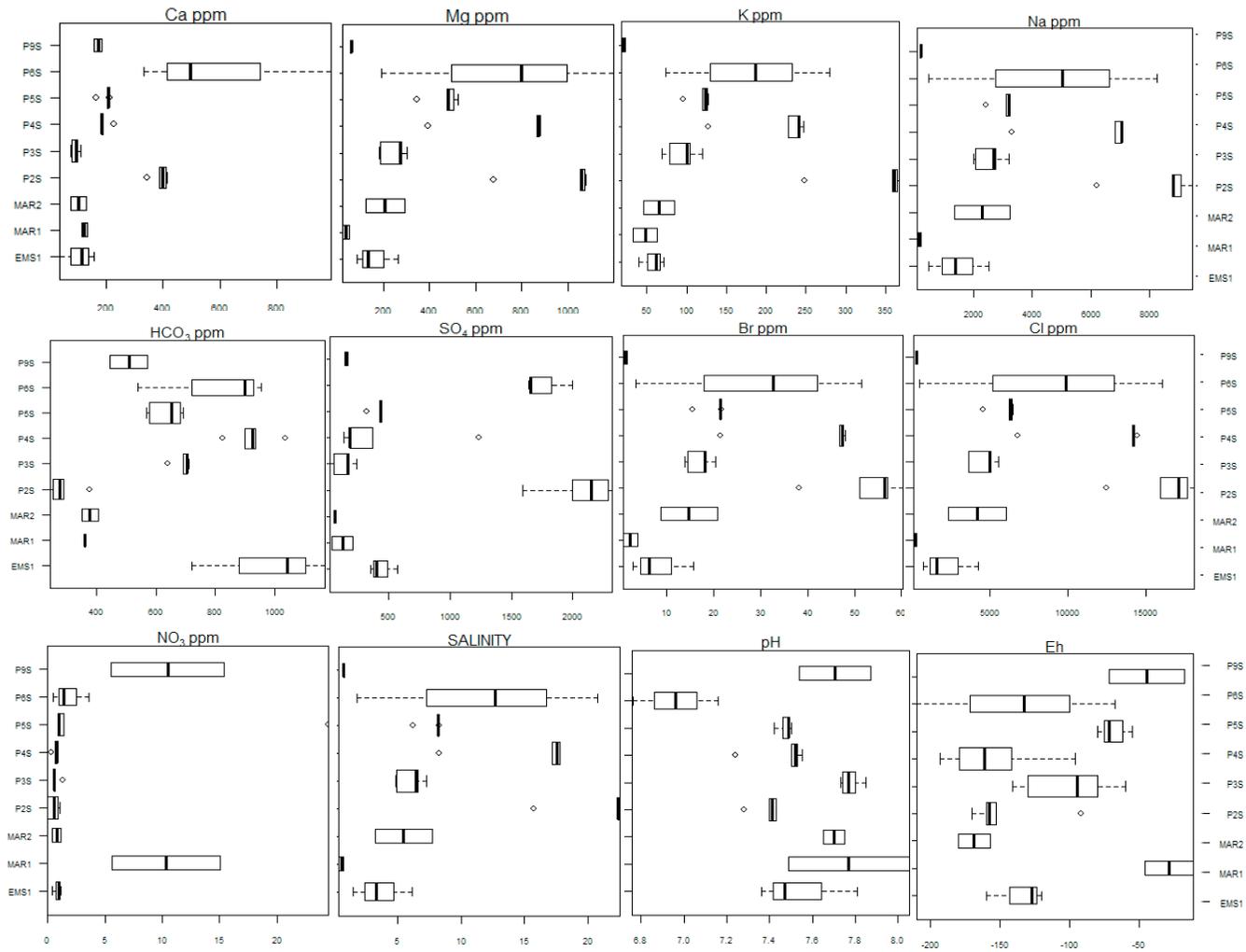
WELL	POZZO	depth_grou nd	BI	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	HCO 3 ppm	SO4 ppm	Cl ppm	NO 3 pp m	Br ppm	T °C	CE mS/cm	SALI NIT Y g/l	pH	Eh mV	Fe Ferro ppm	Fe tot ppm	Ammo nio ppm	fosfati ppm	Solfu ri ppm	Nitri ti ppm
P1S_1	P1S	-1,4	2,4	8350	250	175	1050	640	90	15252	0	46	16	38	25	8	-152	0	6	9	0	0	0
P1S_2	P1S	-2,9	3,9	9050	300	185	1100	560	70	16048	0	49	15	39	26	8	-160	4	11	33	0	0	0
P1S_3	P1S	-4,9	1,4	8750	300	190	1100	540	206	16352	0	50	15	40	26	8	-160	4	11	47	0	0	0
P1S_4	P1S	-19,9	2,0	8750	300	155	1100	548	10	16209	0	49	15	40	26	8	-165	4	5	43	0	0	0
MAR1_1	MAR1	-2,1	-3,7	170	180	214	110	584	390	583	1	2	20	2	1	7	80	0	0	0	0	0	0
MAR1_2	MAR1	-2,9	-1,5	120	130	181	90	520	550	202	1	2	16	2	1	7	51	0	0	0	0	0	0
MAR1_3	MAR1	-3,9	-0,5	200	120	186	110	516	590	341	1	2	17	3	1	8	33	0	0	0	0	0	0
MAR1_4	MAR1	-4,9	-5,0	1560	120	159	220	504	240	3327	1	9	18	9	5	8	-44	0	0	5	0	0	0
MAR1_5	MAR1	-6,9	-2,9	4025	125	115	400	530	190	7680	2	30	18	27	16	8	-132	1	2	6	3	0	0
MAR2_1	MAR2	-1,1	-6,2	100	12	99	38	356	120	213	1	1	21	1	0	8	40	0	0	0	0	0	0
MAR2_2	MAR2	-2,1	-1,9	116	10	99	35	336	96	218	0	1	19	1	0	7	-90	1	2	0	0	0	0
MAR2_3	MAR2	-3,1	-2,0	115	11	105	37	352	99	223	0	1	19	1	1	7	-60	0	0	0	0	0	0
MAR2_4	MAR2	-5,1	-5,0	110	10	101	36	348	96	236	1	1	18	1	1	7	-40	0	1	0	0	0	0
MAR2_5	MAR2	-8,1	-2,9	115	11	107	37	348	102	236	0	1	18	1	1	7	-50	0	1	0	0	0	0
P3S_1	P3S	-3,0	0,0	2075	75	68	200	652	10	3578	0	10	23	11	5	8	-102	1	5	11	3	0	0
P3S_2	P3S	-6,4	-4,6	2050	75	68	200	672	20	3897	0	11	19	11	6	8	-172	1	7	4	20	0	0
P3S_3	P3S	-8,9	-5,4	2050	75	68	200	684	50	3939	0	11	19	11	6	8	-151	2	5	9	10	0	0
P3S_4	P3S	-10,9	2,3	2950	125	85	300	720	115	4924	1	14	19	14	8	8	-133	1	5	12	4	0	0
P3S_5	P3S	-12,9	-3,0	2325	100	68	250	724	40	4353	0	12	18	12	7	8	-140	2	5	10	7	0	0
P3S_6	P3S	-14,9	-4,7	2125	75	110	200	788	10	4059	0	11	18	11	6	8	-165	2	5	10	4	0	0
P3S_7	P3S	-16,9	-5,1	1884	61	75	176	744	75	3500	0	11	18	11	6	8	-155	3	5	11	4	0	0
P3S_8	P3S	-18,6	-3,3	1860	60	74	175	768	150	3250	0	11	18	10	6	8	-130	2	6	10	4	0	0
P3S_9	P3S	-19,4	-1,9	2025	68	77	192	784	150	3458	0	12	18	11	6	8	-142	2	5	10	4	0	0
P3S_10	P3S	-21,9	3,6	2106	70	85	202	740	215	3175	0	13	17	10	6	8	-138	1	5	11	3	0	0
P4S_1	P4S	-2,4	-11,7	1742	70	86	161	780	390	3519	1	8	18	11	6	8	-43	2	22	1	1	0	0
P4S_2	P4S	-3,7	-4,4	6175	182	160	803	1144	600	12317	0	34	17	37	23	8	-114	3	9	40	0	0	0
P4S_3	P4S	-4,9	-3,9	6560	201	186	904	1224	750	13048	0	38	17	37	24	8	-120	1	10	63	0	0	0
P4S_4	P4S	-6,4	-3,7	7150	208	187	926	1164	750	14100	0	39	18	37	22	8	-118	2	10	38	0	0	0
P4S_5	P4S	-16,4	-5,1	7005	216	189	953	1152	750	14400	0	42	16	38	24	8	-100	3	9	34	0	0	0

