



C.N.R. - Istituto per lo Studio
della Dinamica delle Grandi Masse



Città di Chioggia
Assessorato all'Ambiente



Consorzio di Bonifica
Adige Bacchiglione



Consorzio di Bonifica
Bacchiglione Brenta



Consorzio di Bonifica
Delta del Po Adige



Magistrato alle Acque
per la Laguna di Venezia



Provincia di Padova
Assessorato all'Ambiente

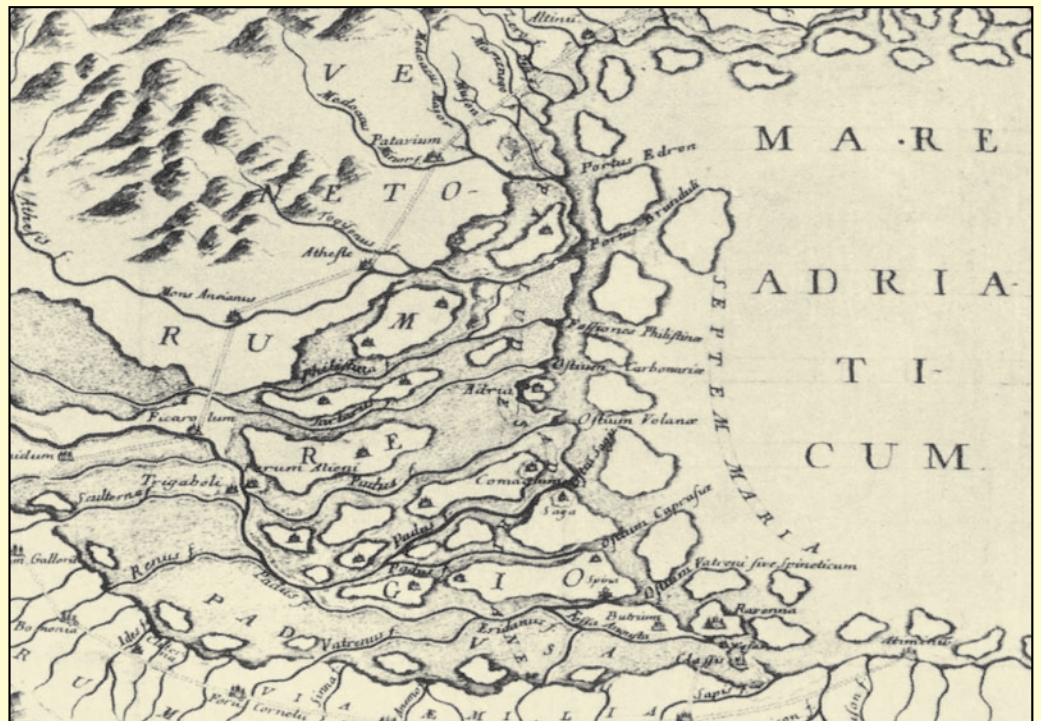


Provincia di Venezia
Assessorato alla Protezione Civile

IL PROGETTO ISES PER L'ANALISI DEI PROCESSI DI INTRUSIONE SALINA E SUBSIDENZA NEI TERRITORI MERIDIONALI DELLE PROVINCE DI PADOVA E VENEZIA

Laura Carbognin e Luigi Tosi

Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Venezia



In copertina: da una mappa del settecento denominata “*Le Paludi Adriane*”.
Riproduzione integrale in E. MIOZZI (1969) - “*VENEZIA NEI SECOLI. Vol. III - la Laguna*” .

Il progetto ISES
per l'analisi dei processi
di intrusione salina e subsidenza
nei territori meridionali delle
province di Padova e Venezia

Laura Carbognin e Luigi Tosi

Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Venezia

2003

PROMOTORI DEL PROGETTO



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per lo Studio
della Dinamica delle Grandi Masse



Provincia di Venezia
Assessorato alla Protezione Civile



Provincia di Padova
Assessorato all'Ambiente



Città di Chioggia
Assessorato all'Ambiente



Magistrato alle Acque
per la Laguna di Venezia



Consorzio di Bonifica
Adige Bacchiglione



Consorzio di Bonifica
Bacchiglione Brenta



Consorzio di Bonifica
Delta Po Adige

e con la collaborazione di



Autorità di Bacino
del Fiume Adige



Consorzio di Bonifica
Polesine Adige
Canal Bianco



Consorzio Venezia Nuova
Servizio Informativo

Presentazione

Per conseguire obiettivi di pregio bisogna mirare alto, e così hanno voluto i numerosi Enti che hanno deciso – cosa non facile nelle Pubbliche Amministrazioni – di mettere in sinergia le proprie forze tecniche ed economiche per realizzare il Progetto *ISES*, per approfondire le conoscenze sui fenomeni di intrusione salina e di subsidenza che coinvolgono la parte meridionale del territorio delle province di Padova e Venezia. Questo studio ha consentito di ottenere le informazioni indispensabili per governare i vari processi che possono provocare conseguenze indesiderate sulla qualità della vita, sull'ambiente e sull'economia.

Riteniamo che sia un pregio notevole l'aver saputo coagulare in un unico, ambizioso progetto, ben dieci Enti con caratteristiche anche molto diversificate tra loro, che coniugano il sapere scientifico del Consiglio Nazionale delle Ricerche con la complessità delle competenze delle Autonomie locali (Province di Padova e Venezia e Comune di Chioggia), la diretta operatività dei Consorzi di bonifica (Adige Bacchiglione, Bacchiglione Brenta, Delta Po Adige, Polesine Adige Canal Bianco) con l'attività pianificatoria dell'Autorità di Bacino del fiume Adige e con la secolare tradizione del Magistrato alle Acque, tutti consci che vale veramente il detto "l'unione fa la forza" e che da solo nessun ente avrebbe potuto conseguire i risultati esposti in questo volume che unisce il pregio della semplicità didattica alla completezza scientifica.

Il fenomeno della contaminazione salina, sia delle falde sotterranee che delle acque superficiali, primo aspetto indagato dal Progetto *ISES*, può infatti comportare, per un territorio quale quello in esame, forti penalizzazioni ad una fiorente economia agricola di tradizionale pregio, quale quella orticola. Basti pensare agli orti di Chioggia, famosi da secoli ed i cui prodotti sono largamente apprezzati da una clientela cosmopolita ed esigente. Fonte altresì di lavoro e di reddito a larga parte della popolazione residente, essi potrebbero in pochi anni andare desertificati se il fenomeno dell'intrusione salina non venisse tenuto sotto attento e continuo controllo.

Ancora più temibile è, per la pubblica opinione, la subsidenza, male subdolo che colpisce ancor più gravemente territori fragili quale quello in esame, in gran parte soggiacente al livello del mare e che, per la sua vicinanza con quest'ultimo, vedrebbe maggiormente aggravati i danni di un eventuale abbassamento del suolo amplificato e velocizzato da colpevoli (in quanto oggi ampiamente note) iniziative dell'uomo. La rete di monitoraggio altimetrico *ISES* potrebbe essere di primaria importanza qualora in futuro si procedesse allo sfruttamento dei giacimenti gassiferi dell'alto Adriatico, in quanto essa costituisce "l'anno zero" per la valutazione di eventuali subsidenze indotte. Questa rete di livellazione, nella sua interezza, ha permesso altresì di studiare nel dettaglio sia aree già esaminate, fornendo l'evoluzione della subsidenza nel tempo, sia, soprattutto, di investigare zone completamente scoperte, che ora potranno essere tenute sotto con-

trollo anche dai singoli partecipanti al Progetto *ISES* in quanto l'istituzione della rete è stata studiata per poter garantire anche l'autonomia gestionale dei vari Enti.

Un ringraziamento a quanti, con passione e competenza, hanno consentito il conseguimento degli obiettivi che le Amministrazioni interessate si erano date.

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse
Il Direttore
Luigi Alberotanza

PROVINCIA DI VENEZIA
Il Presidente
Luigino Busatto
L'Assessora alla Protezione Civile
Delia Murer

PROVINCIA DI PADOVA
Il Presidente
Vittorio Casarin
L'Assessore all'Ambiente
Domenico Riolfatto

CITTA' DI CHIOGGIA
Il Sindaco
Fortunato Guarnieri
L'Assessore all'Ambiente
Sergio Vianello

MAGISTRATO ALLE ACQUE
PER LA LAGUNA DI VENEZIA
Il Presidente
Maria Giovanna Piva

CONSORZIO DI BONIFICA
ADIGE BACCHIGLIONE
Il Presidente
Antonio Salvan

CONSORZIO DI BONIFICA
BACCHIGLIONE BRENTA
Il Presidente
Alessandro Ghiro

CONSORZIO DI BONIFICA
DELTA PO ADIGE
Il Presidente
Francesco Arduini

CONSORZIO DI BONIFICA
POLESINE ADIGE CANAL BIANCO
Il Presidente
Marino Bianchi

AUTORITÀ DI BACINO
DEL FIUME ADIGE
Il Segretario Generale
Alessandro Goio

Il Progetto *ISES* è stato promosso e realizzato con i finanziamenti di (in ordine alfabetico):
Comune di Chioggia, Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione, Consorzio di Bonifica Bacchiglione Brenta, Consorzio di Bonifica Delta Po Adige, Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse CNR di Venezia, Magistrato alle Acque di Venezia, Provincia di Padova e Provincia di Venezia;

e con il patrocinio di:

Autorità di Bacino del Fiume Adige e Consorzio di Bonifica Polesine Adige Canal Bianco.

E' stato costituito un Gruppo Ristretto permanente per la validazione delle attività, formato da:

Andrea Vitturi (*Provincia di Venezia*), coordinatore generale del Progetto,
Paolo Spagna (*Comune di Chioggia*),
Giuseppe Gasparetto Stori (*Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione*),
Roberto Rosselli (*Servizio Informativo del Magistrato alle Acque di Venezia*),
Annamaria Licini (*Provincia di Padova*),
e dai due Responsabili Scientifici del Progetto:
Laura Carbognin e Luigi Tosi (*ISDGM-CNR*).

Nell'ambito del SOTTOPROGETTO INTRUSIONE SALINA hanno condotto l'acquisizione, l'informatizzazione, l'elaborazione dei dati e redatto le relazioni tecniche relative a:

Acque superficiali

Valentina Bassan (Geologo - Selvazzano, PD)
Enrico Conchetto (Geologo - Dolo, VE)

Idrogeologia

Enrico Conchetto (Geologo - Dolo, VE)
Pietro Zangheri (Geologo - Padova)

Indagini geoelettriche e livellazione dei pozzi e piezometri

Enrico Farinatti (Geologo - Studio A.T.A. - Rovigo)
Rossella Merola (Geologo - Studio A.T.A. - Rovigo)

Indagine litostratigrafica

Valentina Bassan (Geologo - Selvazzano, PD)
Pietro Zangheri (Geologo - Padova)

Sondaggi

Vittorio Bisaglia (Geologo - Padova)
che inoltre ha avuto l'incarico di Direzione Lavori.

Nell'ambito del SOTTOPROGETTO SUBSIDENZA hanno condotto:

Le livellazioni

Gianfranco Castelli e Marco Sabbatani (TE.MA, Faenza, RA)

I rilievi DGPS

Marco Giada e Barbara Chiozzotto (MORGAN, Venezia)

La Direzione Lavori

Pietro Teatini (DMMSA, Università di Padova)

L'editing del presente volume è stato curato da Pietro Zangheri.

Indice

	Premessa	pag. 13
1	AREA DI STUDIO.	» 15
1.1	Inquadramento geografico	» 15
1.2	Inquadramento geologico e geomorfologico	» 16
1.3	Inquadramento idrogeologico.	» 22
2	SOTTOPROGETTO INTRUSIONE SALINA.	» 25
2.1	Inquadramento descrittivo del processo di intrusione salina.	» 25
2.2	Intrusione salina nel comprensorio lagunare.	» 27
2.3	Intrusione salina nell'area ISES	» 30
2.3.1	<i>Indagine litostratigrafica.</i>	» 30
2.3.2	<i>Indagine geoelettrica</i>	» 32
2.3.3	<i>Indagine idrologica.</i>	» 36
2.3.3.1	<i>Acque sotterranee</i>	» 38
2.3.3.2	<i>Acque superficiali</i>	» 39
2.3.4	<i>Istituzione delle reti di monitoraggio</i>	» 39
2.3.4.1	<i>Rete e monitoraggio delle acque sotterranee</i>	» 40
2.3.4.2	<i>Rete e monitoraggio delle acque superficiali</i>	» 45
2.3.5	<i>Gestione delle reti di monitoraggio delle acque.</i>	» 46
2.4	Analisi congiunta delle indagini ed interpretazione del processo	» 52
2.4.1	<i>Zonizzazione del processo.</i>	» 57
3	SOTTOPROGETTO SUBSIDENZA	» 63
3.1	Inquadramento descrittivo del fenomeno di subsidenza	» 63
3.2	Subsidenza regionale.	» 63
3.3	Subsidenza nel comprensorio lagunare	» 64
3.4	Subsidenza nell'area di competenza del progetto ISES	» 65
3.5	Istituzione della rete di monitoraggio altimetrico ISES	» 69
3.5.1	<i>Livellazione geometrica</i>	» 70
3.5.2	<i>Misure GPS</i>	» 71
3.5.3	<i>Gestione della Rete altimetrica.</i>	» 72
3.6	Modello locale dell'ondulazione del geoide.	» 73
3.7	Confronti altimetrici	» 73
3.8	Ricerche complementari al Progetto ISES per lo studio della subsidenza	» 82
4	CONCLUSIONI.	» 85
4.1	Intrusione salina	» 85
4.2	Subsidenza	» 86
5	CITAZIONI BIBLIOGRAFICHE	» 91

Elenco delle tavole fuori testo

- Tavola 1. Prove geognostiche
- Tavola 2. Stratigrafie carotaggi continui ISES
- Tavola 3. Ubicazione SEV e traccia delle sezioni interpretative della contaminazione salina
- Tavola 4. Pozzi censiti
- Tavola 5. Distribuzione della conducibilità elettrica nelle acque sotterranee per classi di profondità
- Tavola 6. Punti di misura su acque superficiali
- Tavola 7. Sezioni interpretative della contaminazione salina (sez. 1-6)
- Tavola 8. Sezioni interpretative della contaminazione salina (sez. 7-13)
- Tavola 9. Sezioni Tomografiche Elettriche (ERT)
- Tavola 10. Tetto della contaminazione salina
- Tavola 11. Letto della contaminazione salina
- Tavola 12. Reti di livellazione

IL PROGETTO *ISES*

Premessa

Il Progetto *ISES* (acronimo per Intrusione Salina e Subsidenza) viene istruito nel 1999 per iniziativa congiunta della Provincia di Venezia - Ufficio Difesa del Suolo e dell'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse (ISDGM) del CNR di Venezia, a seguito dei risultati ottenuti da studi precedenti dai quali era emersa la grave situazione altimetrica e idrologica in cui si trovano alcune zone estreme delle province di Venezia e Padova. In particolare da parte dell'ISDGM, nell'ambito del Progetto Finalizzato "Sistema Lagunare Veneziano" (1991-1996), veniva puntualizzata la situazione altimetrica regionale del 1993, e, nell'ambito del Progetto Strategico "Ambiente e Territorio" (1994-1997), si era posta la problematica della salinizzazione degli acquiferi sia freatici che artesiani attraverso indagini di campagna e studi modellistici. La Provincia di Venezia nell'ambito del Progetto "Cuneo Salino" ha iniziato a sua volta, nel 1998, le indagini e gli studi sull'intrusione salina nel comune di Chioggia, convogliati poi nel nuovo Progetto.

ISES nasce dunque con lo scopo di approfondire le conoscenze sui processi di intrusione di acque saline nel sottosuolo e di subsidenza che coinvolgono in modo preoccupante molte aree del comprensorio meridionale della Provincia di Venezia e della Provincia di Padova, relativamente all'area prospiciente il margine lagunare, con particolare gravità nei settori interessati dalle più recenti bonifiche.

Nello svolgimento degli studi precedenti si era inoltre evidenziata la mancanza di controlli sistematici, omogenei e confrontabili, dei fenomeni in atto; solo puntualmente, e per proprio conto, alcuni Enti e Consorzi provvedevano ad effettuare verifiche e misure saltuarie sulle caratteristiche degli acquiferi e sull'abbassamento del suolo.

Altro obiettivo del Progetto *ISES* era pertanto quello di colmare questa lacuna installando reti fisse di monitoraggio territoriale, sia per l'idrologia superficiale e sotterranea, sia per l'altimetria, idonee a fornire dati arealmente omogenei e confrontabili nel tempo sui processi in atto.

In considerazione degli studi programmati e degli obiettivi descritti, molti Enti locali operanti all'interno

dell'area di indagine hanno dimostrato grande interesse per *ISES*.

Il Progetto è stato finanziato dalle Province di Venezia e Padova, dal Comune di Chioggia, dal Magistrato alle Acque di Venezia, dai Consorzi di Bonifica Adige-Bacchiglione, Bacchiglione-Brenta, Delta Po-Adige e dal CNR ed è stato patrocinato dall'Autorità di bacino del Fiume Adige e dal Consorzio di Bonifica Polesine-Adige-Canal Bianco ⁽¹⁾.

Tenendo conto delle operazioni da compiere nello svolgimento degli studi, che vanno dal censimento dei dati, all'istituzione delle reti di monitoraggio, alle campagne di misura, all'elaborazione dei dati, nonché all'interpretazione e definizione dei processi, il piano di lavoro è stato elaborato per una durata complessiva di 3 anni. In quest'arco di tempo sono state prodotte diverse relazioni tecniche contenenti i dati originali e le prime elaborazioni degli stessi ⁽²⁾.

⁽¹⁾ A seguito di numerose riunioni fra i potenziali partecipanti, hanno formalmente aderito ad un Accordo di Programma i 10 Enti menzionati.

⁽²⁾ Tutta questa documentazione, che comprende 14 relazioni inerenti le diverse fasi operative, è stata depositata, ed è consultabile dai partecipanti al Progetto *ISES*, presso il Servizio Informativo del Magistrato alle Acque (MAV) di Venezia, sede di Padova.

1. Area di studio

1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area di studio *ISES* copre una vasta porzione di pianura costiera situata a sud-ovest e a sud della Laguna di Venezia per un totale di circa 400 kmq ricadenti nella bassa padovana e nel basso veneziano. I limiti geografici sono ben definibili (Fig. 1.1), in quanto coincidono: a nord e ad est con il margine di conterminazione lagunare e con la linea di costa che separa il lido di Sottomarina ed il litorale compreso tra le foci dei fiumi Brenta ed Adige dal Mare Adriatico, a sud con il tratto terminale dell'Adige, mentre ad ovest l'area termina in corrispondenza di un'ipotetica linea passante per Lova, Corte, Piove di Sacco, Pontelongo, Cona, Rottanova e Anguillara Veneta. Quasi tutto il

settore centro-settentrionale appartiene dunque al territorio della provincia di Padova, mentre quello meridionale, più esteso, ed un limitato lembo posto a nord, nei pressi di Lova, fanno parte della provincia di Venezia (Fig. 1.2).

Attualmente vaste aree giacciono sotto il livello del mare; solo nel settore orientale si riscontrano quote ad esso superiori. Questi territori sono utilizzati per fini prevalentemente agricoli, e nelle aree depresse lo smaltimento delle acque è garantito da una fitta rete di canali di scolo e di bonifica, chiaviche ed impianti idrovori, i principali dei quali sono: il Canale Novissimo (che segue il margine lagunare ed entra nelle Valli di Chioggia), il Canale Barbegara (che scorre a sud del Bacchiglione), il Canale Rebosola

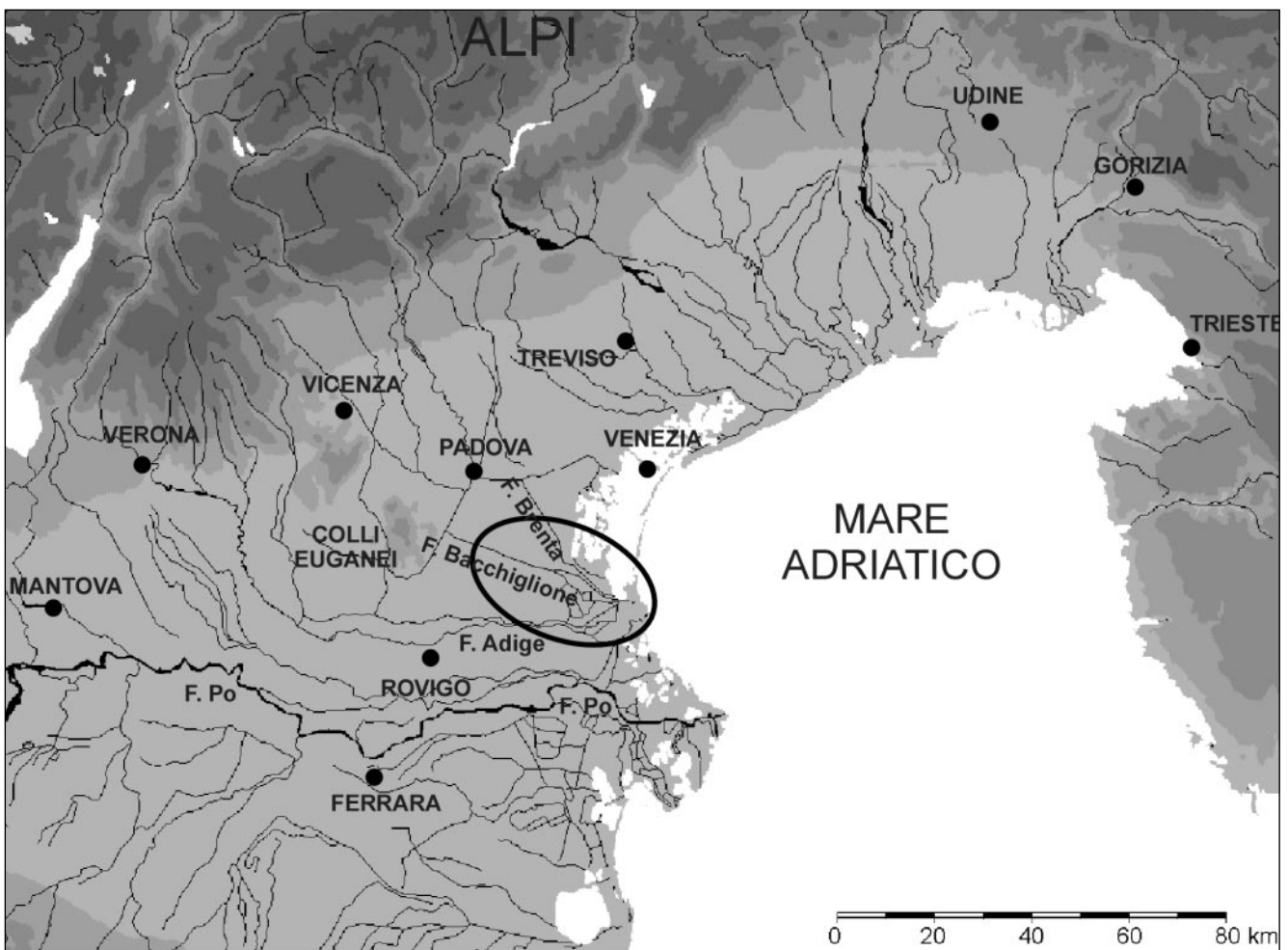


Figura 1.1 - Inquadramento territoriale dell'area di studio

(che in parte coincide con il confine provinciale), il Canale dei Cuori (che giunge da Agna e prosegue in direzione O-E), il Canale Gorzone (che da Rottanova scorre verso Punta Gorzone, dove poi confluisce nel Brenta), il Canale di Valle (che da Cavanella d'Adige si dirige a nord fino a confluire nel Brenta nei pressi di Punta Gorzone) (Fig. 1.2).

Il territorio è oggi attraversato da due importanti fiumi, il Brenta ed il Bacchiglione. Il primo scorre in direzione NO-SE fino al margine meridionale della Laguna di Venezia, quindi prosegue verso est e sfocia nel Mare Adriatico in corrispondenza del Porto di Brondolo; il secondo, più meridionale, è affluente di destra del Brenta, entro il quale confluisce nei pressi di Ca' Bianca, dopo avere seguito un percorso orientato ONO-ESE.

1.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Poiché i processi in esame sono fortemente correlati all'assetto geologico e geomorfologico dell'area in cui si esplicano, risulta indispensabile fornirne un inquadramento, sia pure di estrema sintesi.

La parte meridionale del comprensorio veneziano appartiene geologicamente all'avampaese intermedio tra i fronti appenninici, che si trovano poco più a Sud (Pieghe Ferraresi), ed i fronti alpini a nord. In questa zona è individuato il fianco settentrionale della fossa padano-adriatica a struttura omoclinale immersa verso sud fino ad incontrare le strutture sepolte delle Dorsali Ferraresi. Sul substrato mesozoico si è depositata, durante il Paleogene, una serie di marne talora arenacee con episodi calcarei anche di notevole consistenza, che ha colmato i principali dislivelli legati all'orogenesi alpina; dal Miocene in poi, tutta la

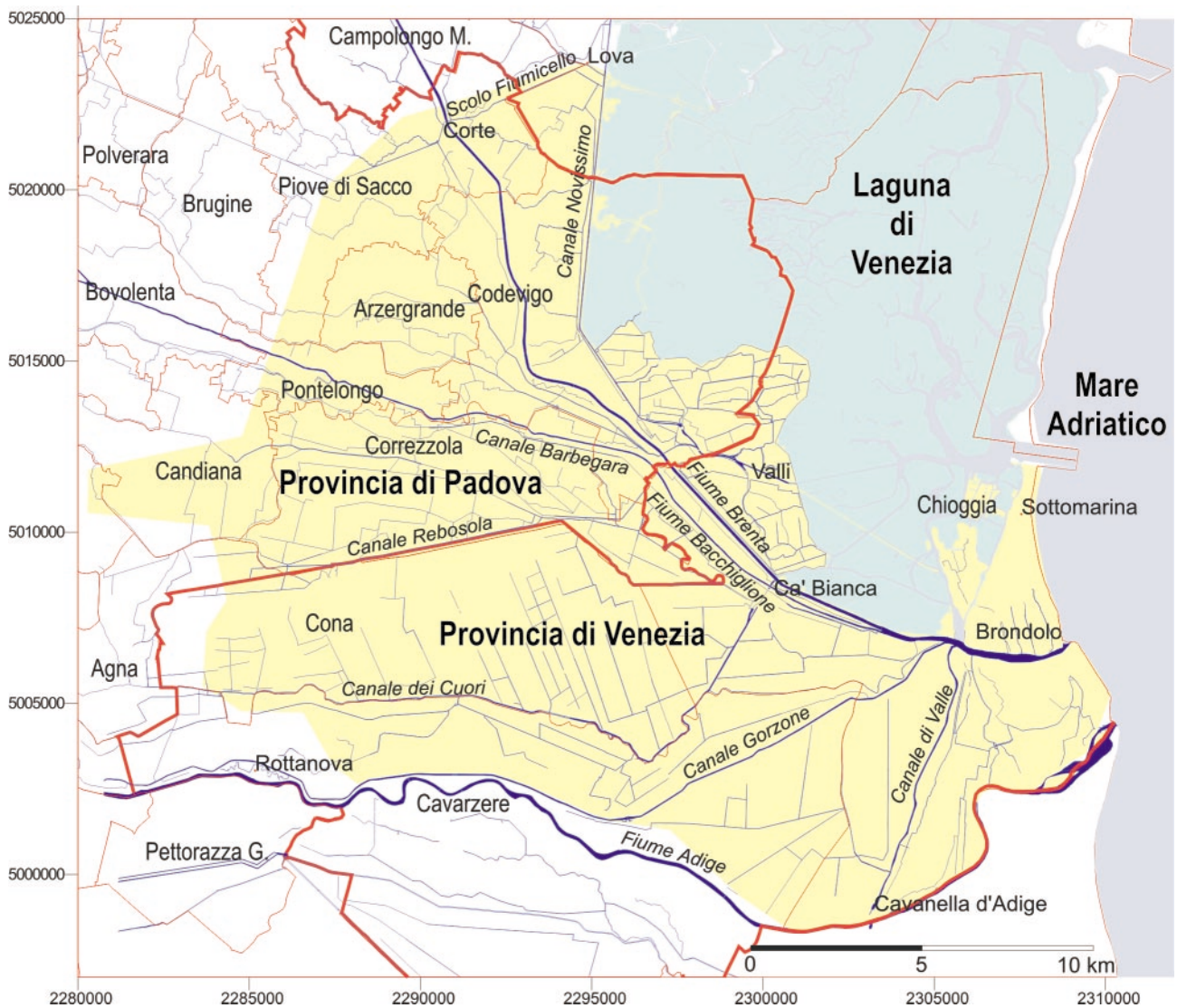


Figura 1.2 - Inquadramento geografico dell'area ISES: la linea di colore rosso delinea il confine provinciale. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

Pianura Veneta ha costituito un'area di piattaforma con mare poco profondo, soggetta ad una subsidenza compensata talora dalla sedimentazione e alternata a fasi di emersioni locali. Nel Miocene, la zona marina manteneva i caratteri di una blanda "periclinale", con pendenza verso sud del 3-4%, già impostata nel Mesozoico. La separazione tra la piattaforma recente e la "periclinale" sembra essere localizzata poco a sud del parallelo di Venezia e a sud di Chioggia; inoltre, questa struttura accentua la sua pendenza e si congiunge al fianco nord-orientale della Fossa Padano-Adriatica.

L'inizio del Pliocene è caratterizzato da una estesa trasgressione marina che invase le regioni mediterranee. Sul finire si verificarono regressioni marine e il sollevamento di intere regioni; l'attività tettonica fu allora di notevole importanza e nell'area veneziana indusse una subsidenza rilevante come non più nei tempi successivi [61]. All'inizio del Quaternario pertanto (circa 1,8 milioni di anni fa), nella regione adriatica si estendeva un vasto dominio marino da cui emergevano l'orogeno alpino e quello appenninico. L'attuale Pianura Veneta, che risultava completamente sommersa, occupava, tra le due catene insorgenti, un'estesa depres-

sione nella quale il mare Adriatico creava un profondo golfo (Fig. 1.3a). In questo confluivano gli apporti detritici della degradazione dei rilievi emersi, dando luogo ad un processo di progressiva colmata. Nelle aree strutturalmente più depresse si ebbe un accumulo di sedimenti maggiore ed in esse, di conseguenza, si instaurò un più rapido processo di costipamento per il maggior carico litostatico; il risultato fu una subsidenza differenziale che determinò elevati spessori di sedimenti diversi da zona a zona e accentuò le forme strutturali già esistenti.

Per quanto riguarda la tipologia dei sedimenti, la serie Quaternaria è abbastanza monotona, ma dal punto di vista paleoambientale risulta articolata in relazione alle varie fasi glaciali ed interglaciali che si sono succedute e hanno indotto importanti variazioni eustatiche comportando l'alternanza di regressioni e trasgressioni marine.

Alla fine dell'ultimo periodo glaciale würmiano, circa 20.000 anni fa, il livello del mare era grosso modo 100-130 m più basso dell'attuale per le grandi quantità d'acqua ritenute sui continenti sotto forma di ghiaccio e la linea di costa si trovava circa 300 chilometri più a sud rispetto ad oggi, e tutto il bacino alto adriatico risultava emerso a formare una vasta pianura: la paleopianura altoadriatica würmiana (Fig. 1.3b).

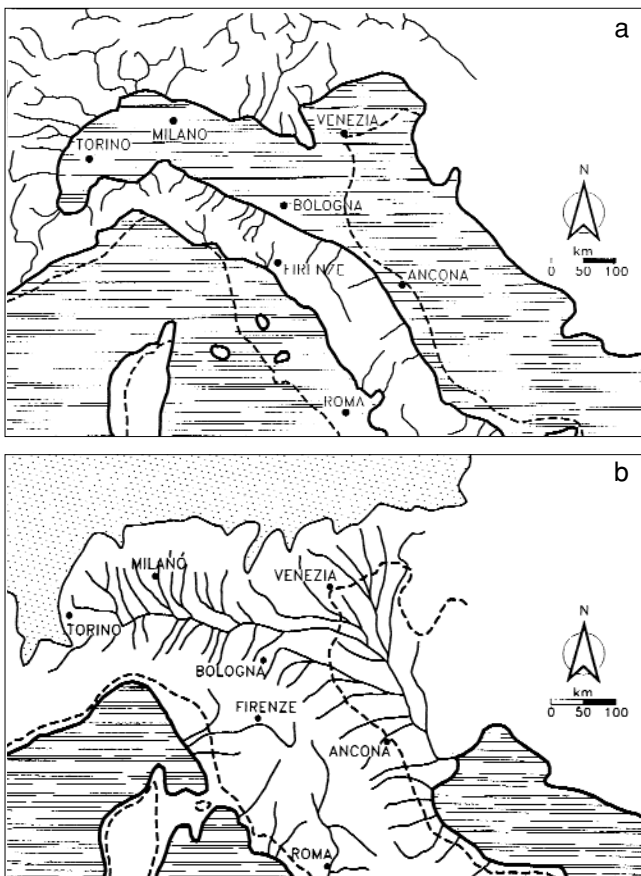
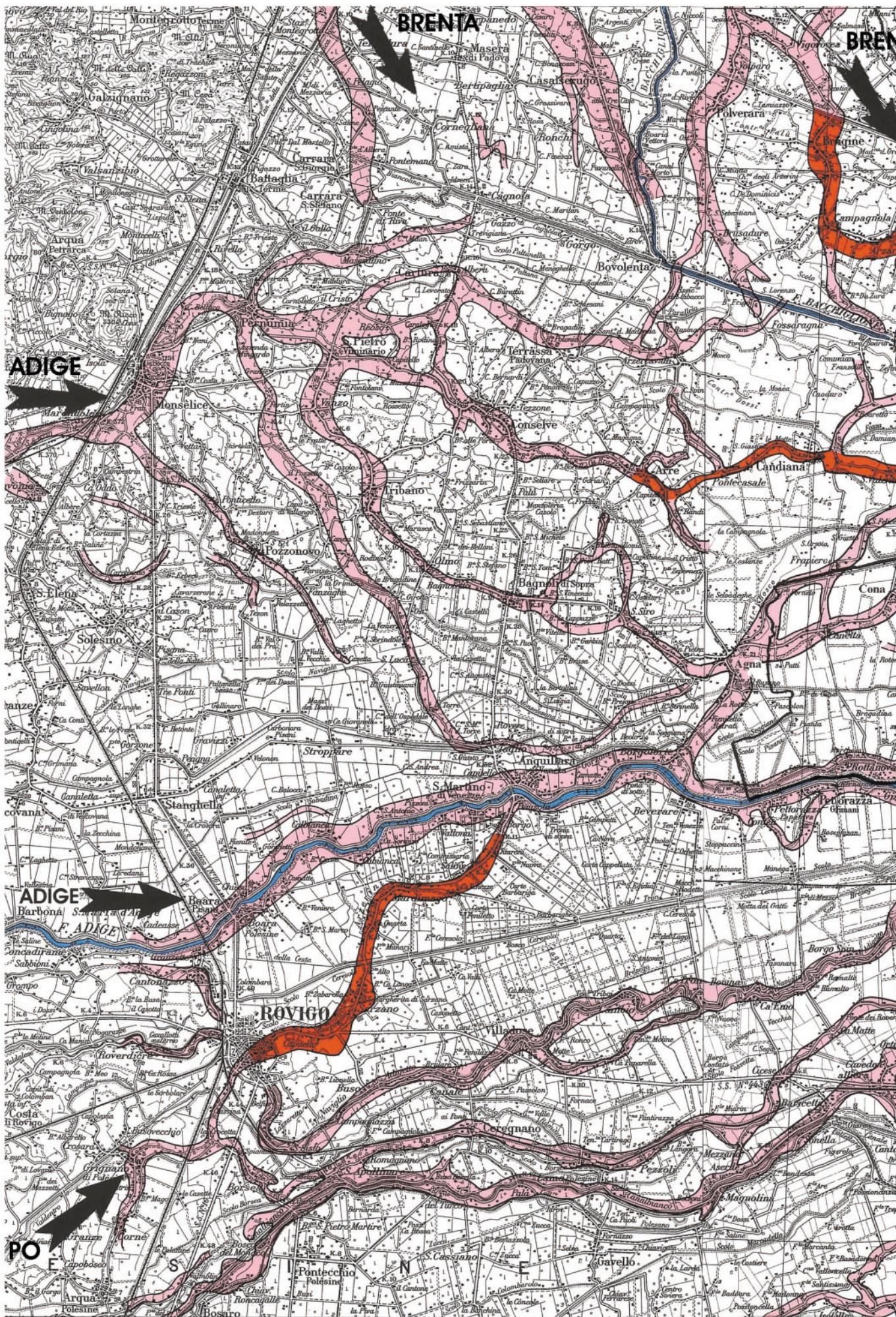
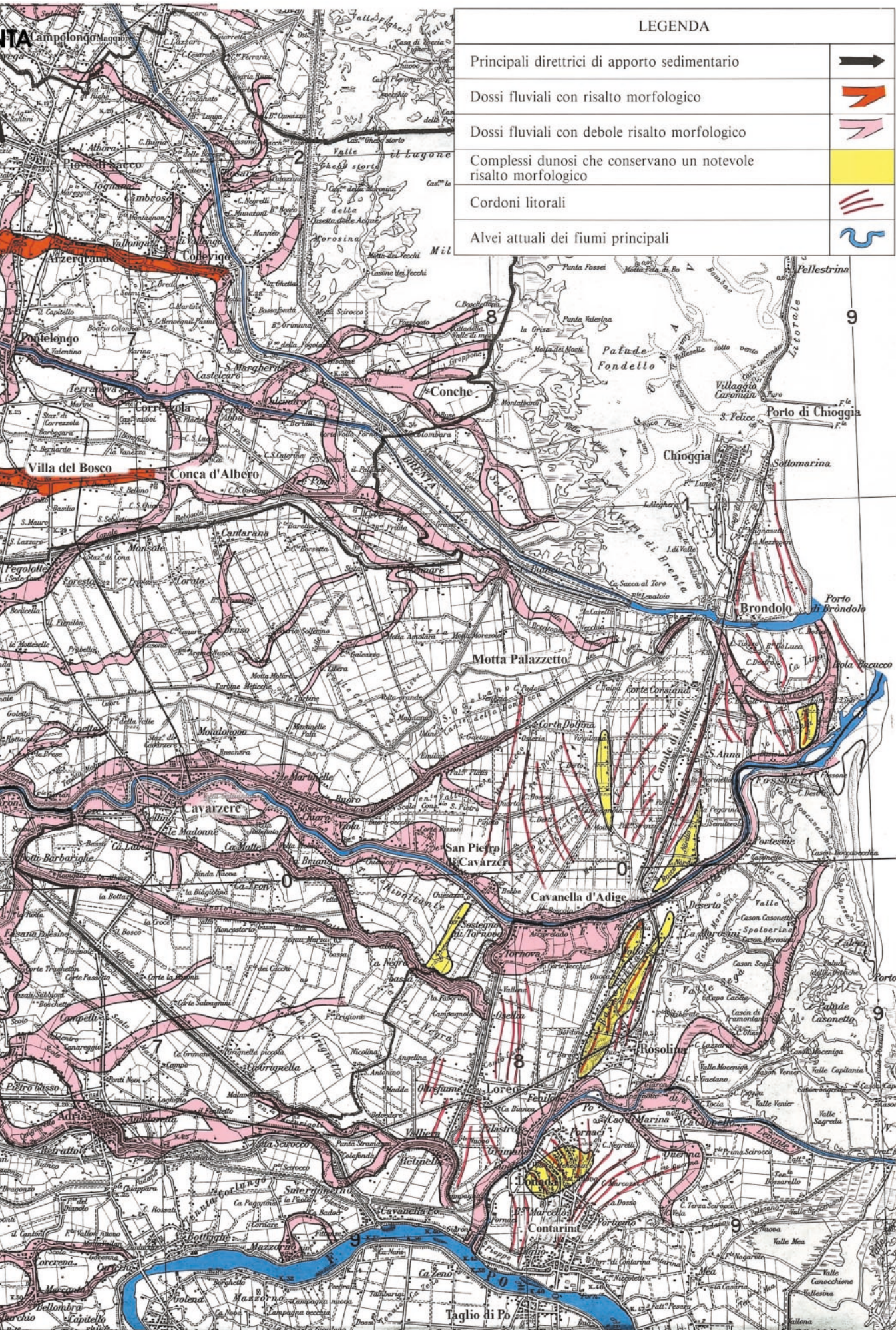


Figura 1.3 - Rappresentazione schematica dell'area adriatica: a) nel Pliocene (tra 5 e 2 milioni di anni b.p.) e b) durante l'ultima fase glaciale würmiana (circa ventimila anni b.p.): in tratteggio la situazione attuale [62].

Le strutture geologico-geomorfologiche osservabili direttamente sul terreno o tramite sondaggi a piccola profondità (10-20 m) e che rivestono un ruolo importante nella definizione dell'assetto attuale, nello sviluppo e nella comprensione dei processi di intrusione salina e subsidenza, sono quelle relative all'evoluzione post glaciale ed olocenica della pianura würmiana.

Relativamente ai depositi recenti, dal punto di vista geomorfologico e sedimentologico il territorio esaminato può essere suddiviso in due parti: il settore centro-occidentale, dove sono tuttora riconoscibili tracce di antichi dossi fluviali e di paleoalvei e rare evidenze di cordoni litoranei spianati, ed il settore orientale, caratterizzato dalla presenza di numerosi cordoni dunosi, che spesso conservano ancora un parziale rilievo. Le caratteristiche attuali costituiscono il prodotto dei processi evolutivi che si sono verificati soprattutto nel corso dell'Olocene: erosione, sedimentazione, variazioni del livello marino e subsidenza rappresentano i principali fattori che hanno condizionato l'evoluzione del territorio. Hanno altresì assunto un ruolo di fondamentale importanza i corsi d'acqua che attualmente attraversano o lambiscono il territorio e di cui è possibile individuare sul terreno gli antichi percorsi, che con i loro ripetuti processi erosivi e sedimentari hanno infatti vistosamente





LEGENDA	
Principali direttrici di apporto sedimentario	
Dossi fluviali con risalto morfologico	
Dossi fluviali con debole risalto morfologico	
Complessi dunosi che conservano un notevole risalto morfologico	
Cordonii litorali	
Alvei attuali dei fiumi principali	

modellato la superficie di questa parte di pianura, creando dossi e depressioni. Inoltre i cospicui apporti sedimentari, convogliati dai fiumi verso il mare, hanno favorito il progressivo e rapido avanzamento del litorale verso est ed in parte contrastato gli effetti della subsidenza.

Numerose evidenze di corsi d'acqua estinti, diretti verso la parte meridionale della Laguna di Venezia, sono state individuate soprattutto nel settore centro-occidentale del territorio esaminato: in alcuni casi si riconoscono tuttora le tracce degli antichi canali, in altri, invece, soltanto i dossi. Tra questi si segnala la presenza della più antica direttrice settentrionale di deflusso del Po [38]; passante per Agna, Cona, Conca d'Albero e Civè e diretta verso Chioggia (Figg. 1.4 e 1.5). Presso Conca d'Albero vi confluiva anche un paleo-Adige proveniente da ovest e passante per le località Candiana e Villa del Bosco. Anche ad ovest dell'allineamento Motta Palazzetto-San Pietro di Cavarzere, tra l'attuale corso dell'Adige e l'antico ramo del Po appena descritto, sono evidenti alcuni paleoalvei allungati prevalentemente in direzione SO-NE, possibili testimonianze di antiche diramazioni dell'Adige. Più ad est, tra il margine meridionale della Laguna di Venezia ed il Canale Vecchio dei Cuori, si snoda il tracciato del Brentone Vecchio, che si suppone sia stato il percorso più meridionale dei fiumi Brenta-Bacchiglione [48]. Sulla fascia costiera sviluppata a ridosso della Laguna di Venezia sono state individuate anche tracce di numerosi sottili canali, spesso particolarmente ramificati. Considerazioni di carattere geomorfologico e sedimentologico inducono a ritenere che gran parte di essi si sia sviluppata in ambienti di tipo fluvio-deltizio e lagunare; alcuni, inoltre, costituiscono l'evidenza di vecchi canali di bonifica.

Numerosi studi hanno evidenziato che durante l'acme della trasgressione marina olocenica la linea di costa si è attestata ad ovest dell'attuale, in corrispondenza della direttrice Conche-Cavarzere, senza tuttavia raggiungere la zona di Contarina (Figg. 1.4; 1.5 e 1.6). La mancanza di evidenze superficiali lungo la linea di massima ingressione, nonché le scarse testimonianze stratigrafiche di antichi apparati costieri e la constatazione che depositi di ambiente marino litorale sembrano passare con gradualità a quelli di ambiente fluviale, inducono a ritenere che la costa non si sia stabilizzata in questa posizione per lungo tempo, tanto da consentire l'elaborazione di apparati costieri rilevanti, e che un attivo apporto clastico fluviale abbia determinato una graduale regressione [48; 55].