15.8BOX PLOT Transetto

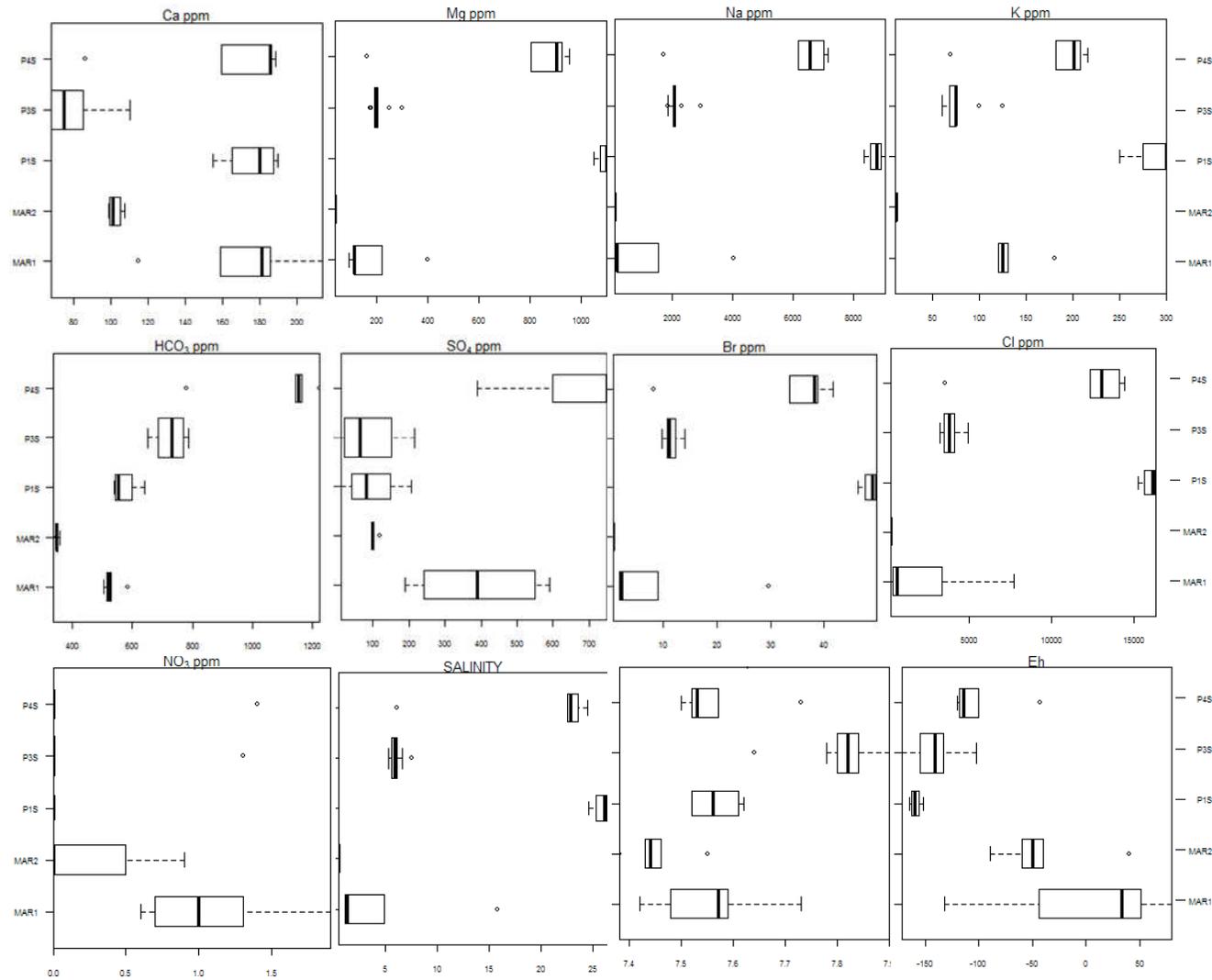
BOXPLOT Transetto dicembre 2010



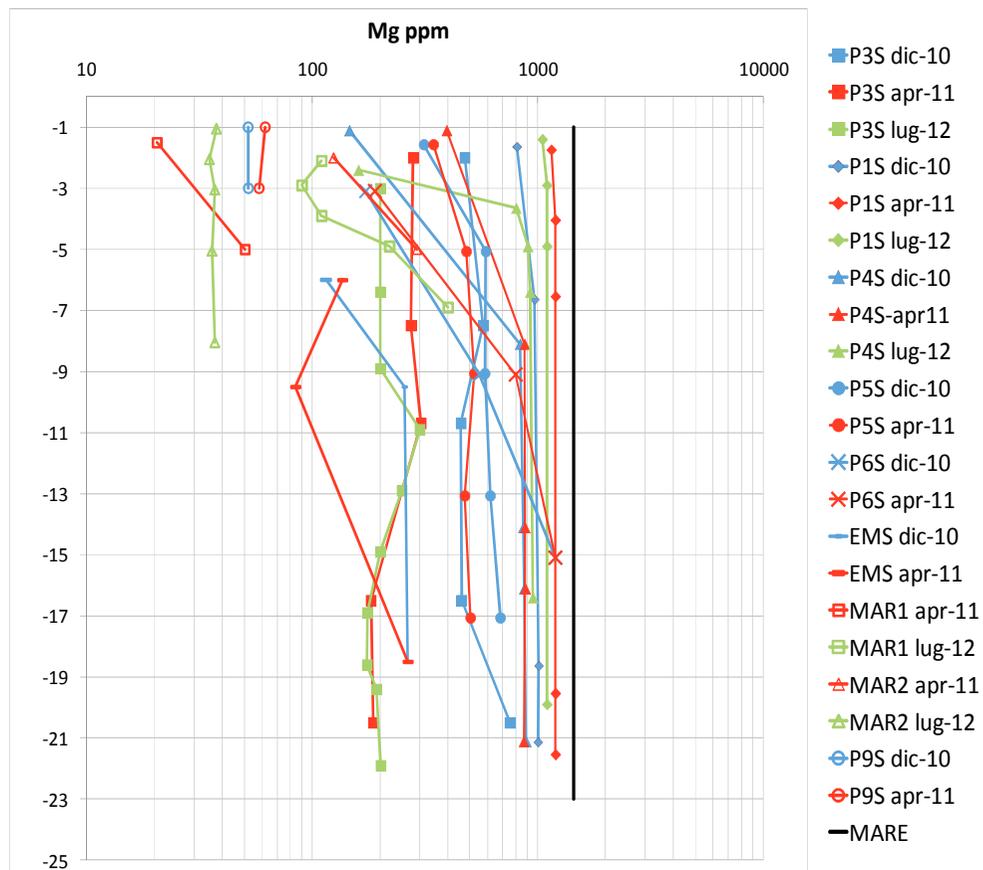
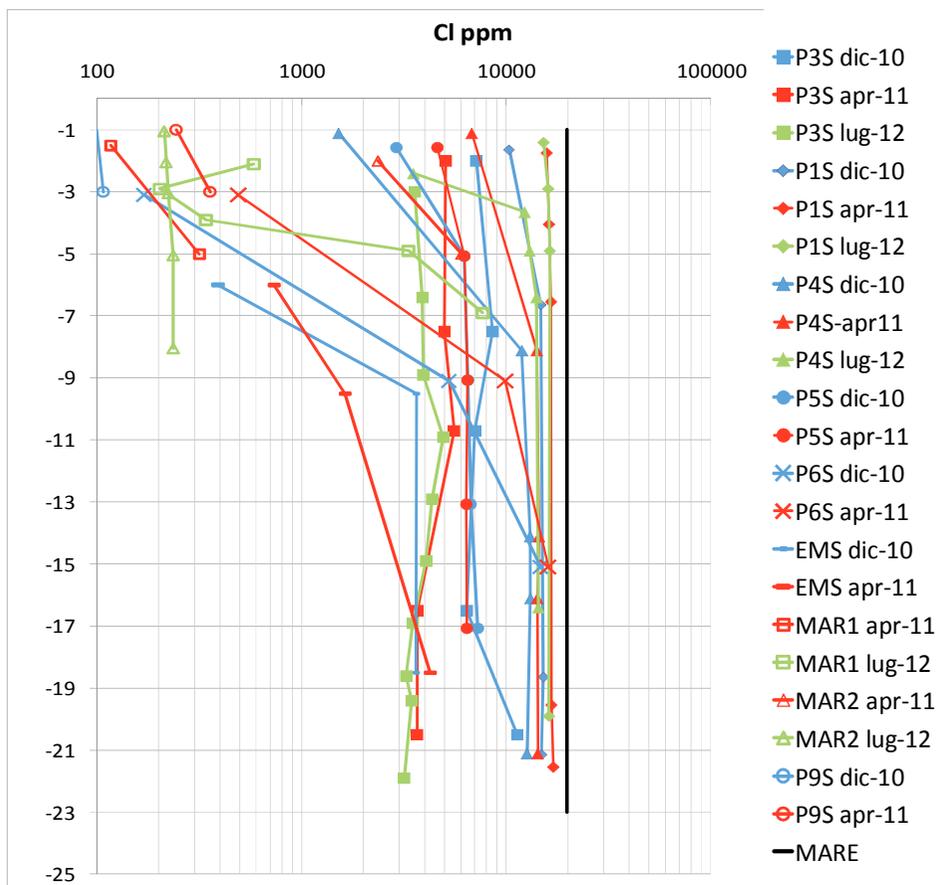
BOXPLOT Transetto aprile 2011

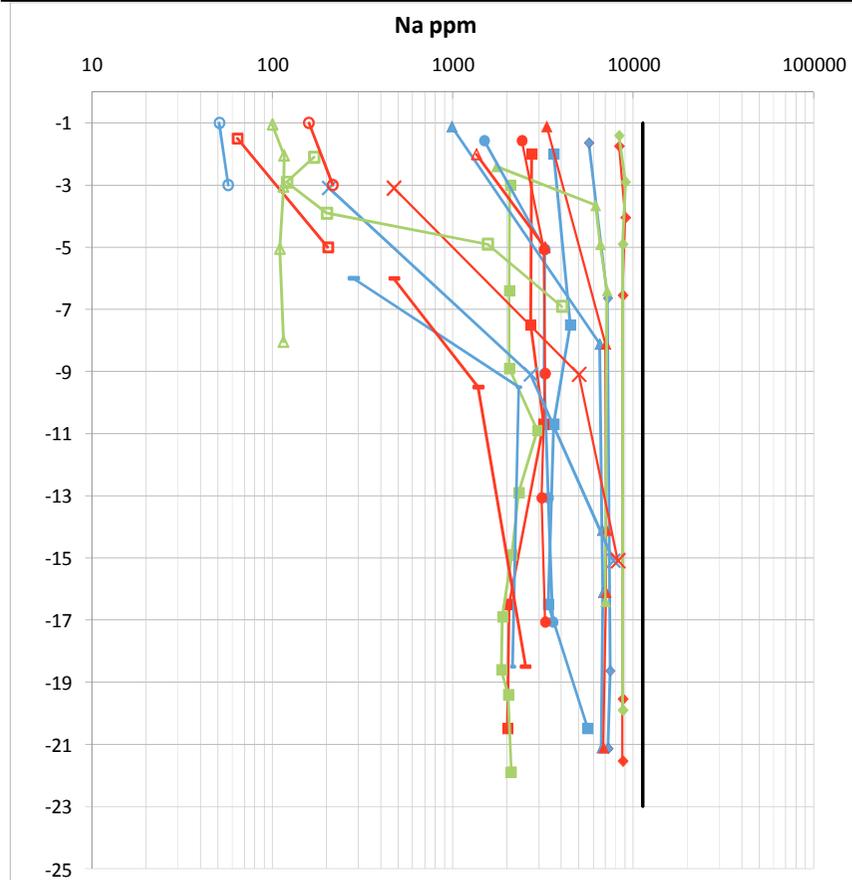


BOXPLOT Transetto luglio2012

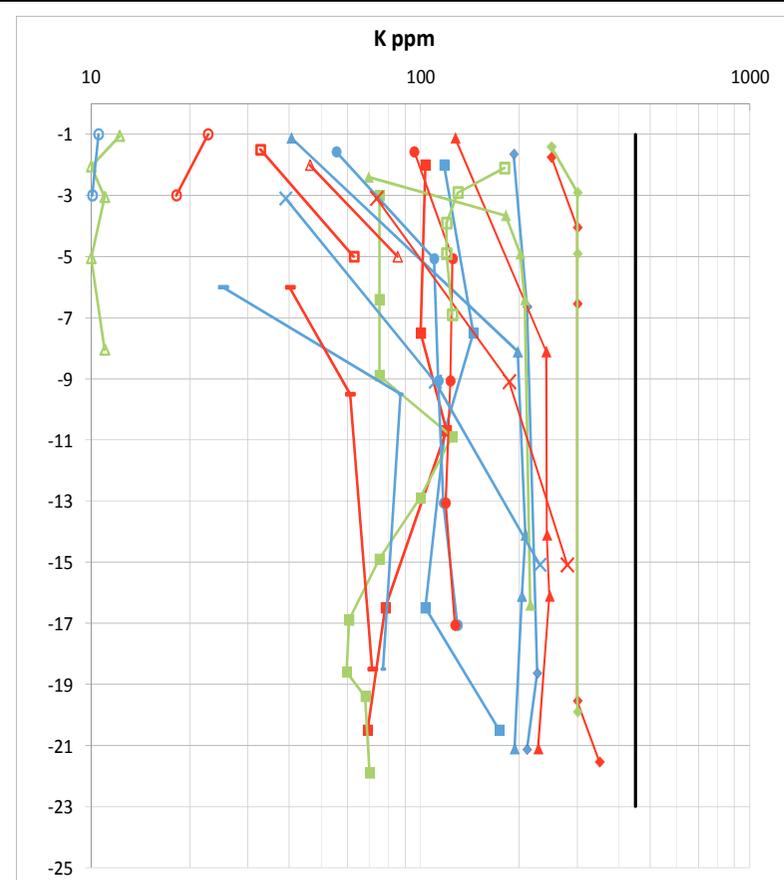


15.9 Profili

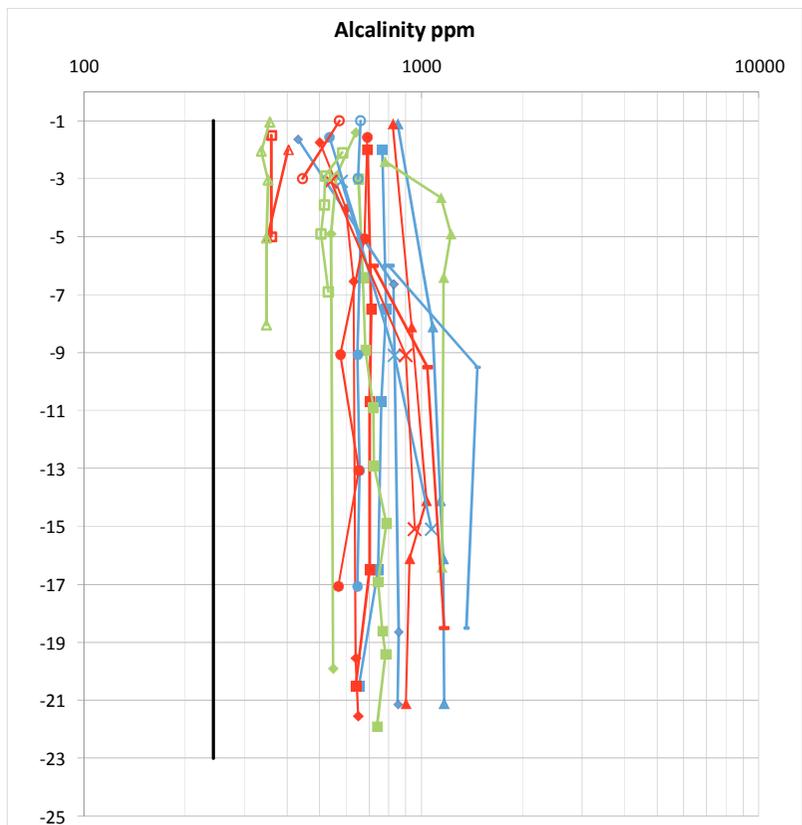




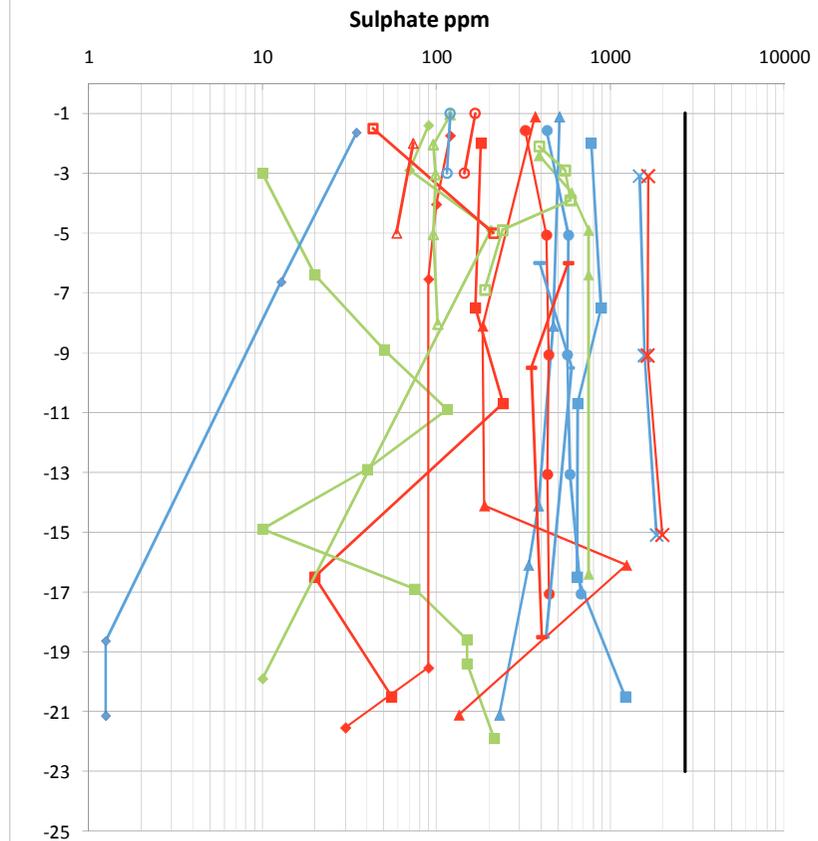
- P3S dic-10
- P3S apr-11
- P3S lug-12
- ◆ P1S dic-10
- ◆ P1S apr-11
- ◆ P1S lug-12
- ▲ P4S dic-10
- ▲ P4S apr-11
- ▲ P4S lug-12
- P5S dic-10
- P5S apr-11
- × P6S dic-10
- × P6S apr-11
- EMS dic-10
- EMS apr-11
- MAR1 apr-11
- MAR1 lug-12
- ▲ MAR2 apr-11
- ▲ MAR2 lug-12
- P9S dic-10
- P9S apr-11
- MARE