Le prime evidenze superficiali di un'antica linea di costa [69] si rinvencono ad oriente, in particolare a

poco più di 1 chilometro a sud-est del Bacino Zennare, dove sottili tracce di antichi cordoni litoranei, privi di rilievo topografico e disposti in direzione NE-SO, sono state distinte mediante l'analisi delle fotografie aeree e di rilievi sul terreno. Viceversa conserva un notevole risalto morfologico l'apparato costiero che si individua tra le località Motta Palazzetto e San Pietro di Cavarzere (Fig. 1.4), la cui formazione risale al 2500 a.C. [15]: il suo notevole sviluppo e lo spessore dei depositi sabbiosi litorali che lo costituiscono sembrano infatti essere il prodotto di una lunga elaborazione verificatasi nel corso di un prolungato periodo di stasi della linea di costa in questa stessa posizione (Fig. 1.6). A monte di questi antichi cordoni litoranei si sono formati bacini lagunari e palustri, episodici e discontinui [16] la cui successiva scomparsa è da mettere in relazione con l'arrivo di sedimenti alluvionali che hanno anche favorito il nuovo avanzamento della linea di costa verso est; bacini di acqua salata e salmastra sono stati quindi progressivamente sostituiti da paludi di acqua dolce. Da questo momento, ad ovest degli apparati costieri più antichi, l'influenza marina sembra essere stata molto scarsa, se non addirittura assente, mentre i processi di origine fluviale sono divenuti dominanti. Ad est dell'allineamento Motta Palazzetto-San Pietro di Cavarzere le tracce degli antichi cordoni litoranei, che segnano le tappe successive della progradazione costiera, sono particolarmente evidenti; assai rilevanti sono quelle sviluppate nella direzione Chioggia-Bosco Nordio, testimoni di un lungo periodo di stabilizzazione del litorale, durante il quale i processi di accumulo e di rielaborazione dei sedimenti sono stati

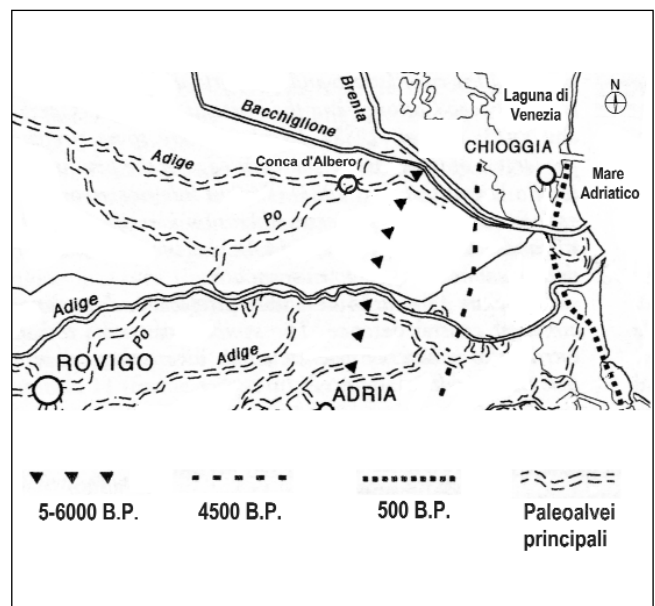


Figura 1.5 - Variazioni della linea di costa e tracce dei principali paleovalvei [modificata da 15].

molto intensi. Si tratta di una serie di allineamenti sabbiosi paralleli e molto vicini tra loro, situati immediatamente ad oriente del Canale di Valle e riferibili, da ovest ad est, al IV sec. a.C., al III sec. d.C. e al X sec. d.C. [15; 41]. Tra la direttrice Motta Palazzetto-San Pietro di Cavarzere ed il Canale di Valle, la disposizione dei cordoni litoranei permette di riconoscere le tracce di due antichi apparati deltizi, uno con cuspidi presso Cavanella d'Adige, l'altro in corrispondenza di Brondolo: nel primo la fase di massimo protendimento è riferibile a circa il 1000 a.C. (Fig. 1.6); all'altezza di Brondolo, invece, la linea di costa si trovava lì già in epoca romana. Il tratto di litorale esteso dal Porto di Chioggia alla foce dell'Adige ha oggi un andamento arcuato e dal punto di vista morfologico è caratterizzato da una costa sabbiosa, bassa e con spiagge sottili, alle cui spalle è presente una fitta sequenza di cordoni litoranei paralleli all'attuale litorale. Si tratta di strutture relativamente recenti, sviluppatasi a partire dal XV secolo, contemporaneamente al protendimento verso mare del delta lobato del Po, in seguito ampiamente modificati dall'uomo, per esigenze di sviluppo agricolo e urbano.

L'attuale morfologia del litorale è in parte una diretta conseguenza degli interventi antropici e, in particolare, della modifica del tratto terminale del Brenta, compiuta verso la fine del XIX secolo; con una nuova inalveazione venne abbandonata l'ansa del Brenta Vecchio, di cui oggi rimangono ancora evidenti tracce (v. Fig. 1.4), riducendo così la lunghezza dell'originario percorso del fiume e spostandone la foce più a nord [85].

Al progressivo recente generale avanzamento del

lido di Sottomarina, alimentato soprattutto dagli apporti solidi di Adige, Brenta e Bacchiglione, ha contribuito inoltre la costruzione delle dighe del Porto di Chioggia, avvenuta tra il 1911 ed il 1930. Le dighe, proteggendo parte della spiaggia dal flutto di bora ed impedendo il movimento longitudinale delle sabbie, hanno favorito l'accumulo dei sedimenti parallelamente al litorale [85; 55].

Da quanto detto emerge quindi che attualmente nell'area esaminata sono presenti morfologie e depositi di ambiente alluvionale, deltizio e litoraneo.

Le differenti condizioni ambientali che si sono succedute nel corso dell'Olocene sono testimoniate anche dall'ampia varietà di depositi affioranti e sub-affioranti che caratterizza tutto il territorio. In corrispondenza dei dossi fluviali e degli antichi cordoni litoranei, in genere rappresentativi delle zone altimetricamente più elevate, si rinvencono sabbie, sabbie limose e secondariamente limi sabbiosi. Sedimenti argilloso-limosi, spesso caratterizzati da un elevato contenuto di sostanza organica, si trovano invece nei bacini interfluviali e tra apparati costieri successivi, zone che in passato erano prevalentemente soggette a fenomeni di impaludamento. Nel settore meridionale dell'area, in corrispondenza di zone particolarmente depresse che localmente oggi giacciono a quote anche fino a 4 m sotto il livello del mare e che in passato sono state sedi di paludi e canneti, si rinvencono estesi affioramenti di torbe, il cui spessore massimo non supera i 2 m. Nelle fasce di transizione tra zone altimetricamente elevate e depresse prevalgono i limi sabbioso-argillosi, i quali rappresentano generalmente l'unità litologica verso la quale passano gradatamente i limi sabbiosi di origine fluviale, depositi in corrispondenza dei dossi. Argille ed argille limose costituiscono anche riempimenti di canali in fase di abbandono e testimoniano quindi condizioni di sedimentazione verificatesi in un paleoalveo ormai non più attivo; esse infatti si rinvencono a volte in corrispondenza di corpi canalizzati sviluppati lungo la parte mediana dei dossi.

L'assetto geologico-geomorfologico tardo-pleistoceno ed olocenico del bacino meridionale lagunare risulta quindi molto articolato. Come si vedrà nei capitoli successivi, la variazione areale delle caratteristiche sedimentologiche e geomorfologiche dell'area ISES si riflette nella dinamica differenziale dei processi di intrusione salina e subsidenza alla quale è spesso correlato.

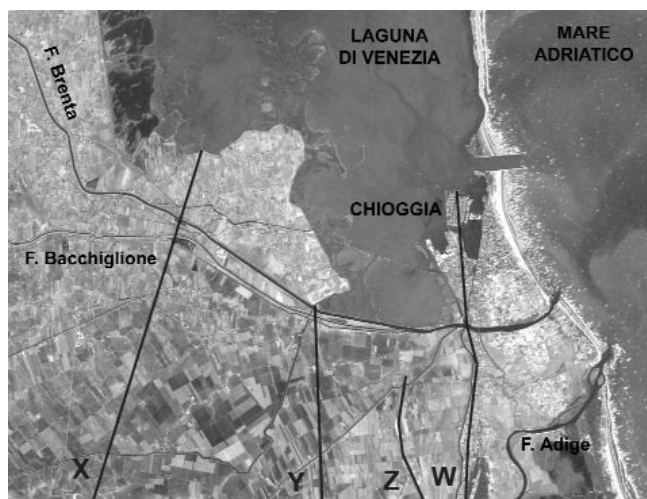


Figura 1.6 - Rappresentazione delle variazioni della linea di costa in un'immagine satellitare [70]: X≈5-6.000 anni b.p.; Y≈4.500 b.p.; Z≈3.000 anni b.p. e W≈2.500 anni b.p.

1.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

La coltre quaternaria è costituita prevalentemente da sedimenti continentali con intercalati depositi marini, che riflettono il succedersi delle fasi regressive e trasgressive del mare. I sedimenti continentali fanno parte delle vaste conoidi alluvionali dei fiumi Brenta e Adige, i cui rapporti si intersecano strutturalmente con addentellati, forme enteropiche, ecc., cui interferiscono, in presenza alterna, i depositi marini. Questa complessità stratigrafica dà origine ad irregolari variazioni laterali di facies che si riflettono sulla situazione idrogeologica, condizionando quindi l'andamento spaziale degli acquiferi ed i loro reciproci rapporti. Malgrado le centinaia di terebrazioni di pozzi artesiani eseguite in quasi tutto il comprensorio ISES, la descrizione delle colonne litostratigrafiche è molto spesso inutilizzabile per una ricostruzione precisa del sistema acquifero.

Per ovviare in parte a questa mancanza e ricostruire l'assetto batimetrico del sistema acquifero si è analizzata la frequenza della distribuzione dei filtri posti in opera nei pozzi artesiani in quanto legata allo sviluppo degli orizzonti acquiferi produttivi [24]. E' stato inoltre di grande aiuto il confronto con la situazione dell'area lagunare veneziana (Fig. 1.7) che, sicuramente analoga a quella dell'area meridionale e pertanto ad essa comparabile, risultava estremamente dettagliata grazie all'utilizzo delle stratigrafie provenienti dai pozzi esplorativi profondi effettuati a caro-

taggio continuo [1; 42; 63].

Come risultato di una elaborazione di tutti gli elementi raccolti, il sistema acquifero presente nel bacino meridionale, che si sviluppa fino a circa 230 m di profondità, è stato tracciato lungo una sezione schematica con orientazione ONO-ESE (direttrice Codevigo-Chioggia) (Fig. 1.8) e può essere descritto come segue:

1° *acquifero*: rappresenta un orizzonte poco potente e non ben delineato di spessore più o meno costante in tutte le direzioni;

2° *acquifero*: costituisce probabilmente più a nord un'unica falda con il precedente dal quale tende a separarsi nettamente procedendo verso SE. Potente in genere circa 50 m, esso si assottiglia nei pressi dell'Adige fino a 20 m, includendo un orizzonte di argilla di circa 10 m;

3° *acquifero*: risulta composto da più livelli produttivi che sono stati raggruppati in un'unica unità idrologica per analogia con la situazione veneziana. In prossimità del mare Adriatico e del fiume Adige, esso tende probabilmente a congiungersi con quello sottostante andando a formare una sola falda di notevole spessore;

4° *acquifero*: è la falda più potente e, benché vi siano presenti varie lenti di argilla, risulta essere la più produttiva e di conseguenza è, ed è stata in già in passato, la più sfruttata del sistema multistrato;

5° *acquifero*: orizzonte ben delineato solamente nella parte centro-settentrionale dell'area dove presenta

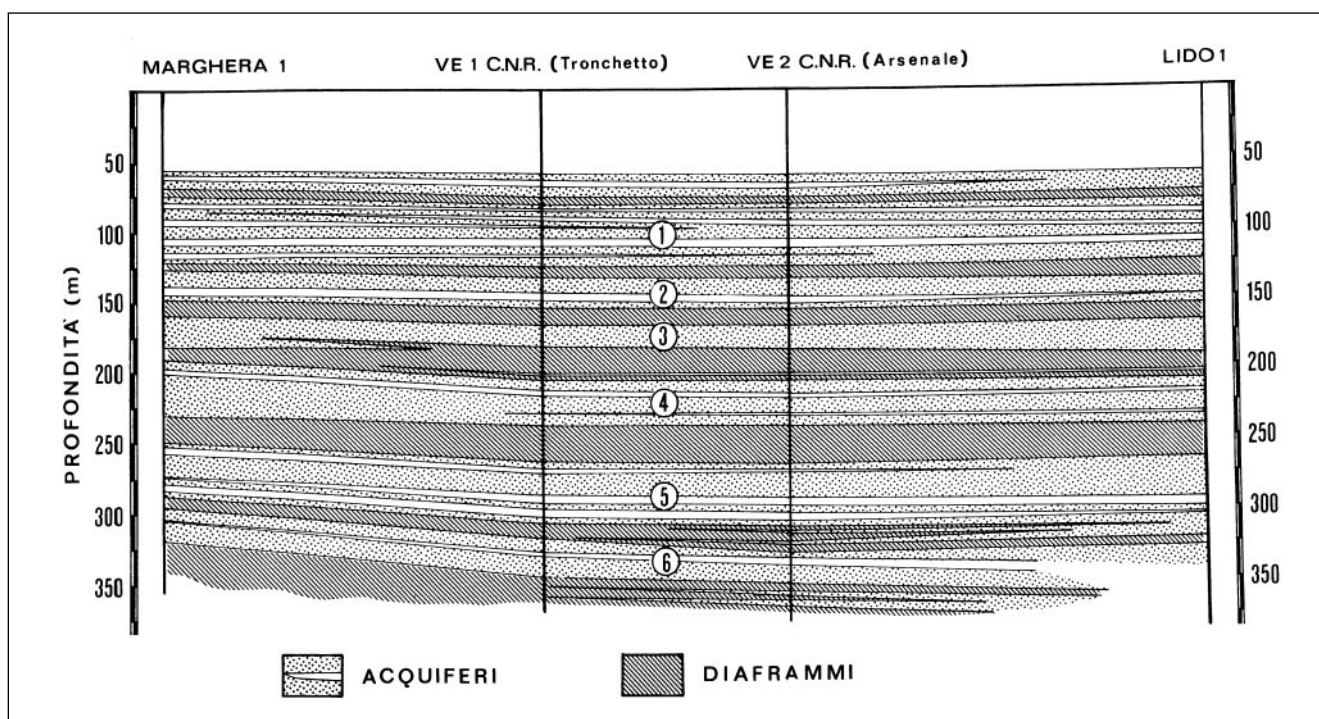


Figura 1.7 - Sezione schematica del sistema acquifero veneziano sfruttato fino a 350 m di profondità lungo la direttrice Marghera-Venezia-Lido [27].

uno spessore costante di circa 20 m.

Con base a circa 260 m di profondità esisterebbe un sesto acquifero che, a causa della scarsità di dati al suo riguardo, è descritto solo in modo sommario.

Le falde su definite risultano separate da diaframmi impermeabili di argilla ed argille-limose, con potenza variabile tra i 10 e 20 m, comunque non sempre ben delineati o continui. Gli orizzonti sabbiosi non sono quasi mai termini puri e presentano una varia composizione granulometrica che ne condiziona la permeabilità e di conseguenza la produttività. Non sono presenti termini ghiaiosi, neppure in banchi di piccolo spessore, mentre è più diffusa la presenza di torba sia in orizzonti ben definiti che frammista da altri sedimenti. Intorno ai - 350 m si trova una interfaccia di acqua dolce-acqua salata, il cui tenore salino ne pregiudica l'utilizzo.

Quanto sopra è riferibile all'intera zona del bacino meridionale.

Considerando le irregolarità e le variazioni laterali di facies e focalizzandoci arealmente al più ristretto com-

Tabella 1.1 - Variazione delle profondità medie degli acquiferi presenti nell'area ISES

ACQUIFERI	Profondità (in metri)		
	Piove di Sacco	Conche	Chioggia
I	40 - 60	57 - 80	68 - 95
II	65 - 100	90 - 135	113 - 155
III	107 - 140	143 - 164	170 - 190
IV	150 - 197	175 - 215	190 - 228
V	210 - 230	228 - 245	?
VI	243 - 263	?	?

prensorio ISES, l'assetto batimetrico del sistema multifalदे qui individuato, di poco difforme da quello descritto in precedenza (Fig. 1.8), è ripotato in tabella 1.1 con le profondità medie dei 6 acquiferi principali, considerati dalla zona più occidentale di Piove di Sacco. I primi 50 m di sottosuolo, relativi alla falda freatica-semiartesiana non sono stati correlati a causa della loro alta variabilità litologica e degli sviluppi lentiformi e spesso interdigerati degli orizzonti.

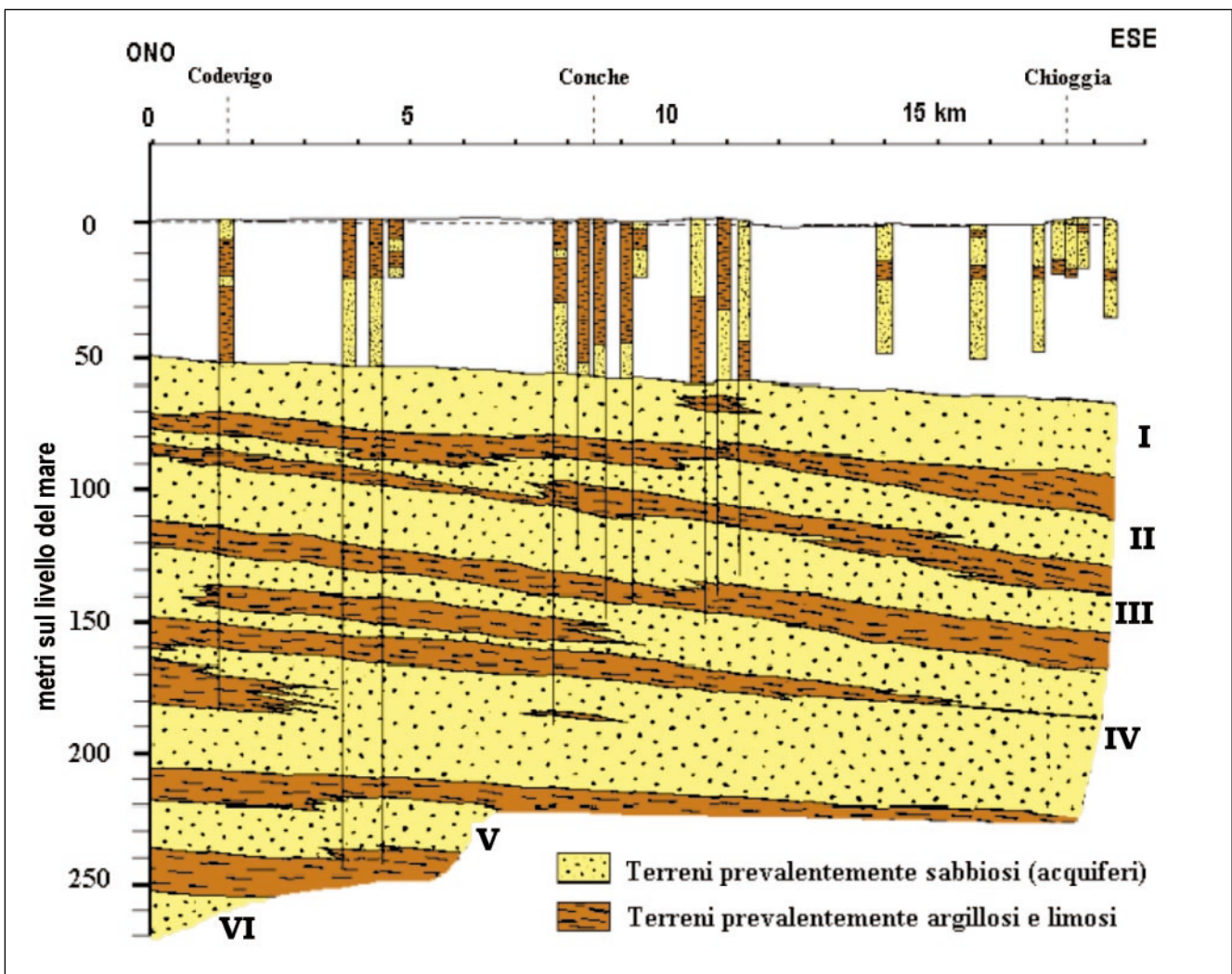


Figura 1.8 - Schematizzazione del sistema acquifero lungo la sezione Codevigo-Conche-Chioggia ([13] modificata in [4]).

2. Sottoprogetto Intrusione salina

2.1. INQUADRAMENTO DESCRITTIVO DEL PROCESSO DI INTRUSIONE SALINA

In generale il problema dell'intrusione salina è tipico delle falde costiere ove l'acqua del mare si infiltra spiazzando l'acqua dolce degli acquiferi freatici e artesiani. Questo fenomeno prende il nome di intrusione salina.

Negli acquiferi l'acqua dolce, per la minor densità ed il maggior carico idraulico rispetto all'acqua salata, "galleggia" senza mescolarsi sopra di essa deprimendo la superficie di separazione che prende il nome di *interfaccia*.

Considerando il fenomeno essenzialmente dal punto di vista statico, la legge che regola l'equilibrio al contatto tra le due acque è quella di Ghyben-Herzberg:

$$H_i \rho_m = H_p \rho_d + H_i \rho_d$$

dove: H_i = profondità dell'interfaccia dal livello medio del mare; H_p = altezza del livello di falda sul livello del mare; ρ_m = densità dell'acqua di mare (mediamente di 1027 kg/m^3 , con circa 42 g/l di contenuto salino); ρ_d = densità dell'acqua dolce di falda (circa 1000 kg/m^3). Da essa si deduce che la profondità dell'interfaccia (H_i) dipende dall'altezza della superficie di falda sul livello medio del mare e dalle densità relative dei due liquidi.

Considerando i valori di densità sopracitati si ottiene che $H_m \approx 37 H_p$, cioè per un'elevazione della falda freatica di 1 m sul livello medio del mare, si ottiene un approfondimento dell'interfaccia di circa 37 m (Fig. 2.1a). In realtà, l'interfaccia si trova a profondità maggiori per effetto del deflusso della falda che è stato trascurato. Infatti le frequenti eterogeneità ed anisotropie degli acquiferi comportano l'esistenza di diverse velocità di deflusso all'interno della stessa falda, che provocano numerose irregolarità sull'andamento dell'interfaccia. Inoltre il limite acqua dolce/acqua salata non è netto, ma avviene gradualmente attraverso una zona di diffusione o di transizione, a salinità decrescente dal basso verso l'alto (Fig. 2.1b). Questa superficie presenta una inclinazione che varia a seconda delle condizioni idrogeologiche e fa assumere alla falda salata la geometria di un cuneo, definito appunto "cuneo salino" (Fig. 2.2).

Quando la superficie della falda si abbassa, per pompaggi o altre cause, avviene una ingressione dell'acqua del mare che, entrando nell'acquifero per via sottomarina, si sostituisce all'acqua dolce. L'acqua dolce comunque copre ancora quella salata, e continua ad esistere tra di esse una interfaccia che può variare da 50 cm a oltre 100 m di spessore e la cui *forma* è regolata dalle relazioni idrodinamiche tra flusso dolce e flusso salato [59].

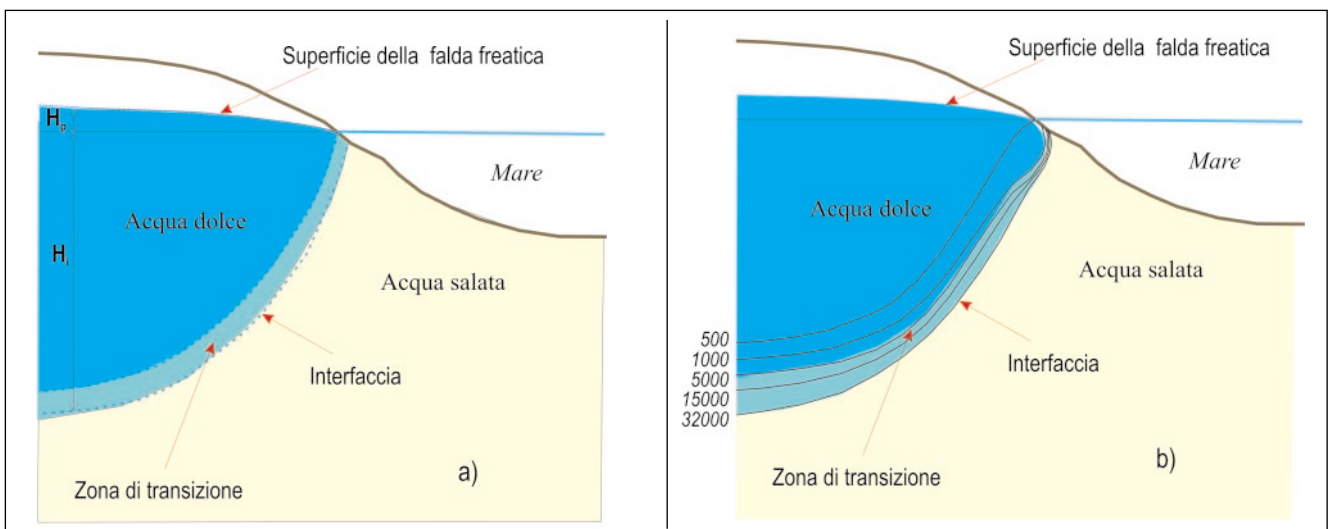


Figura 2.1 - Schema teorico dei rapporti tra acqua dolce e acqua salata negli acquiferi costieri e variazione del tenore salino ($\mu\text{S/cm}$) nella zona di transizione [40].

Il processo dell'intrusione salina è spesso concomitante all'emungimento di acqua da una falda costiera che, modificando l'equilibrio esistente, "richiama" l'acqua salata in direzione del pozzo (Fig. 2.3). Oltre all'emungimento a intermittenza dell'acquifero, anche il pompaggio continuo o l'ubicazione sbagliata di pozzi di estrazione possono risultare fattori innescanti l'intrusione di acqua salata. Infatti, poiché l'interfaccia acqua dolce/acqua salata è il risultato di un equilibrio dinamico, quando il naturale deflusso

di acqua dolce verso il mare viene ridimensionato o interrotto perché captato si verifica l'intrusione salina. E' evidente che l'emungimento in continuo è il peggior sistema di sfruttamento dell'acquifero, in quanto l'acqua salata, più densa dell'acqua dolce può tornare a livelli più bassi dell'acquifero solo in caso di cessazione dei pompaggi. L'intrusione salina è un problema grave non solo per l'inquinamento delle acque sotterranee ma anche perché può innescare, con la salinizzazione dei sedi-

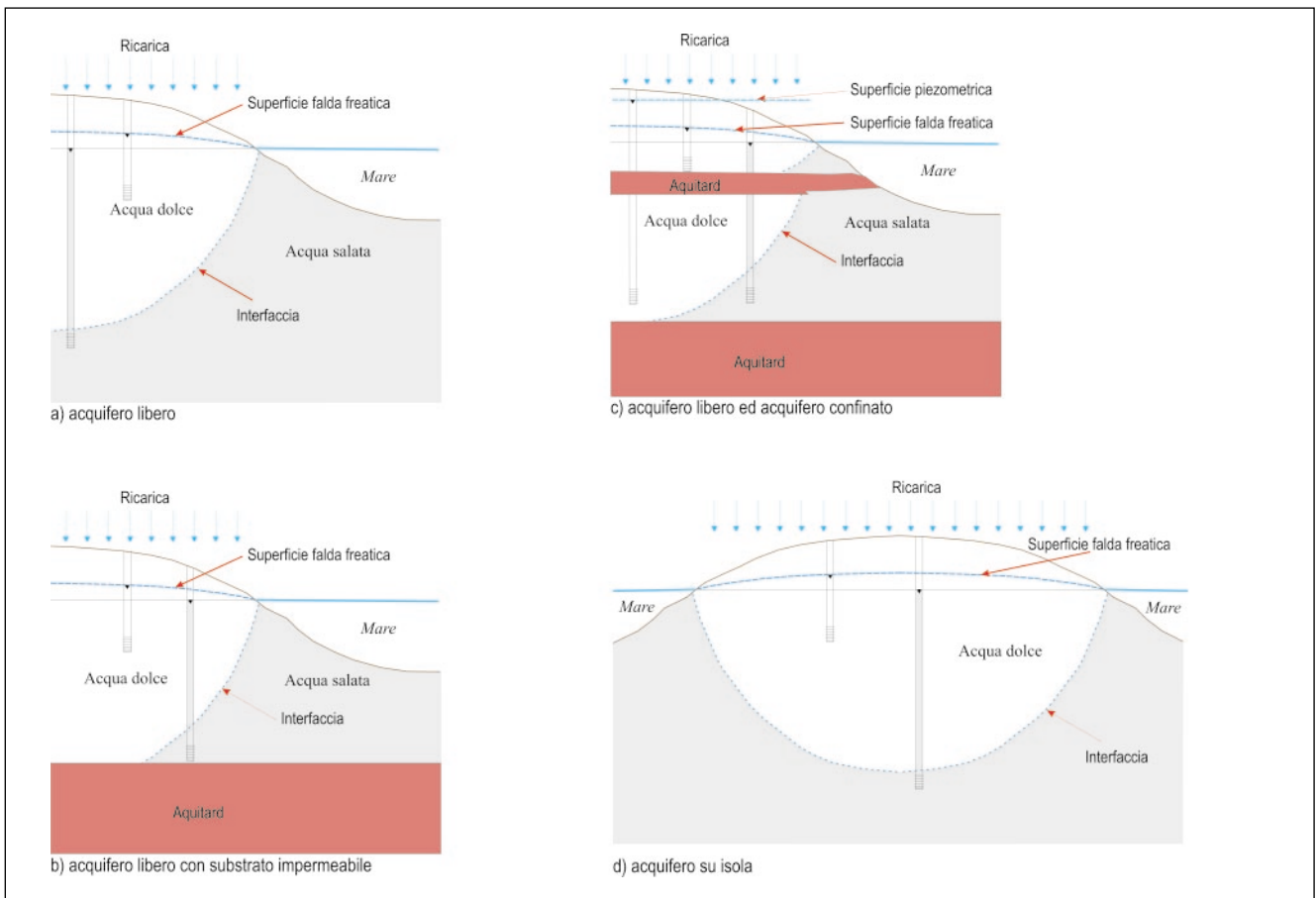


Figura 2.2 – Diverse situazioni idrogeologiche naturali teoriche nelle aree costiere.

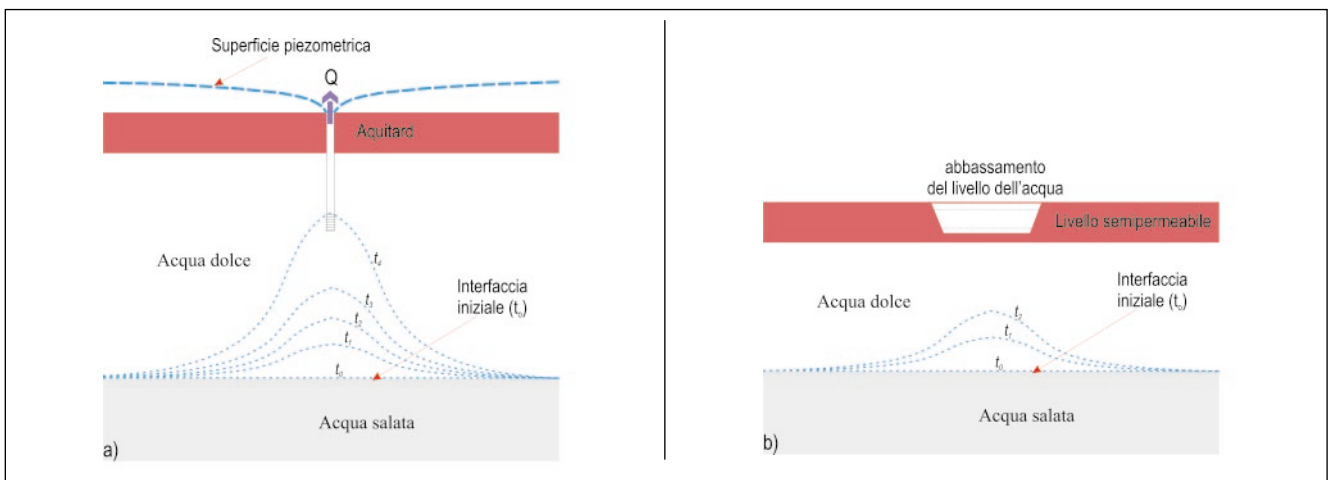


Figura 2.3 – Risalita dell'interfaccia indotta da: a) upconing; b) bonifica.

menti, un collasso delle argille superficiali per la variazione del chimismo delle loro acque interstiziali e quindi una ulteriore subsidenza [81].

2.2 INTRUSIONE SALINA NEL COMPRESORIO LAGUNARE

In considerazione delle caratteristiche geoambientali del comprensorio, le risorse idriche sotterranee destinate all'approvvigionamento per uso potabile sono soggette ad inquinamento antropico di varia origine, incluso quello indotto da uno sfruttamento eccessivo delle risorse stesse che, in particolari situazioni, può tradursi in "inquinamento per salinizzazione".

Il problema della contaminazione salina del sottosuolo è stato affrontato già da alcuni decenni in modo più o meno sistematico.

Le prime indagini sul territorio risalgono agli anni 1970 e furono condotte per incarico del Ministero dei Lavori Pubblici "Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali" con lo scopo di valutare se, dove e come la contaminazione salina fosse presente. Dalle indagini condotte [7, 9] fu tracciato il limite dell'intrusione marina superficiale legata alla falda freatica per l'intero comprensorio lagunare (Fig. 2.4a). Il fenomeno interessava una profondità massima di circa 20 m ed era osservabile lungo tutto il margine interno della laguna. Un'altra elaborazione fornita dagli stessi autori riporta la mappa delle isobate del tetto del substrato conduttore (Fig. 2.4b), che è riferibile al limite delle acque saline fossili: esso variava da circa 350 m di profondità nell'area meridionale per arrivare ad oltre 600m nella parte settentrionale. Come sintesi del lavoro fu tracciato uno spaccato geoelettrico relativo ad un profilo che segue il margine interno della laguna di Venezia. Questo modello elettrostratigrafico del processo di contaminazione salina evidenzia chiaramente la movimentata morfologia del tetto del marker conduttore profondo, che si attenua nella parte più interna (Fig. 2.5).

A parte successivi sporadici rilevamenti e controlli, solo nell'ultimo decennio il problema è stato oggetto di maggiore attenzione, in concomitanza agli allarmi climatici sulla base dei quali, in conseguenza a variazioni significative del livello del mare, meteo-climatiche in generale, e/o a processi di desertificazione, si sarebbe potuta creare una "criticità di disponibilità" delle risorse sotterranee anche per processi di salinizzazione delle stesse, soprattutto, ovviamente, in zone costiere. Il problema per il comprensorio lagunare venne così affrontato nell'ambito del Progetto Strategico "Ambiente e Territorio" del CNR ⁽³⁾ e del

successivo Progetto "Cuneo salino nel comune di Chioggia" della Provincia di Venezia ⁽⁴⁾.

Le conoscenze pregresse, gli studi preliminari condotti nel territorio e le differenti problematiche avevano suggerito di condurre le ricerche con ottiche diverse per i settori centro-settentrionale e meridionale del comprensorio lagunare veneziano.

Nel settore centro-settentrionale, l'approvvigionamento idrico, più o meno intenso, interessa da sempre il sistema *aquifer-aquitard* che si sviluppa tra 55 e 340 metri di profondità. Qui il rischio dell'intrusione salina per gli acquiferi *artesiani* maggiormente sfruttati è stato studiato mediante simulazione numerica [11; 12]. Per la calibrazione del modello matematico e per migliorare alcune informazioni di input quali ad esempio nuovi dettagli litologici, fu eseguita una serie di campagne per la determinazione stagionale del tenore salino salinità nonché dei carotaggi radioattivi "gamma-ray log" in pozzi profondi della rete di controllo delle pressioni di strato del CNR-ISDGM e strategicamente ubicati per ottenere informazioni aggiuntive importanti per la schematizzazione idrogeologica di alcuni settori ove in precedenza era poco nota [6].

In considerazione dei dati disponibili, stratigrafici e piezometrici, le simulazioni furono ristrette ad una sezione verticale bidimensionale del sistema acquifero ritenuta rappresentativa dello stesso. La sezione prescelta nella zona delle falde in pressione è ortogonale alla linea di riva, lunga 32.6 chilometri, e si estende da Scorzè, passando attraverso Venezia e Lido, all'incirca 27 chilometri all'interno della linea di riva fino ad un punto nell'Adriatico a 5 chilometri dalla costa (Fig. 2.6a). In direzione verticale il dominio di simulazione si estende dalla profondità di 40 m al di sotto del medio mare fino alla profondità di 450 m, includendo tutti i sette acquiferi sfruttati (A, I, II, III, IV, V, VI) e gli *aquitard* intermedi (1, 2, 3, 4, 5, 6), uno strato superiore B compreso tra le profondità di 40 e 55 m e due strati profondi C e D, *aquitard* ed acquifero rispettivamente (Fig. 2.6b).

Dopo opportune valutazioni "teorico-pratiche", suggerite dalla scarsità di misure piezometriche e di concentrazione salina in istanti temporali diversi, la simulazione modellistica ha valutato lo sviluppo futu-

⁽³⁾ Unità Operativa 3: "Valutazione dell'intrusione salina nel sistema acquifero veneziano costiero e della sua propagazione a seguito delle variazioni del livello medio del mare e climatiche nonché dello sfruttamento antropico delle acque di falda", CNR-ISDGM, Venezia. Responsabile Dr.ssa Laura Carbognin.

⁽⁴⁾ Progetto della Provincia di Venezia, Assessorato alla Protezione Civile, Ufficio Difesa del Suolo, Responsabile Dott. Geol. Andrea Vitturi. Coordinatore Scientifico Dott. Geol. Luigi Tosi (ISDGM-CNR). Studio curato dal Dott. Geol. Enrico Farinatti e dalla Dott.ssa Rossella Merola (Studio A.T.A., Rovigo).

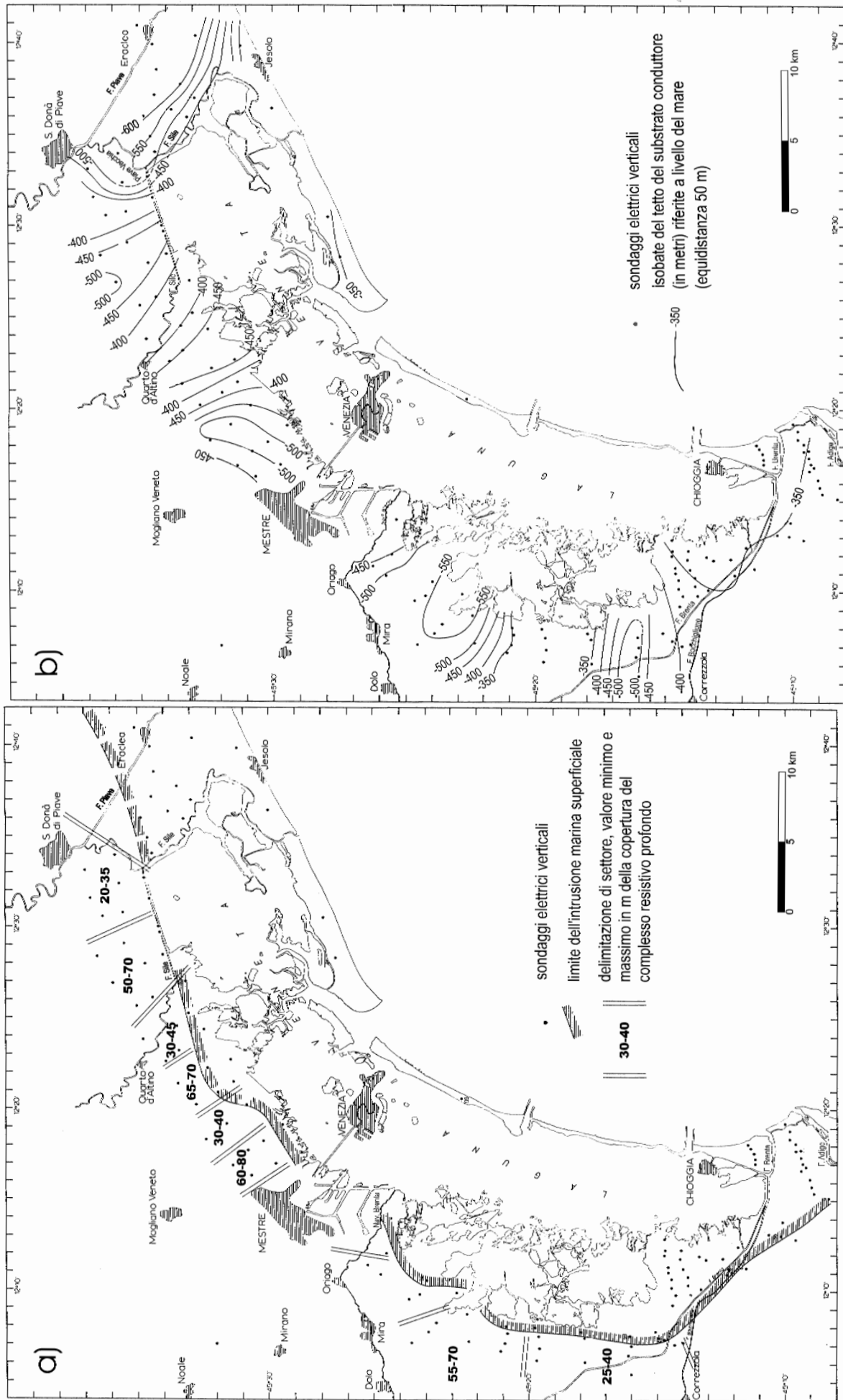


Figura 2.4 - Schema della contaminazione salina nel comprensorio veneziano determinata negli anni 1970: a) propagazione dell'intrusione salina nell'acquifero superficiale; b) mappa della profondità del substrato conduttore relativo alle acque fossili profonde [7].

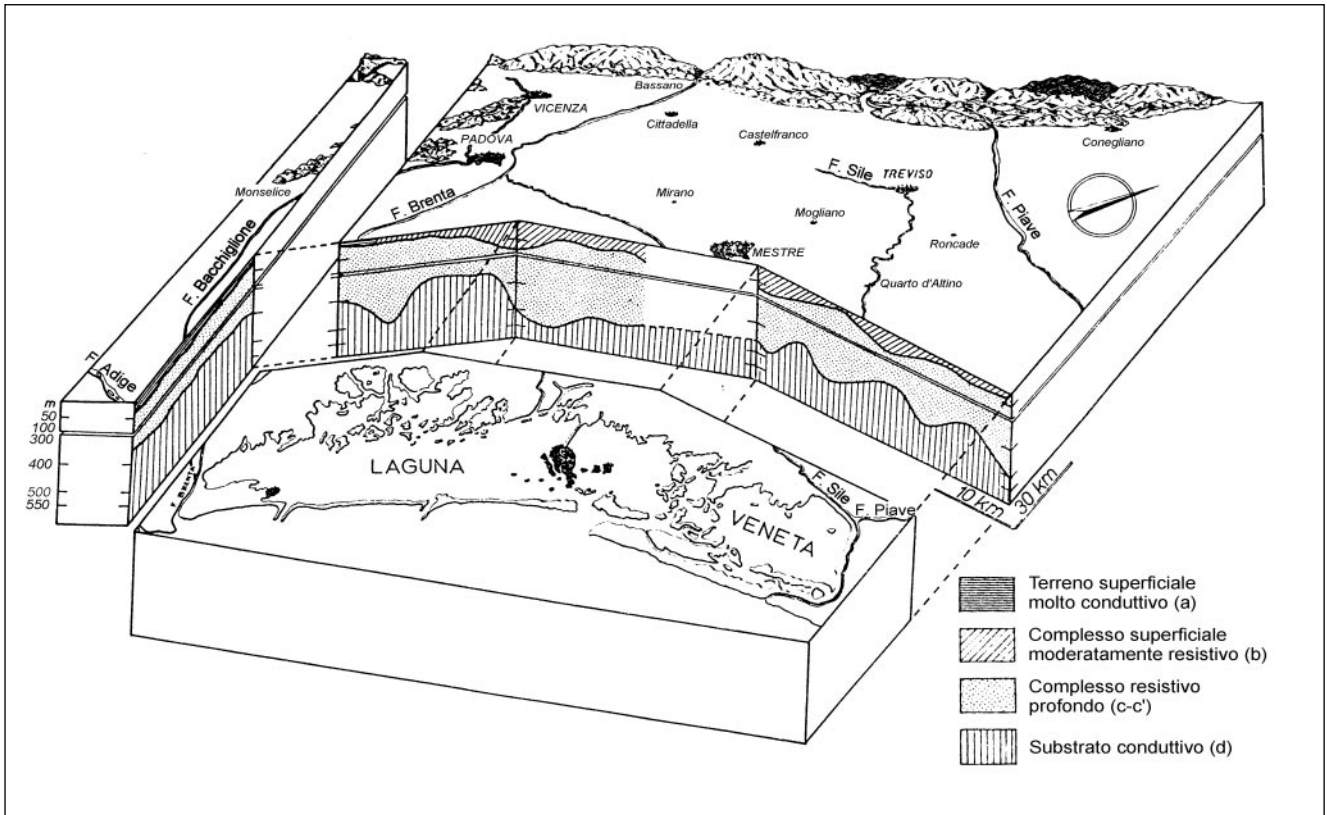


Figura 2.5 - Modello elettrostratigrafico dell'intrusione salina per il settore circumlagunare [7].

ro del processo a partire dall'attuale salinità nel dominio di calcolo e nell'ipotesi che la piezometria misurata nel 1993 rappresentasse una condizione di equilibrio e restasse invariata nel tempo (simulazione stazionaria di prima approssimazione). I risultati ottenuti hanno evidenziato che in tali condizioni la

potenziale intrusione salina nel sistema acquifero costiero sfruttato sarebbe pressochè nulla. Solo in tempi estremamente lunghi, la contaminazione potrebbe arrivare a coinvolgere la fascia costiera (Fig. 2.6b) con contaminazioni saline anche superiori ai 3.5 g/l per la penetrazione verticale fino a circa 200 m

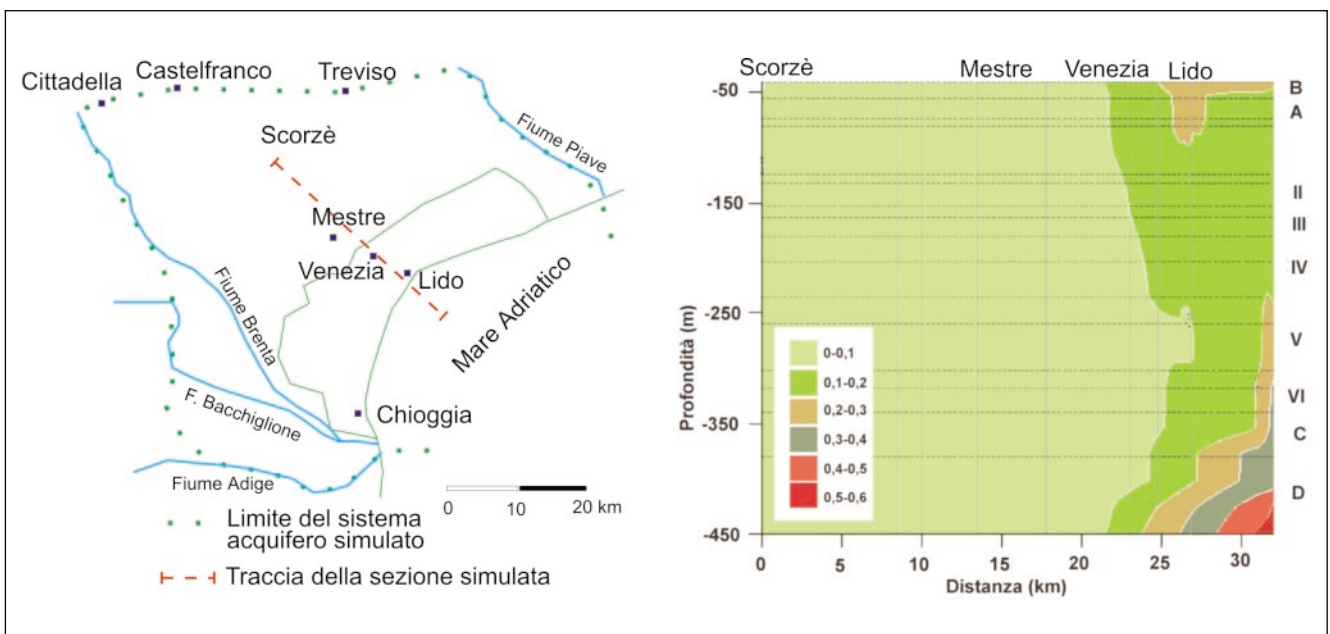


Figura 2.6 - Studio modellistico del processo di intrusione salina negli acquiferi artesiani: a) traccia della sezione simulata; b) un risultato del modello matematico [12].

di profondità delle acque salate e salmastre provenienti da mare e laguna; al di sotto di tale profondità si troverebbero concentrazioni anche più elevate derivanti dall'intrusione laterale delle acque fossili salate provenienti dalle formazioni profonde al di sotto del mare [12]. In ogni caso una valutazione modellistica più attinente alla realtà potrà essere attuata solo con una serie di dati relativi ai parametri input che non era disponibile al momento della su menzionata elaborazione.