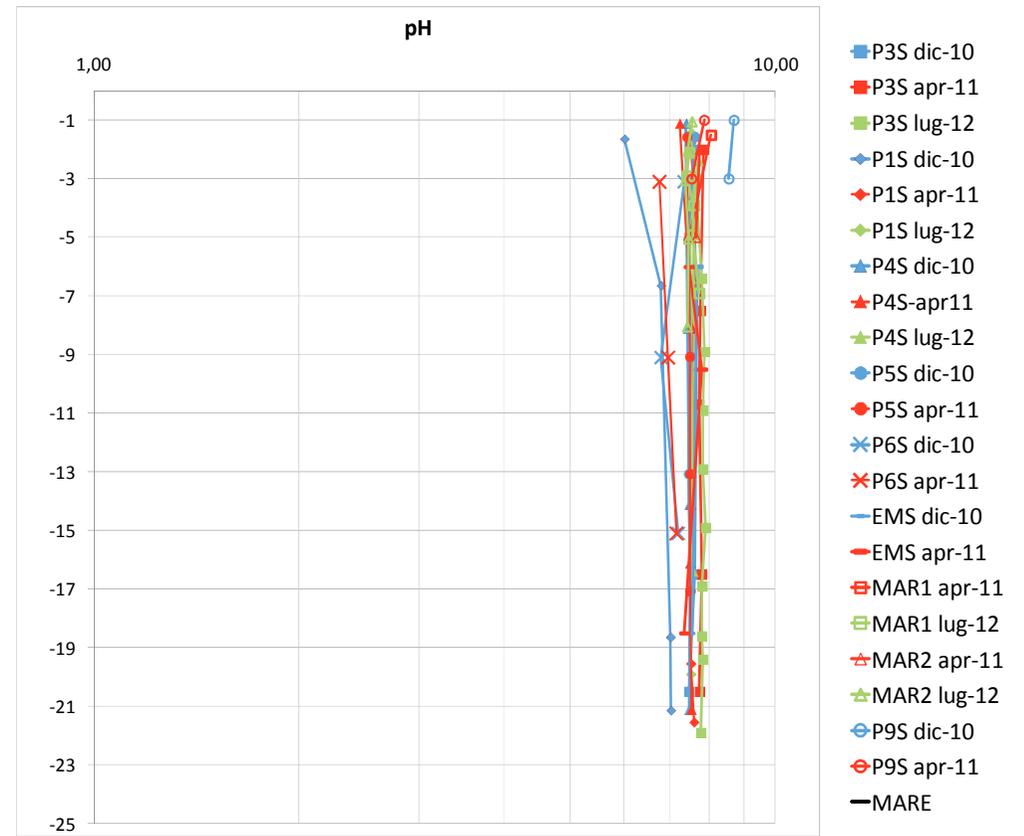
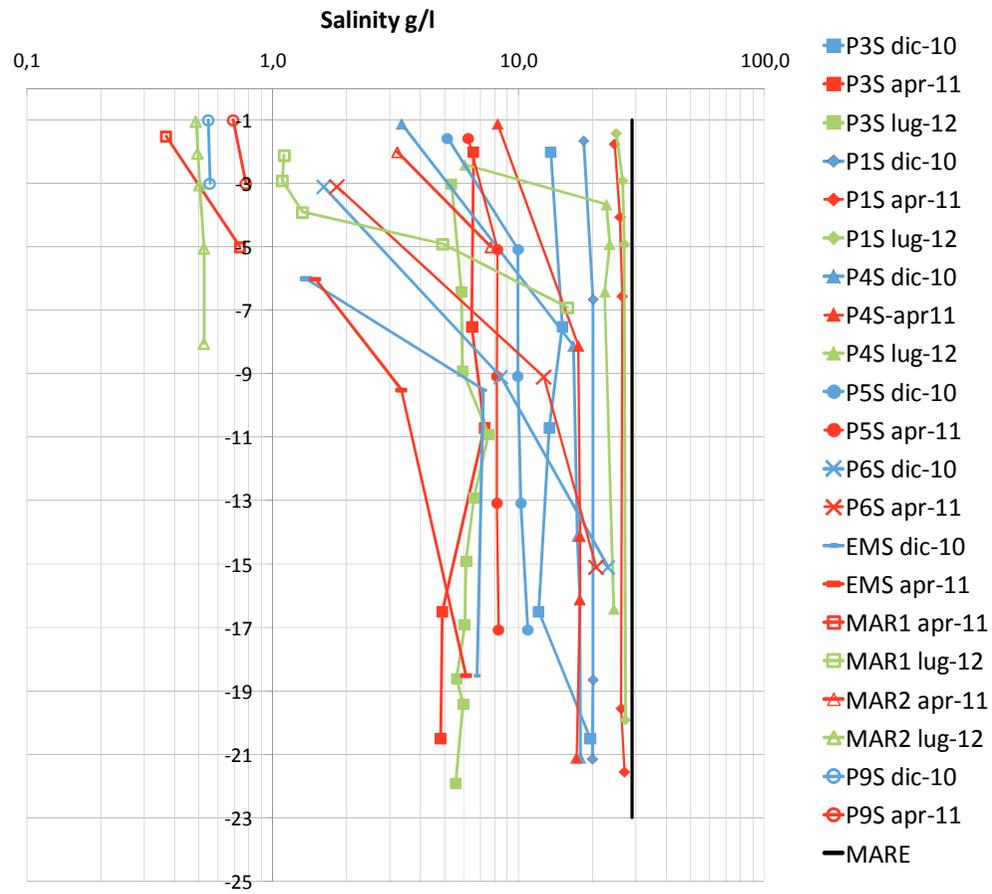
- P3S dic-10
- P3S apr-11
- P3S lug-12
- ◆ P1S dic-10
- ◆ P1S apr-11
- ◆ P1S lug-12
- ▲ P4S dic-10
- ▲ P4S apr-11
- ▲ P4S lug-12
- P5S dic-10
- P5S apr-11
- × P6S dic-10
- × P6S apr-11
- EMS dic-10
- EMS apr-11
- MAR1 apr-11
- MAR1 lug-12
- ▲ MAR2 apr-11
- ▲ MAR2 lug-12
- P9S dic-10