Nel settore meridionale invece, ove il problema della intrusione di acqua salina interessa soprattutto le falde superficiali, le ricerche pregresse furono indirizzate ad una valutazione di massima dell'estensione e quindi della gravità del fenomeno. Allo scopo fu utilizzata una serie di indagini multidisciplinari e tra loro complementari che evidenziarono la presenza di una grave e complicata situazione di contaminazione salina nei terreni superficiali, e di rischio nelle aree ove il fenomeno è latente [5; 8; 51; 52] che ha suggerito quegli approfondimenti fatti propri dal progetto *ISES*.

2.3. INTRUSIONE SALINA NELL'AREA *ISES*

Il processo naturale dell'intrusione di acqua salata dovuta alla vicinanza del mare e della laguna è aggravato da una serie di fattori. Tra questi è di particolare importanza la quota critica del territorio (fino a quattro metri sotto il livello del mare), cui si associa la necessità di mantenere la superficie della falda al di sotto del piano campagna attraverso una rete di bonifica che restituisce le acque in laguna per mezzo di idrovore.

Per le modalità con cui il processo si esplica nell'area *ISES* sarebbe opportuno sostituire il termine di "intrusione salina" con quello di "contaminazione salina" in quanto il primo si riferisce ad una componente del processo complessivo; i termini "intrusione salina" e "cuneo salino" dovrebbero essere limitati al processo di ingressione dell'acqua marina negli acquiferi costieri.

Per valutare l'estensione, le modalità e le cause dell'intrusione salina, sono state effettuate la raccolta dei dati pregressi, una serie di indagini in sito e l'istituzione delle reti di monitoraggio per le acque sotterranee e per le acque superficiali.

È stata inoltre appositamente terebrata una serie di carotaggi due dei quali spinti fino a circa 100 m di profondità che per la prima volta, in quest'area, hanno permesso di definire con elevato dettaglio le variazioni litologiche di spessori così elevati.

Le indagini condotte, più avanti descritte in maniera

dettagliata ed esaustiva, sono: l'indagine litostratigrafica, l'indagine geoelettrica e l'indagine idrologica al completamento delle quali si è proceduto all'istituzione delle reti di monitoraggio e alle prime campagne di misura.

2.3.1 *Indagine litostratigrafica*

L'indagine litostratigrafica è stata condotta essenzialmente per definire i litotipi principali al fine dell'interpretazione congiunta dei dati, con particolare riguardo ai SEV, e per meglio individuare i sedimenti più permeabili e quindi potenzialmente più soggetti alla contaminazione e propagazione dell'intrusione salina.

Le informazioni di base sono state ottenute attraverso la raccolta delle stratigrafie esistenti e la selezione di quelle ritenute attendibili per disporre di una banca dati litostratigrafici omogenea dell'area *ISES*. La capillare ricerca dei dati stratigrafici ha portato al reperimento di circa 700 prove geognostiche (dati stratigrafici e prove penetrometriche), la maggior parte delle quali derivanti dalle banche dati delle Province di Padova e Venezia. Altre stratigrafie sono state fornite da diversi altri Enti operanti nell'area di studio quali: Consorzio Venezia Nuova; Consorzi di Bonifica (Adige Bacchiglione, Bacchiglione Brenta e Delta Po Adige); Autorità di Bacino del fiume Adige; Magistrato alle Acque; Genio Civile di Padova; Regione del Veneto; altri enti e studi professionali.

I dati reperiti si riferiscono ad indagini condotte con scopi diversi e risultano quindi caratterizzati da notevoli disuniformità nella precisione e nella qualità e, come si può notare in Tavola 1, non sono distribuiti uniformemente nell'area *ISES*.

Sulla base delle carenze informative evidenziate, è stata decisa l'ubicazione delle nuove indagini geognostiche. Ciò ha portato alla realizzazione di 25 sondaggi terebrati prevalentemente a carotaggio continuo e spinti a profondità variabile fino a 100 m. Nella figura 2.7 è riportata l'ubicazione dei nuovi carotaggi.

I sondaggi sono stati terebrati in corrispondenza di alcuni SEV al fine di contribuire alla taratura degli stessi e nei fori sono stati posti in opera dei piezometri con filtri posizionati a diverse profondità (Tab. 2.1). In Tavola 2 è riportata la sintesi delle colonne stratigrafiche dei due sondaggi profondi.

In questa fase, presso il nucleo operativo di Padova del Magistrato alle Acque con sede a Voltabarozzo, si è costituito un archivio di campioni di sottosuolo del comprensorio lagunare. Lo scopo di questo archivio è di raccogliere e conservare campioni di terreno pre-

Tabella. 2.1 - Profondità e caratteristiche dei nuovi sondaggi la cui ubicazione è riportata in Figura 2.7.

Numero	SEV Rif.	Provincia	Comune	Località	Perforazione	Prof. (m)	Prof. filtri (m)
1	26	Padova	Codevigo	Corte Colombara	Carotaggio continuo	20	0-20
2	7	Padova	Piove di Sacco	Palazzo Jacona	Carotaggio continuo	20	0-20
3	33	Padova	Codevigo	Corte Vallona	Carotaggio continuo	20	18-21
4	68	Padova	Codevigo	C. Aventi	Carotaggio continuo	20	0-17
5	71	Venezia	Chioggia	Idrovora delle Trezze	Carotaggio continuo	20	0-20
6	75	Venezia	Chioggia	Ca' Bianca	Distruzione di nucleo	19	0-19
7	78	Venezia	Chioggia	Motta Morezzolo	Carotaggio continuo	20	0-20
8	64	Venezia	Chioggia	Cordenazzo	Carotaggio continuo	25	18-25
9	54	Venezia	Cona	Cantarana	Carotaggio continuo	20	0-20
10	112	Venezia	Cavarzere	San Pietro di Cavarzere	Carotaggio continuo	12	0-12
11	106	Venezia	Cavarzere	Valcere Dolfina	Carotaggio continuo	20	0-20
12	108	Venezia	Chioggia	Tenuta Alfiere	Carotaggio continuo	12	0-12
13	84	Venezia	Chioggia	Ca' Pasqua	Carotaggio continuo	36	30-36
14	84	Venezia	Chioggia	Ca' Pasqua	Distruzione di nucleo	10	0-10
15	140	Venezia	Chioggia	Sottomarina Sud	Carotaggio continuo	20	0-18
16	137	Venezia	Chioggia	Sottomarina Orti	Carotaggio continuo	21	0-21
17	131	Venezia	Chioggia	Ca' Lino	Carotaggio continuo	20	0-21
18	126	Venezia	Chioggia	Mandriole	Carotaggio continuo	15	0-15
19	125	Venezia	Chioggia	Idrovora Locazzolo	Carotaggio continuo	15	0-14
20	89	Venezia	Cavarzere	Martinelle	Carotaggio continuo	15	0-15
21	93	Venezia	Cona	Idrovora Tassi	Carotaggio continuo	12	0-12
22	49	Padova	Correzzola	Villa del Bosco	Carotaggio continuo	24	0-9; 16-24
Piezometro A	114	Padova	Correzzola	Idrovora San Pietro	Carotaggio continuo	100	74-92
Piezometro B	45; 155	Venezia	Chioggia	Idrovora San Pietro	Carotaggio continuo	100	60-84
Piezometro C	45; 155	Venezia	Chioggia	Idrovora San Pietro	Distruzione di nucleo	52	31-52

levati nell'ambito di studi diversi, che possono essere utilizzati per future analisi sul sottosuolo del comprensorio lagunare.

I dati raccolti sono stati informatizzati tramite GIS e costituiscono l'Archivio informatizzato delle prove geognostiche, idoneo ad essere aggiornato nel tempo. Poiché le principali fonti dei dati sono state le Amministrazioni Provinciali di Padova e Venezia, si è ritenuto di mantenere l'uguale criterio di archiviazione delle schede stratigrafiche di questi due Enti [83] anche per i nuovi dati acquisiti nel corso del lavoro.

Le stratigrafie raccolte sono state suddivise rispettivamente in funzione del tipo di sondaggio (carotaggio continuo, a distruzione di nucleo, prove penetrometriche) e per classe di profondità, utilizzando le apposite funzioni presenti nel GIS.

In particolare (vedi Tavola 1) sono state accorpate le seguenti classi:

- stratigrafie con profondità minore o uguale a 10 m;
- stratigrafie con profondità tra 10 e 50 m;
- stratigrafie con profondità maggiore di 50 m.

Questa indagine, che secondo gli obiettivi del progetto doveva essere prevalentemente di supporto alle indagini geoelettrica ed idrologica, ha in realtà conseguito un ulteriore importante risultato in quanto ha permesso la realizzazione Banca dati geologico-stratigrafica per l'area ISES che potrà essere utilizzata in molte altre tematiche connesse con la gestione dell'ambiente e del territorio.

2.3.2. Indagine geoelettrica

I metodi geofisici in senso lato sono utilizzati per la misurazione di alcune proprietà fisiche del sottosuolo e quindi per avere indirettamente informazioni sulla sequenza geologica. In quest'ambito si può col-

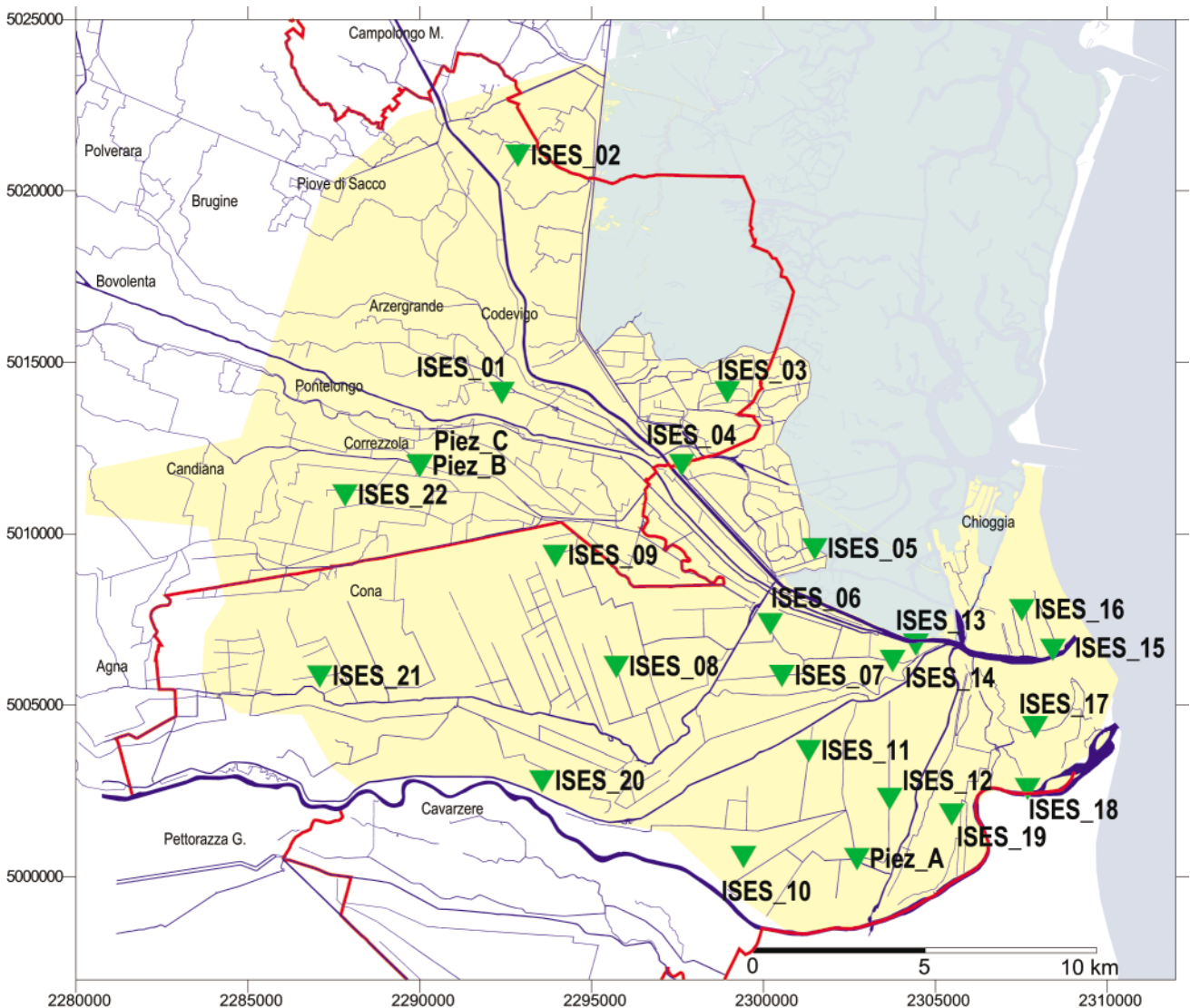


Figura 2.7 - Ubicazione dei 25 sondaggi ISES. Coordinate di riferimento Gauss Boaga Fuso Est.

locare l'indagine geoelettrica che consente altresì di investigare su vasti territori con costi contenuti rispetto a quelli dei carotaggi o altre prove dirette.

Il metodo geoelettrico utilizzato per indagare sull'intera area di studio è stato quello dei sondaggi elettrici verticali (SEV), mentre per approfondire le conoscenze di alcune situazioni locali più complicate, individuate nella zona meridionale della Provincia di Venezia, è stata usata anche la tomografia elettrica (ERT).

I SEV e gli ERT sono un metodo di prospezione geofisica che consiste nel determinare la resistenza elettrica dei terreni immettendo della corrente continua nel sottosuolo.

Il dispositivo utilizzato per i SEV è il quadripolo di Schlumberger, con il quale è possibile specificare le caratteristiche elettriche dei vari elettrostrati attraversati dalla corrente immessa e di investigare lungo la verticale fino a qualche centinaio di metri di profondità.

Gli ERT, invece, permettono di acquisire informazioni sia in profondità che lungo la distanza orizzontale e quindi di ottenere delle sezioni bidimensionali. Questa metodologia permette risoluzioni di indagine molto elevate, ma rispetto ai SEV consente di indagare a profondità più limitate.

Le due indagini geoelettriche individuano degli elettrostrati, ossia dei corpi definiti da diversi valori di resistività elettrica, generalmente riconducibili alle varie tipologie litologiche (sabbie, limi, argille) e alla presenza di acqua dolce, salata o salmastra.

In realtà, esistono alcuni casi in cui l'interpretazione degli elettrostrati è difficile, o quantomeno ambigua; ad esempio un livello sabbioso sede di un acquifero con tenore salino non molto elevato (acque salmastre), ma comunque non utilizzabile per scopi agricoli, può assumere resistività caratteristiche di elettrostrati limo-argillosi. Da qui si evince l'importanza di condurre in parallelo indagini dirette, come i carotaggi continui e le misure in pozzo, per calibrare accuratamente le misure geoelettriche.

L'indagine geoelettrica è stata preceduta da una accurata raccolta dei SEV eseguiti nell'ambito di precedenti indagini i quali sono stati recuperati in forma originale, quindi rielaborabili o quanto meno reinterpretabili. In particolare sono stati reperiti 22 SEV effettuati dall'Università di Padova negli anni 1970; 26 SEV eseguiti dal CNR-ISDGM in collaborazione con l'Università di Padova negli anni 1997/98 nell'ambito del Progetto Strategico CNR "Ambiente e Territorio"; 40 SEV del Progetto "Cuneo Salino nel comune di Chioggia" realizzati nel 1998/99 dalla Provincia di Venezia con il coordinamento CNR-ISDGM, nonché uno studio condotto per conto della Regione del Veneto e dell'Autorità di Bacino del Fiume Adige in varie zone rivierasche dell'Adige (1999).

Successivamente sono stati effettuati 169 nuovi SEV con stendimento medio $AB=400$ m e profondità d'indagine variabile da 70 a 100 m distribuiti omogeneamente in tutta l'area d'indagine, con qualche addensamento nei punti più critici. L'ubicazione dei nuovi SEV e di quelli raccolti, utilizzati per questo studio, è rappresentata in Tavola 3.

Il passo successivo è stato la rielaborazione dei modelli elettrostratigrafici dei SEV effettuati in passato utilizzando molte informazioni stratigrafiche ed idrogeologiche oggi disponibili e quindi l'omogeneizzazione con i nuovi SEV.

Dall'interpretazione congiunta di tutti i 257 SEV è stata definita la seguente successione elettrostratigrafica (Fig. 2.8).

Elettrostrato A. Elettrostrato superficiale con resistività (ρ) molto variabile e spessore anche molto sottile che stagionalmente può essere assente nei territori di bonifica sotto il livello del mare con grave contaminazione salina. Data la sua grande variabilità questo elettrostrato più superficiale è suddivisibile in tre sottolivelli: *A1* sabbie asciutte con $\rho > 100 \Omega\text{m}$; *A2* sabbie sature con acqua dolce con ρ compreso tra 20 e 40 Ωm ; *A3* limi sabbioso argillosi e argille con ρ compreso tra 5 e 20 Ωm .

Elettrostrato B. Riscontrabile generalmente nelle aree più prossime alla costa e in alcune zone "anomale" dell'entroterra, non sempre presente. E' suddivisibile in: *B1*, elettrostrato molto conduttivo con $\rho < 4.5 \Omega\text{m}$ che indica la presenza di acqua salata; *B2*, elettrostrato conduttivo con ρ compreso tra 4.5 e 10 Ωm che indica la presenza di acqua salmastra e per i valori più elevati la probabile presenza di sedimenti prevalentemente fini.

Elettrostrato C. E' un elettrostrato conduttivo con ρ compreso tra 4.5 e 7.0 Ωm , sottostante l'elettrostrato *B1*. Identifica una zona di transizione inferiore all'elettrostrato molto conduttivo e che può identificare sia un livello ad acqua salmastra sia un aquitard. Da notare che tale strato non è individuabile in tutta l'area indagata ma generalmente in alcune zone prossime alla costa.

Elettrostrato D. Elettrostrato con resistività da media ad alta con ρ compreso tra 10 e 100 Ωm e che indica la presenza di acqua dolce nel sistema acquifero profondo. Le variazioni di resistività sono imputabili ai diversi gradi di permeabilità e alla presenza di alternanze di acquiferi ed aquitard.

Infine, in alcuni casi si è riscontrata la presenza di un ulteriore strato conduttivo (*Elettrostrato E* con $\rho < 10 \Omega\text{m}$) occasionalmente presente sotto i 300-400 m, che indica la presenza di acque saline fossili profonde.

Data la vastità del territorio di indagine e le sue varia-

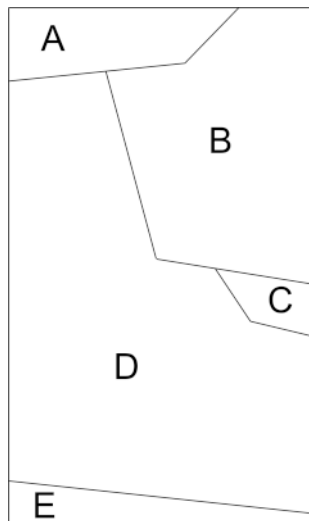


Figura 2.8 - Schematizzazione della successione elettrostratigrafica ricostruita per l'area ISES

zioni idrogeologiche, questa successione elettrostratigrafica vuole essere solamente una schematizzazione, per l'area ISES, del raggruppamento dei diversi modelli elettrostratigrafici elaborati, ed è quindi da considerarsi un criterio guida al fine di poter correlare le varie indagini puntuali.

Oltre all'interpretazione monodimensionale dei SEV, è stata fornita anche una loro correlazione bidimensionale tramite la stesura di sezioni elettrostratigrafiche, e sono state realizzate le mappe della profondità della base del primo elettrostrato resistivo (o tetto del conduttivo) (Fig. 2.9) e della base di quello conduttivo (o tetto del secondo resistivo) (Fig. 2.10) dalle quali si è tracciato lo spessore del corpo conduttivo (Fig. 2.11).

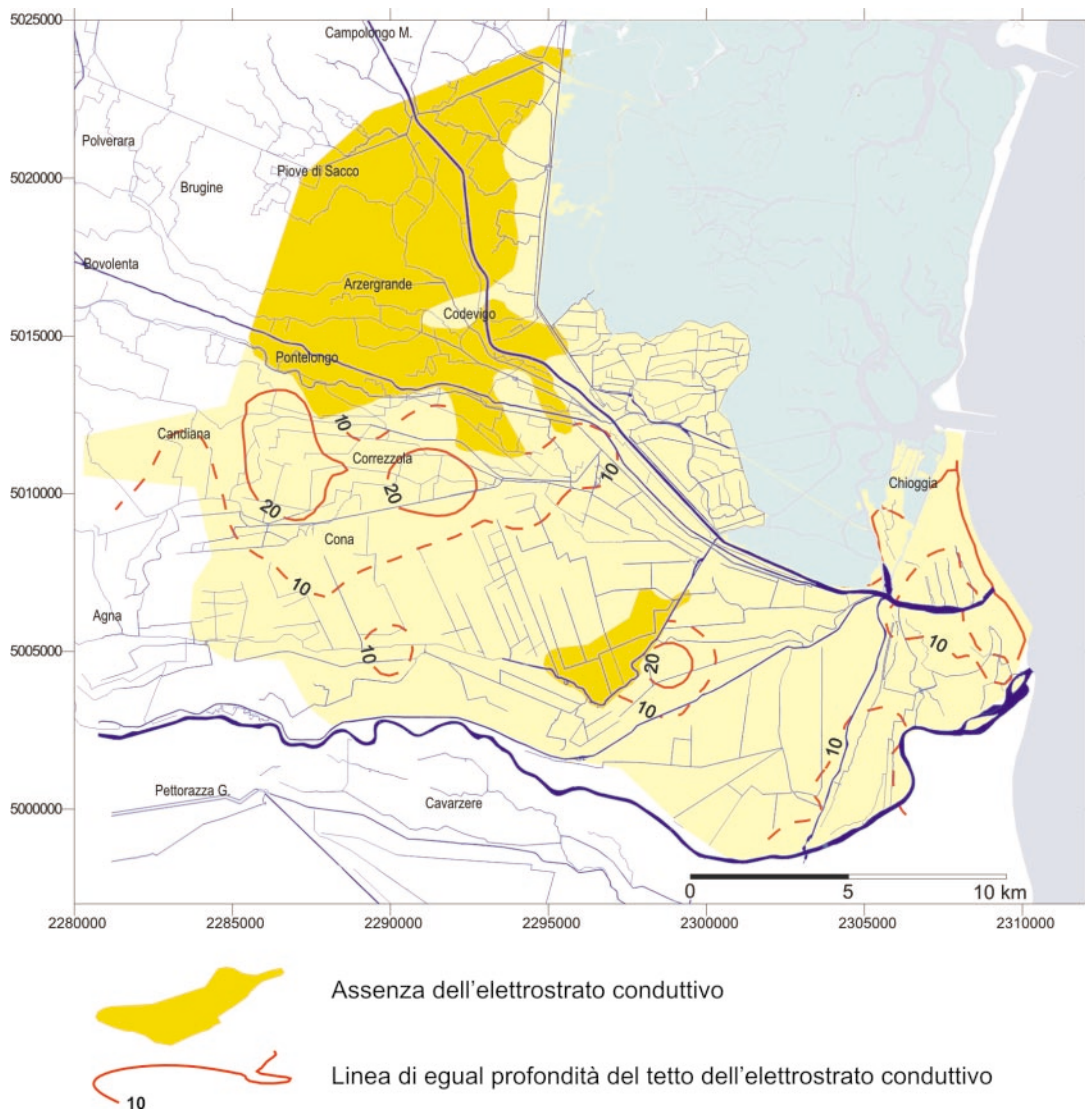


Figura 2.9 - Mappa del tetto dell'elettrostrato conduttivo. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

E' stato possibile inoltre elaborare la mappa della porosità della formazione sabbiosa della sola zona costiera in comune di Chioggia, unica area idonea a tali elaborazioni grazie alle presenza di acquiferi sabbiosi abbastanza omogenei e di diversi pozzi nei quali sono state effettuate le misure di conducibilità elettrica dell'acqua, parametri di base per ottenere i valori di porosità secondo la seguente relazione [47]:

$$\phi = \sqrt{\frac{0.81}{F}}$$

dove ϕ = porosità della formazione, F = fattore di formazione = R_f/R_w con R_f = resistività reale della formazione e R_w = resistività dell'acqua.

Nella mappa (Fig. 2.12) si può vedere che i valori medi di porosità sono abbastanza elevati, compresi tra il 36% e il 42%, ad indicare la presenza di sabbie

con granulometrie medio-alte e di formazioni poco addensate.

Un'altra elaborazione è la mappa della resistenza trasversale (Fig. 2.13) che viene ottenuta dal prodotto della resistività della formazione acquifera per il suo spessore. La resistenza trasversale è direttamente proporzionale alla trasmissività idraulica della formazione (che è data dal prodotto del coefficiente di permeabilità, K, per il suo spessore) e, pur essendo una misura indiretta, fornisce utili informazioni sulle variazioni areali delle sue caratteristiche idrauliche.

In questo caso è stato considerato il solo acquifero freatico ad acqua dolce, che è anche l'unico sfruttabile in questa zona nell'area di Chioggia.

Dall'elaborazione di questa carta si evince una progressiva diminuzione dei valori di resistenza trasversale procedendo da nord a sud e di conseguenza una

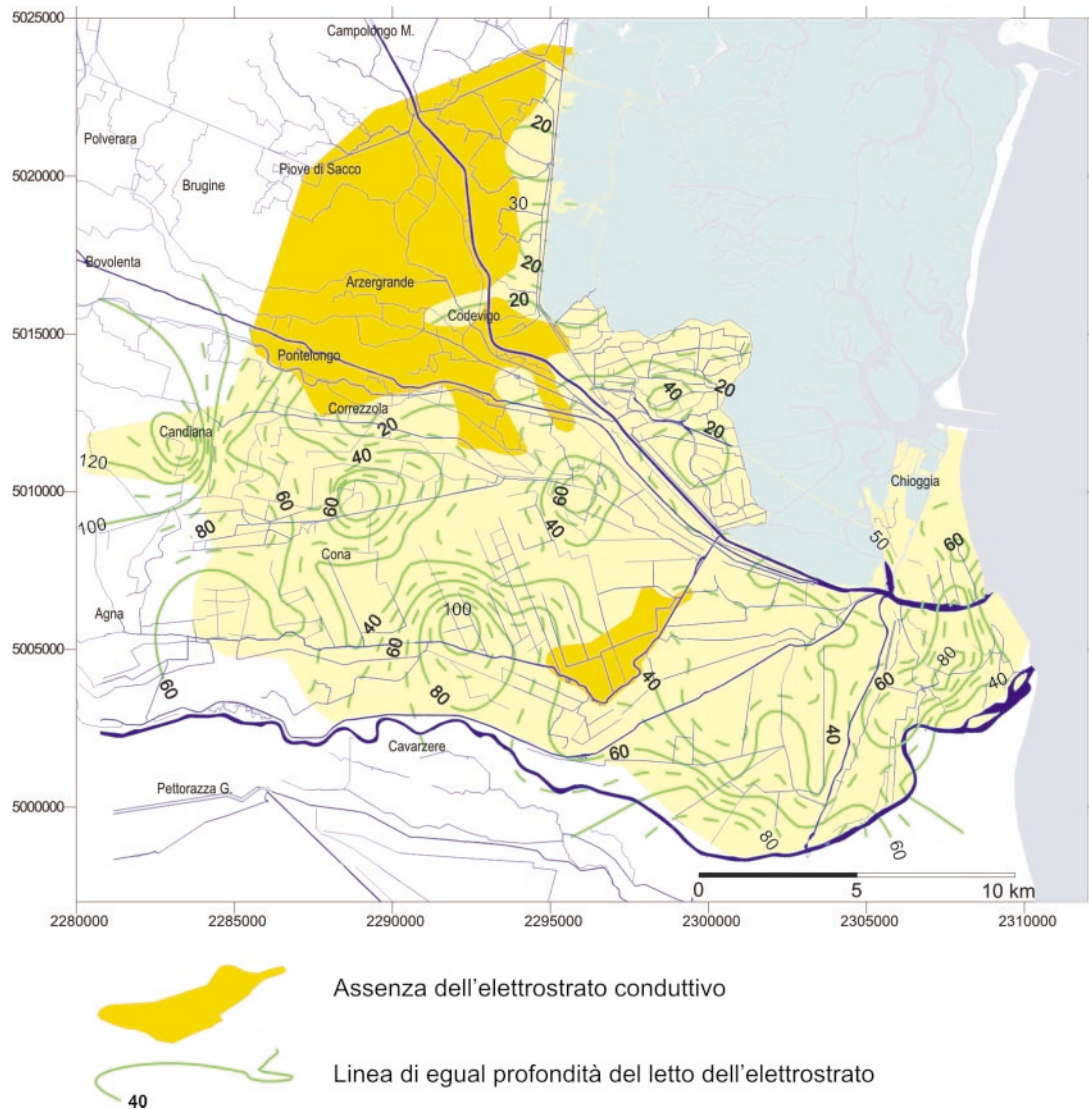


Figura 2.10 - Mappa del letto dell'elettrostrato conduttivo. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

maggior trasmissività idraulica nel settore settentrionale rispetto a quello meridionale. E' possibile però che questa diminuzione nei valori di trasmissività idraulica sia in parte condizionata dalla diminuzione della resistività elettrica per l'ingressione di acqua salata nell'entroterra attraverso la foce del fiume Adige.

Come precedentemente accennato, la tomografia elettrica (ERT) è stata utilizzata per approfondire le conoscenze di alcune situazioni locali complicate emerse nel corso della indagine geoelettrica con i SEV nella zona meridionale della Provincia di Venezia.

Sono stati eseguiti 5 stendimenti tomografici: due nel Bacino Zennare, uno a Ca' Bianca e due nei pressi di Punta Gorzone (Fig. 2.14). A seconda della lunghezza degli stendimenti, le indagini hanno raggiunto profondità di 16 e 30 m con risoluzione verticale

rispettivamente di 1,5 e 2,5 m. Le sezioni tomografiche verranno illustrate e discusse in seguito.

2.3.3 Indagine idrologica

L'indagine idrologica costituisce il nucleo centrale dello studio sull'intrusione salina.

E' chiaro infatti che definire la qualità dell'acqua utilizzabile è altrettanto importante quanto valutarne la disponibilità. In altri termini l'uso delle risorse idriche è legato alle loro caratteristiche; la salinizzazione dell'acqua sotterranea e/o superficiale può tradursi nell'impossibilità del loro utilizzo con gravi conseguenze alle attività agricole che nell'area ISES, in molti casi, rappresentano la risorsa economica primaria.

L'indagine idrologica si è quindi indirizzata all'analisi ed al monitoraggio sia delle acque sotterranee che di quelle superficiali.

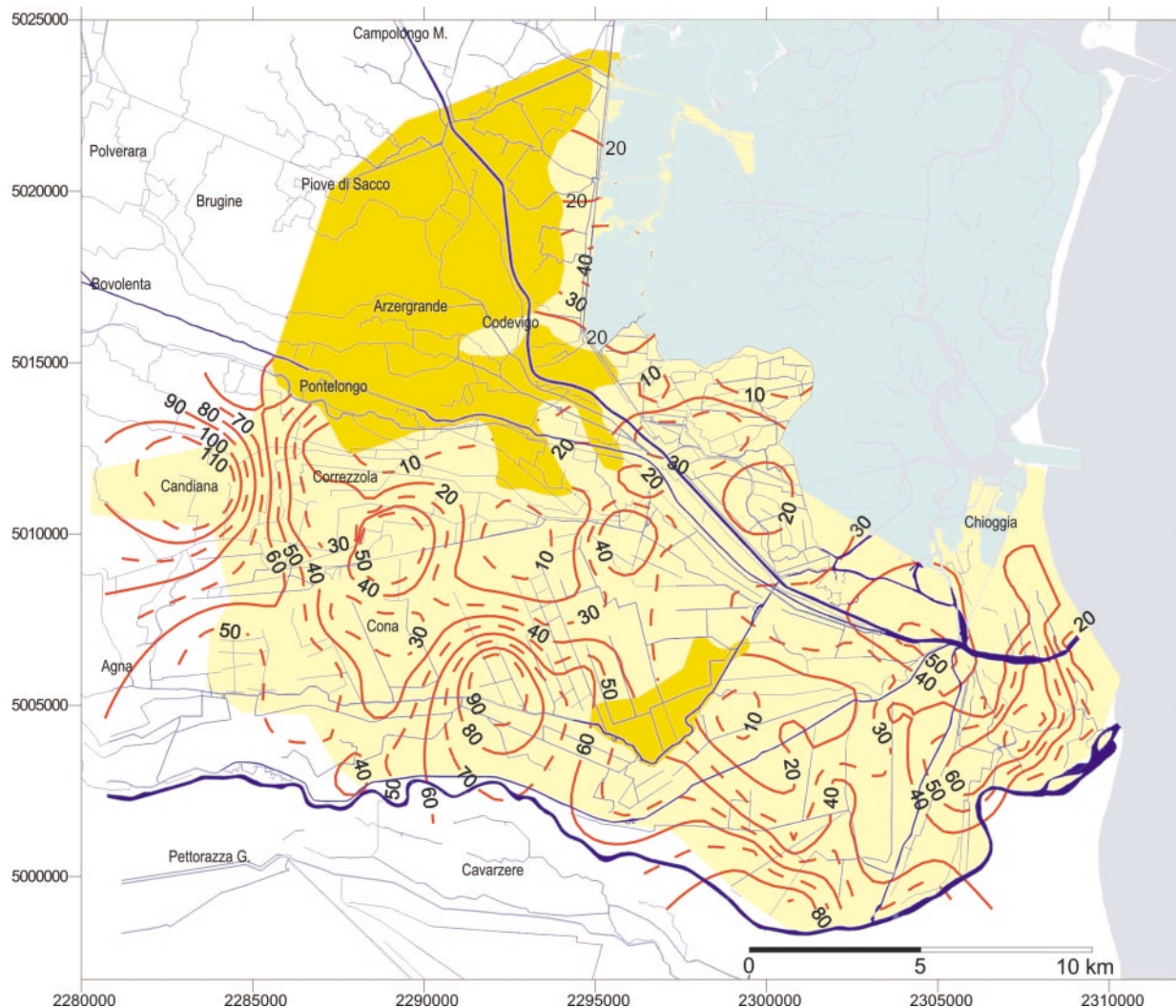


Figura 2.11- Mappa dello spessore del corpo conduttivo. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

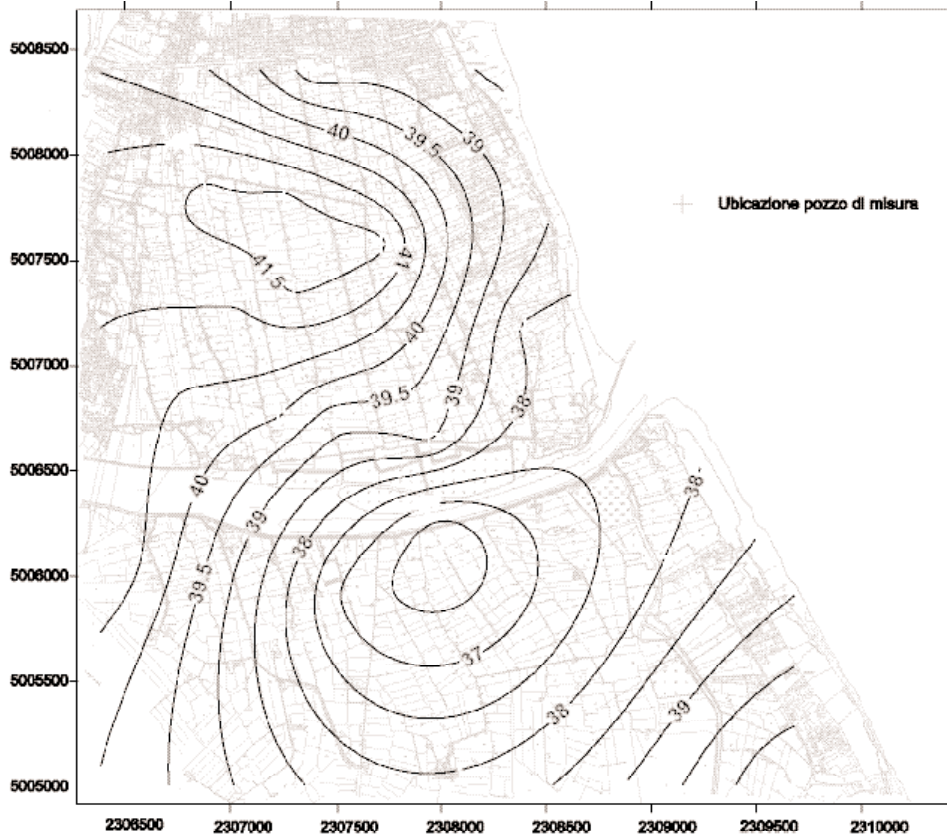


Figura 2.12 - Mappa delle isolinee di porosità. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

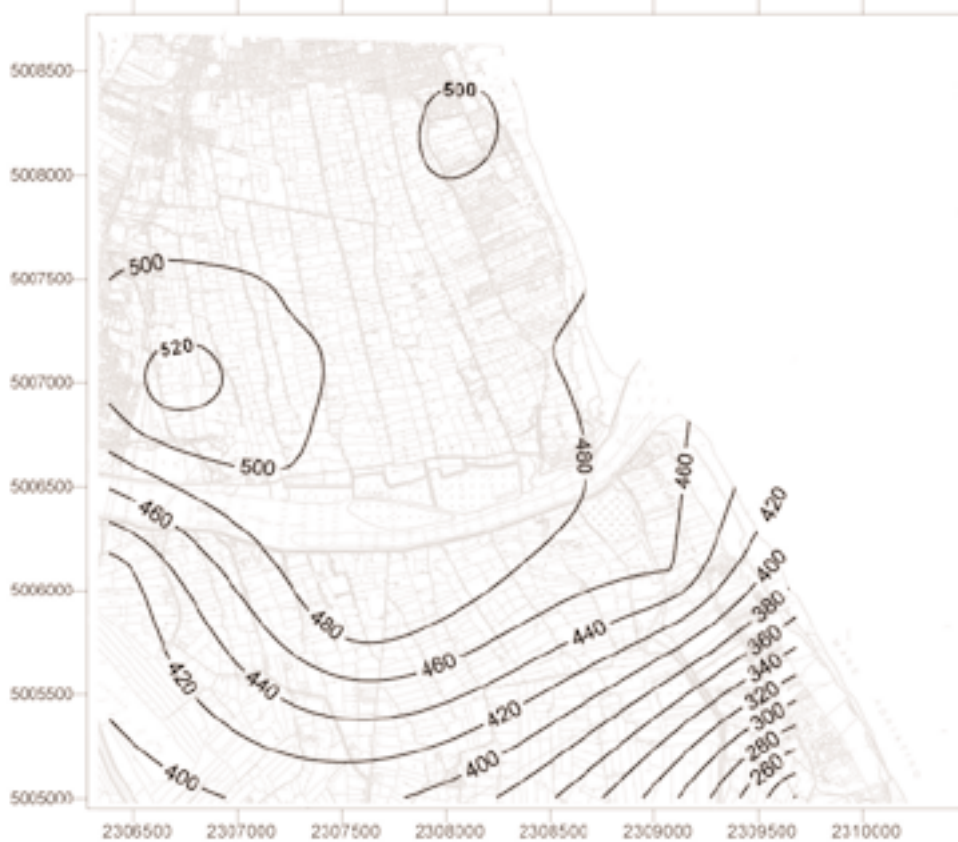


Figura 2.13 - Mappa della isolinee della resistenza trasversale. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

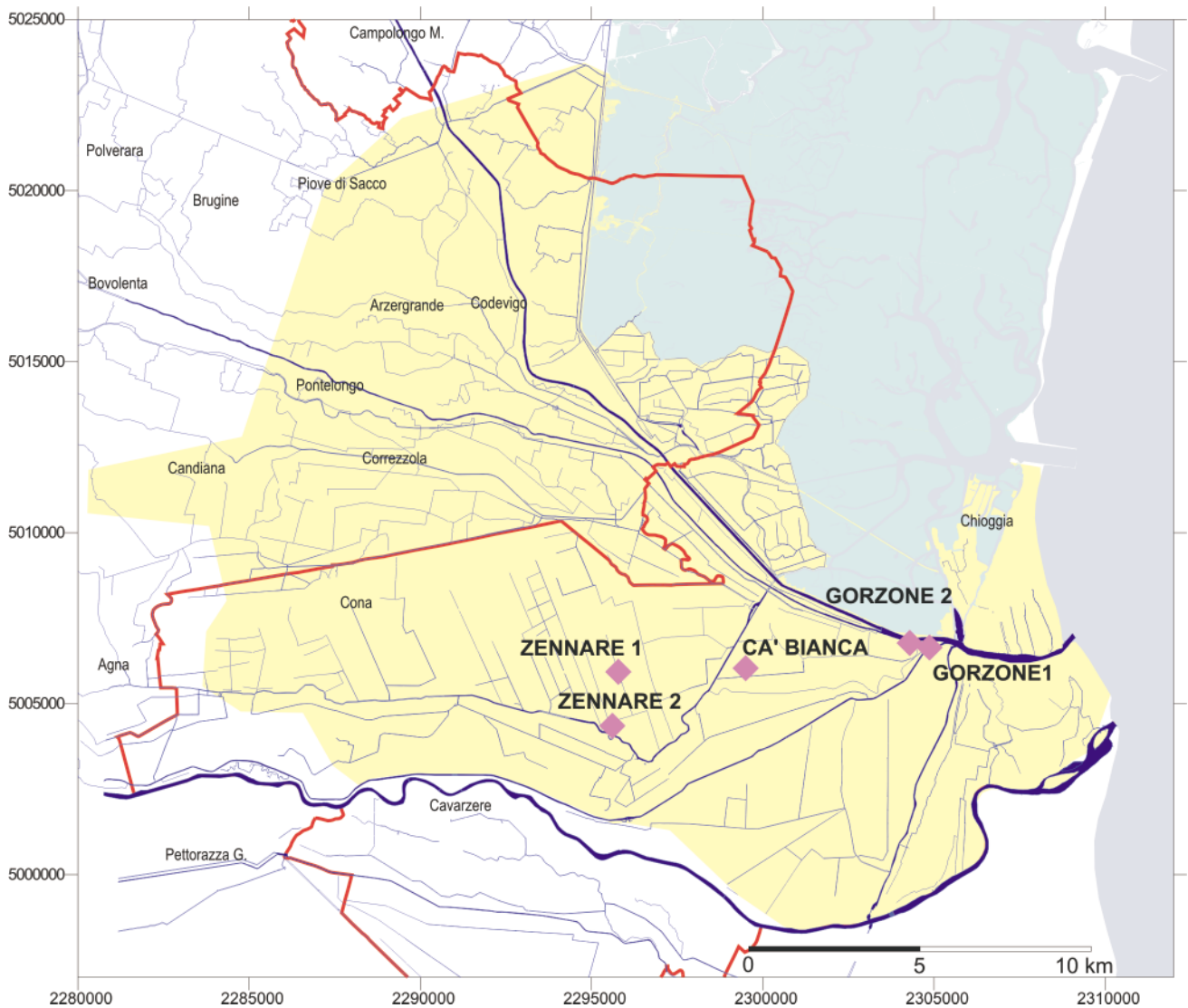


Figura 2.14 - Ubicazione dei 5 stendimenti tomografici. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

2.3.3.1 Acque sotterranee

La prima parte del lavoro è consistita nel censimento dei pozzi presenti nell'area di progetto. A tale scopo, preliminarmente alla fase di indagine di campo, si è utilizzata una serie di banche dati e di informazioni esistenti:

- indagine idrogeologica del territorio provinciale di Venezia;
- autodenunce di approvvigionamento idrico autonomo, archiviate presso la Provincia di Venezia (Settore Politiche Ambientali);
- autodenunce dei pozzi, previste dall'art. 10 del decreto legislativo 12 luglio 1993 - n. 275, archiviate presso le Province di Padova e di Venezia;
- reti di monitoraggio idrogeologico preesistenti (C.N.R.-I.S.D.G.M.; Provincia di Venezia-Regione Veneto) [45;84];
- domande di derivazione presentate al Genio Civile

di Padova;

- alcuni pozzi di proprietà del Consorzio Adige Bacchiglione;
- alcuni pozzi di proprietà del Consorzio Bacchiglione Brenta.

I pozzi censiti risultano circa 400, dei quali 371 sono apparsi idonei alle misure del tenore salino; la loro ubicazione con suddivisione per classi di profondità è riportata in Tavola 4.

I pozzi sono stati inizialmente suddivisi per classi di profondità per consentire l'elaborazione dei dati in presenza di acquiferi sovrapposti ed in generale il modello del sistema acquifero adottato è quello realizzato dal CNR-ISDGM di Venezia e dalla Provincia di Venezia.

Le nove classi di profondità relativamente alle falde individuate sono: 0-8 m, 10-30 m, 37-50 m, 75-104 m, 120-33 m, 150-60 m, 170-80 m, 200-220 m, 250-300 m. Da una prima analisi della distribuzione areale dei

pozzi e delle profondità dei loro filtri, si deduce che l'assenza di pozzi e/o filtri in alcune zone indica la presenza del cuneo salino, mentre laddove esiste una concentrazione di pozzi l'acqua risulta utilizzabile, ovvero i livelli di salinità si mantengono entro valori che ne permettono l'uso se non altro a scopo agricolo.

In tali zone si sono installati i nuovi piezometri sui fori di sondaggio precedentemente eseguiti e ubicati i filtri su indicazione delle indagini geoelettrica e litostratigrafica al fine di intercettare le interfacce da monitorare.

I dati relativi ai pozzi contenenti anche una serie di informazioni e misure sulla qualità delle acque sono stati archiviati in un database collegato ad un GIS con base topografica la CTR in scala 1:10.000. La banca dati si basa, con alcune modifiche, sullo schema che era stato utilizzato nella indagine idrogeologica del territorio provinciale di Venezia [84].

Le misure di conducibilità elettrica sono state raggruppate in 5 classi, in funzione dell'attitudine del loro utilizzo per uso irriguo, e sono riportate in tabella 2.2. Queste classi sono, con modeste modifiche, quelle di riferimento generalmente utilizzate dall'Unione Veneta Bonifiche [80]. L'elaborazione dei dati relativi alla prima campagna di misura, secondo le classi di profondità e di conducibilità sopra viste, è presentata in Tavola 5.

2.3.3.2 Acque superficiali

L'analisi della conducibilità elettrica delle acque della rete idrica superficiale consente di individuare la presenza della contaminazione salina, sia essa di provenienza marino-lagunare o da formazioni fossili.

Come d'uso prima di effettuare misure dirette si è proceduto alla raccolta dei dati esistenti derivanti da studi condotti dalle Province di Padova e Venezia, dalla Regione del Veneto, dai Consorzi di Bonifica, dal CNR, dall'ARPAV nonché da specifiche indagini inedite eseguite dal Consorzio Adige Bacchiglione in

parte in collaborazione con l'Università di Padova [17; 44; 66; 68].

Successivamente si è passati all'individuazione, sulle aste fluviali e sui canali, di stazioni di misura della conducibilità con misure distanziate ogni 2-3 chilometri e a diverse profondità in funzione della batimetria del corpo idrico. Il lavoro di osservazione in campagna è iniziato nell'ottobre del 1999 ed è terminato nel marzo del 2000. In questa prima campagna di rilievo della conducibilità elettrica sui diversi corpi idrici sono stati investigati 400 siti, a profondità comprese tra 0,2 e 7 m, per un totale di 555 misure (Tavola 6).

Gran parte delle misure si riferisce ai primi 50 cm di profondità dei corpi idrici; per le altre classi di profondità il numero di misure si riduce progressivamente ad indicare che la maggior parte dei corpi idrici presenti è caratterizzata da batimetrie che raramente superano i 2 m.

E' interessante osservare che il 30% dei valori di conducibilità rilevati è al di sotto di 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mentre il 50% delle misure presenta valori compresi tra 1000 e 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando così un grave segnale di allarme relativo ai terreni superficiali ed a quelli coltivati (Tab. 2.3).

2.3.4 Istituzione delle reti di monitoraggio

Obiettivo specifico delle reti di monitoraggio ISES risulta il controllo spazio-temporale del fenomeno della contaminazione salina in falda e nei corpi idrici superficiali.

La realizzazione di questa rete vuole fornire quella precisa conoscenza delle caratteristiche del fenomeno e della sua variazione nel tempo indispensabile per l'attuazione degli interventi gestionali. Questa rete pone inoltre lo "zero" di riferimento per valutare in futuro le variazioni non solo dei livelli piezometrici delle acque, ma soprattutto del loro tenore salino, e fungere quindi da "sistema di allarme".

Tabella 2.2- Valori di conducibilità elettrica suddivisi per classi in funzione dell'attitudine del loro utilizzo per uso irriguo.

Conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Classi	Classificazione	Qualità dell'acqua	Grado di utilizzazione irrigua dell'acqua
200-1000	<i>da bassa a media</i>	<i>Buona</i>	<i>tutte le piante</i>
1001-2000	<i>medio-alta</i>	<i>Tollerabile</i>	<i>piante meno tolleranti la salinità</i>
2001-3000	<i>alta</i>	<i>Dubbia</i>	<i>piante più tolleranti la salinità in condizioni di buon drenaggio</i>
3001-5000	<i>molto alta</i>	<i>Inutilizzabile</i>	<i>non adatta</i>
5001-16000			

Tabella 2.3 – Numero delle misure di conducibilità effettuate sulla rete idrica superficiale durante la fase di censimento.

Classi di conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Profondità (m)															Totale misure per classe cond.	
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	N.	%	
<1000	109	35	9	8	1	3	1	0	1	0	1	0	0	1	169	30.5	
1001 - 5000	201	39	23	9	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	275	49.5	
5001 - 10000	26	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	5.8	
>10000	44	14	8	6	1	1	0	2	0	2	0	1	0	0	79	14.2	
Totale misure per classe di profondità	380	94	40	23	2	6	2	2	1	2	1	1	0	1	Totale misure 555		

2.3.4.1 Rete e monitoraggio delle acque sotterranee

L'area *ISES* è parzialmente interessata dalla una rete di monitoraggio della Provincia di Venezia [84] e da una rete di monitoraggio delle pressioni di strato del CNR-ISDGM [45]. La rete *ISES* va ad integrarsi, per quanto possibile, con le reti di monitoraggio preesistenti, anche se nasce con obiettivi nettamente diversificati rispetto a queste.

Nella realizzazione del progetto della rete si è dovuto tener conto di alcune tematiche specifiche, legate alla particolare struttura geologica dell'area ed alle caratteristiche dei pozzi esistenti, quali: la struttura idrogeologica, la presenza di numerosi pozzi privi di informazioni sulle loro caratteristiche e sulla stratigrafia, la perdita di efficienza per fenomeni di intasamento e/o di incrostazione dei filtri di diversi pozzi artesiani ormai obsoleti, e la stretta connessione tra la falda freatica con la rete idrica superficiale e con le idrovore.

Da quanto esposto consegue che, potendo sopportare costi rilevanti, la "soluzione ottimale" sarebbe quella di costruire appositi pozzi di monitoraggio. Con la "soluzione migliore" la rete *ISES* è stata realizzata basandosi su una selezione accurata di pozzi esistenti ed una integrazione con 25 nuovi punti di osservazione realizzati appositamente per il monitoraggio. Poiché i nuovi punti di controllo sono stati selezionati in modo ragionato sulla base della struttura idrogeologica e della disponibilità di punti di misura adeguati, non risultano con densità omogenee secondo maglie territoriali regolari.

In generale i criteri per l'organizzazione delle reti di monitoraggio delle acque sotterranee devono considerare l'esigenza di studiare e gestire un programma

di acquisizione dati su alcune componenti e variabili selezionate in un sistema idrogeologico; tale programma deve essere quindi continuo e standardizzato dal punto di vista metodologico e tecnico. L'obiettivo principale del programma di monitoraggio *ISES* è stato quello di raccogliere, elaborare ed analizzare dati sulla qualità e quantità delle acque in modo da raggiungere una conoscenza di base sullo stato attuale del mezzo e prevedere le modificazioni nello spazio e nel tempo del sistema idrogeologico dovute sia a processi naturali sia ad impatti antropici. Ciò rappresenta la base della gestione e protezione della risorsa nel medio e lungo periodo.

A tale scopo è risultato fondamentale collegare la rete di monitoraggio ad un *database* aggiornabile, creato a partire da parametri prescelti, che è essenziale unire ad elaborazioni di cartografie tematiche.

Nella selezione dei punti esistenti, si sono preferiti pozzi attivi, in particolare pubblici (di proprietà di Consorzi di Bonifica o di Amministrazioni comunali). I rimanenti pozzi sono ubicati quasi sempre presso aziende agricole.

La scelta del numero di punti di controllo per ciascun acquifero è avvenuta in base alla rappresentatività dell'acquifero da monitorare, alle caratteristiche idrogeologiche delle falde nelle differenti aree ed alle disponibilità di punti con caratteristiche adeguate.

I pozzi selezionati per il monitoraggio della conducibilità elettrica sono 71, distribuiti come si può vedere in figura 2.15, e per ciascuno pozzo è stata redatta una monografia (Fig. 2.16).

Per quanto possibile si è scelto di utilizzare pozzi che consentissero di effettuare sia le misure di livello piezometrico che di conducibilità elettrica. Ciò non è

risultato sempre possibile (es. i pozzi con pompa aspirante) ed infatti solo 37 dei 71 pozzi selezionati sono risultati idonei alla misura del livello piezometrico. Va inoltre precisato che, considerati gli obiettivi del lavoro, si è in genere privilegiata la selezione di punti adatti alla misura di conducibilità rispetto alla misura dei livelli piezometrici.

Come precedentemente rilevato, a causa della scarsa disponibilità di punti di monitoraggio delle acque sotterranee, si è proceduto all'installazione di 25 nuovi piezometri (vedi Fig. 2.17). I tratti filtranti sono stati posizionati prevalentemente nelle falde comprese tra i 10 e 36 m, uno tra 31 e 52 m, uno tra 60-84 e uno tra 74-92 (vedi Tab. 2.1).

Molti dei piezometri realizzati ex novo sono stati fenestrati lungo l'intera lunghezza del piezometro stesso. Ciò è stato fatto per avere la possibilità di effettuare periodicamente dei log di conducibilità e

quindi di seguire nel tempo il movimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Va ribadito che l'utilizzo della tecnica del carotaggio continuo, oltre a consentire di integrare le informazioni stratigrafiche, ha permesso anche di posizionare al meglio i filtri dei piezometri, isolando eventuali falde risalenti e, infine, di procedere ad una migliore calibrazione dei SEV.

In totale i punti di controllo risultano 96 (Fig. 2.17) suddivisi come in tabella 2.4.

I pozzi-piezometri della rete, sui quali sono possibili le misure del livello di falda, sono stati quotati con livellazione speditiva adottando una tolleranza pari a $t = 3\sqrt{D}$ mm, con D lunghezza del tratto in chilometri. Di ogni pozzo-piezometro è stato quotato un riferimento permanente principale esistente o di nuova istituzione (chiodo). La livellazione dei pozzi-piezo-

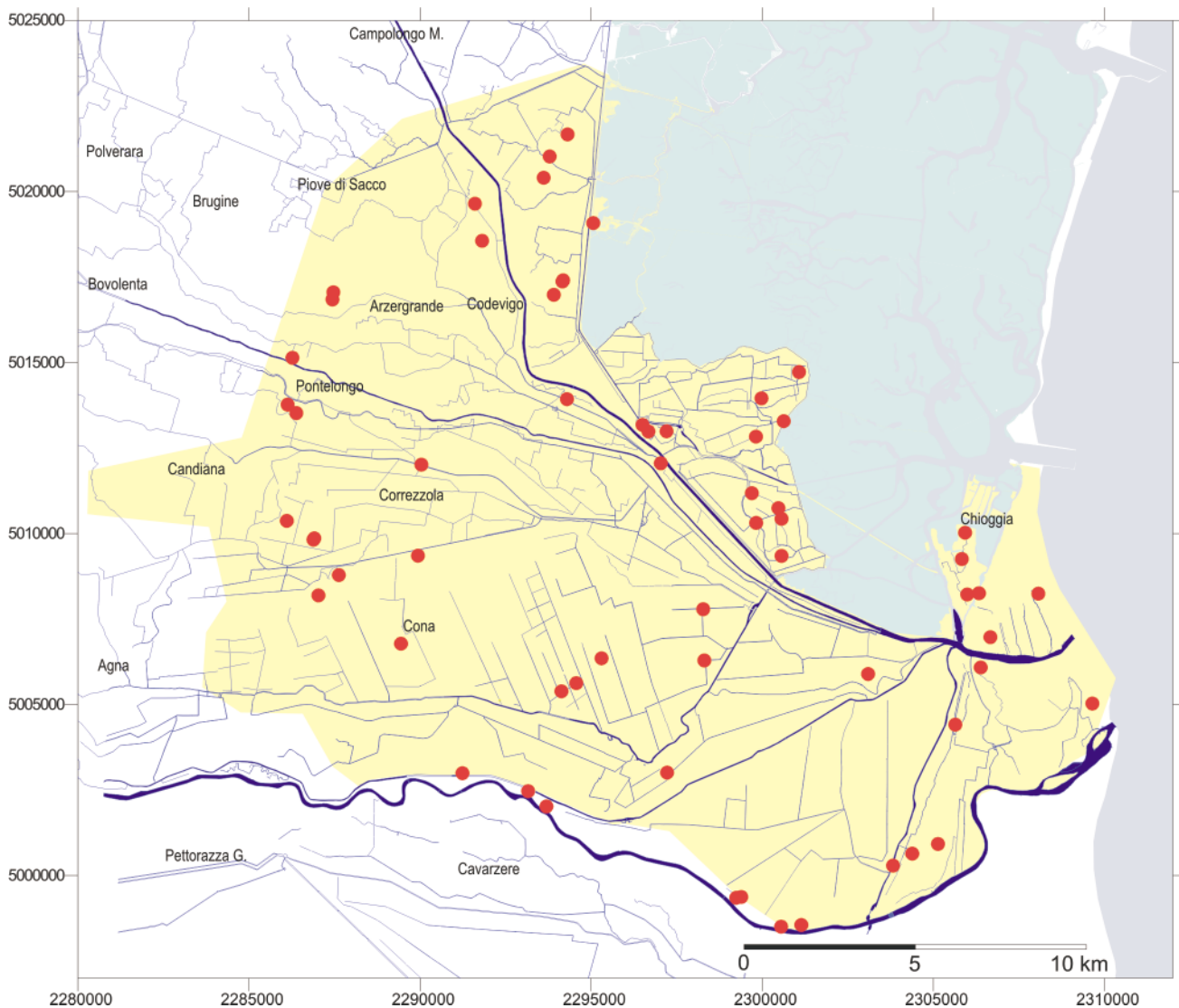


Figura 2.15- Distribuzione dei pozzi selezionati per il monitoraggio della conducibilità elettrica. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

PROGETTO ISES

INTRUSIONE SALINA E SUBSIDENZA

Piezometro ISES_C (precedente denominazione: Pozzo PC)

Ubicazione: Padova - Correzzola - Canale Barbegara

Descrizione: Piezometro nuova installazione, sito presso l'idrovora Barbegara, lungo il canale omonimo

Caposaldo: Bocca foro

Tipo: PVC

Profondità: 52 m

Note: filtro tra 31 e 52 m

Foto



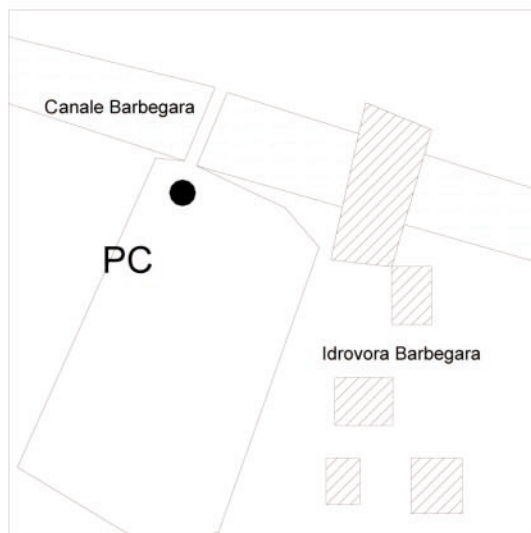
Elementi numerici

Anno	Quota ort. (Rua Feletto)	Quota ort. (Treviso)	Quota ort. (ISES)
	CSO	CSO	CSO
2001	-1,1807	-1,1732	-1,1509

Elementi Grafici

	Nord	Est
Coord.	5012042	2290093
G.B. Fuso Est		

Planimetria



CTR CAVANELLA N° 169070



Figura 2.16 - Esempio di una scheda monografica di un pozzo ISES.

metri si è resa indispensabile al fine di poter risalire alla quota assoluta del livello piezometrico delle falde, potendone definire le direzioni di deflusso e

quindi i rapporti di interdipendenza tra i vari corpi idrici superficiali e quelli sotterranei.

Per quanto concerne il monitoraggio, sono state realizzate tre campagne di misura relative ai periodi estivi 2000, 2001 e 2002. Si sono scelti tali periodi in quanto dovrebbero coincidere con quelli più siccitosi e, teoricamente, di maggiore concentrazione salina. Sui nuovi piezometri sono state eseguite tre campagne di log, la prima nel settembre 2001, la seconda nel giugno 2002 e la terza in dicembre 2002: si riportano alcuni esempi in figura 2.18.

Si è osservato, con soddisfazione, che l'ubicazione preliminare dei filtri, progettata sulla base delle indagini geoelettriche, è stata molto precisa e che l'obiettivo di intercettare mirati livelli, o la zona di transizione, è stato pienamente raggiunto. Sui piezometri, interamente fenestrati, è chiaramente individuabile l'interfaccia acqua dolce/acqua salata; si

Tabella 2.4 - Numero di pozzi della rete ISES per classi di profondità.

Profondità (m)	Numero di pozzi/piezometri
0 - 8	21
10 - 30	44
37 - 50	3
75 - 104	4
120 - 133	7
150 - 160	4
170 - 180	3
200 - 220	9
250 - 300	1



Figura 2.17 - Ubicazioni dei pozzi della rete ISES totale. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

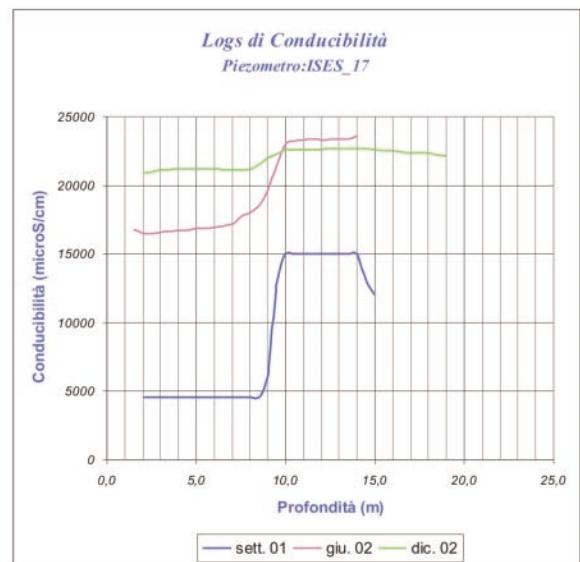
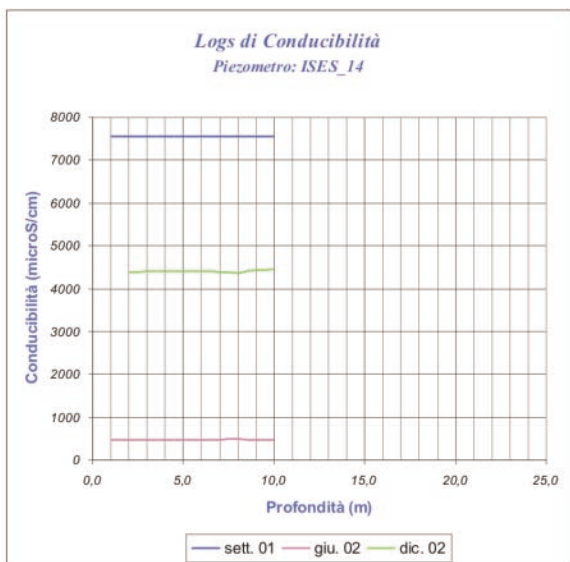
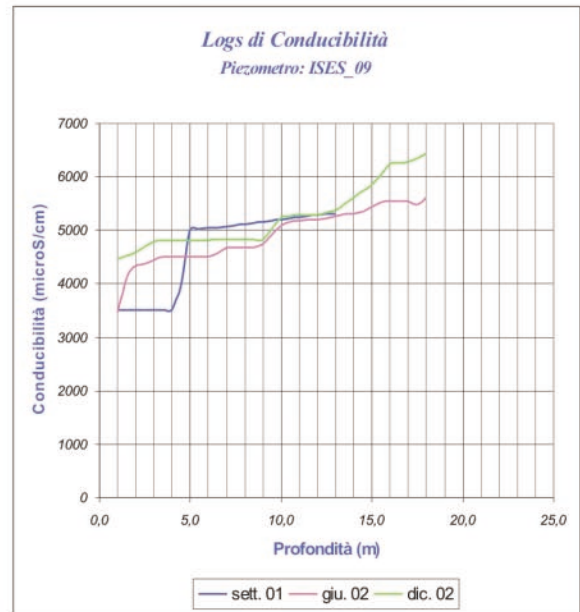
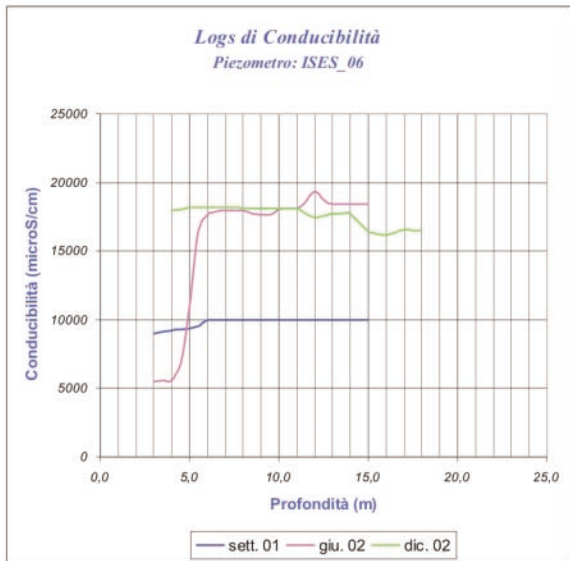
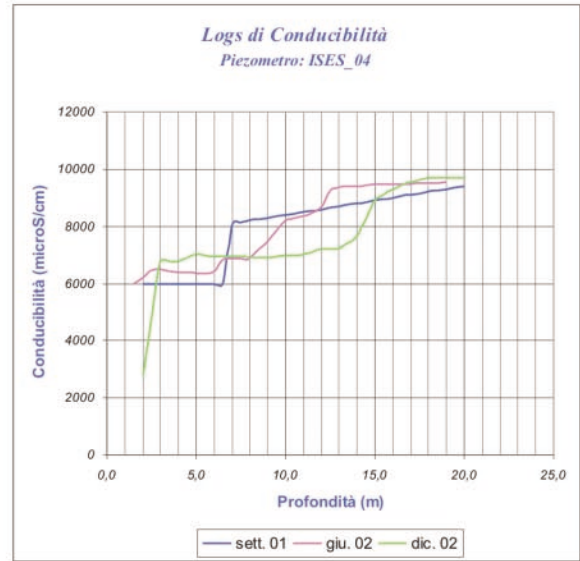
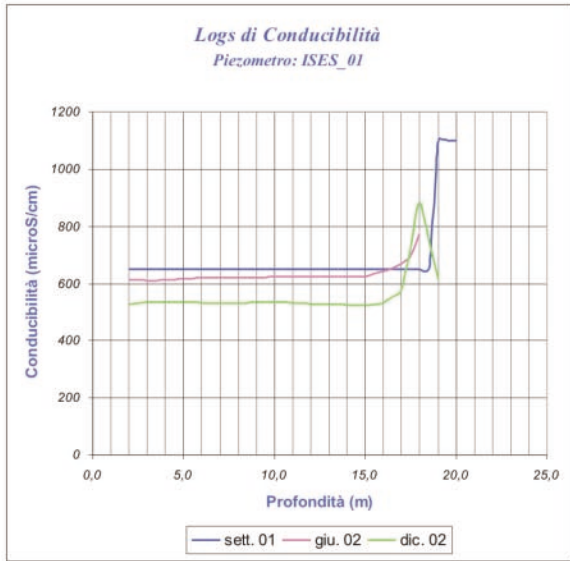


Figura 2.18 - Alcuni log di Conducibilità.

tratta di un dato che è risultato estremamente utile per validare le diverse tipologie di elettrostrati identificati (si rimanda a tale proposito alla sintesi interpretativa).

Va precisato che questa fase del progetto era strettamente finalizzata alla realizzazione di una rete che dovrà essere mantenuta in funzione dagli Enti partecipanti al progetto stesso e che quindi sarà oggetto di numerose acquisizioni di serie temporali la cui elaborazione statistica porterà a descrivere sempre più in dettaglio la dinamica del processo.

Il numero di monitoraggi di conducibilità elettrica oggi disponibile consente solo una valutazione dell'attuale contaminazione salina relativa al momento delle misure e non si è in grado di fornire un attendibile un valore medio nè di tendenza. Per alcuni punti, dove si dispone di misure precedenti grazie ai rilievi eseguiti dalla Provincia di Venezia e/o da altri Enti, è possibile dare alcune indicazioni sul regime piezometrico, sulla temperatura e sulla conducibilità elettrica: si può affermare che, in generale, le falde presentano oscillazioni piezometriche modeste, mediamente inferiori al metro, e che sia temperatura che conducibilità elettrica presentano variazioni molto limitate nel tempo. Le elaborazioni cartografiche prodotte forniscono una serie di importanti indicazioni preliminari sulla distribuzione della contaminazione salina che però richiede l'integrazione con le altre indagini previste nel quadro del progetto per una completa interpretazione, per la quale si rimanda ai capitoli successivi. Nell'interpretazione non va dimenticato che raramente si rinvengono pozzi attivi intercettanti falde salate per cui la loro assenza, in una determinata area e/o profondità, spesso rappresenta un indizio di probabile contaminazione salina.

L'analisi della distribuzione della conducibilità nei livelli 0-8 m e 10-30 m (vedi Tavola 5) mette in evidenza l'estrema gravità e la grande diffusione del fenomeno della contaminazione salina che coinvolge l'intera fascia circumlagunare che, nella parte meridionale, interessa alcune aree poste a decine di chilometri dalla costa anche per la presumibile presenza di "acque fossili". Anche negli acquiferi più profondi sono stati talora riscontrati valori di conducibilità alquanto elevati dimostrando che la propagazione del fenomeno interessa anche le falde oltre i 100 m.

I log di conducibilità hanno più volte identificato l'interfaccia acqua dolce/acqua salata poco al di sotto della base della zona non satura e quindi in prossimità del suolo agrario.

2.3.4.2 Rete e monitoraggio delle acque superficiali

Al fine di fornire un primo quadro della situazione sul grado di salinità delle acque che scorrono nella rete idrografica, è stata allestita una rete di osservazione a maglia stretta cercando di porre sotto controllo tutti i fiumi, canali, fossi e scoli presenti. Sono stati presi in considerazione anche i corsi d'acqua di drenaggio ed irrigazione gestiti da privati ed afferenti alla rete di bonifica consortile. Sulla base dei risultati ottenuti in 399 punti relativi alla prima campagna di misura, è stato possibile individuare in prima approssimazione la prevalente individualità del comportamento di ciascun corpo idrico malgrado caratteristiche simili siano invece state rilevate arealmente (vedi Tavola 6). Su questa base è stata istituita una rete di monitoraggio di secondo ordine costituita da 144 siti (Fig. 2.19) che rispondesse ai seguenti requisiti: distribuzione uniforme sul territorio o comunque strategica per punti di particolare interesse; necessità di monitoraggio di valori particolarmente elevati di conducibilità o comunque anomali; effettuare più misure nello stesso corpo idrico in grado di descrivere l'ingressione di acque salate direttamente dalla rete idrografica. Parallelamente è stata considerata anche l'accessibilità e la possibilità di reiterare le misure nel tempo. E' stata inoltre selezionata una rete di monitoraggio di primo ordine, per misure più frequenti, costituita da 55 punti, scelti tra i precedenti 144, in modo che vi fosse almeno un sito di monitoraggio nei corsi d'acqua ritenuti particolarmente sensibili al processo di intrusione salina (Fig. 2.20).

Per ciascuno dei 144 siti è stata realizzata una scheda monografica di cui un esempio è riportato in figura 2.21.

La prima campagna di misura (febbraio-marzo 2000) è stata effettuata su circa 400 siti e successivamente, nella rete di primo ordine, sono stati eseguiti 3 monitoraggi nei seguenti periodi: maggio 2000; luglio 2000; novembre 2000. Nella figura 2.22 sono riportati i valori massimi di conducibilità registrati nelle quattro campagne di misura i cui valori sono rappresentati per classi di conducibilità con cerchi di dimensione direttamente proporzionale alla classe di appartenenza. Mentre per la prima campagna invernale le misure sono state effettuate sull'intera rete, le successive campagne di misura hanno interessato solo la rete di primo ordine.

L'analisi della distribuzione della conducibilità evidenzia aree in cui i valori sono piuttosto elevati durante tutto l'arco dell'anno, tra le quali vanno ricordate: Conche, Valli, Piovini e Tenuta Valgrande.

Peraltro nell'area di Conche i valori sembrano influenzati dalla fase di irrigazione estiva più che nelle altre aree citate.

Tutta la parte di Cona e Cavarzere afferente al Canale dei Cuori, come pure la porzione rimanente del Bacino di S. Pietro, è caratterizzata, nonostante la sensibile riduzione delle concentrazioni durante il periodo estivo, da tenori salini piuttosto elevati.

Esistono poi situazioni critiche di contaminazione salina lungo corpi idrici costantemente o temporaneamente in comunicazione idraulica con l'acqua della laguna o del mare quali: Fiume Bacchiglione, Fiume Brenta, Canale Gorzone, Canale di Valle, Canal Morto, Canale Montalbano e Scolo Fiumazzo. E' stato osservato inoltre che, indipendentemente dal valore assoluto, l'escursione tra i valori minimo e massimo (Fig. 2.23) è più accentuata nelle zone prossime alla laguna che in quelle più interne (Campagna

Lupia, Piove di Sacco, Arzergrande, Pontelongo, Correzzola, Cona).

La figura 2.24 riassume i valori massimi di conducibilità relativi alle quattro campagne di misura sulla rete di primo ordine ed evidenzia come, in aree ben identificabili, vi sia una forte individualità dei singoli corsi d'acqua dovuta sia a fattori intrinseci naturali (litologia, permeabilità, morfologia, condizioni idrogeologiche, ecc.) sia a cause esterne (irrigazione, drenaggio artificiale, possibili inquinamenti di origine agricola, ecc.).

2.3.5 Gestione delle reti di monitoraggio delle acque

L'importanza di aver istituito delle reti di monitoraggio non risiede solo nel fatto che, quali strumenti indispensabili per gli studi previsti dal progetto, hanno permesso di fornire utili indicazioni sul pro-

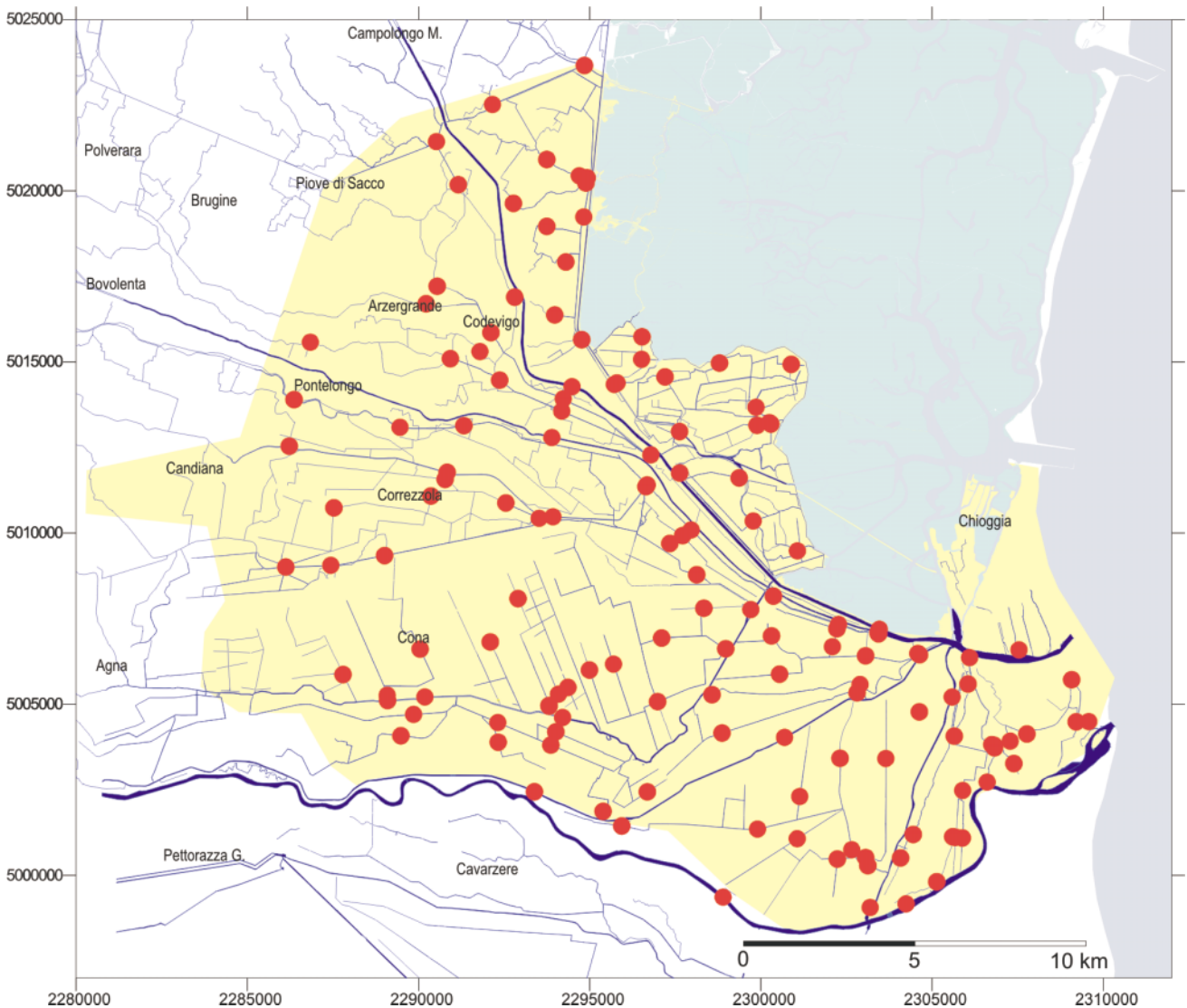


Figura 2.19 - Rete di monitoraggio di secondo ordine delle acque superficiali. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

cesso in atto, ma perché costituiscono per gli Enti competenti alla gestione del territorio uno strumento di controllo e di acquisizione che deve essere mantenuto attivo e in efficienza.

I parametri fondamentali da monitorare nella rete delle acque sotterranee risultano: conducibilità elettrica, livello piezometrico e temperatura. Gran parte dei punti della rete sono inoltre adatti al campionamento dell'acqua e quindi idonei al monitoraggio e al controllo di un maggior numero di parametri. Si ritiene adeguato procedere con cadenza semestrale: gennaio-febbraio e luglio-agosto fermo restando che, per una più precisa definizione della variabilità temporale dei parametri, dovrà essere realizzato il monitoraggio stagionale (gennaio, aprile, luglio, novembre) ed in alcuni punti in continuo. Infine, relativamente ai piezometri appositamente istituiti con il progetto *ISES*, si ritiene indispensabile la manutenzione perio-

dica con operazioni di spurgo. Va sottolineato il fatto che il monitoraggio delle acque sotterranee, in un'area con caratteristiche quali quella *ISES*, aumenta di efficacia se svolto in parallelo a quello delle acque superficiali e, anche se non espressamente previsto, congiuntamente al monitoraggio dei parametri meteorologici e idrometrici (altezze di marea, altezze idrometriche, precipitazioni) per i quali esistono nell'area *ISES* diversi Enti competenti per la loro acquisizione.

Il monitoraggio delle acque superficiali prevede la misura della conducibilità elettrica su due reti: una di primo ordine, che risponde al bisogno di trovare un compromesso tra la necessità di gestire un numero di punti di controllo non eccessivamente elevato (rete a maglia larga su punti strategici), e una di secondo ordine per un monitoraggio più completo (rete a maglia stretta) da utilizzare in situazioni particolari e/o

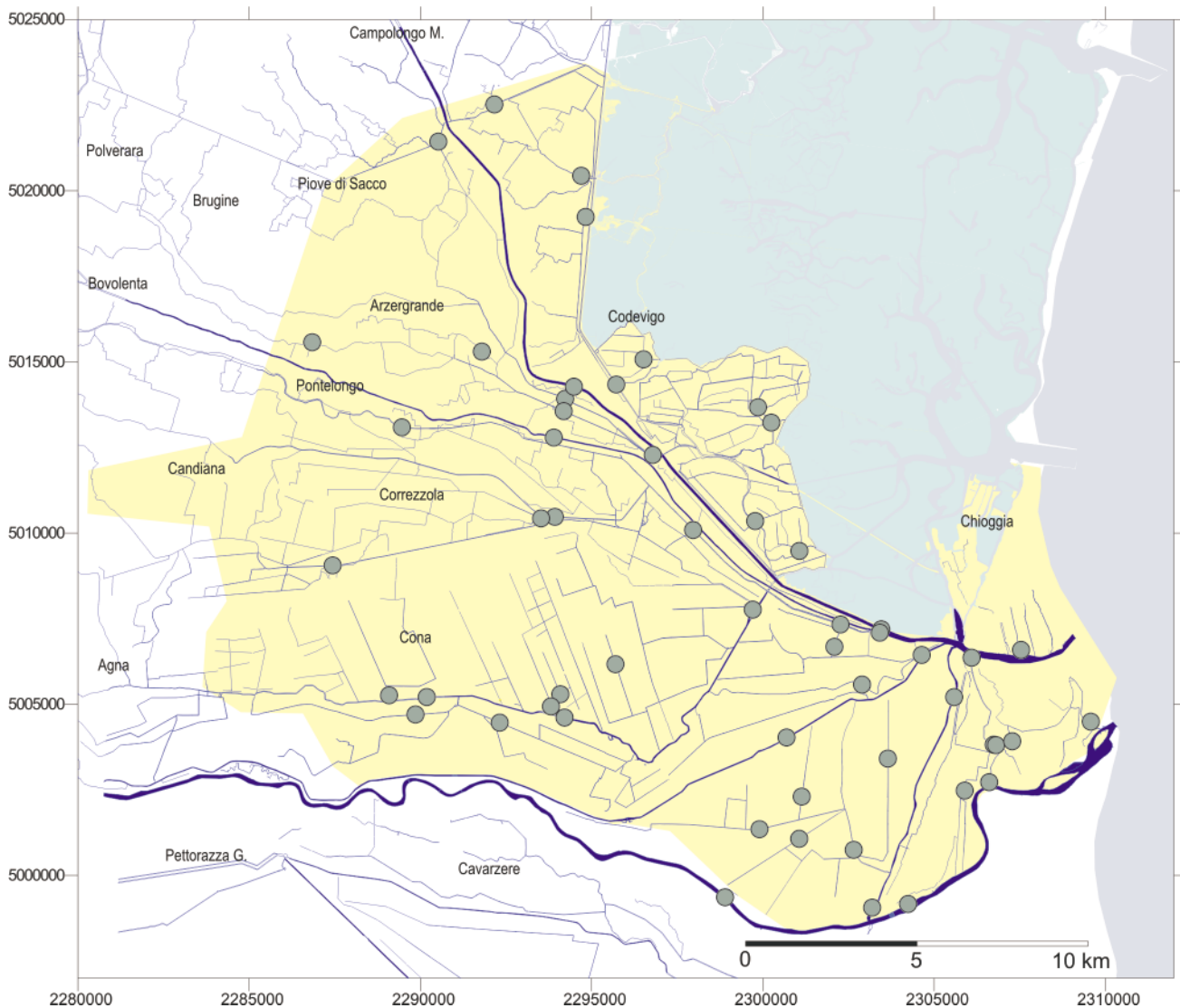


Figura 2.20 - Rete di monitoraggio di primo ordine delle acque superficiali. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

PROGETTO ISES

INTRUSIONE SALINA E SUBSIDENZA

Acque superficiali

Monografie dei punti di controllo

N: 8
 CORPO IDRICO: SCOLO FIUMICELLO
 COMUNE: PIOVE DI SACCO (PD)
 LOCALITA': CORTE

ORDINE RETE: 1
 CTR: PIOVE DI SACCO NORD
 COORD. EST GAUSS-B (FUSO EST): 2290524
 COORD. NORD GAUSS-B. (FUSO EST): 5021437

PUNTO DI PRELIEVO: CENTRO SOSTEGNO, LATO VALLE
 CONDIZIONI IDRODINAMICHE MEDIE: CORRENTE BASSISSIMA
 ALTEZZA MEDIA LAMA D'ACQUA (cm): 280
 STRUMENTI DI MISURA IN SITO: TELEIDROMETRO
 PRELIEVO CAMPIONI: NO
 ANALISI CHIMICHE: NO

UBICAZIONE

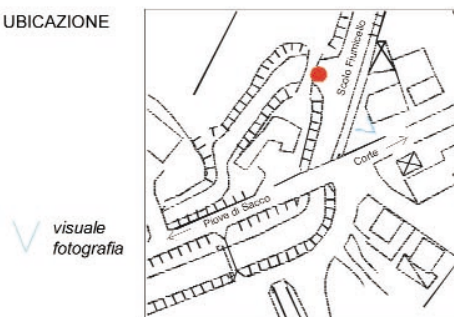


FOTO:



CAMPAGNE DI MISURA

VALORI DI CONDUCIBILITA' ($\mu\text{S/cm}$)

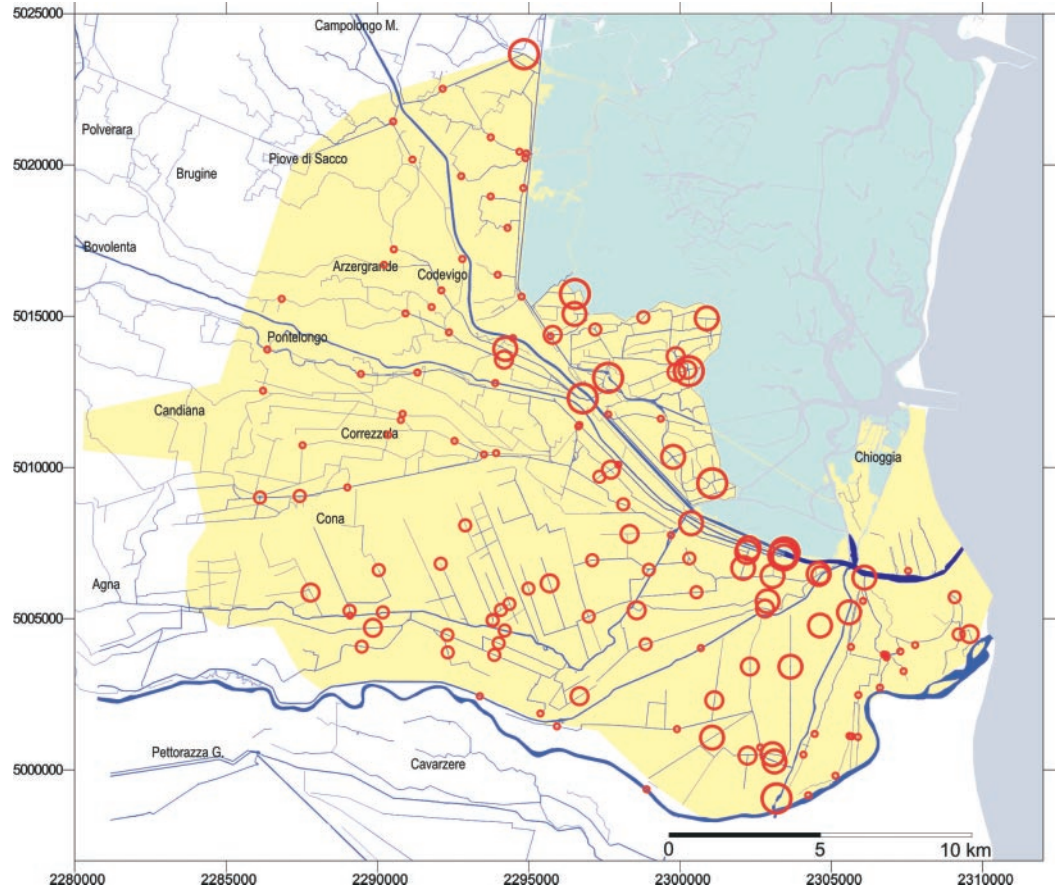
PROF (m)	INVERNO 1999 - 2000	MAGGIO 2000	LUGLIO 2000	NOVEMBRE 2000
0,5	416	581	442	844
1	416	586	434	844
1,5				
2				
2,5				
3				
3,5				
4				
4,5				
5				
5,5				
6				
6,5				
7				

Figura 2.21- Scheda monografica di un punto di misura delle acque superficiali.