- P9S apr-11
- MARE

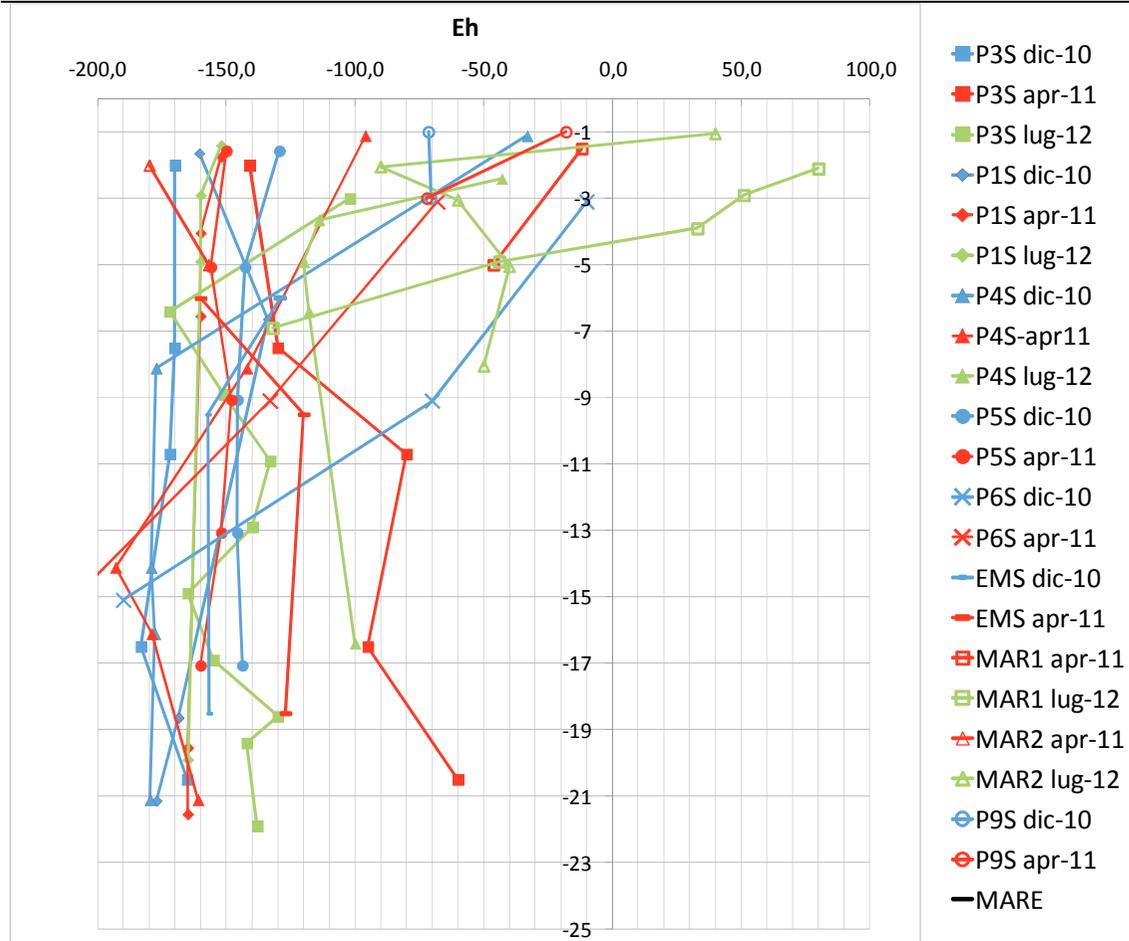


- P3S dic-10
- P3S apr-11
- P3S lug-12
- ◆ P1S dic-10
- ◆ P1S apr-11
- ◆ P1S lug-12
- ▲ P4S dic-10
- ▲ P4S apr-11
- ▲ P4S lug-12
- P5S dic-10
- P5S apr-11
- × P6S dic-10
- × P6S apr-11
- EMS dic-10
- EMS apr-11
- MAR1 apr-11
- MAR1 lug-12
- ▲ MAR2 apr-11
- ▲ MAR2 lug-12
- P9S dic-10
- P9S apr-11
- MARE