Dicembre 1999
-
Marzo 2000

Classi di Conduttività
($\mu\text{S}/\text{cm}$)

- <2000
- 2001-5000
- 5001-10000
- 10001-25000
- >25000



Luglio 2000

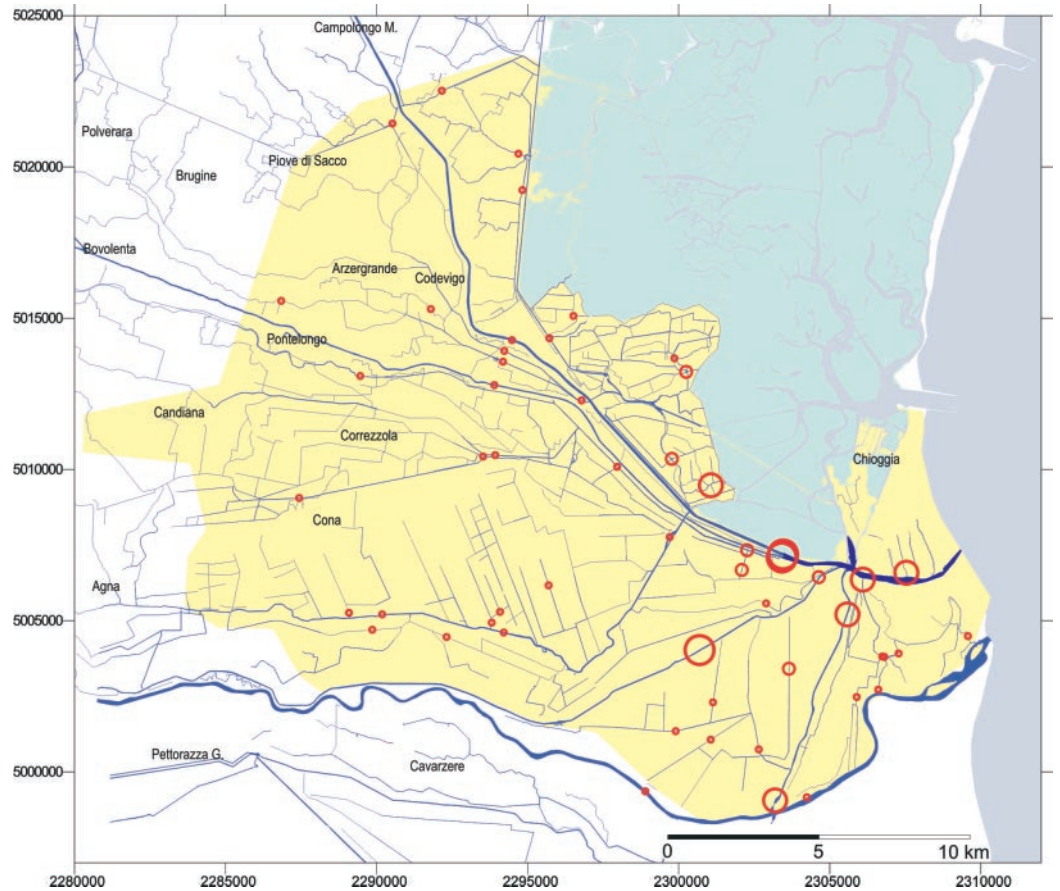
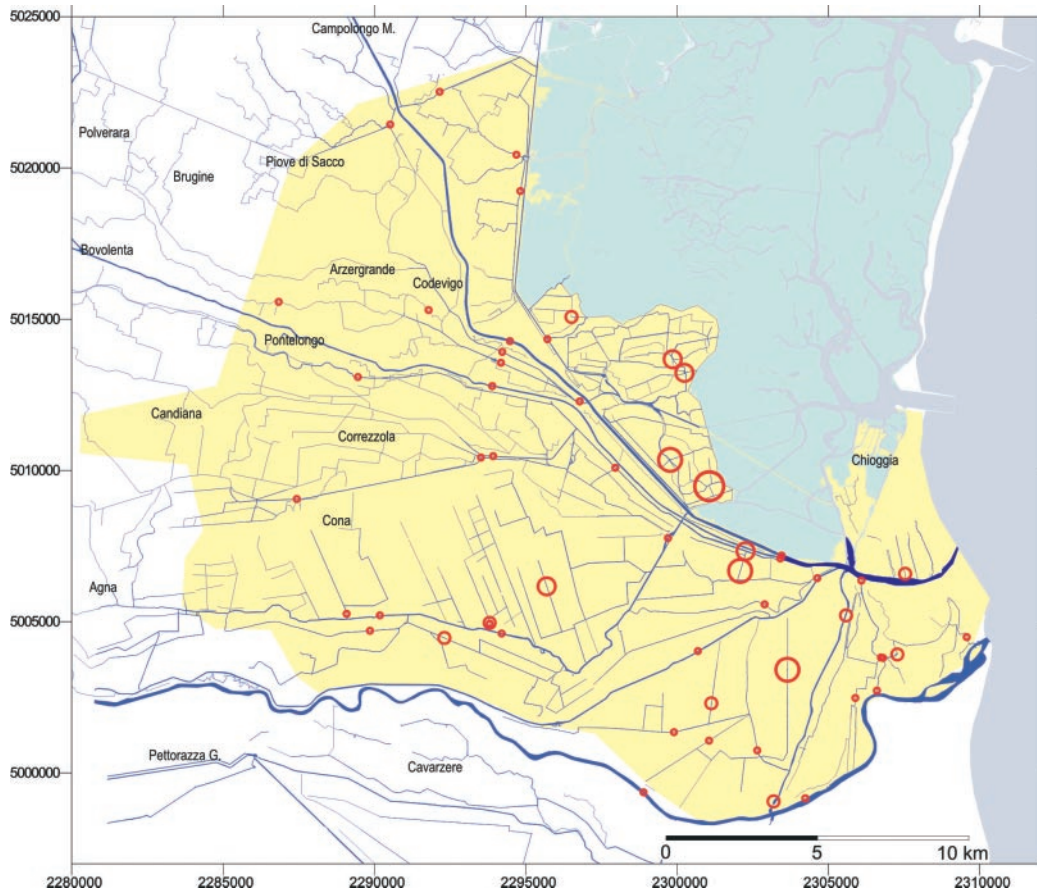
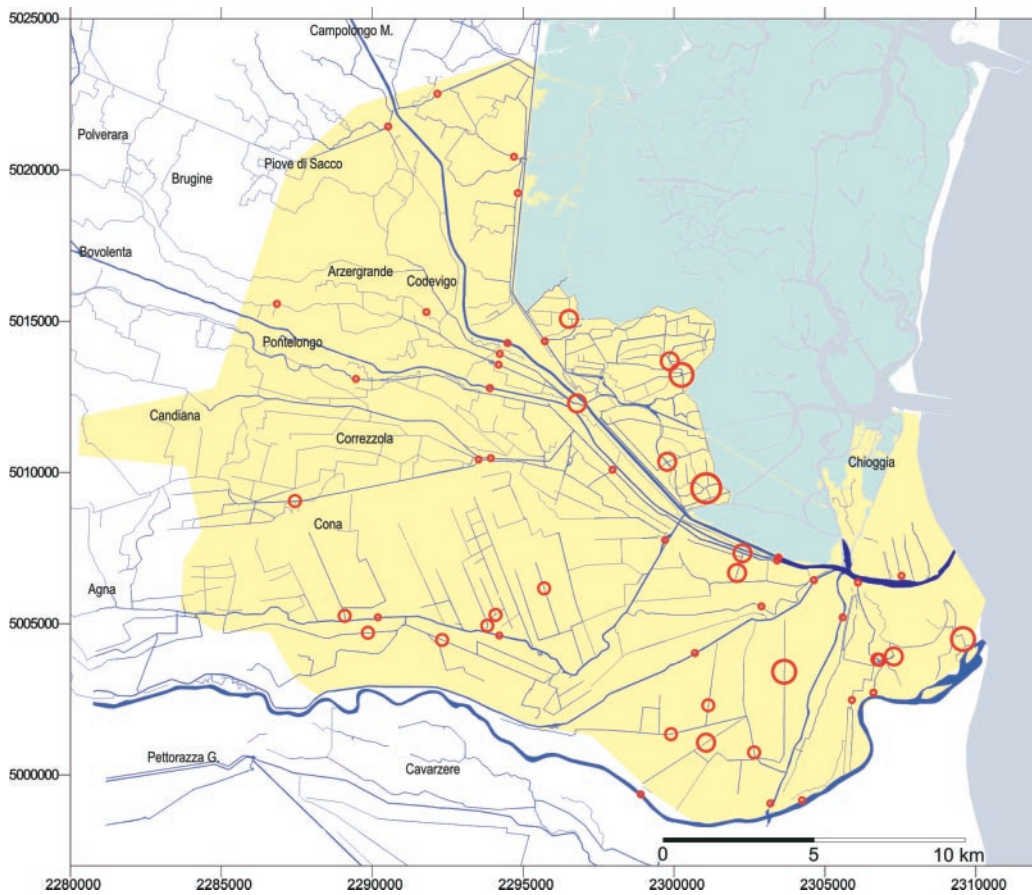


Figura 2.22 - Rete di primo ordine: campagne di misura nei seguenti periodi: a) marzo 2000, b) maggio 2000; c) luglio 2000; d) novembre 2000.



Maggio
2000



Novembre
2000

di emergenza. In considerazione della variabilità temporale dei parametri, si ritiene opportuno che i monitoraggi siano effettuati con una frequenza di 4 campagne di misura all'anno: gennaio, aprile, luglio, novembre, per poterne seguire le modifiche stagionali.

2.4 ANALISI CONGIUNTA DELLE INDAGINI ED INTERPRETAZIONE DEL PROCESSO

Malgrado alcune delle indagini effettuate abbiano fornito buone indicazioni sul processo di contaminazione salina, esse non sono in grado, singolarmente considerate, di spiegarlo adeguatamente. I risultati degli studi settoriali sono stati quindi oggetto di calibrazione-validazione reciproca e successivamente sono stati integrati e correlati tra loro al fine di fornire un quadro complessivo del processo in esame.

La rappresentazione dei risultati è stata effettuata attraverso la realizzazione di sezioni interpretative e mappe di zonizzazione.

Sono state realizzate 13 sezioni interpretative del processo di contaminazione salina (Tavole 7 e 8), combinando tra loro le indagini geoelettriche (SEV, ERT), litostratigrafica, idrogeologica, e sulle acque superficiali. La scelta di una rappresentazione a sezioni incrociate, le cui ubicazioni sono riportate in figura 2.25 e in Tavola 1, ha lo scopo di visualizzare come il fenomeno della contaminazione salina si distribuisce nelle tre dimensioni in quanto trae origine da ambienti geograficamente diversi quali la laguna, il mare ed i corsi d'acqua.

Va precisato che data l'ampiezza dell'area di indagine (circa 400 kmq) si è dovuto utilizzare una scala verticale notevolmente esagerata rispetto a quella orizzontale, ottenendo con ciò una esagerazione grafica delle pendenze dei livelli rappresentati.

Data la complessità di questo processo cui contribuiscono più cause, dove la struttura del sottosuolo, come è stato evidenziato, mostra notevoli variazioni litologiche laterali e verticali anche a distanze ravvicinate, si è dovuto far ricorso ad una legenda che sintetizzasse la situazione emersa dalle indagini multidisciplinari ma al tempo stesso fosse di lettura accessibile a tutti.

Il problema principale che si è dovuto affrontare nella fase interpretativa è stata la discriminazione dei livelli limo-argillosi dalle falde contenenti acque a medio-bassi tenori salini. Questo soprattutto perchè le indagini geoelettriche, le quali costituiscono la principale fonte di informazioni per la realizzazione delle sezioni, forniscono una risposta elettrostratigrafica analoga relativamente a entrambe le due situazioni idrogeologiche, come precedentemente rilevato.

In particolare l'*aquitard* di base, relativo alle falde salate, che impedisce il passaggio della contaminazione nei livelli dolci sottostanti, non risulta sempre individuabile e quindi nella fase di rappresentazione dei risultati per uniformità non è stato riportato.

Nella legenda si è quindi scelto di indicare solamente la presenza o l'assenza della contaminazione salina nel sistema acquifero complessivo e non di definire gli sviluppi degli orizzonti litostratigrafici, peraltro poco correttamente delineabili a causa della scarsa qualità della maggior parte delle stratigrafie profonde disponibili. Ove possibile e rappresentabile, sono state inserite delle informazioni qualitative sulla permeabilità degli acquiferi stimata integrando le considerazioni sulla resistività misurata con i SEV e i dati litologici.

La legenda riporta inoltre alcuni elementi utili per comprendere i rapporti tra acque sotterranee e superficiali ed evidenziare le aree in cui si manifestano dispersioni di acque superficiali che condizionano, favorendola od ostacolandola, la propagazione del processo di contaminazione. A questo proposito sono state inserite delle informazioni sintetiche sulla qualità delle acque superficiali, misurate sulla rete idrografica, e sotterranee, determinate in pozzi e piezometri.

Le tre classi di qualità dell'acqua utilizzate sono state stabilite in funzione dei limiti accettabili per i principali usi orticolo ed agricolo dei suoli. Si è quindi stabilito di classificare le acque in:

salate quelle che presentano valori di conducibilità elettrica, misurati in pozzi e canali, superiori a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e resistività elettrica del terreno inferiori a 4,5 ohm^*m ;

salmastre quelle che presentano valori di conducibilità elettrica dell'acqua dei pozzi e canali compresa tra 5000 e 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e resistività elettrica del terreno compresa tra 4,5 e 7 ohm^*m ;

dolci quelle con conducibilità elettrica, misurata in pozzi e canali, inferiore a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e resistività elettrica del terreno superiore a 7-10 ohm^*m .

Le acque qui classificate salmastre hanno un tenore salino normalmente superiore a 0,8-1 g/l e generalmente non sono idonee all'uso irriguo, mentre quelle denominate salate possono raggiungere tenori salini analoghi a quelli della laguna e del mare (circa 35 g/l). Nella legenda è stata infine inserita una campitura per evidenziare la fascia di oscillazione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata in corrispondenza delle variazioni idrauliche e meteorologiche stagionali.

Sezioni 1 e 2. Questi profili sono posti nell'area più settentrionale di studio con sviluppo E-O, da Corte di Piove di Sacco al margine lagunare (Tavola 7).

Nell'area compresa tra le due sezioni la contaminazione salina appare esclusivamente in prossimità del

bordo lagunare; c'è presenza di acqua dolce in tutto il sistema acquifero e in tutto lo spessore indagato e, sulla base delle informazioni derivanti dai sondaggi e dai pozzi per acqua, fino ad oltre 300 m di profondità. Solo in prossimità della sezione 2 è stata individuata una seconda falda salata ad una profondità di circa 70 metri che però si esaurisce poco a monte della laguna, come evidenziato dalle misure nei pozzi profondi. Questa situazione è principalmente correlabile sia alla dispersione del fiume Brenta e del Canale Novissimo che non convogliano acqua salata verso l'entroterra, sia alla presenza di livelli argillosi nei primi 20 metri di sottosuolo che impediscono la pro-

pagazione verso l'entroterra del cuneo salino. Da notare che anche i corpi d'acqua superficiali non sono interessati dalla contaminazione salina; va però sottolineato che in corrispondenza delle opere idrauliche che collegano la laguna alla rete scolante sottopassando il Canale Novissimo si hanno localizzate e stagionali presenze di acque salate.

Sezioni 3 e 4. Queste sezioni si sviluppano a partire da Pontelongo, sovrapponendosi per circa un chilometro e separandosi prima del fiume Brenta, terminando entrambe in laguna: la sezione 3 presso Valle Millecampi e la sezione 4 verso la Palude Fondello (Tavola 7).

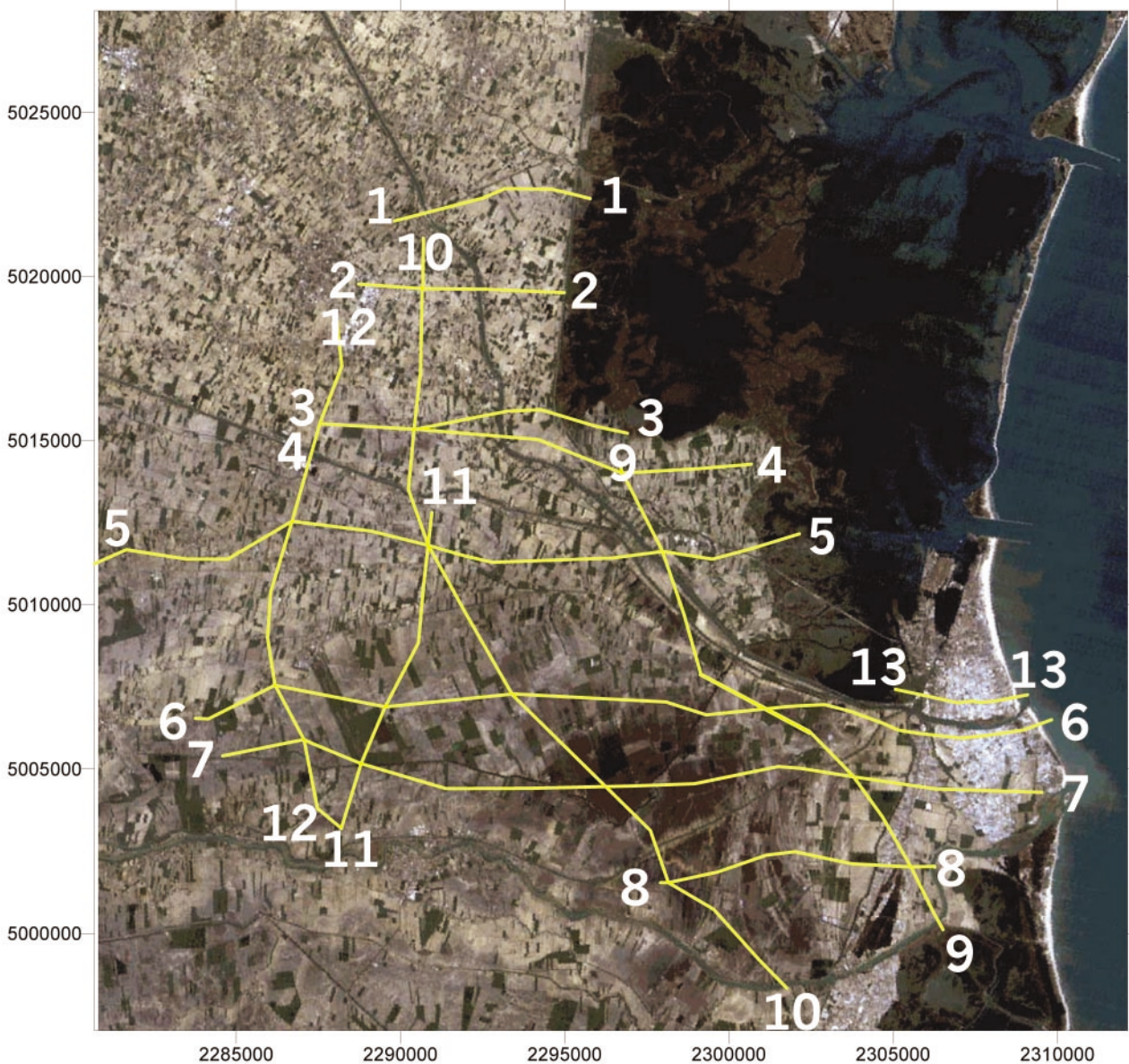


Figura 2.25 - Ubicazione delle sezioni interpretative su un'immagine satellitare. Coordinate di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.

L'area interessata dall'intrusione salina è compresa tra la laguna e il fiume Brenta, mentre fino a Pontelongo le acque sia sotterranee che superficiali sono dolci.

Nella *sezione 3* l'intrusione salina delle acque provenienti dalla laguna riesce ad oltrepassare il fiume Brenta la cui influenza positiva risulta ristretta ad un intorno piuttosto limitato.

Nella *sezione 4* viceversa la contaminazione non oltrepassa il Canale Novissimo in quanto, per un tratto di circa un chilometro, è parallela al fiume Brenta ed al Canale Novissimo, la cui dispersione di acqua dolce riesce a contrastare il cuneo salino presente da qui fino alla laguna. In questo tratto però, soggiacente al livello del mare, assume elevata criticità il processo di intrusione salina in quanto lo spessore della falda dolce freatica è limitato a un paio di metri ed è molto sensibile alle variazioni stagionali dei fattori meteorologici ed idraulici. Anche le acque superficiali in questo tratto risultano frequentemente salate e salmastre.

Sezione 5. Con direzione anch'essa circa E-O, si sviluppa parallelamente alla sezione 4 estendendosi maggiormente verso l'entroterra. Il limite occidentale è nella zona di Pontecasale (PD), mentre quello orientale è sulla parte meridionale della laguna (Tavola 7).

Con questa sezione ci si è spinti molto ad occidente per verificare alcune anomalie (presenza di un potente strato ad acqua salata) segnalate da Consorziati del Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione e riscontrate durante le indagini geofisiche. Infatti, nella zona compresa tra Ponte Casale e Villa del Bosco risulta esservi un potente banco ad acqua salata che tocca il culmine arrivando ad una profondità di 170 m dal p.c. nella zona di Candiana. Questo fenomeno può essere indotto dalla presenza di acque saline fossili legate a precedenti ingressioni marine e a fenomeni termali; è evidente che queste ipotesi vanno suffragate da uno studio di dettaglio del sottosuolo di quest'area. Malgrado ciò, è confortante che i primi 10-15 metri di sottosuolo siano generalmente esenti da contaminazione, salvo proprio in corrispondenza della zona di Candiana dove la presenza di acqua salata arriva a pochi metri dal piano campagna e risente delle variazioni stagionali.

Nella parte orientale del profilo, lo sviluppo del processo di intrusione salina dal margine lagunare è simile a quello visto nelle precedenti sezioni 3 e 4, benché assuma qui un carattere più intenso interessando inoltre una seconda falda salata/salmastra che si sviluppa sotto i 30 metri. Anche qui nell'area compresa tra il fiume Brenta e la laguna l'acqua salata può raggiungere stagionalmente la base della zona non saturata. Il cuneo salino viene contenuto dall'effetto disper-

sivo dei fiume Brenta, Bacchiglione e del Canale Morto.

In corrispondenza della zona di Conca d'Alabero è nuovamente presente una lente di acqua salmastra/salata che è l'estremità settentrionale del cuneo salino provenienti da sud (vedi sezione 10).

Sezioni 6 e 7. Le sezioni in esame hanno la loro origine ad est di Agna e terminano sulla costa, immediatamente a sud della foce del fiume Brenta (Tavole 7 e 8). Gran parte del territorio compreso tra queste sezioni è contaminato da acqua salata o salmastra. Nella estremità occidentale, come già ipotizzato per la sezione 5, il fenomeno potrebbe essere correlato alle acque fossili a loro volta legate all'ultima fase ingressiva/regressiva che ha rispettivamente portato e sigillato il "paleocuneo salino" a questa distanza dalla attuale costa. Le profondità interessate da questo fenomeno appaiono ridotte rispetto a quanto visto più a nord nella sezione 5 raggiungendo grossomodo i 70 metri.

Nel settore centrale, in corrispondenza dell'estremità meridionale del Bacino Zennare, il Canale dei Cuori assume stagionalmente un ruolo positivo nella mitigazione del processo di contaminazione salina, in concomitanza al rilascio di acque dolci per l'irrigazione. Nella Sezione 7 questo effetto positivo si evidenzia per tutto il tratto ove il Canale scorre parallelo alla traccia della sezione stessa, cioè tra Cona ed il Bacino Zennare.

Nel settore centro-orientale ritorna fortemente la presenza di acqua salina che è senz'altro ascrivibile all'intrusione delle acque marine e lagunari e alla contaminazione dovuta alla dispersione delle acque di marea dalla rete idrografica.

La dispersione dell'acqua di marea che risale i fiumi Brenta, Bacchiglione, Adige e i canali di Valle, Gorzone contribuisce ad aggravare la già preoccupante situazione della fascia costiera.

Ad est del Canale di Valle, dove le quote topografiche sono nettamente al di sopra del livello del mare e sono presenti consistenti corpi sabbiosi relativi alle dune antiche e recenti ed ai paleocordoni litoranei, la falda freatica dolce può raggiungere i 10 metri di spessore e garantire così un buon franco di coltivazione, malgrado in alcune aree le oscillazioni stagionali siano di entità non trascurabili.

Ad ovest del Canale di Valle, dove invece i territori sono normalmente a quote inferiori al livello medio del mare, la contaminazione salina è prossima alla base dei suoli coltivati. Anche le acque superficiali, che in molti periodi drenano la falda freatica, ne evidenziano il contenuto salino. Nel periodo irriguo, viceversa, la stessa rete scolante assume un effetto mitigante della salinità di enorme importanza, grazie

alla provenienza delle acque dolci rilasciate a monte dai Consorzi di Bonifica.

Sezione 8. E' il più meridionale dei profili con direzione E-O ed è praticamente compreso in un'ansa terminale del fiume Adige, partendo a nord di San Pietro di Cavarzere e terminando a sud di Sant'Anna (Tavola 8).

Lungo questa sezione si è di nuovo registrata con continuità la presenza di una zona invasa da acqua salata, anche piuttosto cospicua oltrepassando localmente i 60 metri di spessore. Malgrado la gravità di questa situazione una certa mitigazione per gli strati più superficiali è fornita dalla presenza di una zona ad acqua dolce o che comunque solo stagionalmente può assumere carattere salmastro.

I dati rilevati inducono a ritenere che l'azione delle paratoie costruite verso la foce dell'Adige per contrastare gli effetti della marea crescente lungo l'asta fluviale e la dispersione dell'acqua marina nel sottosuolo, sia limitata ai terreni superficiali nell'immediato intorno dell'opera idraulica.

Sezione 9. Questa sezione è la più orientale fra quelle con direzione NO-SE e si sviluppa da S. Margherita-Passo della Fogolana (Conche) al F. Adige (Tavola 8). Essa corre parallelamente al margine lagunare nella parte settentrionale e incrocia le sezioni 4, 5, 6, 7 e 8 sopra descritte, permettendo una verifica ed interpretazione evolutiva tridimensionale del processo di contaminazione salina.

Lungo tutto il suo sviluppo si estende uno spessore di 30-40 m di acque saline che toccano i 60 metri nelle vicinanze di Sant'Anna. Per contro, proprio in questa zona tra Sant'Anna ed il fiume Adige è presente una falda dolce superficiale, di 5-10 m, variabile stagionalmente di spessore, per i noti fenomeni.

Nell'area compresa tra il Brentone Vecchio, il Canale dei Cuori, il Gorzone ed il Canale di Valle, le acque più profonde denunciano un carattere salmastro mentre le acque superficiali presentano una estrema variabilità nei contenuti salini, passando ad un carattere dulcicolo solo stagionalmente.

Il fiume Brenta che nel tratto iniziale sembra avere un letto impermeabile o disperdere acqua salata solo stagionalmente, nel tratto compreso tra il Canale Nuovo dei Cuori ed il Canale di Valle, che scorre parallelo alla sezione, rilascia acqua salata aggravando la già precaria situazione del territorio.

Sezione 10. Questa sezione parte da Corte di Piove di Sacco e si sviluppa parallelamente alla sezione 9 prolungandosi fino a Cavanella d'Adige (Tavola 8).

Analogamente a quanto registrato nelle sezioni 1, 2, 3, 4 e 5, nell'area settentrionale fino al Bacchiglione all'altezza di Correzzola, in tutto lo spessore indagato si osserva la presenza di acque dolci. Nella totalità

dell'area compresa tra Brenta e Bacchiglione l'assenza di acqua salata testimonia l'azione positiva di questi due fiumi che agiscono da "barriera idraulica" allo sviluppo areale della contaminazione salina in tutte le acque sotterranee.

A sud di Correzzola comincia a manifestarsi la presenza della intrusione salina anche se nell'area compresa il Bacchiglione ed il Rebosola l'effetto positivo di questi due corsi d'acqua e del Barbegara deprime l'interfaccia dolce/salata al di sotto dei 15 metri.

A Sud del Rebosola fino al fiume Adige la situazione si fa critica in particolare per i livelli dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata al di sotto dei 10 metri dal p.c., e dove la contaminazione salina localmente supera i 100 metri di spessore. L'area compresa tra Concadalbero e Cordonazzo è attraversata da importanti paleoalvei sabbiosi, dei quali quello del Po, passante per Cona e Concadalbero, sembra funzioni da serbatoio di acqua dolce. Mentre quelli presenti più a Sud, passanti per Solferino e Cordonazzo, drenano l'acqua salata del sottosuolo ma possono anche fungere da serbatoio delle acque dolci piovane.

Va infine notato che nella zona meridionale del Bacino Zennare, caratterizzato da un alto contenuto organico nei suoli, il Canale dei Cuori, che in parte scorre parallelo alla sezione, funge da barriera che interrompe il cuneo salino; si precisa però che una azione di contrasto alla contaminazione salina è dovuta altresì alla presenza di un importante livello di argilla situato alla base delle torbe affioranti.

Sezione 11. Questa sezione si aggancia alla precedente a Correzzola e, con direzione N-S, arriva al fiume Adige poco ad ovest di Cavarzere (Tavola 8).

Anche in questo caso vi è da segnalare la continuità dello strato ad acqua salata e salmastra, con spessori di 30 metri o più quasi ovunque. Lungo tutta la sezione comunque l'interfaccia tra acquifero dolce superficiale ed acqua salata, pur oscillando stagionalmente, è generalmente al di sotto dei 10 m dal piano campagna.

Tra il canale Rebosola e il canale Barbegara l'interfaccia acqua dolce/acqua salata è piuttosto depressa, tanto che la si trova a profondità di oltre 25 m dal p.c., grazie al loro fenomeno di contrasto, già più volte ricordato, e del paleoalveo del Po già citato per la sezione 10.

Nel tratto terminale prospiciente il fiume Adige l'acqua salata viene contenuta anche dall'apporto dolce sia del fiume stesso che del Canale Gorzone.

Sezione 12. Questa sezione, che parte da Piove di Sacco (PD) per arrivare a Rottanova (VE) sulla riva dell'Adige, risulta la più occidentale tra quelle con direzione N-S (Tavola 8).

Nell'area settentrionale compresa tra Piove di Sacco e Pontelongo è presente acqua dolce, come già evi-

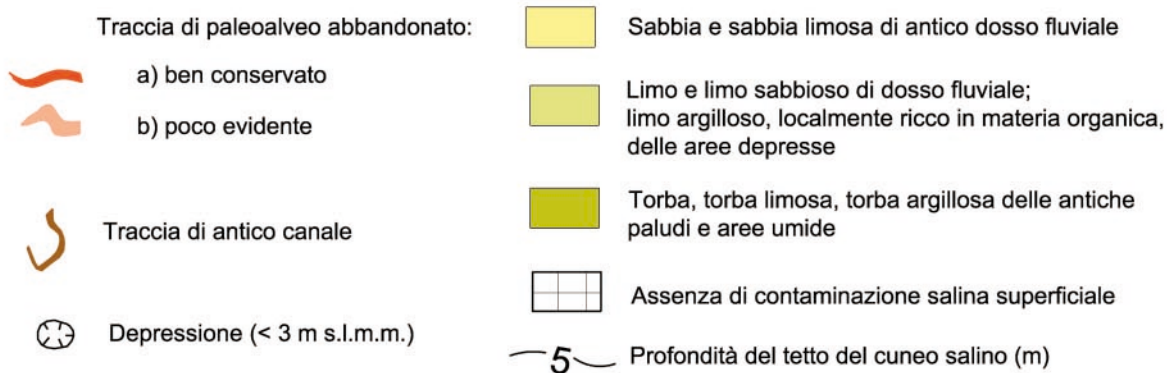
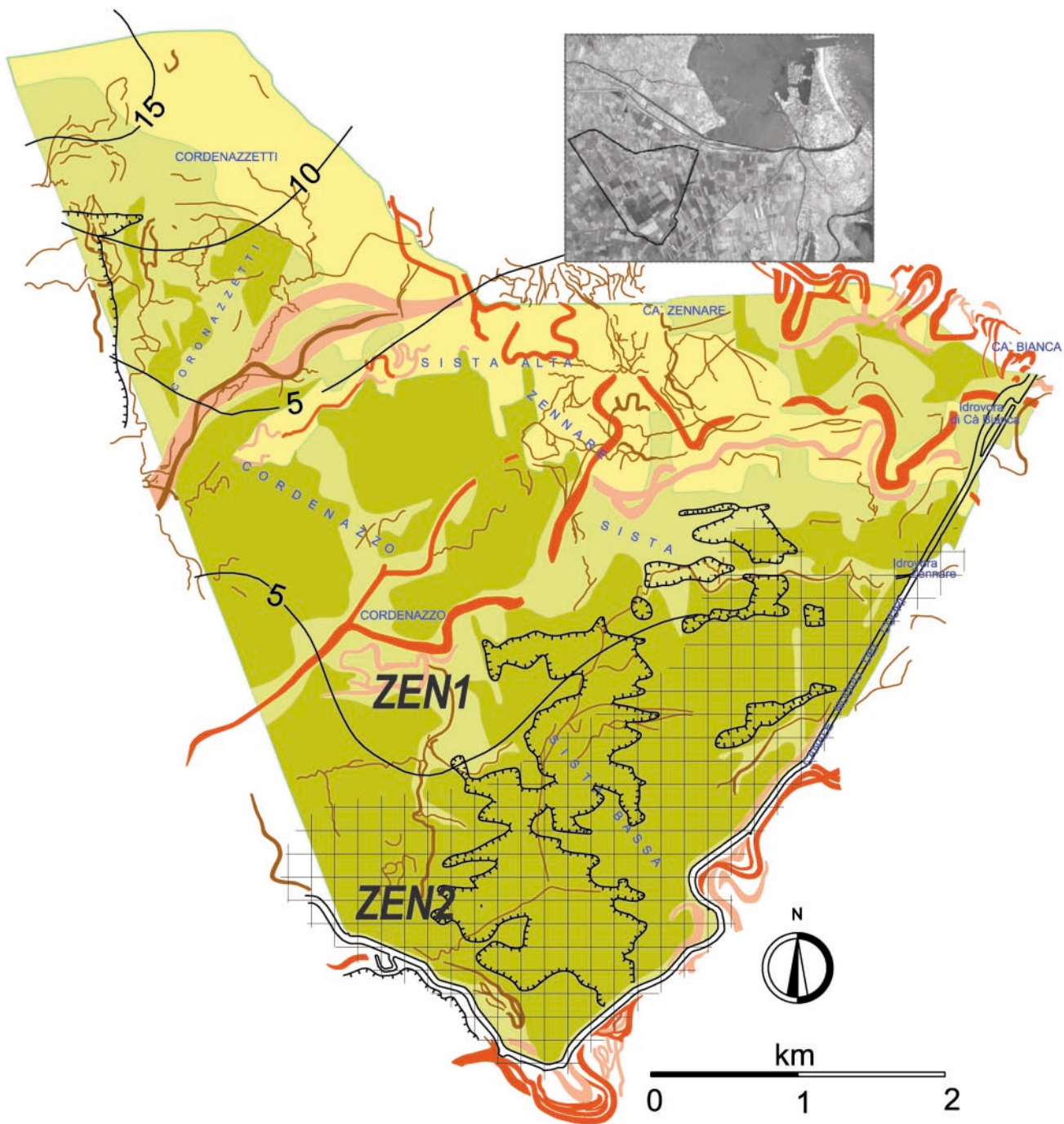


Figura 2.26 - Bacino Zennare: mappa dei lineamenti geomorfologici sovrapposta a quella del tetto dell'intrusione salina [70]; ZEN 1 e ZEN 2 indicano l'ubicazione delle tomografie elettriche (vedi Tavola 12).

denziato in precedenza (cfr. sezioni da 1 a 4). La contaminazione salina si avverte subito a Sud del Bacchiglione, anche se al *boundary* (confine) con l'acqua dolce si trova depressa ad una trentina di metri in prossimità di Villa del Bosco per poi risalire assestandosi ad una profondità di 10 metri dal piano campagna fino al termine della sezione, pur avendo una risalita stagionale nella parte più a Sud.

Sezione 13. Il profilo ha direzione Est-Ovest ed attraversa la stretta lingua di terra che separa la laguna dal mare, passando attraverso la località di Brondolo (Tavola 8).

Al di sotto di un primo livello di sabbia è presente nella falda freatica una importante lente di acqua dolce con uno spessore di una decina di metri nella zona centrale del lido, che si assottiglia gradualmente verso il mare e la laguna. Le misure di conducibilità elettrica, effettuate su alcune pozze per l'uso irriguo scavate anche fino a circa -5 metri, e in pozzi e in piezometri superficiali, hanno indicato acque dolci.

Il sottostante livello ad acqua salata, con la sua geometria a doppio cuneo, esemplifica la tipica fenomenologia dell'intrusione salina nelle aree insulari provenienti, in questo caso, sia da mare che dalla laguna. Lo spessore salato è variabile e raggiunge una profondità massima di oltre 60 m dal piano campagna.

Benchè l'utilizzo degli ERT sia stato di importanza nell'interpretazione e definizione delle sezioni su descritte, si vuole fornirne anche una descrizione separata per l'utilità che ricoprono nel fornire quel dettaglio sui diversi tipi litologici, le falda dolce, salmastra e salata che non è sempre rilevabile dai SEV. Di seguito vengono descritte le 5 sezioni ERT la cui ubicazione è riportata in figura 2.14 e richiamata in Tavola 8.

Sezioni Zennare 1 e Zennare 2. Nella sezione Zennare 1 è stata evidenziata la presenza di un paleoalveo (Tavola 9), che sembrerebbe spingersi sino ad una profondità di circa 6 m. Esso funge da serbatoio di acqua dolce e riesce a contrastare l'intrusione salina veicolata dai numerosi altri corpi sabbiosi ben visibili in figura 2.26, dove la mappa dei lineamenti geomorfologici è stata sovrapposta a quella del tetto dell'intrusione salina.

La sezione Zennare 2 è stata realizzata per verificare la già citata anomalia riscontrata all'estremità meridionale del bacino Zennare, ove localmente non era stata individuata la presenza di acqua salata nonostante tutte le zone circostanti ne fossero contaminate (v. sezioni 7 e 10). Si individua qui una elettrostratigrafia tipica dei depositi limo-sabbiosi che conferma l'assenza di acqua salata: durante le operazioni di campagna è stata misurata una conducibilità dell'ac-

qua di strato non superiore a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a convalida dei valori mediamente bassi di resistività elettrica. *Sezione Ca' Bianca.* Analogamente a quanto sopra, anche in questa sezione si è voluto dettagliare una situazione anomala quale l'assenza di acqua salata. La litologia prevalente è quella limo-sabbiosa ed è stata evidenziata la presenza di un paleoalveo superficiale in falda dolce che si spinge sino ad una profondità di circa 8 m.

Sezioni Gorzone 1 e Gorzone 2. Nella zona di Punta Gorzone è presente una situazione estremamente critica, con l'acqua salata molto prossima al piano campagna, ed aggravata dalla dispersione delle acque marine che risalgono il corso del fiume Brenta.

La gravità di questa situazione si evince dalle sezioni Gorzone 1 e Gorzone 2. Nella prima è evidente la presenza di acqua salata fino al piano campagna e si individua una transizione salato/salmastro ad una profondità di circa 13 m. Nella sezione Gorzone 2 è presente un livello salmastro superficiale, di spessore variabile da 1 a 6 m, che sovrasta la falda salata la quale si spinge oltre il limite inferiore della sezione, che è di 30 m. In figura 2.27 è riportata la sezione 2, rielaborata con maggior risoluzione, dalla quale appare evidente la presenza di un paleoalveo, individuato anche dall'analisi geomorfologica, contenente acqua salata fino ad una profondità di circa 18 m.

In figura 2.28 è stata riportata l'analisi dei principali lineamenti morfologici sovrapposta alla mappa della profondità del tetto del cuneo salino al fine di evidenziare la relazione tra questi ed il processo di contaminazione salina per l'area di Punta Gorzone. E' da notare come, in corrispondenza del paleoalveo indagato, il letto del fiume Brenta sia approfondito a -8 m rispetto al l.m.m. a causa di una fossa di erosione, mentre il livello del piano campagna è a circa -1m. Ciò favorisce l'accumulo di acqua salata di marea nella fossa di erosione stessa e la successiva dispersione attraverso il paleoalveo.

Dai risultati di dettaglio ottenibili, come sopra visto, dalla tomografia elettrica, si ribadisce l'importanza di adottare, ove possibile, il sistema di analisi integrato tra SEV (per la caratterizzazione a grande scala) ed ERT (per lo studio di dettaglio delle anomalie locali e superficiali), che è la via più idonea per indagini di questo tipo, in grado di offrire risultati completi e interpretabili.

2.4.1 Zonizzazione del processo

Sulla base di tutti i dati sinora emersi, si sono elaborate due mappe di zonizzazione del processo relativa-

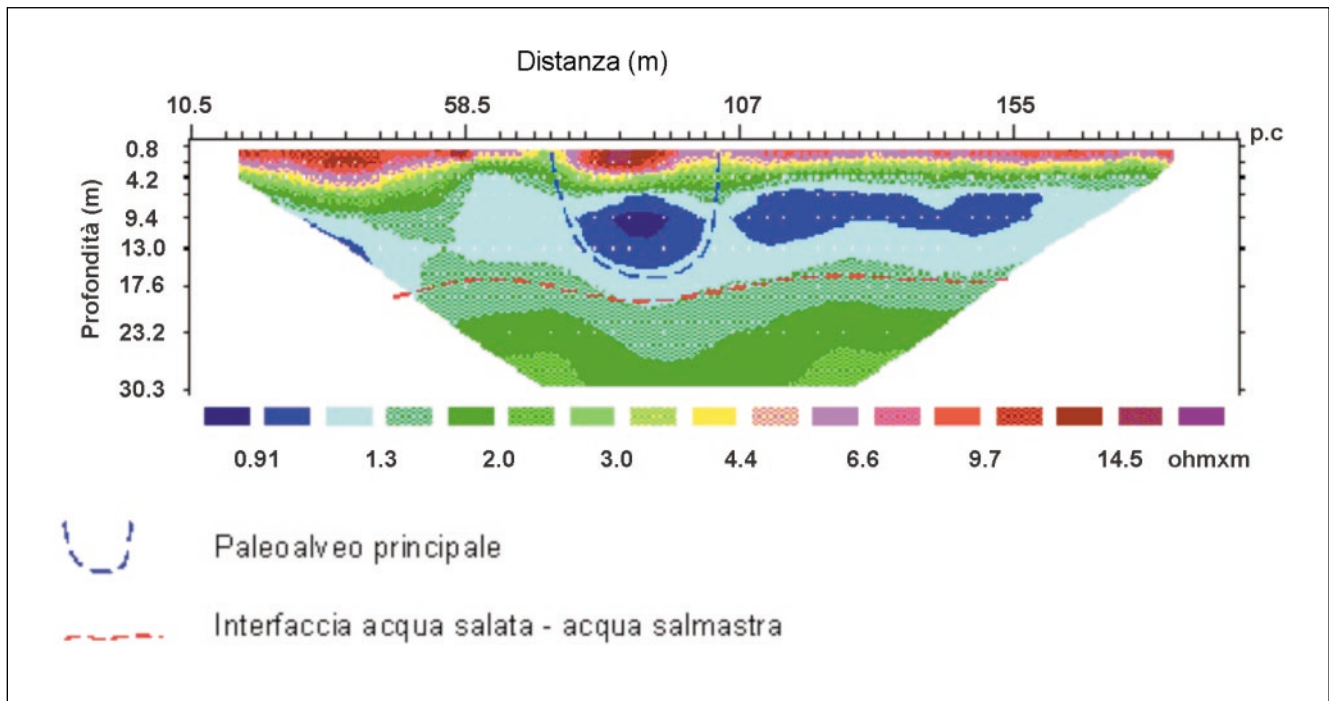


Figura 2.27 – Interpretazione del modello derivante dalla inversione dei dati per la Sezione Gorzone 2, rielaborata con classi di resistività più dettagliate rispetto a quella riportata in Tavola 9.

mente alla morfologia del tetto e del letto della contaminazione salina, in grado di fornire una visione sinottica dell'evoluzione tridimensionale del processo rappresentato settorialmente dalle sezioni interpretative.

La mappa del tetto (Tavola 10) rappresenta la profondità a cui compare la prima falda salata, ovvero l'interfaccia acqua dolce/acqua salata, e approssimativamente, se si esclude il primo sottile livello areato, lo spessore dell'acqua dolce sovrastante.

Poiché, come si è già visto nelle indagini dirette in sito e nell'elaborazioni dei parametri monitorati, la profondità a cui si rinviene la prima interfaccia acqua dolce/acqua salata varia con le diverse condizioni idrauliche e meteorologiche, ne consegue che la mappa del tetto della contaminazione salina è una rappresentazione mediata dello sviluppo del processo. In particolare le variazioni sono maggiormente sensibili nell'intervallo di profondità 0-10 metri, come già evidenziato nelle sezioni interpretative illustrate nei paragrafi precedenti.

La mappa è stata suddivisa in 6 classi di profondità equidistribuite da 0 a 30 metri.

Le aree che appartengono alla prima classe di profondità (0-5 m) sono quelle decisamente *critiche* in quanto la contaminazione salina può coinvolgere direttamente i terreni coltivati.

Le aree della seconda classe (5-10 m) sono ad *alto rischio* in quanto stagionalmente soggette a variazioni che possono far risalire il livello dell'acqua salata.

Le aree ricadenti nelle rimanenti classi, pur sensibili alle variazioni stagionali dell'interfaccia, sono decisamente a rischio via via decrescente.

Le zone esenti da contaminazione salina sono:

l'area compresa tra il fiume Brenta e il fiume Bacchiglione fino all'altezza circa di Correzzola-Codevigo;

una ristretta area all'interno del Bacino Zennare.

Le aree critiche, con acqua salata entro i primi 5 metri, sono:

tutto il margine lagunare che include Fogolana, Santa Margherita, Conche, Valli, Ca' Bianca, Ca' Pasqua, Punta Gorzone, Chioggia, nonché la fascia costiera tra Sottomarina e la foce dell'Adige; due fasce che si prolungano dal bordo lagunare fino al fiume Adige, interessando rispettivamente le zone di Cantarana, Cordonazzo, Solferino, Brusio, Villaggio Busonera di Cavarzere e di Valgrande, Valcerere Dolfina e l'area poco a N-O di Cavanella;

altre aree senza apparente continuità di distribuzione e circoscritte che, in senso antiorario a partire da nord, sono: l'area compresa tra Santa Margherita e Brenta d'Abba in corrispondenza dell'idrovora Presa, poco a N-O dell'idrovora Barbegara (a sud di Correzzola); l'area fra Conetta e Fra Piero a N-E di Agna; l'area tra l'Idrovora Tassi e Marcanta (poco a nord di Ca' Venier); un'area interna al Bacino Civrana tra Corte Duoda e Corte Emo; una fascia prossima al fiume Adige compresa tra Buoro

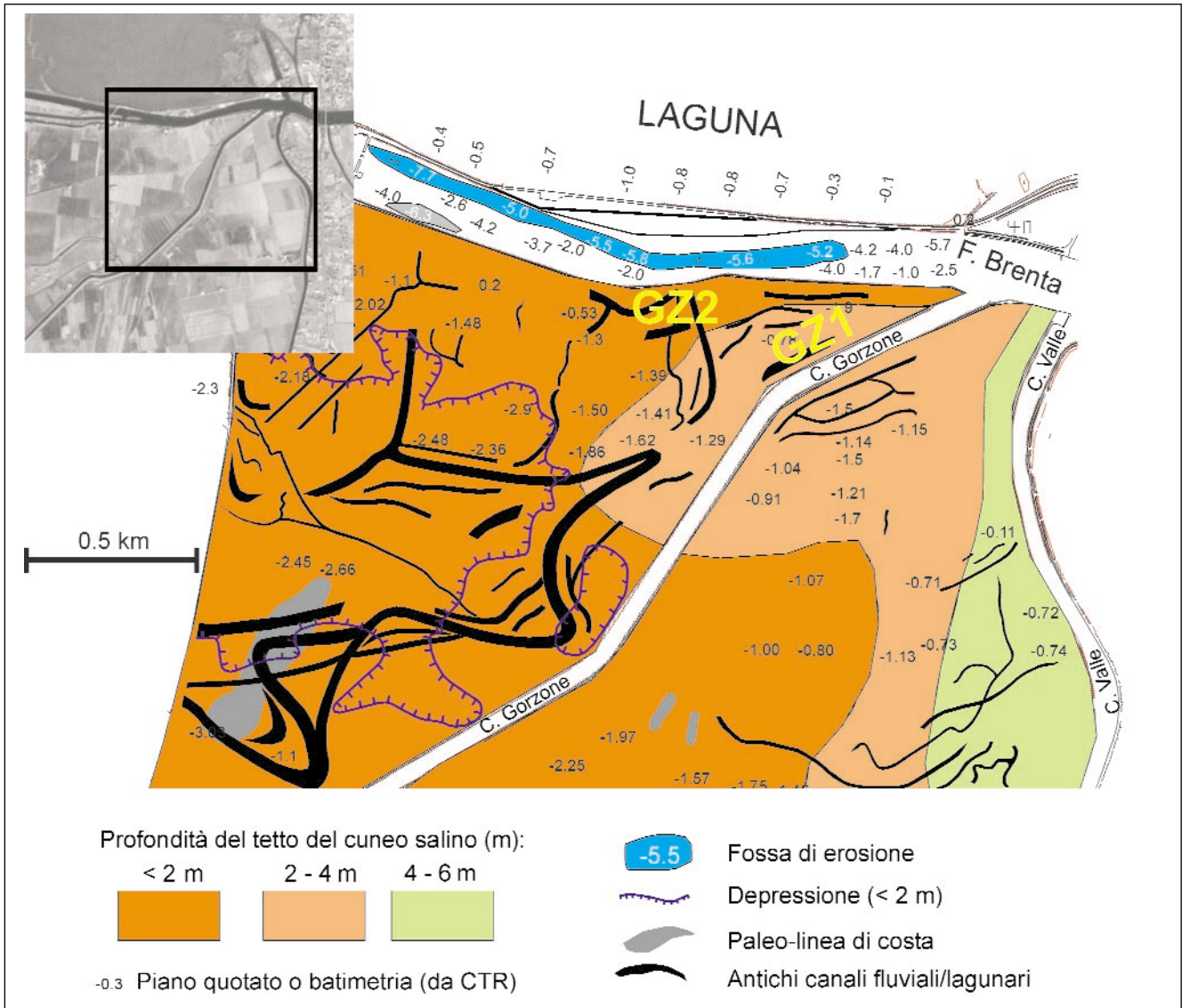


Figura 2.28 - Principali lineamenti morfologici sovrapposta alla mappa della profondità del tetto del cuneo salino per l'area di Punta Gorzone [70]; GZ 1 e GZ 2 indicano l'ubicazione delle tomografie elettriche (vedi Tavola 12).

Vecchio, San Pietro di Cavarzere e Bebbe; l'area in riva all'Adige a valle di Punta Bussola.

Le aree ad alto rischio, con il livello dell'acqua salata compreso tra 5 e 10 metri e in molti casi oscillante di qualche metro in condizioni sfavorevoli, sono:

due fasce di forma e larghezza molto variabile che vanno ad interessare le aree di: Candiana, Cona, l'area tra Civè, La Sista e Ca' Rossa, l'Idrovora Civrana, Ca' Venier, Cavarzere, Motta Molara, Valcerere, Motta Contarina, Idrovora San Pietro, Tenuta Alfiere e Ca' Lino.

Le aree a rischio via via decrescente vengono menzionate suddivise per settore il costiero e per quello centrale.

a) le aree nel settore costiero sono:

la fascia centrale a nord di Ca' Lino e a sud di Sottomarina;
l'area compresa tra Cavanella d'Adige e Sant'Anna;
una ristretta fascia comprendente San Gaetano;

b) le aree nel settore centrale sono:

l'area di Arre, Foresto, Civè, Treponti e, in misura minore, Pegolotte, Villa del Bosco, Concadalbero e Cantarana.

Le morfologie rappresentate nella mappa del tetto della contaminazione salina sono quindi influenzate da fattori indotti (piovosità, prelievi di acqua, attività delle idrovore, rilasci irrigui), e dalla presenza di alcune strutture geologiche sub-superficiali originatesi durante il processo evolutivo dell'area in esame, quali ad esempio i paleoalvei, gli antichi cordoni litorali e le dune costiere.

Confrontando la mappa della profondità tetto della contaminazione salina con quella geomorfologica, realizzata quest'ultima dalle Province di Venezia e di Padova [64; 65], è possibile individuare una certa relazione tra le forme prodotte dalla zonazione e quelle dei corpi geologici principali sub-affioranti (Fig. 2.29); si

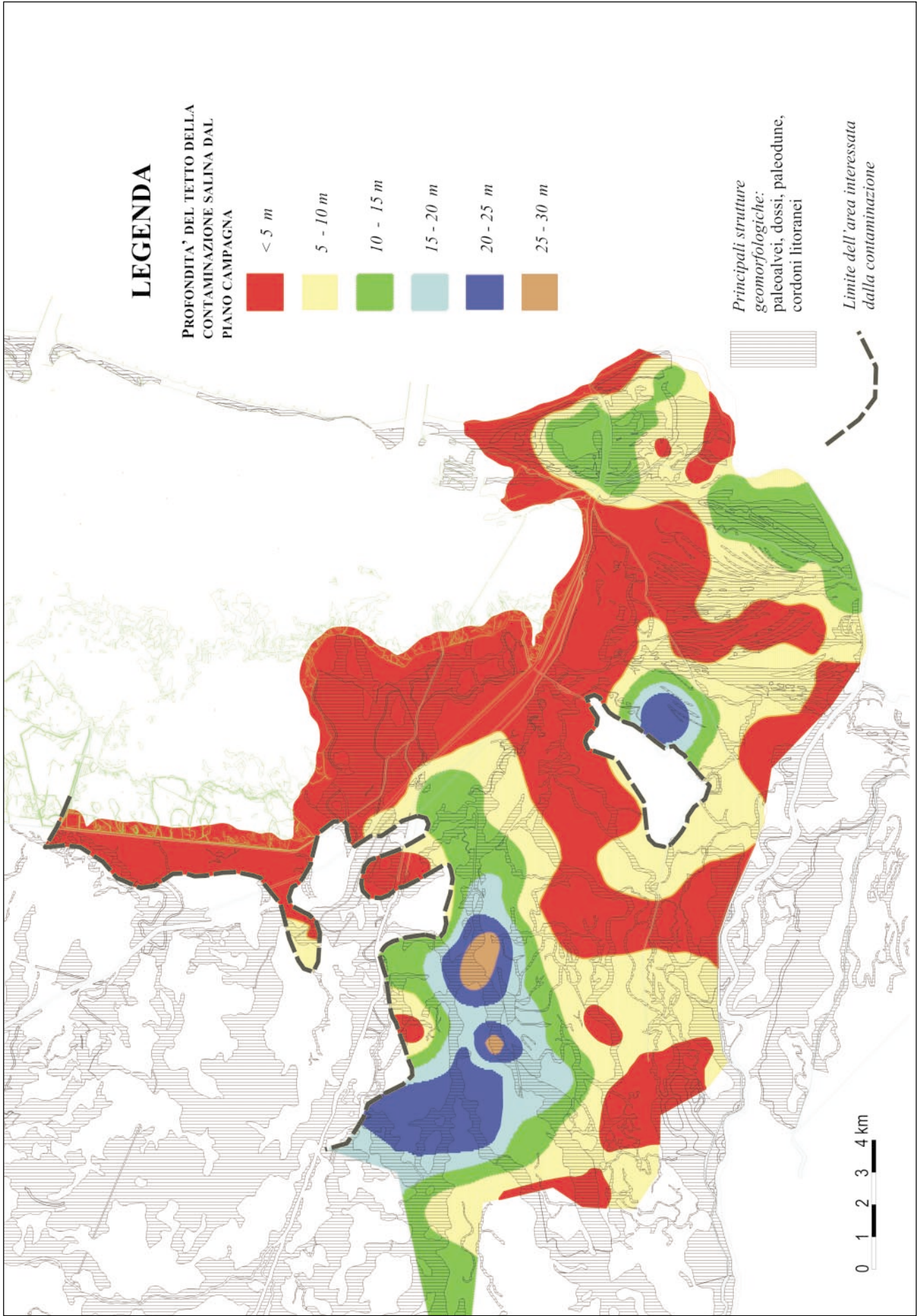


Figura 2.29 - Sovrapposizione della mappa della profondità del tetto della contaminazione salina con quella geomorfologica, fornita dalle Province di Padova [64] e Venezia [65].

ricorda che per la Provincia di Venezia sono in fase conclusiva i lavori di approfondimento geomorfologico nell'ambito del Progetto "Carta Geomorfologica Informatizzata". Nelle aree ove sono presenti gli antichi cordoni litorali e le dune, malgrado la prossimità al mare, lo strato di acqua dolce che riesce ad accumularsi è in grado di deprimere il tetto del cuneo salino fino a circa 15 metri dal piano campagna nella fascia ad est del Canale di Valle e di Sottomarina. Un esempio di questo processo per il settore di Sottomarina-Ca' Lino è rappresentato dettagliatamente in figura 2.30.

Ad ovest del Canale di Valle, ove le quote del piano campagna sono generalmente inferiori al livello del

mare, le paleo-strutture mantengono in alcuni casi una lente di acqua dolce di poco meno di 10 metri, mentre in altri casi favoriscono il flusso delle acque saline come avviene ad esempio a San Pietro di Cavarzere. Esempi interessanti di paleo-strutture che convogliano acque salate dalla laguna sono quello di Punta Gorzone, di Ca' Bianca e di Conche-Valli. Infine, il consistente sistema di paleoalvei che attraversa tutta l'area centro-settentrionale ha un duplice comportamento: nella porzione settentrionale funge da serbatoio per l'accumulo dell'acqua dolce ostacolando la propagazione del cuneo salino mentre in quello centrale mantiene solo in parte la falda salata al di sotto dei 20 metri, che in questo caso è anche di

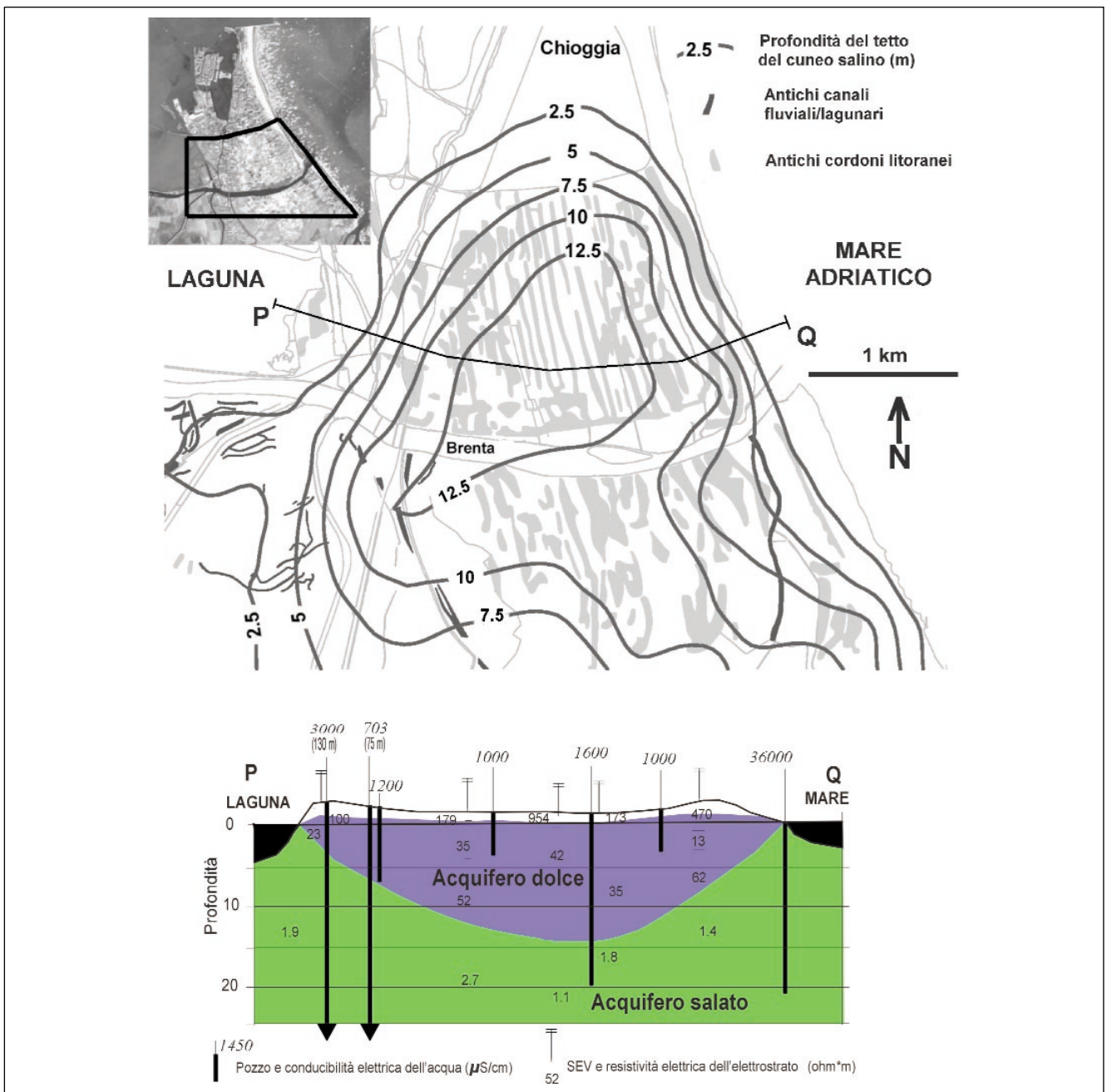


Figura 2.30 - Processo di contaminazione lungo il litorale di Sottomarina-Ca' Lino [70].

origine fossile, ed in parte cattura le acque saline. Anche per il letto della contaminazione salina, benchè per l'uso agricolo dei suoli sia di importanza ridotta rispetto alla morfologia del tetto, è stata redatta la mappa della sua superficie morfologica (Tavola 9) ed individuata la sua zonazione. Viene qui definito come letto della contaminazione salina il passaggio agli acquiferi dolci che si trovano sotto il livello a spessore variabile di litotipi a bassissima permeabilità che funge da "barriera" alla propagazione in profondità dell'acqua salata. Questo livello argilloso, come già spiegato a proposito delle sezioni interpretative, è difficilmente individuabile con i metodi di prospezione geofisica perché non è sempre distinguibile dall'acquifero salato sovrastante.

La morfologia del letto dipende quindi dallo sviluppo degli orizzonti argillosi, dal loro grado di permeabilità nonché dal loro spessore. Si ricorda che raramente sono stati individuati livelli impermeabili ad ampia continuità spaziale a causa della complessa storia geologica di queste aree deltizie che, come noto, sono state oggetto di più trasgressioni marine intercalate a fasi continentali spesso erosive che hanno inciso fortemente i livelli deposizionali sottostanti.

La zonazione della base della contaminazione salina è stata eseguita utilizzando per i primi 105 metri 7 classi di profondità con intervalli di 15 metri e quin-

di una classe cumulativa delle profondità rimanenti di 65 m.

La base della contaminazione salina in generale si approfondisce procedendo da nord verso sud, partendo da una profondità media di 15-30 metri per arrivare a 60-75 metri. Approfondimenti localizzati sono stati individuati fino a 90 metri in corrispondenza delle aree di Ca' Lino, Villaggio Busonera di Cavarzere; fino 100 metri e oltre a NO di Cavanella d'Adige e Pegolotte e, addirittura, fino a 170 metri a Candiana.

La conoscenza della morfologia del tetto e della base della contaminazione salina, oltre ad individuare le acque saline, dal punto di vista pratico fornisce utili indicazioni sulla presenza delle acque dolci. A tal proposito, va però precisato che gli acquiferi dolci non sono sempre idonei ad essere sfruttati in quanto le loro caratteristiche di permeabilità-trasmissività idraulica potrebbero essere scadenti come pure la qualità bio-chimica dell'acqua a causa di fonti di inquinamento. Inoltre esiste la possibilità che un eccessivo pompaggio induca un processo di subsidenza e aggravi quello di contaminazione salina. L'utilizzo di queste acque deve essere quindi accuratamente valutata, di volta in volta, con indagini specifiche che abbiano come punto di partenza quanto ottenuto col presente studio.

3. Sottoprogetto Subsidenza

3.1. INQUADRAMENTO DESCRITTIVO DEL FENOMENO DI SUBSIDENZA

Com'è noto, con il termine "subsidenza" si intende ogni abbassamento della superficie del suolo, indipendentemente dalla causa che l'ha generato, dal suo sviluppo areale, dalla velocità di esplicazione, evoluzione temporale e alterazioni ambientali che ne possono conseguire.

L'abbassamento del suolo avviene per cause sia naturali sia antropo-indotte che talora si sommano nella risultante. In genere la subsidenza naturale si verifica con evoluzione lenta e a scala almeno regionale, mentre quella indotta si esplica in un arco di tempo generazionale e ha uno sviluppo territoriale più limitato. La subsidenza è il risultato in superficie di processi che si esplicano nel sottosuolo e che in qualche modo sono correlati alla storia geologica del territorio; particolari caratteristiche dei terreni possono infatti favorire, accelerare o impedire tali processi [22].

Le principali cause di *subsidenza naturale* sono attribuibili ai *movimenti tettonici profondi* (=> movimenti orogenetici, attività vulcanica e attività sismica), all'abbassamento del substrato pliocenico per il *carico geostatico* (=> peso dei sedimenti sovrastanti) e alla *compattazione naturale* dei sedimenti quaternari depositatisi sullo strato pliocenico. Cause minori e concomitanti possono essere riconosciute nelle *modifiche dello stato fisico* (=> prosciugamento naturale di bacini lacustri o lagunari con processi di ossidazione e compattazione di materiali organici). L'estrazione di fluidi dal sottosuolo è la causa di *subsidenza indotta* più diffusa e più conosciuta in tutti i paesi del mondo, sia per entità sia per estensione del fenomeno. L'acqua è senza paragoni il più estratto al mondo; gli altri fluidi rimossi dal sottosuolo sono il petrolio e il gas sia allo stato puro che in associazione tra loro o con l'acqua.

La subsidenza per estrazione di solidi ha talora indotto effetti disastrosi sul territorio, ma poiché in genere avviene in lungo arco di tempo, esistono poche osservazioni e una scarsa letteratura internazionale sulla coltivazione di miniere, malgrado giacimenti di carbone e di sali siano diffusi su tutti i continenti.

Le bonifiche, soprattutto quelle per drenaggio, rap-

presentano un'altra delle modifiche all'ambiente operate dall'uomo che comporta seri problemi di subsidenza. In genere il tasso di abbassamento del suolo è direttamente proporzionale all'abbassamento della tavola d'acqua e avviene per due processi principali: uno fisico, che comporta riduzione di volume e incremento di densità, e uno biochimico che avviene per ossidazione dei terreni e conseguente perdita di massa.

3.2 SUBSIDENZA REGIONALE

E' indubbio che l'analisi della subsidenza dell'area di studio non può prescindere dal suo inquadramento nel processo che ha interessato l'intero territorio regionale e oltre. Qui il comprensorio della laguna di Venezia in particolare è da parecchi anni oggetto di approfonditi studi sulle cause del suo sprofondamento che, coinvolgendo la città di Venezia, emerse in tutta la sua gravità nella seconda metà del novecento a seguito degli indiscriminati pompaggi di acque artesiane per scopi industriali.

Grazie all'inserimento della subsidenza fra i temi di ricerca istituzionali dell'ISDGM-CNR, fu avviata sin dal 1969 una ricerca teorica e sperimentale orientata all'analisi di questo processo.

Il problema della subsidenza non riguardò esclusivamente l'area veneziana ma anche molte zone limitrofe [17; 21; 25; 26; 35; 71], tra cui la stessa città di Chioggia che, com'è noto, è pure soggetta al fenomeno dell'acqua alta, e della pianura padana, il polesine in particolare e il ravennate, dove la subsidenza indotta dalla rimozione di fluidi dal sottosuolo raggiunge valori molto più elevati rispetto a quelli veneziani. Queste aree, in parte a quote inferiori al l.m.m., sono coinvolte nel processo di subsidenza naturale che interessa l'intero bacino regionale, ed inoltre sono state oggetto in passato di numerose opere di bonifica.

La subsidenza naturale nell'area padano-veneta orientale è in parte dovuta alle deformazioni tettoniche del substrato e, per lo più, alla progressiva consolidazione dei depositi fini recenti. Nel caso specifico si ha una lenta e progressiva riduzione del volume dei terreni sciolti per effetto del carico sedimentario

sovrastante. Questo processo, proprio delle pianure alluvionali e delle aree deltizie, è tipico della Pianura Padana, estesa *geosinclinale* in abbassamento, dove peraltro un ruolo importante è altresì ascrivibile a processi tettonici. Ora come in passato comunque la subsidenza si esplica in modo differenziale in funzione degli eventi deposizionali, degli spessori quaternari e delle strutture plioceniche sepolte. Come risulta ben evidenziato in figura 3.1, i valori massimi si hanno nella zona del delta del Po e, procedendo verso nord, anche il comprensorio veneziano ne risulta quindi interessato, ma in misura decisamente inferiore, trovandosi sui fianchi del grande insellamento padano ed essendo qui la coltre quaternaria molto meno spessa che nell'area del Delta. Si ricorda inoltre che analisi modellistiche del fenomeno forniscono per l'area del nord Adriatico, anche a livello previsionale, una velocità media di abbassamento intorno a 0.5 mm/anno nella Laguna di Venezia, 2.5 mm/anno a Ravenna e 5 mm/anno nell'area del delta del Po (Fig. 3.2). Questi risultati sono in accordo con quelli ricavati da studi analitici (Fig. 3.3) e da rilievi geodetici condotti in periodi diversi [3; 56].

3.3 SUBSIDENZA NEL COMPRESORIO LAGUNARE

Dai numerosi studi effettuati è emerso che nel territorio dell'attuale bacino lagunare la subsidenza si è esplicata nell'arco di centinaia di millenni, con tassi differenziati, in relazione a movimenti tettonici, ad eustatismo⁽⁵⁾, ai diversi eventi deposizionali succedutisi, ai fenomeni di collasso dei sedimenti fini, e, negli ultimi secoli, agli interventi antropici.

Di seguito, si fornisce la sintesi della valutazione dei tassi di subsidenza per gli ultimi 7000 anni circa, cioè dall'origine della laguna.

- Il tasso medio di subsidenza nel periodo evolutivo naturale, prima dell'intervento dell'uomo, è stato dedotto da radiodatazioni di resti organici della serie olocenica e risulta pari a circa 1,3 mm/anno (1-1,7 mm/anno) [18].

⁽⁵⁾ L'eustatismo è un fenomeno indotto da variazioni climatiche terrestri che influenzano la massa ed il volume degli oceani; esso risulta quindi positivo nei periodi caldi, durante i quali (per espansione termica dei mari, scioglimento dei ghiacciai, ecc.) il livello del mare aumenta e invade i continenti, negativo nei periodi freddi con un conseguente abbassamento del livello del mare. I tassi di sedimentazione e quindi di accumulo di materiali sono legati alle variazioni climatiche. L'innalzamento eustatico del mare è indipendente dal processo di subsidenza ma concorre a ridurre la differenza di quota fra il livello del suolo e quello del mare. Nell'ultimo secolo un incremento generale del livello medio del mare di poco superiore a 1 mm/anno può ben rappresentare la crescita del Mediterraneo [79]. Un tale aumento medio è stato osservato anche a Venezia e in altre stazioni mareografiche dell'alto Adriatico [31].

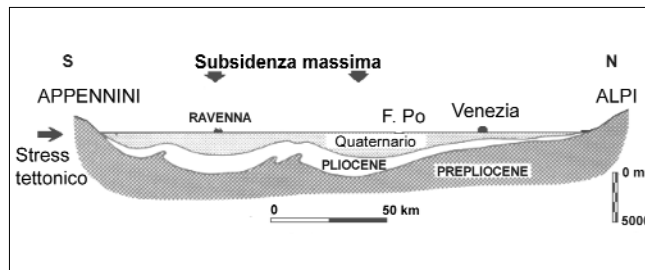


Figura 3.1 - Sezione schematica del bacino subsidente padano [2].

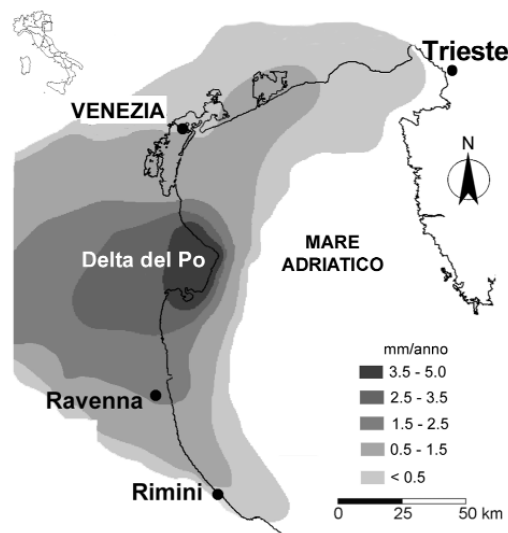


Figura 3.2 - Distribuzione areale della subsidenza geologica (mm/a) del bacino orientale della Valle Padana risultante dal modello di simulazione [54].

- Dopo vari interventi antropici (interventi idraulici di "diversione a mare" eseguiti nel 1400 durante la Serenissima e protratti fino al 1700; trasformazioni alle bocche, dentro il bacino e lungo i litorali dagli inizi del 1800), la subsidenza inizialmente più accentuata è andata attenuandosi e nei primi decenni del XX secolo il suolo si abbassava per sole cause naturali con valori assai modesti ($\eta \leq 0.5$ mm/anno) [56].

- Dal 1930 al 1970 la subsidenza antropica, dovuta principalmente agli emungimenti progressivi ed incontrollati delle sei falde artesiane che si susseguono fino a 320 metri di profondità, aggravò la situazione che divenne particolarmente critica dagli anni '50 con il boom industriale post-bellico; i valori più elevati furono registrati tra il 1968 ed il 1969 con 17mm a Marghera e 14 mm a Venezia [20; 28; 30].

- Dopo il 1970 iniziò una fase di regolamentazione e diversificazione degli approvvigionamenti idrici, e si verificò la rapida ripressurizzazione delle falde. Parallelamente la subsidenza rallentò fino ad annullarsi già nel 1973. Nel 1975 fu misurato un ricupero altimetrico che nel centro storico raggiunse i 2 cm

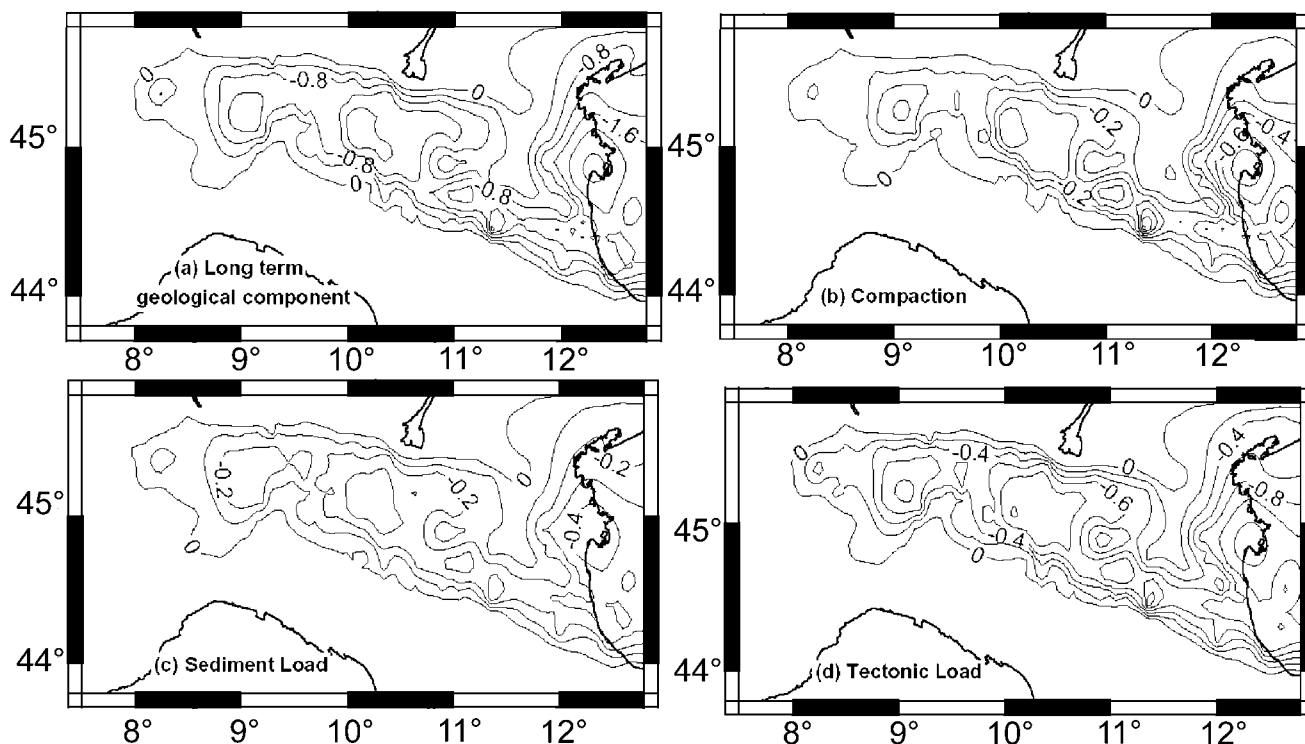


Figura 3.3 - Andamento della subsidenza geologica relativa allo spessore quaternario stimata per l'intera pianura padana (a) e contributo delle sue componenti: compattazione naturale (b), deformazione per carico geostatico (c) e movimenti tettonici (d). Isolinee in mm/a [37].

[27]. Questo *rebound*, dell'ordine del 15% della deformazione totale subita dal sistema, rappresenta la risposta elastica dei sedimenti fini ripressurizzati, ed era stata prevista dal primo modello matematico sviluppato per la simulazione del fenomeno [53].

- Lo studio del ventennio 1973-1993 ha permesso di ampliare le conoscenze sullo sviluppo recente del fenomeno e migliorato la sua simulazione modellistica [23; 75]. Il confronto dei risultati della livellazione 1993 con quelli dell'analogo rilievo 1973 ha evidenziato una ideale "linea di demarcazione" che separa due zone a differente tendenza. La prima include le aree di terraferma nonché la stessa città di Venezia che possono ritenersi stabili (*range* di abbassamento 0-0,5 mm/anno); la seconda comprende le zone di più recente formazione ai bordi lagunari nord e sud ed i litorali (tasso di subsidenza 1-2 mm/anno) [29; 32; 33; 36] (vedi Fig. 3.14).

- Gli ultimi studi e rilievi altimetrici effettuati nel 2000 nell'ambito del progetto *ISES* e l'analisi comparativa con i periodi precedenti hanno completato il quadro informativo sul processo di subsidenza non solo per l'area lagunare in senso stretto, confermando di massima i risultati precedenti, ma soprattutto fornendo conoscenze sulla subsidenza che si esplica al di fuori dei "consueti" tracciati delle linee di livellazione, ed in particolare nel bacino scolante meridionale.

3.4. SUBSIDENZA NELL'AREA DI COMPETENZA DEL PROGETTO *ISES*

Nell'area che include il bacino scolante meridionale della laguna di Venezia, misure altimetriche furono condotte sin dalla fine del 1800.

Le prime linee di livellazione vennero stabilite dall'Istituto Geografico Militare (IGMI) che, secondo i compiti istituzionali, provvedeva ad eseguirne anche i rilievi periodici. Il primo di essi fu qui effettuato nel 1884/87-1897 in un certo numero di punti di riferimento della rete topografica nazionale. Altri rilievi furono condotti nel 1925, nel 1942/47-51 e ogni 5-10 anni durante la seconda metà del 1900. Sfortunatamente la maggior parte dei capisaldi della rete 1884/87-1897 andarono perduti e solo sei punti di riferimento, riportati in figura 3.14, furono quotati nelle successive livellazioni.

In generale fino al 1950 i rilievi altimetrici risultano alquanto intervallati tra loro e assumono maggiore periodicità solo dopo il 1960 (quasi annuale tra il 1968 e il 1980). Infatti con il manifestarsi dei problemi di subsidenza dell'area veneziana, altre Istituzioni regionali e locali, Istituti privati [60] ed Enti pubblici di ricerca [43] istituirono nuove reti collegate a basi ritenute stabili nel tempo (Treviso e Conegliano), per controlli altimetrici di maggior dettaglio areale e

precisione. In particolare le livellazioni periodiche ed omogenee degli ultimi trent'anni sono state eseguite a cura del CNR (v. p.p. Fig. 3.4).

Le linee di livellazione si sviluppavano comunque ai confini dell'area di studio: lungo la costa e i bordi lagunari, nell'area dei Colli Euganei e lungo la Statale 16 *Adriatica* che unisce Padova e Rovigo.

Diversi Consorzi di Bonifica, operanti nel territorio meridionale lagunare al cui interno è l'area *ISES*, hanno posto in opera nell'ultimo secolo delle proprie linee di livellazione per il controllo delle maggiori strutture idrauliche quali gli argini dei corsi fluviali, le idrovore, ecc. Negli anni 1916, 1929, 1935, 1941 e 1965 furono effettuati rilievi topografici nell'area compresa tra la laguna di Venezia e il F. Adige, oggi utilizzabili pro-parte su aree ristrette (v. sottobacini a,...,d in Fig. 3.4).

L'analisi dei dati sopra menzionati permette di ottenere informazioni sull'evoluzione altimetrica spazio-temporale delle aree di competenza.

Malgrado la consapevolezza della diversità esistente

tra le livellazioni storiche in termini sia di tolleranza che di accuratezza, le quote dei sei punti di riferimento IGMI mostrati in figura 3.4 sono state utilizzate per calcolare i tassi di subsidenza riportati in tabella 3.1. Gli abbassamenti più elevati sono avvenuti fra il 1970 e il 1986 al *punto 1*, interessato dalla subsidenza indotta dai pompaggi di acqua termale nel bacino Euganeo, e dal 1950 al 1970 ai *punti 5 e 6* in particolare, che pur ai margini, si trovano all'interno del vasto cono di subsidenza con apice nel Delta del Po, provocato dalle enormi quantità di acqua metanifera qui estratte in quel periodo.

Dalle livellazioni disponibili sono stati calcolati i movimenti verticali avvenuti fino agli inizi degli anni '90 lungo le linee attorno all'area di studio *ISES*.

In particolare vengono riportate in figura 3.5 le variazioni altimetriche occorse da Battaglia Terme a Mestre; quest'area si manifesta mediamente stabile ad eccezione della zona che insiste sul bacino termale. La situazione altimetrica intorno a Mezzavia risul-

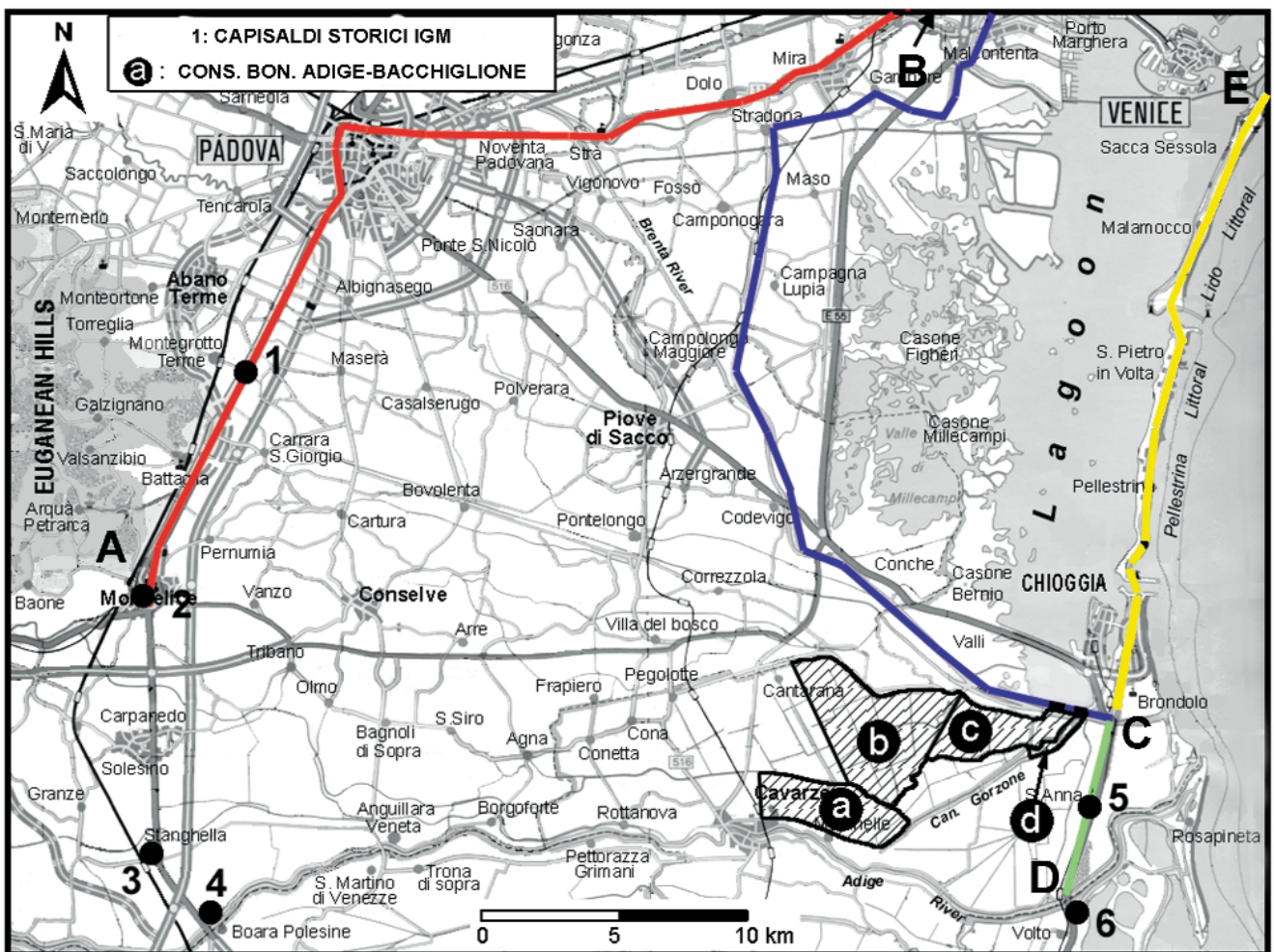


Figura 3.4 – Capisaldi IGMI confrontabili nel tempo (punti da 1 a 6); tracciati locali delle linee di livellazione CNR (linee gialla e blu) e indicazioni dei quattro sottobacini (a,...,d) ubicati all'interno dell'area di studio *ISES* dove in passato sono stati condotti rilievi topografici [modificata da 77].

Tabella 3.1 - Tassi medi annui di subsidenza (η) relativi ai capisaldi IGMI di Figura 3.4

Punto	1	2	3	4
Periodo	$\eta = \text{cm/anno}$			
1884-1947	0.5	0.3	0.4	0.4
1947-1970	0.7	0.0	0.2	1.0
1970-1986	1.6	0.1	0.0	0.1

Punto	5	6
Periodo	$\eta = \text{cm/anno}$	
1897-1951	0.5	0.7
1951-1956	1.1	9.3
1956-1958	1.7	16.3
1958-1970	1.3	3.7
1970-1977	0.7	0.6
1977-1988	0.4	0.5

ta alquanto critica negli anni '970-'980 poiché agli abbassamenti specifici del luogo (per pompaggi, tettonica, ecc.) si somma l'influenza del cono di subsidenza con apice a Montegrotto/Abano [58]. La

“anomalia” al Cataio risiede nel fatto che il caposaldo è qui istituito su roccia.