- P3S dic-10
- P3S apr-11
- P3S lug-12
- ◆ P1S dic-10
- ◆ P1S apr-11
- ◆ P1S lug-12
- ▲ P4S dic-10
- ▲ P4S apr-11
- ▲ P4S lug-12
- P5S dic-10
- P5S apr-11
- × P6S dic-10
- × P6S apr-11
- EMS dic-10
- EMS apr-11
- MAR1 apr-11
- MAR1 lug-12
- ▲ MAR2 apr-11
- ▲ MAR2 lug-12
- P9S dic-10
- P9S apr-11
- MARE





15.10 Hydrofacies

Tabella 15.13 Hydrofacies relative al campionamento complessivo del dicembre 2010

Posizione	hydrosome	Nome campione	Tipo di acqua
Tre ponti canale di drenaggio	Canali di drenaggio	3P	B4CaMix
Lagune	Lagune	BAIONA	S2NaCl
Fiume Bevano	Fiume	BEV	F3CaMix
Canale di drenaggio	Fiume	BEVANELLA	f3CaMixo
Cava Cavallina	Cave	CAV	b4NaCl
Canale Cerba	Canale irriguo	CE	f4CaMixo
Canale Emilia Romagna (Po)	Canale irriguo	CER	g2CaHCO3
Chiaro	Lagune	Chiaro NORD	b3NaCl
Chiaro	Lagune	COMUNE	b3NaCl
Destra Reno	Canale irriguo	DX RE	f4CaMix+
Cave	Cave	EMS 1	b4NaCl+
Cave	Cave	EMS 2	b4NaCl+
Cave	Cave	EMS 3	b4NaCl+
Vicinanza delle Cave	Cave	EMS1-1	b5NaCl+
Vicinanza delle Cave	Cave	EMS1-2	b5NaCl+
Vicinanza delle Cave	Cave	EMS1-3	B4MgMix+
Canale Fosso Ghiaia	Canali di drenaggio	FG	F4CaHCO3
Fiumi Uniti	Fiume	FU	g3CaHCO3
Lamone	Fiume	LAM	F3CaHCO3
Mare	Mare	MARE	S2NaClo
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF1-1	S2NaCl
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF1-5	S3NaCl
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF1-6	b3NaCl+
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF2-2	S2NaCl
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF2-7	b3NaCl
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF2-8	b3NaCl-
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF3-1	S3NaCl-
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF3-6	f4NaHCO3+
Minifiltro	Pineta Ramazotti dune recenti	MF3-8	b4NaCl+
Lagune	Lagune	P10N-1	H4NaCl-
Lagune	Lagune	P10N-2	H4NaCl-
Lagune	Lagune	P10N-3	H4NaCl-
Cave	Cave	P10S-1	b4NaCl+
Cave	Cave	P10S-2	b4NaCl+
Cave	Cave	P10S-3	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P11N-1	b5NaClo
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P11N-2	b5NaClo
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P11N-3	b5NaClo
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P12N-1	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P12N-2	b4NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P12N-3	S4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P12N-4	B4CaMix-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P12S-1	b4NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P12S-2	b4NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P12S-3	B3NaCl-

Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P12S-4	b4NaCl-
Dune recenti Pineta Marina Romea	Dune recenti Pineta Marina Romea	P13N-1	b3NaCl
Dune recenti Pineta Marina Romea	Dune recenti Pineta Marina Romea	P13N-2	S3NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P13S-1	B4NaCl+
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P13S-2	b4NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P13S-3	b4NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P13S-4	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14N-1	b4NaClo
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14N-2	b4NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14N-3	b4NaClo
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14N-4	S4NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14S-1	b3NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14S-2	f3NaMix+
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14S-3	f3NaMix+
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P14S-4	f3NaMix+
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P15N-1	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P15N-2	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P15N-3	b5NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P15N-4	S5NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	P15N-5	S5NaCl-
Pineta a Nord di Lido di Classe	Pineta Ramazotti dune recenti	P15S-1	S3NaCl
Pineta a Nord di Lido di Classe	Pineta Ramazotti dune recenti	P15S-2	S3NaCl
Pineta a Nord di Lido di Classe	Pineta Ramazotti dune recenti	P15S-3	b3NaCl
Pineta a Nord di Lido di Classe	Pineta Ramazotti dune recenti	P15S-4	S3NaCl
In Ambito agricolo Sud Lido Adriano	Ambito agricolo	P16N-1	f3CaMix
In Ambito agricolo Sud Lido Adriano	Ambito agricolo	P16N-2	f3CaMix+
In Ambito agricolo Sud Lido Adriano	Ambito agricolo	P16N-3	b4NaCl
Ambito agricolo tra Lido di Classe e Savio	Ambito agricolo	P16S-1	b4NaCl
Ambito agricolo tra Lido di Classe e Savio	Ambito agricolo	P16S-2	b4NaCl
Ambito agricolo tra Lido di Classe e Savio	Ambito agricolo	P16S-3	b4NaCl
Ambito agricolo tra Lido di Classe e Savio	Ambito agricolo	P16S-4	b4NaCl
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P17N-1	b4NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P17N-2	b4NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P17N-3	b4NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P17N-4	b4NaCl+
Ambito agricolo tra Bevano e Savio	Ambito agricolo	P17S-1	b4NaCl
Ambito agricolo tra Bevano e Savio	Ambito agricolo	P17S-2	b4NaCl
Ambito agricolo tra Bevano e Savio	Ambito agricolo	P17S-3	b4NaCl
Ambito agricolo tra Bevano e Savio	Ambito agricolo	P17S-4	F3CaHCO3
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P18N-1	B3NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P18N-2	B3NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P18N-3	B4NaCl+
In Ambito agricolo tra Porto Fuori e Lido Adriano	Ambito agricolo	P18N-4	b4NaCl+
Pineforest Lido di Savio	Pineta Ramazotti dune recenti	P18S-1	b4NaCl+
Pineforest Lido di Savio	Pineta Ramazotti dune recenti	P18S-2	b4NaCl+
Pineforest Lido di Savio	Pineta Ramazotti dune recenti	P18S-3	B4NaCl+
Pineforest Lido di Savio	Pineta Ramazotti dune recenti	P18S-4	B4NaMix+
Ambito agricolo vicino Savio	Ambito agricolo	P19S-1	B4MgMix
Ambito agricolo vicino Savio	Ambito agricolo	P19S-2	B4MgMix-
Ambito agricolo vicino Savio	Ambito agricolo	P19S-3	B4MgMix

Ambito agricolo vicino Savio	Ambito agricolo	P19S-4	B3NaCl+
Pinete San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P1N-1	b5NaCl
Pinete San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P1N-2	b4NaCl
Pinete San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P1N-3	b4NaCl
Pinete San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P1N-4	b4NaCl
Pinete San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P1N-5	b4NaCl
Pineta Ramazzotti Nord	Pineta Ramazzotti dune recenti	P1S-1	S3NaCl
Pineta Ramazzotti Nord	Pineta Ramazzotti dune recenti	P1S-2	S4NaCl-
Pineta Ramazzotti Nord	Pineta Ramazzotti dune recenti	P1S-3	S4NaCl-
Pineta Ramazzotti Nord	Pineta Ramazzotti dune recenti	P1S-4	S4NaCl-
Pineta Costiera Marina Romea Sud	Dune recenti Pineta Marina Romea	P2N-1	b5NaCl+
Pineta Costiera Marina Romea Sud	Dune recenti Pineta Marina Romea	P2N-2	b4NaCl
Pineta Costiera Marina Romea Sud	Dune recenti Pineta Marina Romea	P2N-3	b4NaCl
Pineta Ramazzotti Sud	Pineta Ramazzotti dune recenti	P2S-1	S3NaCl
Pineta Ramazzotti Sud	Pineta Ramazzotti dune recenti	P2S-2	S3NaCl-
Pineta Ramazzotti Sud	Pineta Ramazzotti dune recenti	P2S-3	b4NaClo
Pineta Ramazzotti Sud	Pineta Ramazzotti dune recenti	P2S-4	S3NaCl
Pineta Ramazzotti Sud	Pineta Ramazzotti dune recenti	P2S-5	S3NaCl
Ambito agricolo a Casalborsetti vicino Destra Reno	Ambito agricolo	P3N-1	b4CaCl-
Ambito agricolo a Casalborsetti vicino Destra Reno	Ambito agricolo	P3N-2	b4CaCl-
Ambito agricolo tra Ramazzotti e Pineta di Classe	Ambito agricolo	P3S-1	b4NaCl
Ambito agricolo tra Ramazzotti e Pineta di Classe	Ambito agricolo	P3S-2	b4NaCl
Ambito agricolo tra Ramazzotti e Pineta di Classe	Ambito agricolo	P3S-3	b4NaCl
Ambito agricolo tra Ramazzotti e Pineta di Classe	Ambito agricolo	P3S-4	b4NaCl
Ambito agricolo tra Ramazzotti e Pineta di Classe	Ambito agricolo	P3S-5	S4NaCl
Pineta San Vitale Nord a sud del Canale Destra Reno	Paleodune Pineta di San Vitale	P4N-1	b4NaCl
Pineta San Vitale Nord a sud del Canale Destra Reno	Paleodune Pineta di San Vitale	P4N-2	b4NaCl
Pineta San Vitale Nord a sud del Canale Destra Reno	Paleodune Pineta di San Vitale	P4N-3	S4NaCl
Pineta San Vitale Nord a sud del Canale Destra Reno	Paleodune Pineta di San Vitale	P4N-4	S5NaClo
Pineta San Vitale Nord a sud del Canale Destra Reno	Paleodune Pineta di San Vitale	P4N-5	S5NaClo
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P4S-1	S5NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P4S-2	S5NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P4S-3	S5NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P4S-4	S5NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P4S-5	b4NaCl
Pineta Costiera Nord del Lamone	Dune recenti Pineta Marina Romea	P5N-1	S3NaCl
Pineta Costiera Nord del Lamone	Dune recenti Pineta Marina Romea	P5N-2	S3NaCl
Pineta Costiera Nord del Lamone	Dune recenti Pineta Marina Romea	P5N-3	S3NaCl
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P5S-1	b4NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P5S-2	b4NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P5S-3	b4NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P5S-4	b4NaCl-
Pineta di Classe	Pineta di Classe paleodune	P5S-5	b4NaCl-
Pinete San Vitale Nord of Lamone	Paleodune Pineta di San Vitale	P6N-1	b4NaCl
Pinete San Vitale Nord of Lamone	Paleodune Pineta di San Vitale	P6N-2	b4NaCl-
Pinete San Vitale Nord of Lamone	Paleodune Pineta di San Vitale	P6N-3	b5NaCl-
Ambito agricolo tra le cave	Ambito agricolo	P6S-1	b4NaCl
Ambito agricolo tra le cave	Ambito agricolo	P6S-2	S5NaCl-
Ambito agricolo tra le cave	Ambito agricolo	P6S-3	f4CaSO4+
Adiacente alla Pialassa Baiona	Lagune	P7N-1	S3NaCl

Adiacente alla Pialassa Baiona	Lagune	P7N-2	S3NaCl
Adiacente alla Pialassa Baiona	Lagune	P7N-3	S3NaCl
Adiacente alla Pialassa Baiona	Lagune	P7N-4	S3NaCl-
Pineta San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P8N-1	B4NaMix+
Pineta San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P8N-2	b5NaCl-
Pineta San Vitale Nord	Paleodune Pineta di San Vitale	P8N-3	S5NaCl-
Pineta costiera di Marina Romea	Dune recenti Pineta Marina Romea	P9N-1	B5NaMix+
Pineta costiera di Marina Romea	Dune recenti Pineta Marina Romea	P9N-2	b4NaCl+
Pineta costiera di Marina Romea	Dune recenti Pineta Marina Romea	P9N-3	S4NaCl
Ambito agricolo 11km dal mare	Ambito agricolo	P9S-1	F4CaHCO3o
Ambito agricolo 11km dal mare	Ambito agricolo	P9S-2	F4CaHCO3
Laguna	Lagune	PIOMBONE	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV6-1	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV6-2	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV6-3	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV6-4	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV6P	S5NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV7-1	B4NaCl+
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV7-2	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV7-3	S3NaClo
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV7-4	S4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV7P	S5NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV8-1	b5NaCl+
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV8-2	b4NaClo
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV8-3	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV8-4	H4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PMSV8P	S5NaCl
Chiaro pialasse	Lagune	PONTAZZO	b3NaCl
Ramazotti	Pineta Ramazotti dune recenti	PR4 VALENTINA	f4CaMix+
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV10-1	f4CaHCO3-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV10-2	f4CaHCO3-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV11-1	F3CaHCO3-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV11-2	b4CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV12-1	b3NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV12-2	S3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV16-1	b3CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV16-2	b3NaCl-
Punte Alberete	Foresta allagata	PZSV18-1	f4CaHCO3+
Punte Alberete	Foresta allagata	PZSV18-2	B4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV19-1	b3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV19-2	b2NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV21-1	B3CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV21-2	B3CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV23-1	B3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV23-2	b3NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV23-3	b3NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV23-4	b3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV24-1	b4CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV24-2	b4CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV24-3	b4CaCl-

Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV24-4	b4CaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV26-1	B3CaMix-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV26-2	B4MgMix
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV26-3	b5NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV28-1	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV28-2	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV28-3	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV30-1	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV30-2	S4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV30-3	H4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV30-4	H4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV31-1	S4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV31-2	H4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV31-3	H4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV31-4	H4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV32-1	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV32-2	b5NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV32-3	S5NaClo
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV34-1	b4CaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV34-2	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV34-3	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV34-4	b4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV36-1	S4NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV36-2	H4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV36-3	H4NaCl-
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV36-4	H4NaCl-
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV37-1	b4NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV37-2	b5NaCl
Ambito agricolo	Ambito agricolo	PZSV37-3	S5NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV9-1	b3NaCl
Pinete San Vitale	Paleodune Pineta di San Vitale	PZSV9-2	b4NaCl+
Fiume Reno	Fiume	RE	B2NaCl
Chiaro Pialasse	Lagune	RISEGA	S3NaClo

Tabella 15.14 Hydrofacies per il transetto nei tre periodi di monitoraggio.