La figura 3.6 si riferisce ai movimenti del suolo avvenuti lungo il percorso che da Mestre, seguendo il bordo lagunare sud, arriva a Brondolo. E' immediato vedere che, pur in presenza di un minimo relativo di subsidenza in prossimità di Porto Marghera (polo dei pompaggi di acque artesiane), esiste un andamento progressivamente decrescente verso il litorale con un massimo assoluto in corrispondenza dell'area di Valli di Chioggia. Alla componente antropica si sommano, in questa zona, gli effetti della subsidenza naturale più elevata, dovuta alla maggior compattazione dei depositi recenti [76] e al probabile contributo tettonico, e di quella indotta dall'ossidazione dei terreni torbosi. In figura 3.7 sono riprodotte le variazioni altimetriche avvenute fino al 1977 da Brondolo a Cavanella d'Adige, lungo la linea a ridosso del litorale tra le foci dei fiumi Brenta e Adige. In quest'area a carattere deltizio, dove gli abbassamenti naturali sono dell'ordine dei 2 mm/anno, sono stati viceversa misurati tassi più che doppi, a causa delle estrazioni artesiane qui operate soprattutto negli anni '970. In figura 3.8 si possono seguire gli abbassamenti registrati da Brondolo alla bocca di Lido, assumendo

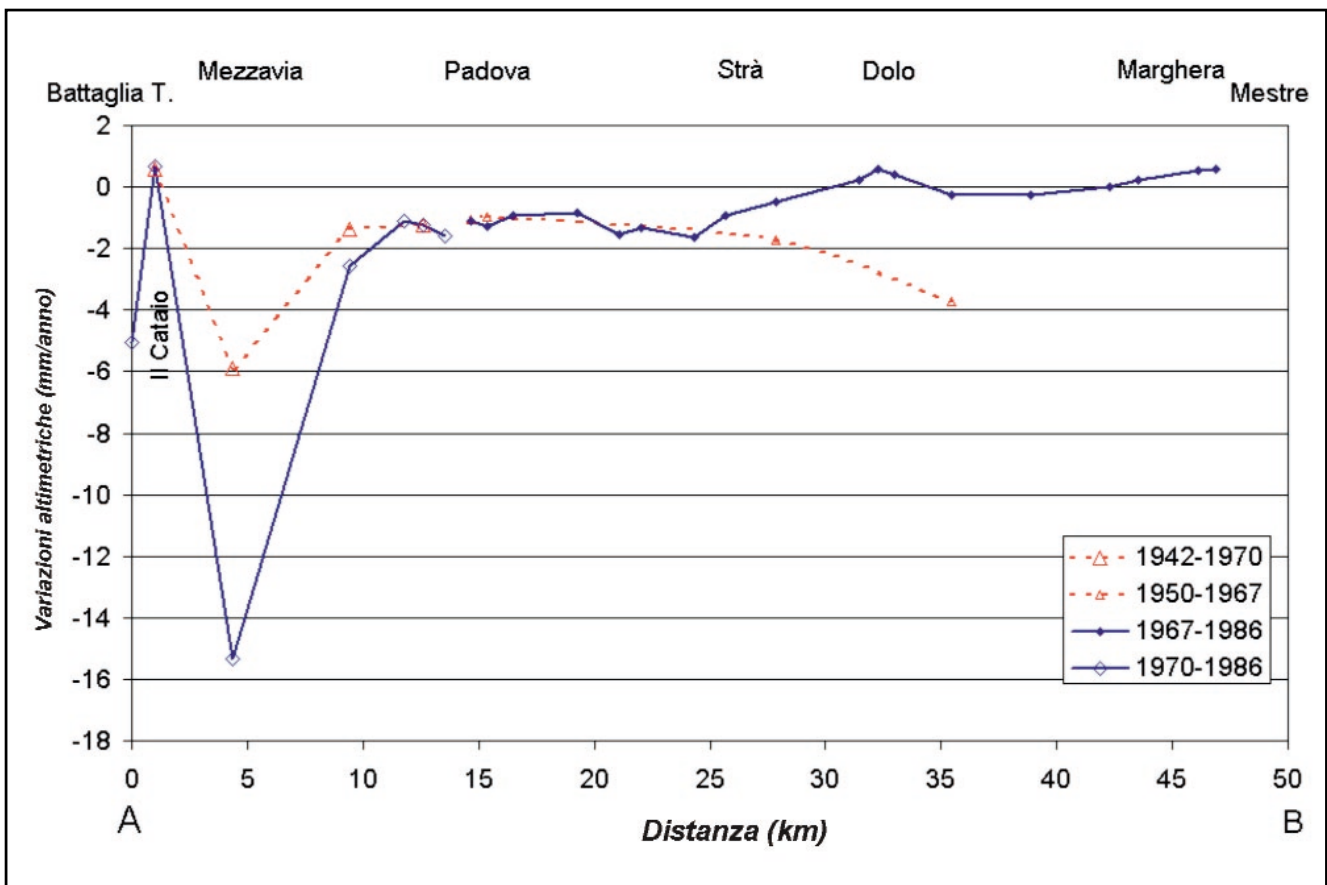


Figura 3.5 - Movimenti verticali risultanti dalle livellazioni IGMI lungo la tratta Battaglia Terme - Padova - Mestre (linea rossa A-B in Fig. 3.4).

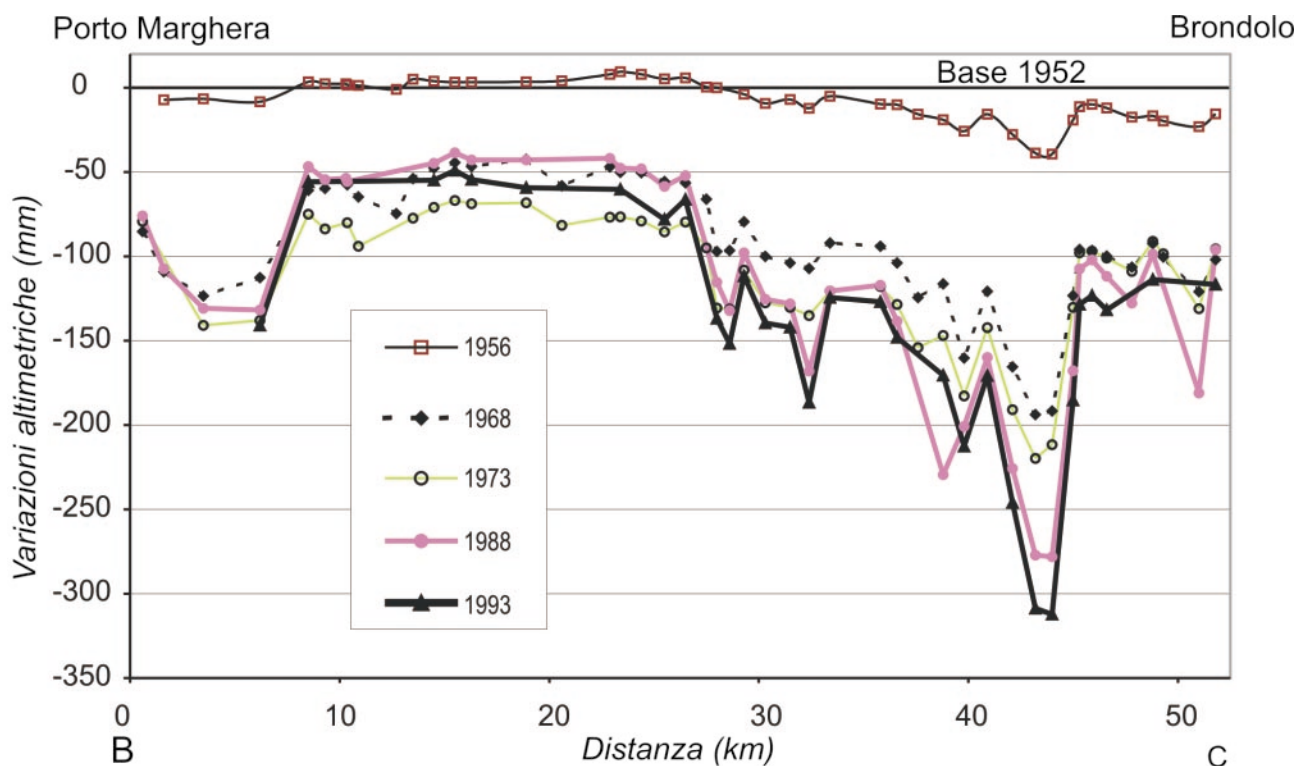


Figure 3.6 - Movimenti verticali da Mestre a Brondolo lungo il bordo lagunare Sud- Ovest risultanti dalle livellazioni CNR e IGMI, assumendo il 1952 IGMI come anno base (linea blu B-C in Fig. 3.4; [77]).

come anno di riferimento il 1968. Si ricorda che la prima livellazione lungo l'intero settore litoraneo fu eseguita nel 1968 mentre lungo il litorale di Lido fu effettuato nel 1961 un precedente rilievo [60]. Si noti come l'abbassamento registrato tra il 1961 e 1968 ($\cong 1\text{cm/a}$) sia in assoluto il più elevato; è peraltro risaputo che i maggiori tassi di subsidenza furono registrati nel decennio 1960-1970, a causa degli sfruttamenti di acque sotterranee effettuati a Marghera per scopi industriali, al Lido⁽⁶⁾ per scopi turistici e nell'area Chioggia-Brondolo per scopi agricoli.

Le diverse livellazioni dei Consorzi di Bonifica condotte nell'area compresa tra la laguna di Venezia e il F. Adige tra 1916 e il 1968 non sono risultate attendibili per un loro confronto in quanto riferite a capisaldi diversi e non stabili.

Indubbiamente quest'area è stata coinvolta da processi di rilevante subsidenza per cui l'impatto del problema è spesso avvenuto anche con la "visione diretta" dei danni prodotti all'ambiente e/o alle infrastrutture esistenti, assumendo diversa importanza in relazione all'altimetria dell'area, al tipo di insediamento e all'idrografia locale. Particolarmente significative in tal senso sono le immagine riportate nelle figure che seguono (Figg. 3.9, 3.10 e 3.11).

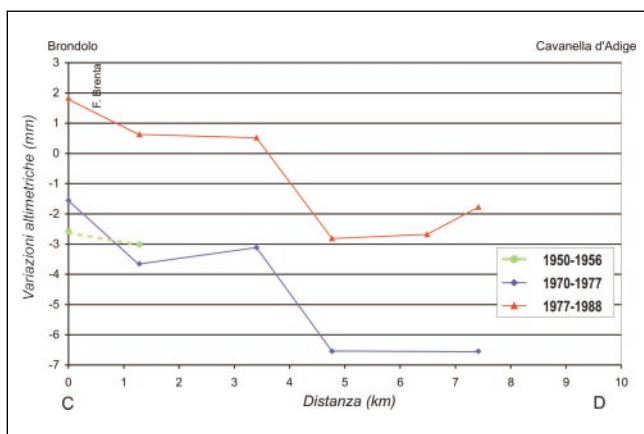


Figura 3.7 - Movimenti verticali lungo il percorso Brondolo - Cavanella d' Adige risultanti dalle livellazioni IGMI (linea verde C -D in Fig. 3.4; [77]).

Malgrado l'impossibilità di un loro confronto diretto, le livellazioni storiche dei Consorzi di Bonifica risultano comunque utilizzabili per un'analisi quantitativa della subsidenza; comparando i risultati di quei rilievi con l'altimetria della Carta Tecnica Regionale 1983 (scala 1:10.000) ottenuta da foto aeree, si può stimare il tasso medio di subsidenza per alcune aree ristrette (v. sottobacini a,b,c,d riportati in Fig. 3.4). Il risultato

⁽⁶⁾ La subsidenza registrata al Lido nel periodo '61-'68 fu più grave di quella del centro storico veneziano.

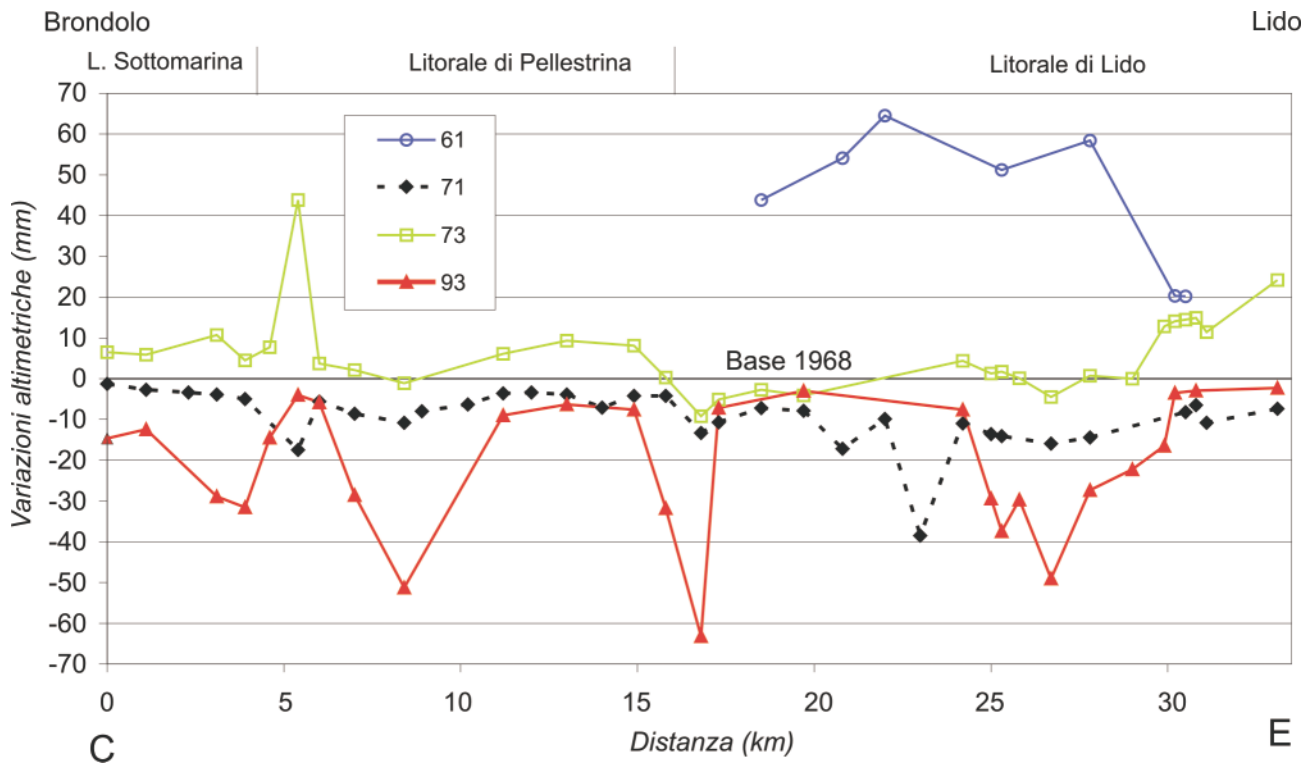


Figura 3.8 - Abbassamenti registrati lungo il settore litoraneo Chioggia-Sottomarina, Pellestrina e Lido (linea gialla C-E in Fig. 3.4; [77]).

di questa elaborazione [44] è riprodotto in tabella 3.2: i dati qui riportati si devono ritenere affetti da un errore grossomodo pari a ± 1 cm/anno, in considerazione delle stime delle quote altimetriche effettuate. Anche tenendo conto di questa fascia di incertezza dei valori ottenuti, la gravità della situazione altimetrica di queste zone, peraltro suffragata dalle immagini di campagna, appare in tutta la sua completezza.

3.5 ISTITUZIONE DELLA RETE DI MONITORAGGIO ALTIMETRICO ISES

Data l'estrema variabilità spazio-temporale che può avere la subsidenza, il monitoraggio altimetrico di dettaglio comporta il rilievo per linee di livellazione, sviluppate in modo da formare una fitta rete ad anel-

Tabella 3.2 – Subsidenza nei 4 sottobacini mostrati in Figura 3.4 stimata dalla carta tecnica regionale e dalle livellazioni dei Consorzi di Bonifica.

Zona	Livellazione (anno)	Subsidenza fino al 1983	
		($\eta \cong$ cm totali)	($\eta \cong$ cm/anno)
a	1935	91	1.9
b	1965	49	2.7
c	1929	140	2.6
d	1941	147	3.5

li per consentire maggior controllo e migliore compensazione delle quote.

Utilizzando strumentazione topografica classica non ci sono attualmente alternative alla livellazione geometrica di alta/altissima precisione che prevede una distanza massima tra livello e stadia di 50 m, mentre la maggiore distanza sfruttabile con una stazione totale o con un teodolite è un vantaggio solo teorico, in quanto presuppone la intervisibilità tra il punto di stazione ed il punto si misura, oltre a precisioni elevatissime, in pratica non ottenibili, nelle misure stru-



Figura 3.9 – Un ponte costruito negli anni 1920 mostra la protrusione della sua fondazione di circa 150 cm. Questa subsidenza fu indotta dalla compattazione per ossidazione dei suoli torbosi e da pompaggi di acque sotterranee. Sullo sfondo il nuovo ponte, che risale agli anni '90, evidenzia un abbassamento del suolo di circa 50 cm avvenuto negli ultimi trent'anni [77].

mentali e nei posizionamenti.

L'unica valida alternativa è costituita oggi dall'impiego della strumentazione GPS (Global Positioning System), che si basa sulla ricezione simultanea di dati da più satelliti per determinare la posizione relativa, ossia la differenza delle coordinate, tra punti situati anche a parecchi chilometri di distanza tra di loro prescindendo da percorsi di qualsiasi genere e dalla intervisibilità.

La rete di monitoraggio altimetrico *ISES* è stata istituita per l'utilizzo sia delle livellazioni geometriche che delle misure GPS, eseguibili sia congiuntamente che separatamente.

Il Progetto ha studiato la geometria di una fitta rete a copertura di tutto il territorio compreso tra la laguna di Venezia e il F. Adige (rete *ISES* Sud) con lo scopo di colmare la lacuna esistente in quanto, come summenzionato, le preesistenti linee di livellazione si sviluppano ai margini di quest'area. La rete *ISES* Sud si estende all'interno dell'area compresa tra (in senso antiorario) Lova-Piove di Sacco-Pontelongo-Carrara S. Giorgio, Montegrotto, Abano, Monteortone, Torreggia, Galzignano, M. Venda, Battaglia, Monselice, Baone, Conselve, Anguillara Veneta, Cavarzere, Cavanella d'Adige, Foce Adige, Foce Brenta, Chioggia, Sottomarina, Pellestrina, Lido, Valli di Chioggia, Conche, Codevigo, Lova.

La rete è stata sviluppata secondo una geometria ad anelle di lunghezza variabile a seconda delle situazioni locali, con frequenza media di circa un caposaldo a chilometro e caposaldo al centro, maggiormente fitta nell'area prossima alla laguna e al litorale e collegata ai Colli Euganei dove i capisaldi su roccia sono



Figura 3.10 – Bacino Zennare: condotta di collegamento sotterranea a mattoni costruita negli anni '930, attualmente sopra il livello dell'acqua e sostituita inferiormente da due tubi di scolo in cemento, il più elevato dei quali già inutilizzabile. Rappresentazione della sezione della vecchia condotta secondo quella che doveva essere la sua ubicazione originale [49].



Figura 3.11 – Bacino Zennare: una vecchia chiusa abbandonata, costruita negli anni '930 per controllare un canale di scolo, è oggi completamente protrusa sopra il piano campagna. Rappresentazione della sezione della vecchia fognatura secondo quella che doveva essere la sua ubicazione originale [49].

ritenuti stabili. I capisaldi nodali, centro maglia ed altri ubicati in posizione significativa per i collegamenti, sono stati istituiti anche per misure GPS.

I capisaldi delle preesistenti linee geodetiche IGMI e CNR, Regione Veneto e Consorzio di Bonifica Adige-Bacchiglione sono stati collegati alla nuova rete che ha uno sviluppo di 522 chilometri e di 30 anelle (Tab. 3.3). Grazie a un finanziamento supplementare del Magistrato alle Acque sono state inoltre eseguite la livellazione e le misure GPS delle linee circumlagunari che si sviluppano fino ai capisaldi di Treviso e Rua di Feletto, nonché la livellazione della linea Mestre-Padova-Battaglia Terme (Tavola 12). E' stato così possibile effettuare alcuni utili confronti con i rilievi geodetici precedenti e aumentare le conoscenze sull'attuale situazione altimetrica regionale.

L'intera rete quotata si sviluppa dunque in due zone: la zona sud, relativa all'area di studio del progetto, dove, come detto, la fitta rete di livellazione è quasi completamente di nuova istituzione, e la zona nord che è riferita alle esistenti linee di livellazione del settore circumlagunare settentrionale. La zona sud e la zona nord sono state rilevate senza interruzione temporale e impiegando le medesime strumentazioni, modalità operative e di elaborazione dei dati. Rispetto al progetto originale, al termine delle operazioni la rete risulta composta nella sua interezza da 53 linee, che formano 34 poligoni chiusi autocontrollati e 6 linee di livellazione a sbalzo per complessivi 775 chilometri di estensione. In totale sono stati livellati 870 capisaldi, e su 119 di questi sono state effettuate contemporaneamente anche misure GPS (Tab. 3.3). D'ora in avanti sarà questa la rete *ISES*, che costituisce il riferimento altimetrico ufficiale per le livellazioni del comprensorio basso Veneziano-Padovano.

Tabella 3.3 - Sviluppo della rete di monitoraggio altimetrico ISES

Caratteristiche rete	Zona Sud	Zona Nord	Totale
Sviluppo della rete di monitoraggio (km)	522	253	775
totale capisaldi e centrini GPS	568	302	870
numero centrini GPS	93	28	119
Numero linee di livellazione	42	11	53
Numero poligoni chiusi (anelle)	30	4	34

Va ricordato che la geometria della rete *ISES* è stata studiata per consentire in futuro misurazioni altimetriche che, grazie alla rete GPS, potranno essere molto precise anche in aree limitate senza dovere eseguire la livellazione nella sua globalità. Ciò permetterà ai vari Enti coinvolti nel Progetto *ISES* una indipendenza operativa nella gestione e nel controllo della propria area di competenza.

3.5.1 Livellazione geometrica

Le modalità di esecuzione della livellazione sono state definite tenendo presente quelle adottate in precedenza. Vale a dire sono state fissate le stesse tolleranze delle livellazioni CNR⁽⁷⁾ per poter eseguire omogenei e attendibili confronti temporali.

La livellazione della rete *ISES* è stata eseguita adottando due tipi di precisione:

- altissima precisione, che corrisponde a tolleranze di $1,5\text{mm}\sqrt{D}$ (con D distanza tra due capisaldi espressa in chilometri) per le linee 35A e 35B (Rua di Feletto-Venezia);
- alta precisione, adottando $2,5\text{mm}\sqrt{D}$ per le restanti linee.

Le tolleranze fissate sono state sempre rispettate; si è rimasti cioè al di sotto delle stesse e l'indice di errore sistematico è rientrato in quei valori convalidando l'indicazione della bontà della misura.

La rete *ISES* ha come punti di riferimento tre settori storicamente ritenuti stabili: i Colli Euganei, Treviso e le Colline Trevigiane. Le quote della rete sono state pertanto omogeneizzate e riferite a tre capisaldi ubicati in questi settori che sono rispettivamente:

- a) il caposaldo 23Bis in località Montegrotto Terme con quota 13.2527 m s.l.m.,
- b) il caposaldo PNOD_63 (ex 24') di Treviso con quota di 13.1970 m s.l.m.,
- c) il caposaldo P35_2A posto a Rua di Feletto con quota di 214.3439 m s.l.m.

La ricerca di ottimali punti di riferimento stabili ha giustificato inoltre l'istituzione di una nuova linea di livellazione, che sviluppandosi sulle pendici dei Colli Euganei, arriva fino alla sommità del Monte Venda il

cui caposaldo (50_351) è stato quotato 481.4938 m s.l.m. partendo da Montegrotto Terme (481.4540 m s.l.m. rispetto a Treviso).

Le quote riferite al caposaldo di Montegrotto Terme sono state ottenute preliminarmente dalla compensazione delle linee della sola zona sud (prima fase di rilevamento) ed infine ricompensando le linee che, in comune con la zona nord, sono state chiuse ad anello nella seconda fase del rilevamento.

Le quote riferite al caposaldo di Rua di Feletto sono state ottenute dalla compensazione totale della rete *ISES* (zona sud e zona nord).

Infine, le quote riferite al caposaldo di Treviso differiscono da quelle riferite a quello di Rua di Feletto di una costante di 0,0075 m.

Le monografie dei capisaldi appartenenti alle linee *ISES* sud (Tavola 12, linee azzurre) riportano tre quote riferite rispettivamente ai punti di partenza a), b), c) e quelle relative alle linee *ISES* nord (Tavola 12, linee rosse) ai punti b) e c).

L'omogeneizzazione delle quote dei capisaldi appartenenti alle linee di nuova istituzione della rete *ISES* con quelle dei capisaldi delle linee già esistenti è stato uno degli obiettivi primari del progetto quale operazione indispensabile per fornire agli utenti una nuova rete univoca per il controllo altimetrico, per consentire l'utilizzo dei dati forniti dalle precedenti livellazioni regionali o locali effettuate da diversi Enti, e per poter effettuare in futuro il monitoraggio della sola zona meridionale o di quella settentrionale limitando di fatto di parecchi chilometri il collegamento con i punti stabili di riferimento.

3.5.2 Misure GPS

Data la vastità del territorio di studio e la distanza anche considerevole tra la fascia costiera ed i settori stabili dei Colli Euganei e del trevigiano, parallelamente alla rete

⁽⁷⁾ Ricordando che, in funzione della delicatezza del territorio veneziano, le precisioni adottate nelle livellazioni CNR sono le migliori ora attuabili, questa decisione rappresenta un aspetto positivo.

di livellazione è stata istituita una rete GPS formata da 119 capisaldi, ubicati in punti strategici quali i nodali e centri maglia della rete di livellazione (Tavola 12).

In tal modo si potrà collegare rapidamente la zona costiera con le aree stabili e rendere meno onerosi i futuri controlli altimetrici svincolandosi dalla necessità di seguire i lunghi percorsi obbligati delle linee di livellazione.

Per il rilievo GPS in modalità differenziale il caposaldo di riferimento è stato scelto tra quelli appartenenti alla rete nazionale IGMI95 ubicati internamente alla zona oggetto dell'indagine: Arzergrande, Cavarzere e Porto di Chioggia. Data la perifericità del caposaldo di Chioggia e la differenza di più di 12 cm riscontrata nell'ambito delle livellazioni *ISES* sulla quota ortometrica del caposaldo di Cavarzere rispetto al valore IGMI95, si è deciso di riferire l'intera rete GPS effettuata nell'ambito del progetto al caposaldo IGMI95 di Arzergrande.

Le coordinate della rete dei capisaldi GPS sono state quindi misurate nel sistema WGS84 elaborando le *baseline* rilevate in modalità statica differenziale. Il rilievo è stato condotto mirando a ottimizzare la copertura della rete *ISES* con *baseline* incrociate e ridondanti e assegnando a taluni capisaldi, sia nodali che "centri maglia", una maggiore valenza strategica effettuandovi sessioni di registrazione molto lunghe e ripetute fino a raggiungere durate complessive di 10-12 ore.

Si sono in pratica istituite numerose sottoreti locali, per le quali tutte le *baseline* hanno lunghezza confrontabile, con questi capisaldi particolarmente affidabili in posizione centrale, mentre gli altri appartengono ad almeno due sottoreti contigue. *Baseline* di maggiore lunghezza collegano infine tra di loro i capisaldi centrali.

Dalla compensazione ai minimi quadrati della rete sono state calcolate le quote ellissoidiche WGS84 dei capisaldi di riferimento della rete di livellazione geometrica che saranno considerate invarianti nelle future campagne di monitoraggio mentre, per contro, il vertice IGMI95 di Cavarzere sarà suscettibile di variazione altimetrica.

Si è inoltre ritenuto opportuno collegare alla rete GPS *ISES* la stazione GPS permanente di Venezia (Agenzia Spaziale Italiana) e quella di Padova (Università).

Per l'esecuzione del rilievo GPS sono stati impiegati

quattro ricevitori geodetici, due a singola frequenza e due a doppia frequenza, registranti simultaneamente con cadenza di 15 secondi. I due ricevitori in singola frequenza sono stati impiegati nelle *baseline* di lunghezza inferiore ai 10 chilometri, per le quali la correzione per la propagazione nella ionosfera è trascurabile. I ricevitori a doppia frequenza (L1+L2) sono stati ubicati in modo da coprire le *baseline* di maggiore lunghezza, potendo in ogni caso utilizzare in fase di elaborazione i dati su entrambe le frequenze. Nella fase di elaborazione si è adottato quale criterio di qualità il valore di GDOP⁽⁸⁾ possibilmente inferiore a 4 e comunque mai superiore a 8, eliminando eventuali periodi di registrazione di qualità non soddisfacente, escludendo eventuali satelliti soggetti a disturbi e salti di ciclo, o con poche epoche utili di registrazione rispetto ad altri, e in ogni caso aventi altezza sull'orizzonte superiore o uguale a 15 gradi.

I dati che si ottengono con le misure GPS sono riferiti all'ellissoide WGS84. E' necessario definire i 7 parametri (3 di traslazione, 3 di rotazione e 1 di scala) di trasformazione da WGS84 a ROMA 40 (Tab. 3.4) essendo questo l'ellissoide di riferimento per l'Italia. I 7 parametri sono stati determinati a partire dai 9 capisaldi GPS IGMI95⁽⁹⁾ relazionati all'area *ISES*, per i quali le monografie ufficiali IGMI riportano le coordinate geografiche espresse nei due sistemi di riferimento (WGS84 e ROMA 40). I parametri applicati alle coordinate cartesiane WGS84 (X_w, Y_w, Z_w) di un punto interno alla zona compresa tra i capisaldi IGMI95 forniscono le coordinate cartesiane (X_r, Y_r, Z_r) nel sistema ROMA 40 dalle quali si passa quindi alle coordinate geografiche e a quelle planimetriche Gauss-Boaga.

Questi parametri hanno permesso di calcolare le coordinate planimetriche Gauss-Boaga X e Y di tutti capisaldi GPS della rete *ISES*.

Tabella 3.4 - I 7 parametri di rototraslazione determinati per l'area *ISES*.

Traslazione:	
tx	112.9818 [m]
ty	24.8298 [m]
tz	-12.2432 [m]
Rotazione:	
rx	-0.1028167 [“]
ry	-2.4597259 [“]
rz	-1.3746033 [“]
Fattore di scala	
	1.0000208087 (20.8087 ppm)

(8) Indice della precisione geometrica della misura che risulta correlata alla posizione dei satelliti.

(9) I capisaldi IGMI95 sono: Venezia, Arzergrande, Cavarzere, Chioggia, Dolo, Meolo, Fossalza di Piave, Caorle e Roncate.

3.5.3 Gestione della Rete altimetrica

Come sopra descritto, la rete di monitoraggio altimetrico *ISES* è stata studiata per permettere ai singoli Enti di controllare l'altimetria anche di aree più limitate e di particolare interesse, senza alcuna perdita di precisione e con costi ridotti. Questo anche perché le quote della rete *ISES*, opportunamente omogeneizzata, sono riferite a tre capisaldi stabili la cui scelta come punto di partenza delle misure può essere decisa di volta in volta in funzione della maggiore vicinanza di uno di essi all'area da rilevare. Inoltre, la "indipendenza" dei capisaldi geodetici di livellazione con quelli GPS può suggerire controlli altimetrici solo con le misure satellitari ove siano richiesti ridotti tempi di rilevamento.

L'entità della subsidenza, risultata dalle misure effettuate, e talvolta resa più *tangibile* dalle conseguenze osservate sul territorio (vedi Figg. 3.9, 3.10, 3.11), la precarietà ambientale e le attività produttive in atto, dovrebbero essere i principali parametri per determinare la periodicità delle misure.

L'esperienza acquisita, congiuntamente alle indicazioni derivanti dalla casistica mondiale, suggerirebbero la frequenza annuale come l'optimum per le aree più a rischio e altimetricamente più deficitarie, quali quelle del bacino scolante meridionale della laguna dove il processo di subsidenza può essere catalizzatore di altre problematiche, ma una cadenza biennale può altresì essere di sicurezza in una accorta gestione territoriale.

In presenza di tassi di abbassamento di 1-2 mm/anno si possono programmare controlli altimetrici ogni 3-5 anni, purché nuovi fattori indotti (aumentati sfruttamenti di fluidi dal sottosuolo, sovraccarichi esterni, ecc.) non intervengano a modificare la tendenza in atto. Le Autorità competenti devono quindi porre grande attenzione nelle nuove concessioni per l'apertura di pozzi d'acqua per non innescare processi di modifica del carico idraulico degli acquiferi che a loro volta inducono subsidenza, come dopo il 1992 è avvenuto al Cavallino. Là dove l'attività estrattiva è già in atto si impongono una rigorosa regolamentazione, controlli e valutazioni secondo i più idonei criteri di sfruttamento (anche facendo ricorso alle simulazioni numeriche) affinché i volumi estratti non superino i limiti di "accettabilità" del sistema, in ragione della tendenza evolutiva della subsidenza.

Un attento controllo altimetrico è indispensabile nelle aree adibite all'agricoltura, alcune di esse già a quote inferiori al l.m.m., e in particolare ove le acque saline risultano più superficiali. La zona areata compresa tra la superficie del suolo e il pelo della falda

libera diminuisce all'aumentare della subsidenza causando, nelle aree agricole, una riduzione del franco di coltivazione; questo fatto, in relazione all'entità del fenomeno, può, nel migliore dei casi, costringere a diversificare i tipi di coltura.

Al monitoraggio si deve aggiungere la manutenzione ordinaria della rete, attuabile con un sopralluogo annuale, e la sostituzione di capisaldi manomessi o divelti. A questo proposito, qualora fosse rilevata la mancanza di uno (o più) dei capisaldi di appartenenza, ne è consigliabile il ripristino con quotatura provvisoria con un rilievo GPS utilizzando il modello di ondulazione del geoide. In occasione del successivo monitoraggio della rete, il nuovo caposaldo sarà quotato e ricollegato alle linee di livellazione in modo definitivo.

3.6 MODELLO LOCALE DELL'ONDULAZIONE DEL GEOIDE

L'esecuzione contemporanea di livellazione geometrica e rilievo GPS rende possibile la determinazione di un modello per il passaggio dalla quota ellissoidica alla quota geoidica, operazione da eseguirsi una sola volta dal momento che il geoide è invariante nei tempi considerati. Questo modello risulta particolarmente utile per la quotatura provvisoria di capisaldi di nuova istituzione o dismessi.

Il modello della ondulazione del geoide per la rete *ISES* è stato determinato separatamente per l'area sud e l'area nord, poiché la diversa distribuzione e densità dei capisaldi influisce sui valori dei residui tra le quote interpolate e quelle geoidiche effettivamente rilevate. Mantenendo separate le due aree, per quanto sopra, si ottiene una migliore rappresentazione del modello potendo utilizzare per entrambe una equazione quadratica.

Il modello della ondulazione del geoide riferito all'area sud è stato determinato solamente nella zona *ISES* centrale, per la quale la distribuzione dei capisaldi quotati sia rispetto all'ellissoide WGS84 che alla rete altimetrica è omogenea, mentre si sono esclusi i Colli Euganei e la linea Pontelongo-Battaglia Terme, poiché la disposizione dei capisaldi è prevalentemente lungo allineamenti. Per le coordinate planimetriche Gauss-Boaga, ottenute applicando i parametri di trasformazione a partire dalle coordinate geografiche WGS84, e per la quota ellissoidica il punto di riferimento è costituito dal vertice IGMI95 di Arzergrande, mentre per le quote geoidiche è il caposaldo di Montegrotto 23 bis.

Il modello riferito all'area nord è stato limitato al settore lagunare ed è da considerarsi affidabile soprattutto per il perimetro circumlagunare dal momento che non vi sono punti interni alla laguna, ad eccezio-

ne di quelli di Venezia. Come per l'area sud, le coordinate planimetriche Gauss-Boaga sono state ottenute applicando i parametri di trasformazione e per la quota ellissoidica il punto di riferimento è sempre il vertice IGMI95 di Arzergrande, mentre per le quote geoidiche derivanti dalla livellazione geometrica il punto invariante è il vertice P35_2A situato a Rua di Feletto.

Il modello è stato determinato scegliendo come interpolatore una funzione quadratica delle coordinate Gauss-Boaga di un generico punto interno all'area:

$f(x,y) = N = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x \cdot y + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot y^2$
con:

Area sud	Area nord
a0 = 39.9315	a0 = 42.9168
a1 = -0.0305302	a1 = -0.0222686
a2 = 0.101398	a2 = 0.0150244
a3 = -0.00029785	a3 = -0.000250233
a4 = 0.000403801	a4 = 0.000280803
a5 = -0.000450030	a5 = 0.00012735

Nella espressione precedente N indica la ondulazione, x e y sono le coordinate Gauss-Boaga del punto riferite al fuso Est, opportunamente espresse in chilometri e diminuite rispettivamente delle costanti 2250 chilometri e 4950 chilometri per consentire maggiore precisione nel calcolo dei parametri, che sono stati determinati con il metodo dei minimi quadrati.

In figura 3.12 sono rappresentati gli andamenti del modello della ondulazione del geoide.

3.7 CONFRONTI ALTIMETRICI

La valutazione dell'attuale situazione altimetrica dell'intero comprensorio lagunare è stata fatta attraverso il confronto delle quote misurate con la livellazione ISES 2000 e quelle delle livellazioni CNR 1973 e 1993, previa l'omogeneizzazione delle quote rispetto allo stesso caposaldo di partenza e l'accurata analisi e selezione dei capisaldi aventi quote confrontabili, escludendo quelli di nuova istituzione, divelti o con altro riferimento. Altri confronti, riferibili a livellazioni IGMI, sono stati operati ove possibile.

Le livellazioni CNR 1973 e 1993 sono estremamente significative per lo studio delle variazioni altimetriche del comprensorio veneziano, in quanto oltre a coprire l'intero settore circumlagunare, i litorali ed il centro storico, si riferiscono ad un periodo in cui la subsidenza è stata per la maggior parte attribuibile a cause naturali ed i tassi misurati possono essere con-

siderati di riferimento per la componente geologica. Entrambe le livellazioni traggono origine dallo stesso caposaldo - nodale 63 (ex 24') con quota 13,1970 m - ubicato a Treviso; in più la livellazione 1993 è stata spinta fino a Rua di Feletto per verificare la variazione di quota relativa di queste due località. Poiché la quota del caposaldo di Treviso si riferisce alla livellazione IGMI 1952 si potrebbero oggi avere dei dubbi sulla sua invarianza e ritenerla obsoleta. In realtà in considerazione delle caratteristiche geotettoniche dell'area trevigiana si ritiene sia meno sensibile ai possibili movimenti tettonici rispetto all'area di Rua di Feletto ove, per effetto di un movimento di basculamento grossomodo centrato a Spresiano, il settore prealpino-alpino ha la tendenza al sollevamento rispetto a quello padano adriatico⁽¹⁰⁾.

Complessivamente si ritiene che il collegamento con Treviso sia una buona procedura per il monitoraggio altimetrico dell'area circumlagunare e che lo sbraccio verso Rua di Feletto sia importantissimo per l'acquisizione di informazioni sui movimenti tettonici relativi profondi. E' da ricordare inoltre che, nell'ambito della campagna 2000, la livellazione da Treviso a Rua di Feletto (primo tratto Fig. 3.13) è servita anche alla determinazione delle quote geoidiche dei capisaldi della rete GPS, cui ci si potrà basare in futuro per un migliore monitoraggio dei movimenti relativi di questo settore.

Un'analisi comparativa dei tassi di subsidenza spaziotemporali attuali (1993-2000) e precedenti (1973-1993) è sintetizzata in figura 3.14. Si ricorda che queste mappe della subsidenza sono state ottenute tramite interpolazione con il metodo di Kriging e che i movimenti rappresentati nelle zone al di fuori delle linee di livellazione e dei capisaldi sono stimati dall'interpolazione [10].

Dalla mappa delle variazioni altimetriche 1973-1993 appare evidente la presenza di un'area stabile con tassi di subsidenza inferiori a 0,5 mm/anno, comprendente le zone di terraferma da Treviso a Mestre, quelle di gronda nonché il centro storico e un'area più propriamente lagunare-litorale (circumlagunare nord e circumlagunare sud) dove l'abbassamento del suolo non è trascurabile. In generale procedendo sia da Mestre a Jesolo che da Mestre a Brondolo i valori di subsidenza aumentano gradualmente.

L'abbassamento riscontrato nei tratti estremi delle linee circumlagunari ha interessato anche l'intero tratto costiero (da Brondolo-Chioggia ai litorali di Cavallino e Jesolo) con valori grossomodo comparabi-

⁽¹⁰⁾ Studi di maggior dettaglio sono in corso per valutare l'entità del fenomeno.

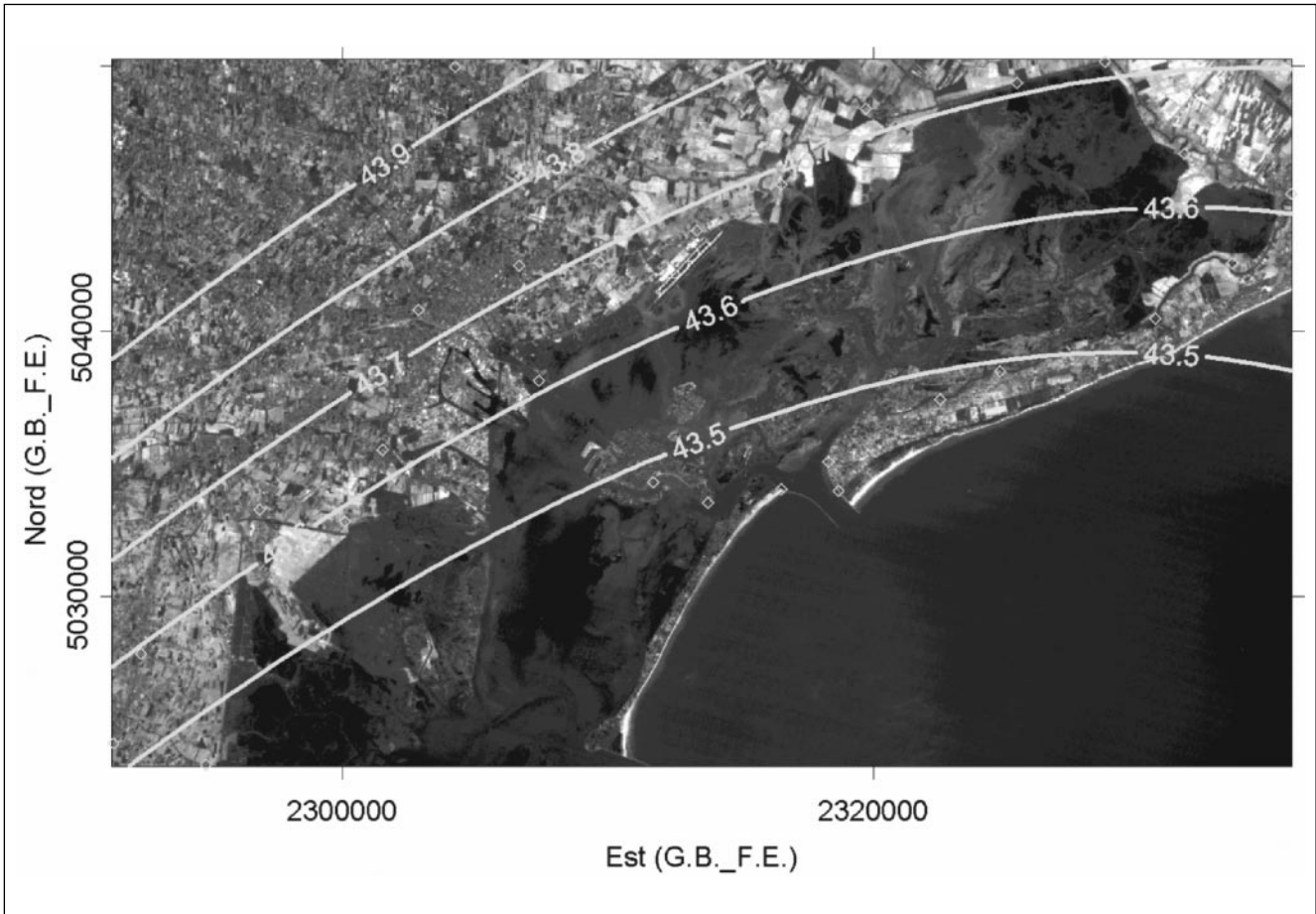
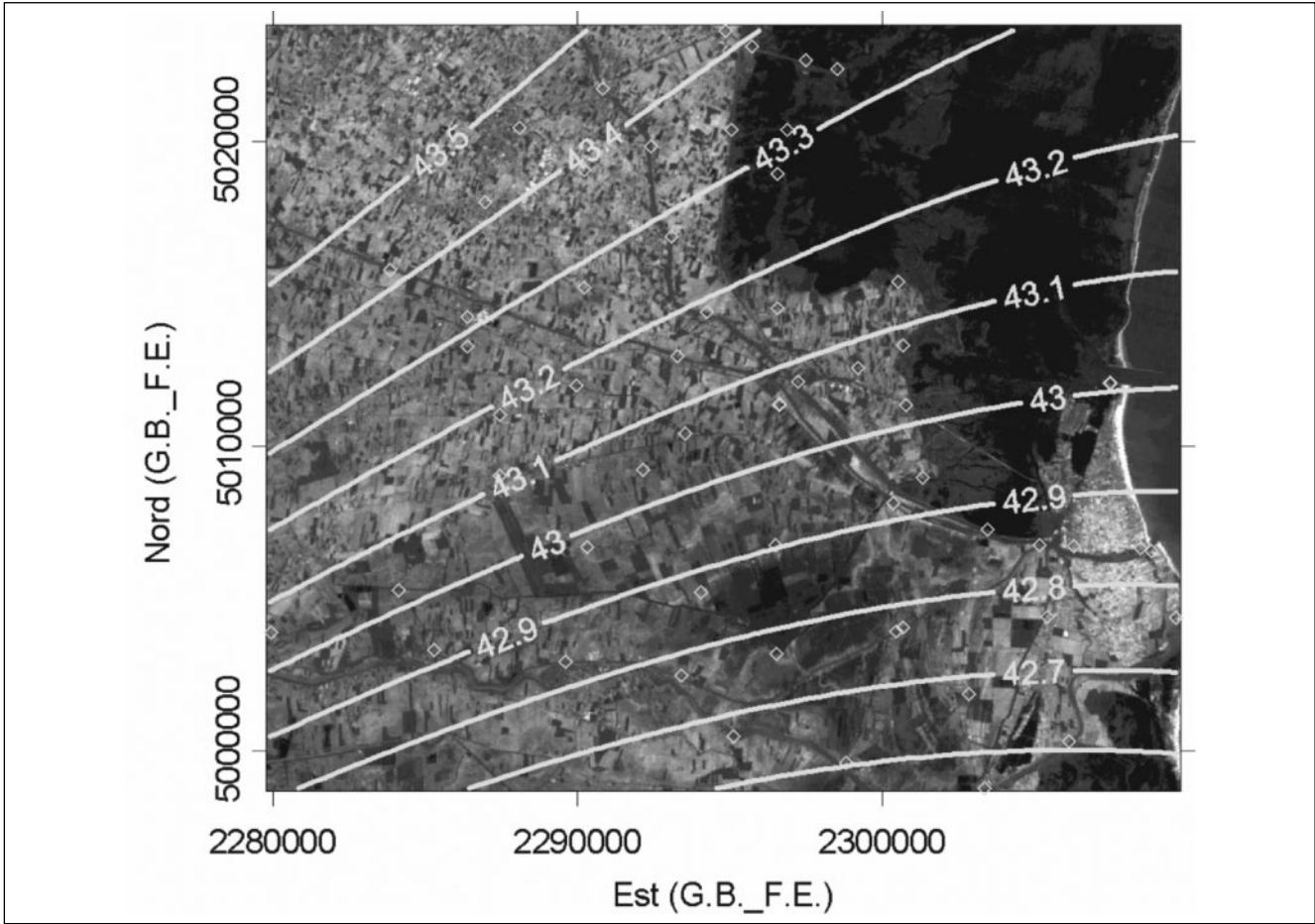


Figura 3.12 - Ondulazione del geoido: a) per l'area meridionale; b) per l'area settentrionale.