DICEMBRE 2010		APRILE 2011		LUGLIO 2012	
BEV	f3CaMix+	P9S-1	f4CaMix+	P1S_1	S4NaCl
BEVANELLA	F3CaMix+	P9S-2	F3CaMix+	P1S_2	S4NaCl
CER	g2CaHCO3+	P6S-1	B4CaSO4+	P1S_3	S4NaCl-
EMS1-1	B4MgMix+	P6S-2	b4NaCl	P1S_4	S4NaCl-
EMS1-2	b5NaCl+	P6S-3	S4NaCl-	MAR1_1	B4CaMix+
EMS1-3	b5NaCl+	P5S-1	b4NaClo	MAR1_2	f4CaMix+
EMS-1	b4NaCl+	P5S-2	b4NaCl-	MAR1_3	B4CaMix+
EMS-2	b4NaCl+	P5S-3	b4NaCl-	MAR1_4	b4NaCl
EMS-3	b4NaCl+	P5S-4	b4NaClo	MAR1_5	b4NaCl-
FG	F4CaHCO3+	P5S-5	b4NaCl-	MAR2_1	f3CaMix+
FU	g3CaHCO3+	P4S-1	b4NaCl	MAR2_2	f3CaMix+
MARE	S2NaCl	P4S-2	S4NaCl-	MAR2_3	f3CaMix+
P1S-1	S3NaCl	P4S-3	S5NaCl-	MAR2_4	f3CaMix+
P1S-2	S4NaCl-	P4S-4	S4NaCl	MAR2_5	f3CaMix+
P1S-3	S4NaCl-	P4S-5	S4NaCl-	P3S_1	b4NaClo
P1S-4	S4NaCl-	P2S-1	S3NaCl	P3S_2	b4NaCl
P2S-1	b4NaClo	P2S-2	S3NaClo	P3S_3	b4NaCl
P2S-2	S3NaClo	P2S-3	S2NaCl	P3S_4	b4NaCl
P2S-3	S3NaCl-	P2S-4	S3NaCl	P3S_5	b4NaCl
P2S-4	S3NaClo	P2S-5	S3NaCl	P3S_6	b4NaCl
P2S-5	S3NaClo	P3S-1	b4NaCl	P3S_7	b4NaCl
P3S-1	b4NaCl	P3S-2	b4NaCl	P3S_8	b4NaCl
P3S-2	b4NaCl	P3S-3	b4NaClo	P3S_9	b4NaCl
P3S-3	b4NaCl	P3S-4	b4NaCl	P3S_10	b4NaCl+
P3S-4	b4NaCl	P3S-5	b4NaCl	P4S_1	b4NaCl
P3S-5	S4NaCl	EMS1-1	B4NaMix+	P4S_2	S5NaCl
P4S-1	b4NaCl+	EMS1-2	b5NaCl+	P4S_3	S5NaCl
P4S-2	S5NaCl	EMS1-3	b5NaCl+	P4S_4	S5NaCl
P4S-3	S5NaCl-	MAR2_1	b3NaClo	P4S_5	S5NaCl
P4S-4	S5NaCl-	MAR2_2	b3NaCl-		
P4S-5	S5NaCl-	MAR1_1	F3CaHCO3+		
P5S-1	b4NaCl	MAR1_2	B3CaMix+		
P5S-2	b4NaCl				
P5S-3	b4NaCl-				
P5S-4	b4NaCl				
P5S-5	b4NaClo				
P6S-1	f4CaSO4+				
P6S-2	b4NaCl+				
P6S-3	S5NaClo				
P9S-1	F4CaHCO3+				
P9S-2	F4CaHCO3+				
V_S	f4CaMix+				
SAVIO	g3CaHCO3				

15.11 Temperature e profondità di stabilizzazione dei pozzi

Tabella 15.15- zona nord - tabella riassuntiva - con piezometri disposti in ordine crescente per le temperature di stabilizzazione. La colorazione rispetta la suddivisioni in fasce (Blu - Duna attuale, Rosso - Pialassa, Verde - Paleoduna, Grigio - retro paleoduna, Nero - i restanti piezometri)

Pozzo	T stabiliz	Quota stabilizzazione	Distanza piano camp	
PZSV34	12,8	-9,00	-9,23	
P1N	13,1	-10,00	-11,35	
P8N	13,1	-9,24	-10,55	
PMSV6	13,1	-9,50	-9,48	
P6N	13,2	-11,20	-12,63	
PZSV28	13,2	-9,00	-9,38	
PZSV30	13,2	-9,02	-9,89	
PZSV31	13,2	-8,42	-8,88	
P4N	13,3	-9,00	-10,72	
PZSV26	13,4	-8,79	-8,24	
PZSV36	13,3	-10,00	-10,83	
PZSV23	13,4	-9,27	-10,78	
P9N	13,5	-8,00	-8,19	
P13N	13,9	-5,00	-6,51	
P18N	13,9	-8,20	-8,66	
P15N	14,0	-10,20	-9,65	
P5N	14,0	-7,89	-8,16	
PMSV7	14,1	-9,93	-11,32	
P12N	14,2	-20,40	-20,83	(fondo pozzo)
P2N	14,1	-8,00	-8,99	
PZSV32	14,2	-9,75	-10,22	(fondo pozzo)
P11N	14,3	-23,50	-24,89	(fondo pozzo)
P14N	14,3	-24,20	-24,07	(fondo pozzo)
P3N	14,3	-7,00	-7,53	
PZSV37	14,3	-10,76	-12,04	(fondo pozzo)
P16N	14,8	-10,80	-11,18	
P17N	14,9	-23,60	-24,47	(fondo pozzo)
PZSV24	15,0	-9,82	-9,69	
P7N	15,2	-8,00	-9,33	
P10N	15,8	-20,20	-20,18	(fondo pozzo)
PMSV8	/	/		
Media	13,97	-8,93	-9,62	

Tabella 15.16- zona sud - tabella riassuntiva – con piezometri disposti in ordine crescente per le temperature di stabilizzazione. La colorazione rispetta la suddivisioni in fasce (Blu – Duna attuale, Rosso – Retroduna , Verde – Paleoduna, Grigio – retro paleoduna)

Pozzo	T stabiliz	Quota stabilizzazione	Distanza piano camp
P4S	13,0	-18,00	-17,89
P5S	13,0	-19,67	-20,61
P12S	13,2	-19,70	-20,32
P13S	13,2	-10,43	-11,10
P15S	13,5	-8,88	-10,08
P2S	13,7	-11,16	-11,62
P1S	13,8	-11,50	-11,66
P17S	14,0	-18,00	-18,64
P3S	14,0	-22,47	-22,57 (fondo pozzo)
P19S	14,2	-11,25	-11,99
P6S	14,2	-10,31	-9,81
P9S	14,2	-6,57	-5,83 (fondo pozzo)
P16S	14,8	-10,00	-10,79
P10S	14,9	-19,20	-17,81
P18S	14,9	-10,00	-11,66
P14S	15,8	-16,50	-17,20
Media	14,03	-13,90	-14,37