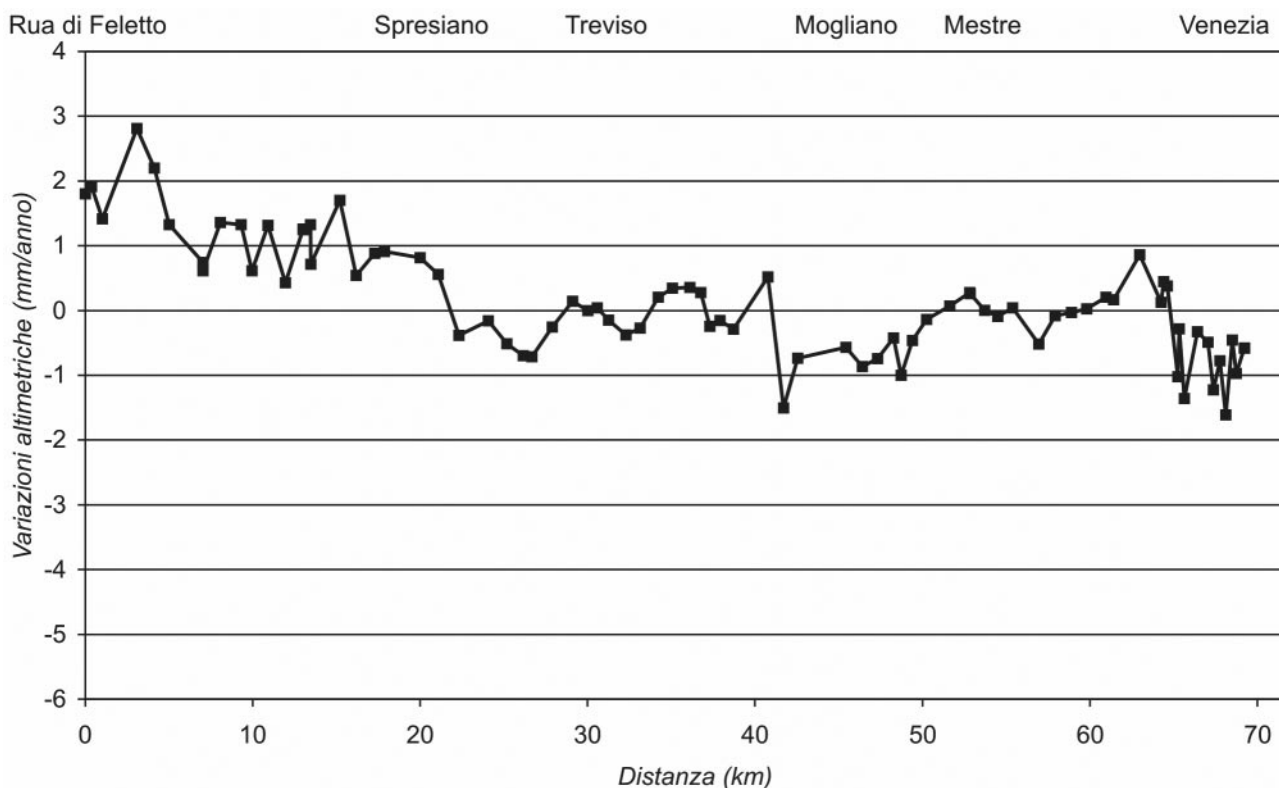


Figura 3.13 - Confronti altimetrici 1993-2000 lungo le linee Rua di Feletto-Venezia.

li. Il litorale veneziano ha subito nel ventennio '973-'993 un abbassamento medio del tutto simile e dell'ordine di circa 1,5 mm/anno, mentre tale valore aumentava a 2,2 mm/anno nel tratto Cavallino-Jesolo dove sono stati misurati i maggiori abbassamenti litoranei. Lo studio dei movimenti 1973-1993 aveva evidenziato una relazione tra i settori stabili e subsidenti rispettivamente con le aree ove i sedimenti superficiali erano prevalentemente di deposizione continentale (tardo pleistocenica) e quindi ben consolidati, e le aree ove la deposizione era di tipo lagunare [14; 76]. Infatti la separazione tra l'area subsidente e quella stabile corrisponde abbastanza bene con il limite della posizione della linea di costa durante la massima fase trasgressiva flandriana [57]. Solo localmente ai picchi di subsidenza era stata attribuita una causa indotta: bonifiche idrauliche, attività agricola e localizzati sfruttamenti artesiani.

In generale l'andamento della subsidenza 1993-2000 del comprensorio veneziano, come appare in figura 3.14, è abbastanza simile a quello evidenziato per il ventennio precedente: un'area centrale stabile e un'area con subsidenza crescente verso le estremità nord e sud del margine lagunare, ma l'analisi di dettaglio di alcune linee permette di rilevare delle ragguardevoli variazioni nell'andamento della subsidenza. In particolare lungo il tragitto circumlagunare (Fig. 3.15), nel tratto settentrionale permangono tassi di subsidenza

pari a 1,5 mm/anno a Portegrandi che aumentano fino ad oltre 5 mm/anno a Jesolo; nel tratto meridionale, in corrispondenza dell'area di "Valli", prossima a Brondolo, l'abbassamento è più localizzato rispetto al settore settentrionale, ma il tasso di circa 5 mm/anno ne rivela la criticità trovandosi in corrispondenza ad una zona ad alto rischio idrogeologico. Studi di approfondimento *causa-effetto* sono in corso.

Relativamente alle misure riferite ai cordoni litoranei (Fig. 3.16) si nota che:

A *Pellestrina*, settore già in stato di precarietà altimetrica intrinseca nella sua struttura, l'analisi 1973-1993 indicava una non trascurabile perdita di quota. Erano stati misurati 5 cm di subsidenza in corrispondenza di Ca' Roman, dove il litorale era costituito dai soli murazzi. Di analoga entità erano anche gli abbassamenti (massimo relativo e massimo assoluto) dei capisaldi infissi sui moli foranei della Bocca di Chioggia (4.78 cm) e di Malamocco (5.39 cm), imputabili comunque a locali cedimenti delle strutture. L'analisi 1993-2000 indica viceversa una buona stabilizzazione di questo settore, quasi certamente avvenuta a seguito dei lavori di consolidazione, ripristino e ristrutturazione dei moli foranei, e più in generale, degli interventi bonifica dell'intero tratto litorale, eseguiti a salvaguardia nell'ambito della Legge Speciale [34].

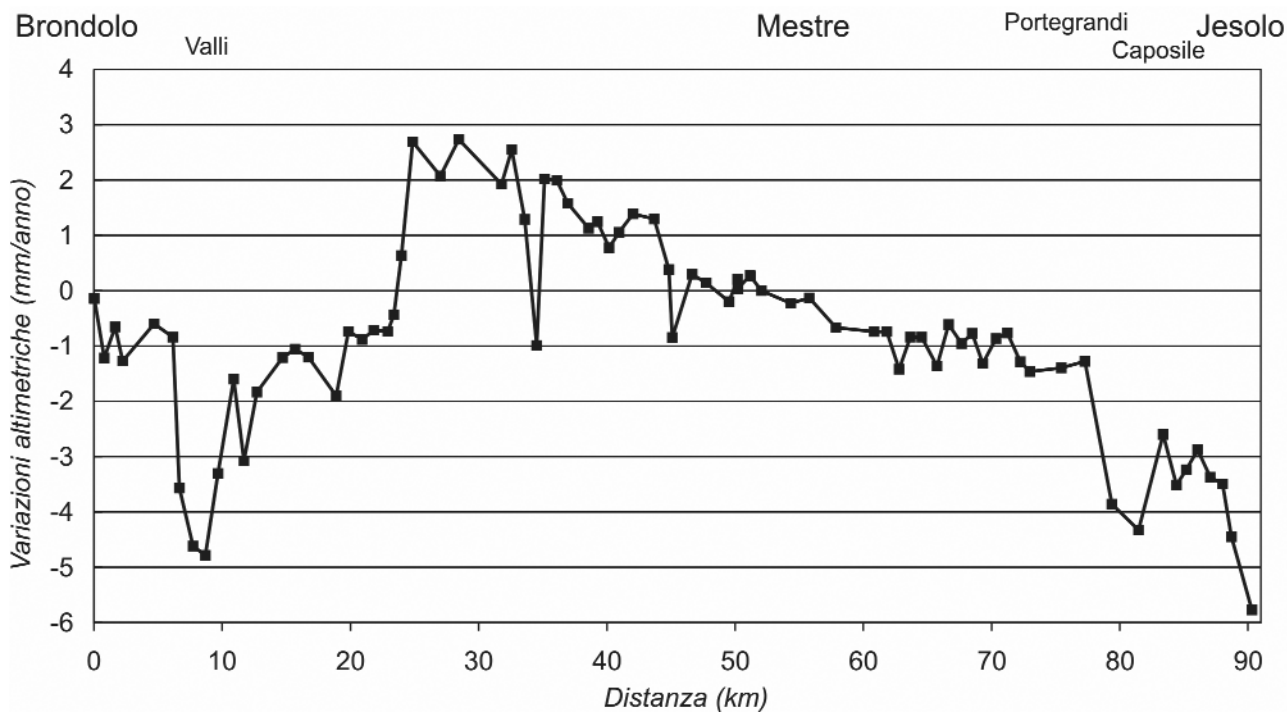


Figura 3.15 - Confronti altimetrici 1993-2000 lungo le linee di livellazione circumlagunari settentrionale (Mestre - Jesolo) e meridionale (Mestre - Brondolo).

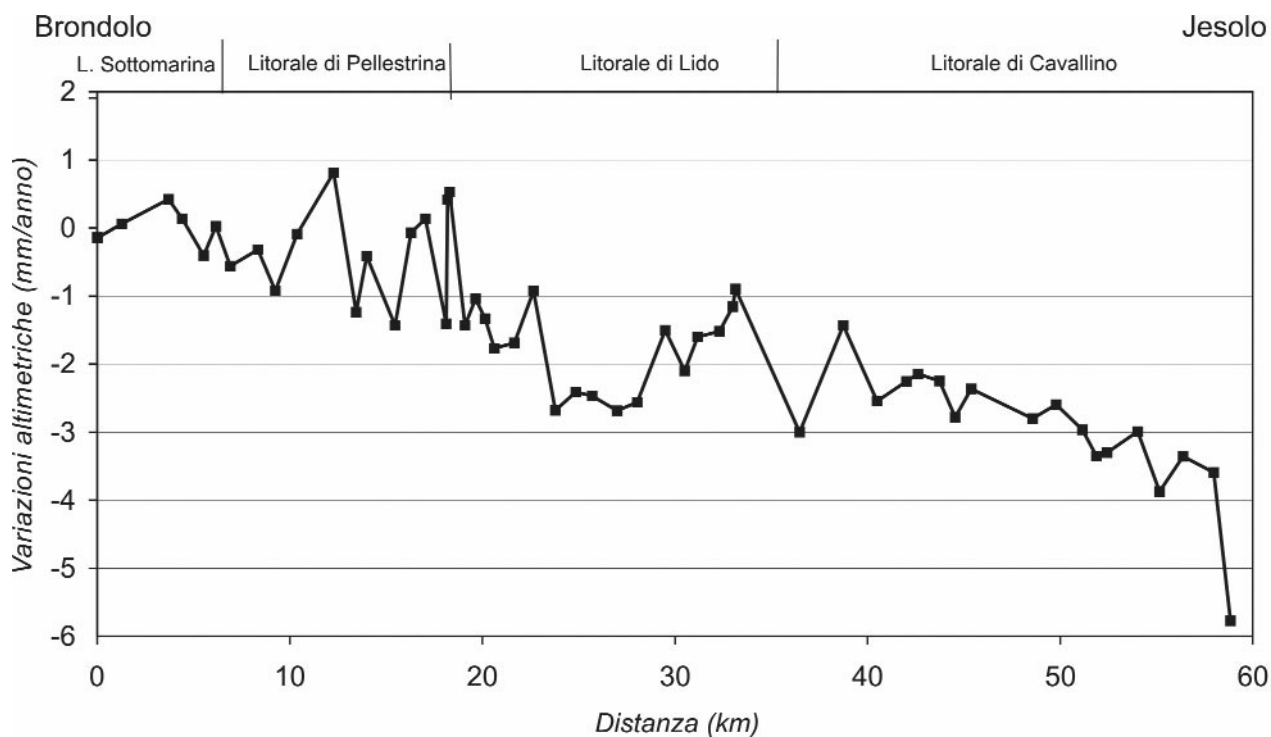


Figura 3.16 - Confronti altimetrici 1993-2000 lungo le linee di livellazione litoranee da Brondolo a Jesolo.

mm/anno

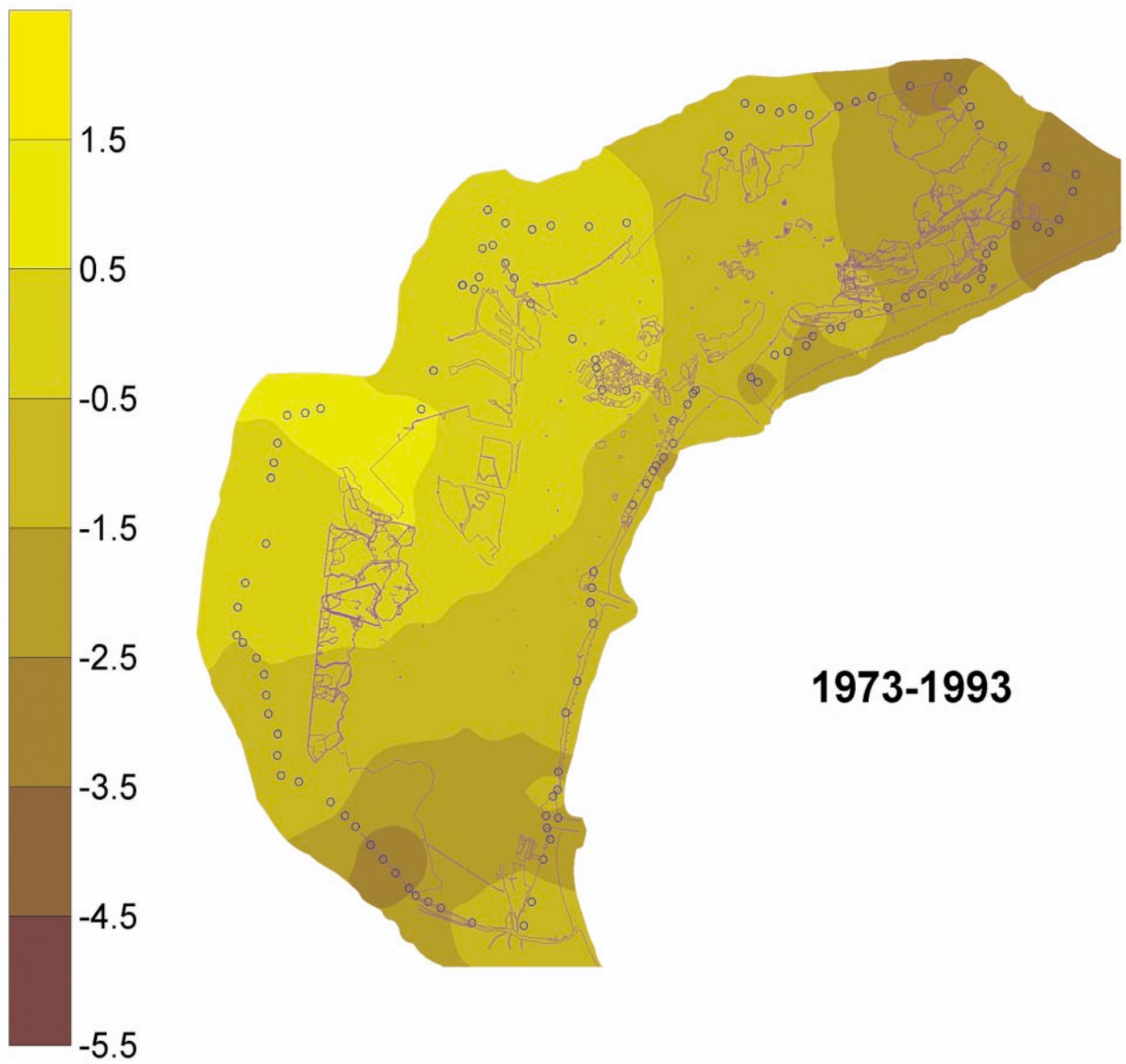
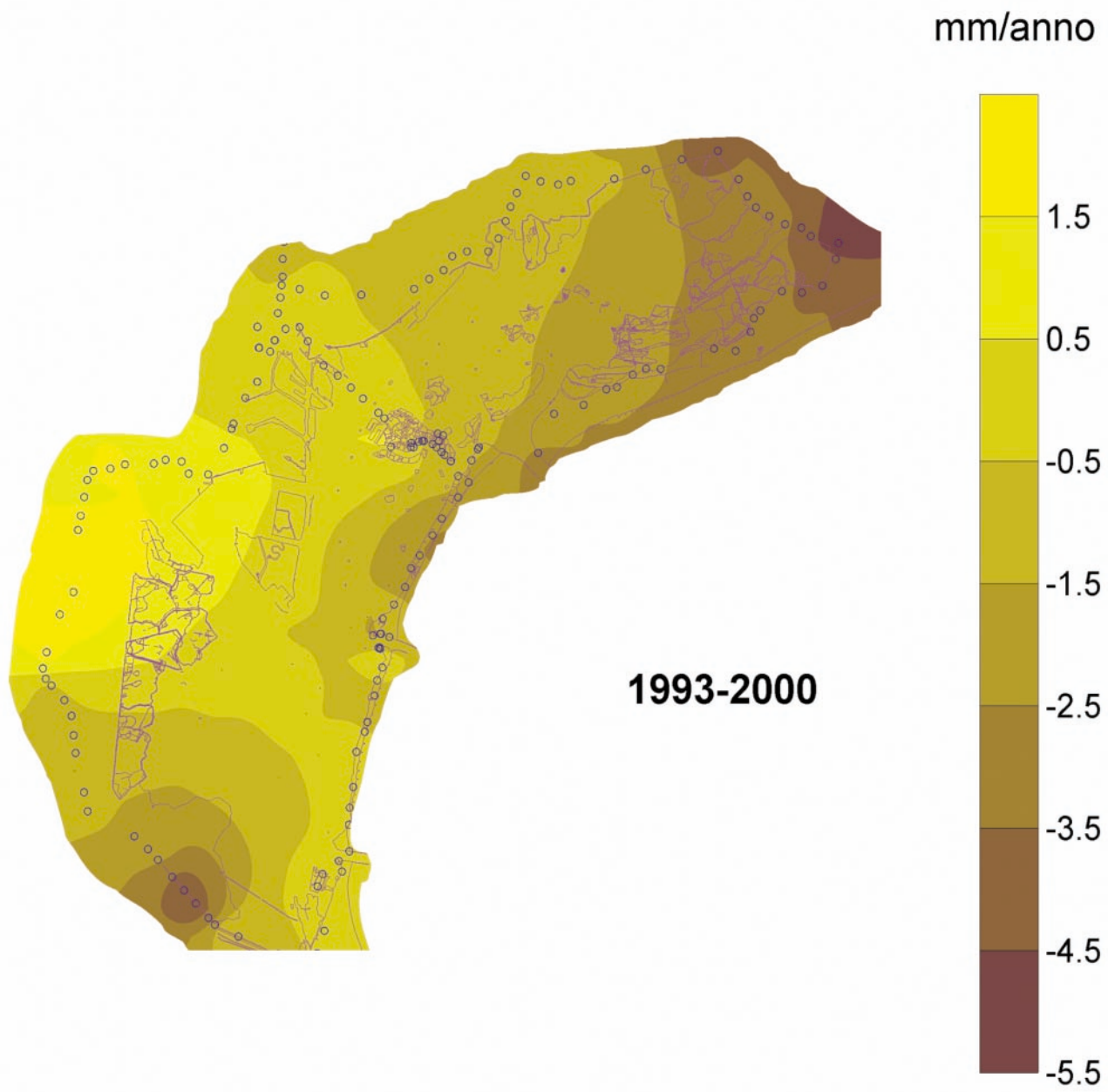


Figura 3.14 – Analisi comparativa dei tassi di subsidenza nel comprensorio lagunare: a) 1973-1993 [32] e b) 1993-2000 [36].



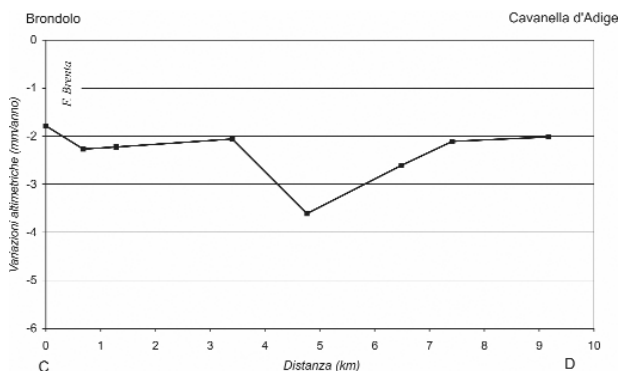


Figura 3.17 - Profilo altimetrico 1988 (livellazione IGMI) - 2000 lungo la linea di livellazione Brondolo - Cavanella d'Adige.

Lungo il *litorale di Lido* attualmente si può osservare un lieve incremento dei tassi di subsidenza non preoccupante ma sicuramente da tenere sotto osservazione. Il settore settentrionale invece, a partire dal *Cavallino*, presenta sempre elevati tassi di subsidenza, e per lo più in aumento rispetto a quelli del periodo precedente, con massimi verso Jesolo. Nel periodo 1993-2000 infatti si passa progressivamente da 2 mm/anno nella zona di Cavallino ad oltre 4 mm/anno in quella di Jesolo. Questo incremento sembra correlato alle diminuzioni della quota piezometrica degli acquiferi, verosimilmente legate alle aumentate estrazioni artesiane in atto.

Nell'area litoranea Chioggia-Sottomarina viceversa permane una situazione altimetrica rassicurante; peraltro anche i processi costieri forniscono un bilancio positivo per l'ampia spiaggia qui presente. Va comunque osservato che la linea di livellazione di riferimento percorre il tratto più lagunare che costiero in senso stretto⁽¹⁾.

La livellazione ISES 2000 ha altresì permesso di valutare i movimenti del suolo attuali nella parte più meridionale della provincia di Venezia e fino all'area termale della provincia di Padova.

In particolare il profilo altimetrico Brondolo - Cavanella d'Adige (Fig. 3.17) confronta la situazione per il periodo 1988 - 2000 evidenziando con il ridimensionamento dei tassi di subsidenza, variabili da circa 2 a 3,5 mm/anno, l'influenza positiva dell'arresto degli sfruttamenti generalizzati di acque sotterranee. La subsidenza oggi in atto, salvo eccezioni locali di poco conto, è per lo più imputabile alla componente naturale; trattandosi infatti, come rilevato in precedenza, di un'area a carattere deltizio, la progressiva consolidazione dei depositi fini recenti risulta qui più attiva che altrove.

⁽¹⁾ Le linee di livellazione degli altri settori litorali veneziani si sviluppano in corrispondenza dei bagni.

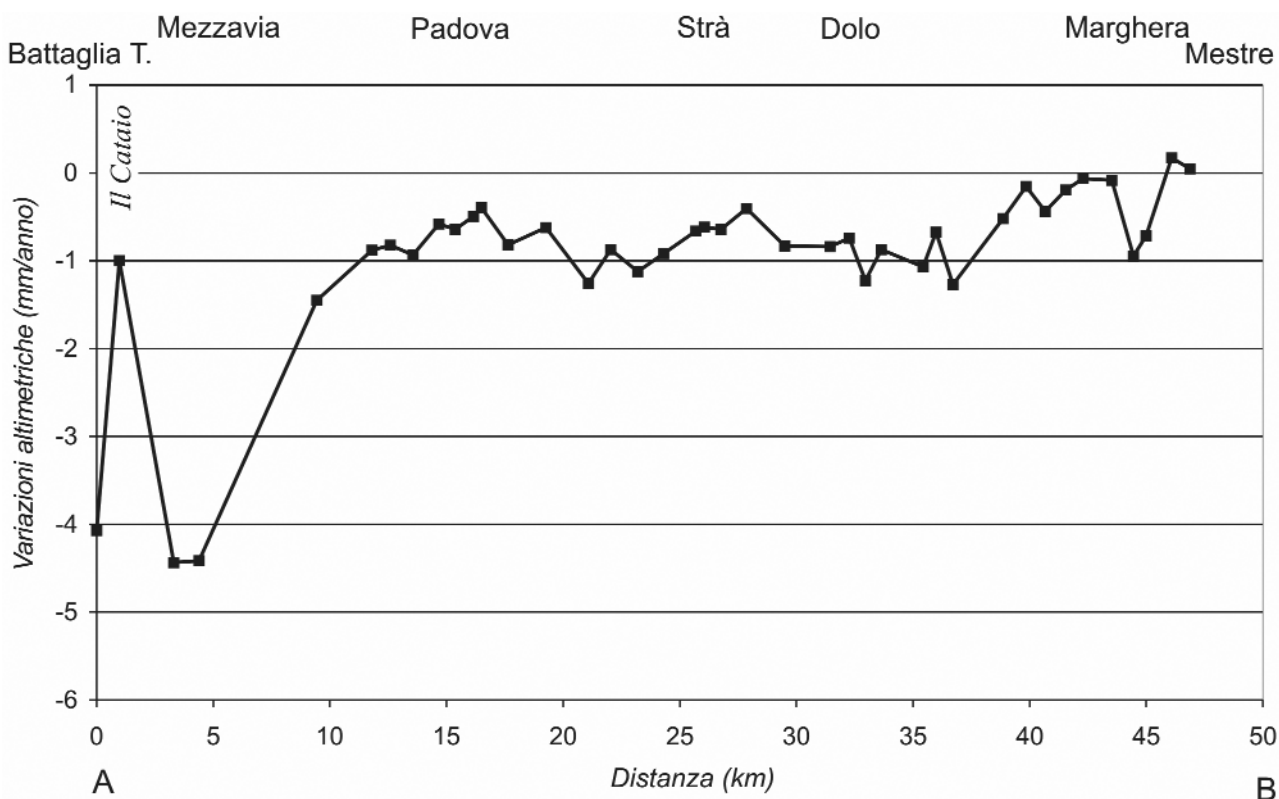


Figura 3.18 - Profilo altimetrico 1986- 2000 da Battaglia Terme a Mestre.

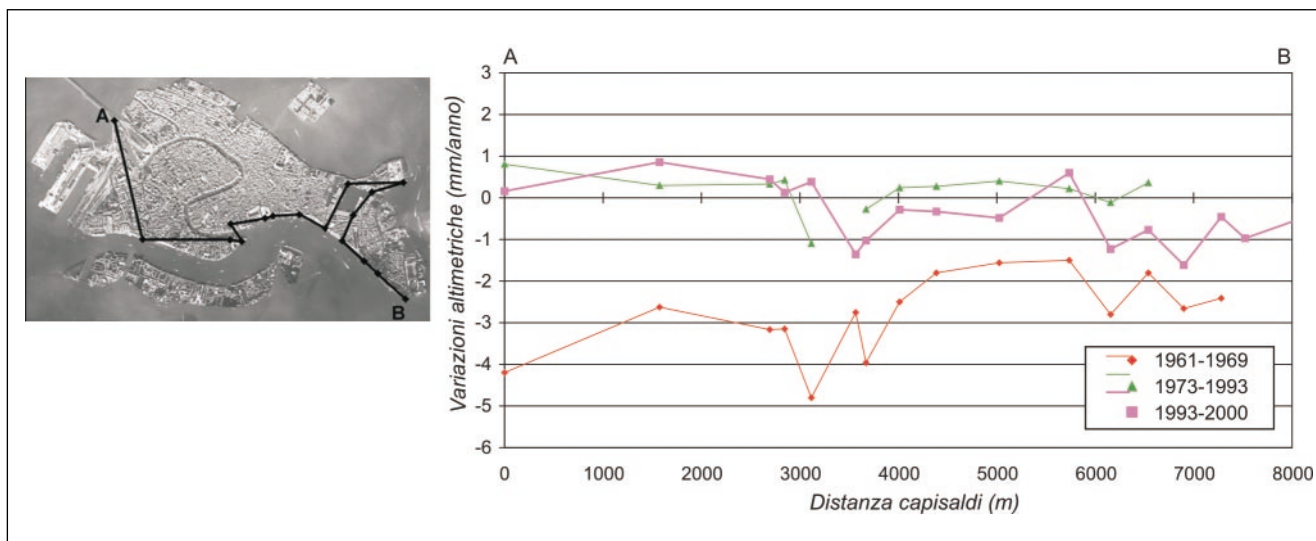


Figura 3.19 – Analisi altimetrica del Centro storico di Venezia (1961-2000) lungo un profilo ovest - est [78].

Il grafico di figura 3.18 riporta l'altimetria recente lungo la linea di livellazione che da Battaglia Terme arriva a Mestre passando per Padova. Lo sviluppo del profilo conferma come questi territori siano esenti da problemi legati al processo di subsidenza, e come il ridimensionamento delle estrazioni termali nel grande bacino Montegrotto Abano Terme abbia operato una sensibile miglione alla tendenza all'abbassamento dei decenni precedenti [72]. Nella zona di Mezzavia⁽¹²⁾, l'abbassamento del suolo si esplica oggi con i medesimi tassi del periodo 1942-1970 (circa 5 mm/anno), quando non era coinvolta dagli effetti delle estrazioni termali del bacino principale.

A Venezia, che per importanza e precarietà è sempre stata l'area più studiata e controllata, esiste una fitta rete di capisaldi (123 su 8 kmq, 65 dei quali confrontabili sin dal 1961) quotati a intervalli temporalmente ridotti, che ha permesso di seguire con grande dettaglio l'evoluzione altimetrica cittadina e rappresentarla sia mediante profili diversi, sia attraverso l'analisi di mappe spazio-temporali delle variazioni altimetriche. La livellazione *ISES* 2000 non prevedeva il monitoraggio del centro storico, ma (nell'ambito di Venezia) la sola chiusura dei due grandi anelli circumlagunari nord e sud per ottimizzare la compensazione delle linee. Approfittando di questa operazione, ci è stato dato di quotare una serie di capisaldi per la verifica dei settori urbani risultati più instabili con le precedenti livellazioni. Purtroppo alcuni capisaldi dell'area occidentale sono risultati precedentemente rimossi e al termine delle operazioni si è potuto disporre della misura di soli 17 punti.

L'analisi temporale è qui riprodotta seguendo il profilo ad unione dei 17 capisaldi quotati nel 2000 (linea

a "segmenti" Fig. 3.19). Si osserva nettamente come dalla situazione critica degli anni '60 si sia passati ad una altimetria rassicurante per la precarietà ambientale veneziana. Il confronto 1993-2000 indica una situazione simile a quella accertata per il ventennio 1973-1993 con valori che localmente, nei punti critici, arrivano a 1 mm/anno.

I pochi capisaldi quotati con la livellazione *ISES* non sono per di più omogeneamente distribuiti sull'area del centro storico. Questa limitazione non permette di rappresentare adeguatamente le variazioni altimetriche 1993-2000 attraverso una mappa di isolinee di ugual subsidenza.

Ci è sembrato comunque di interesse riproporre quella del ventennio 1973-1993 (Fig. 3.20) eseguita con il già menzionato modello di interpolazione del kriging, considerato l'interesse per quest'area.

La stabilità del suolo veneziano di questo periodo appare così con maggior chiarezza; i *picchi* di subsidenza⁽¹³⁾ sono in corrispondenza alle aree di recente interrimento e inducono a ritenere che questi terreni non si siano ancora completamente consolidati. Questo processo di consolidazione, che indubbiamente si esplicava anche in passato, venne "mascherato" nel periodo critico dal più consistente processo indotto. Abbassamenti ancora più localizzati, sia pure di scarsa entità, sono misurati attorno ad alcuni canali principali ad indicare, secondo gli Autori, l'influenza delle correnti che possono qui indurre modesti fenomeni erosivi.

⁽¹²⁾ Si ricorda che, per le sue caratteristiche, il caposaldo istituito al Cataio, la cui altimetria viene comunque riportata per correttezza, non deve essere valutato nella descrizione della tendenza di abbassamento.

⁽¹³⁾ Non si dimentichi che si parla di picchi in relazione ai valori misurati che restano in un intervallo più che modesto.

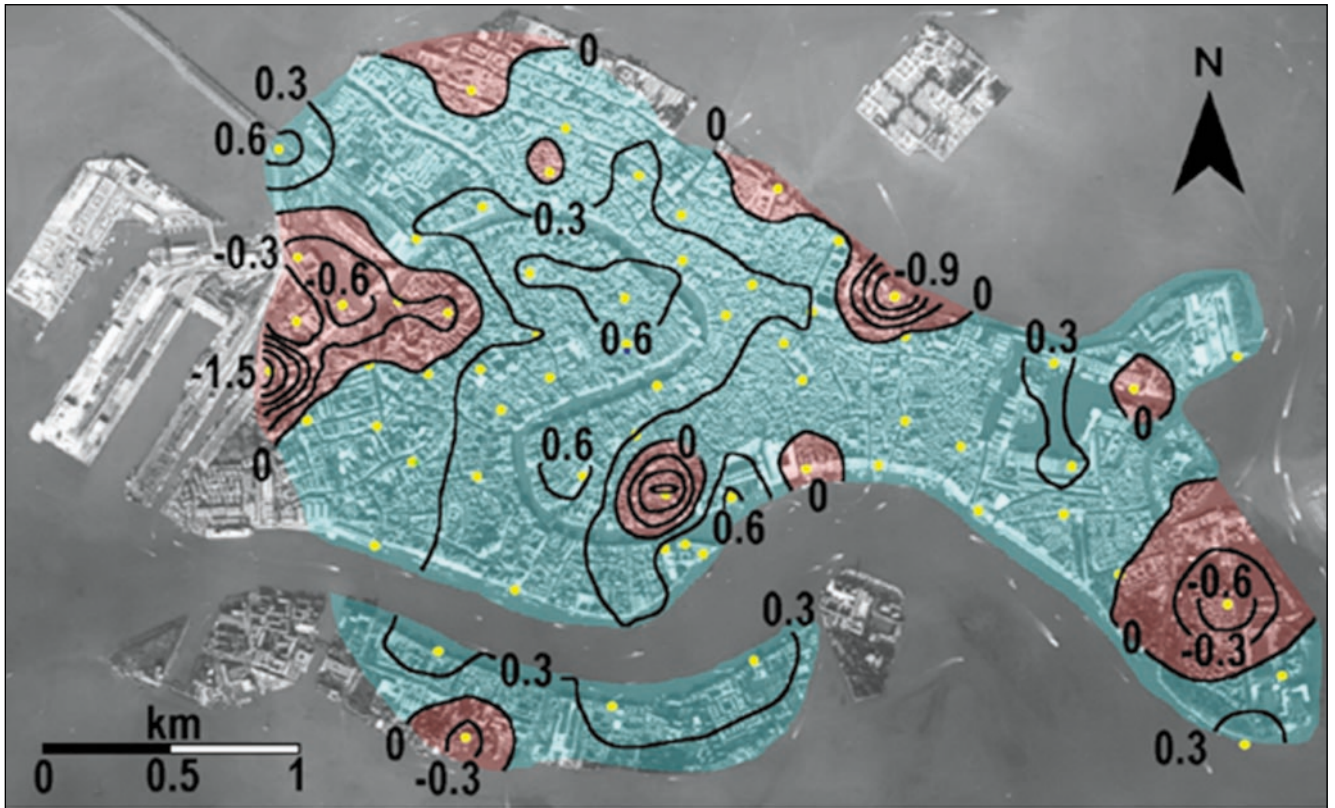


Figura 3.20 - Venezia centro storico: mappa delle variazioni altimetriche (mm/a) per il ventennio 1993-1973 ([78] modificata da [32]).

3.8 RICERCHE COMPLEMENTARI AL PROGETTO ISES PER LO STUDIO DELLA SUBSIDENZA

A seguito dell'interesse con cui è stato seguito lo svolgimento del progetto ISES e dei risultati ottenuti sia in termini di conoscenze territoriali che di struttura

del monitoraggio, ha preso avvio una serie di ricerche integrative e complementari per l'approfondimento delle conoscenze sul processo di subsidenza in particolari situazioni critiche, e per migliorare le più avanzate tecnologie di misura.

Progetto VOSS (Venice Organic Soil Subsidence)⁽¹⁴⁾.

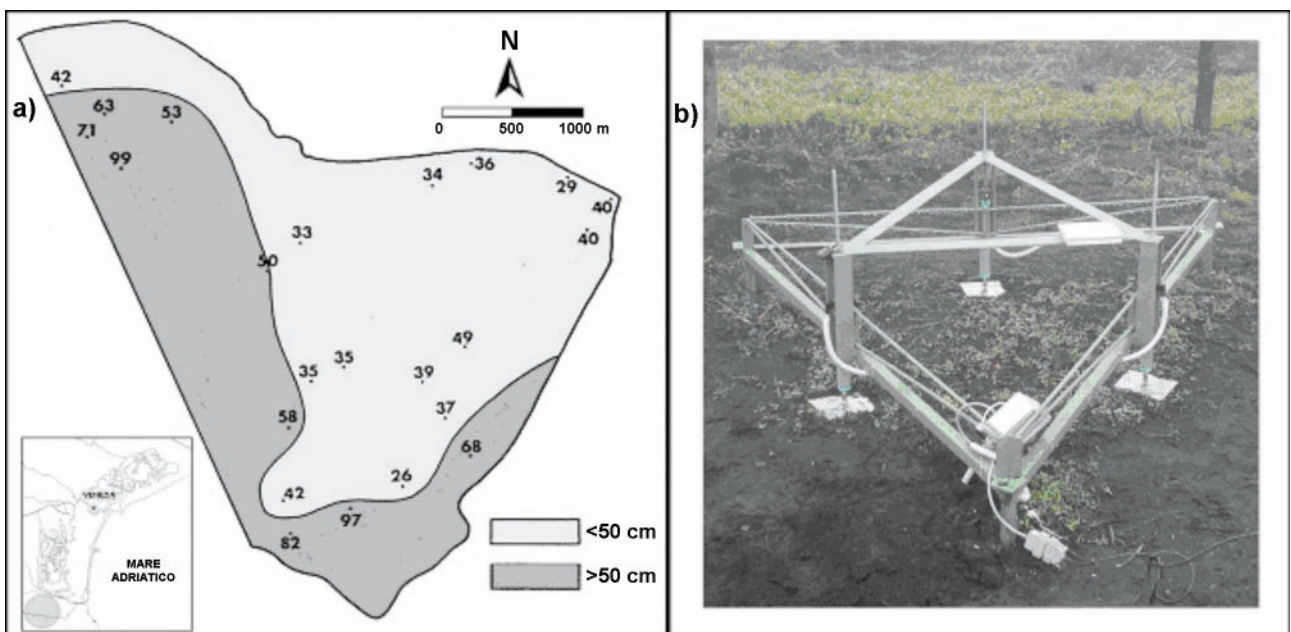


Figura 3.21 - Bacino Zennare: a) subsidenza stimata (cm) tra il 1965 ed il 1998 [dati da 44] ; b) struttura in acciaio installata in sito per monitorare in continuo l'abbassamento della superficie del suolo torboso [49; 50]

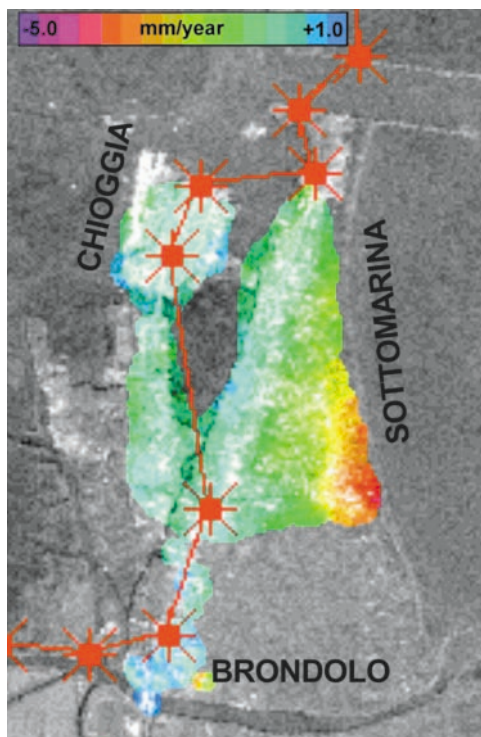


Figura 3.22 – Mappa della subsidenza dell’area di Chioggia-Sottomarina (mm/anno), per il periodo 1993-2000, effettuata utilizzando il metodo di interferometria differenziale SAR. In rosso sono evidenziati i capisaldi della rete di livellazione ISES [74].

I comprensori agricoli della regione Veneto sud-orientale sono caratterizzati, come più sopra illustrato, dalla presenza nel sottosuolo di sedimenti torbosi e argillosi ad alto contenuto organico. Questi suoli sono soggetti a notevole costipazione, per perdita di massa causata dall’ossidazione delle torbe [46], con conseguente subsidenza in superficie e impatto significativo nella gestione del territorio che già si trova abbondantemente sotto il livello del mare. Nel progetto VOSS, che ha scelto come sito sperimentale il Bacino Zennare [44; 50], ubicato all’interno dell’area ISES (Fig. 3.21), viene eseguito uno studio modellistico-sperimentale per la previsione del fenomeno. La formulazione e taratura del modello è supportata da dati raccolti in situ relativi ai parametri idrologici dell’area, alla perdita di CO₂ in atmosfera e nelle acque di falda⁽¹⁵⁾.

Progetto VENEZIA⁽¹⁶⁾. Questo progetto, che vede l’interesse primario dell’Agenzia Spaziale Europea

⁽¹⁴⁾ VOSS è un progetto di ricerca che fa capo al Consorzio per la Gestione del Centro di Coordinamento delle Attività di Ricerca e Inerenti il Sistema Lagunare di Venezia (CORILA) del quale è responsabile il Prof. Giuseppe Gambolati, DMMMSSA, Università di Padova.

⁽¹⁵⁾ Si ricorda che il processo è principalmente controllato dal contenuto in acqua e dalla temperatura del terreno.

⁽¹⁶⁾ Di questo progetto, che fa capo all’ESA, è responsabile il Dott. Tazio Strozzi, Gamma Remote Sensing, Svizzera.

(ESA) e la partecipazione del Magistrato alle Acque per la Laguna di Venezia (MAV), è nato con lo scopo di migliorare le possibilità metodologico-applicative della Interferometria differenziale radar da satellite (InSAR e IPTA) [73; 82], particolarmente per il suo utilizzo da parte delle pubbliche amministrazioni. Si ricorda - in modo semplicistico - che attualmente questo metodo permette di valutare e mappare direttamente (non con metodi di interpolazione tipo kriging) le variazioni altimetriche al di fuori delle linee di livellazione nelle aree urbane e poco vegetate. Sulla base dei rilievi SAR 2000 è stata fatta la mappatura delle differenze altimetriche 1993-2000 precedentemente valutate; nel confermare la stabilità dell’area di Chioggia è stato altresì possibile vedere, contrariamente alle aspettative (cfr. § 3.7), che esiste una lingua di spiaggia a Sottomarina sud, in realtà molto limitata, dove è in atto un abbassamento del suolo dell’ordine di 3-4 mm/anno dal ’93 al 2000, come evidenziato in figura 3.22.

4. Conclusioni

Come specificato in premessa, la pianificazione dei lavori del progetto *ISES* era stata elaborata per una durata di tre anni.

Al termine degli studi e dei monitoraggi condotti in questo arco di tempo, si ribadisce l'importanza e l'utilità dell'attività svolta non solo per i risultati conseguiti nella definizione dei processi studiati, ma anche perché ha fornito la base di partenza informativa e strumentale per un più corretto e razionale uso del territorio, ed infine per aver indirettamente sollecitato l'approfondimento di alcuni aspetti delle problematiche del fenomeno di subsidenza, concretizzatosi con l'avvio di nuovi progetti di ricerca.

Il progetto *ISES* aveva anche il preciso scopo di pervenire alla realizzazione delle reti di monitoraggio per il processo della contaminazione salina e della subsidenza e di individuare la gestione ottimale delle stesse. Con questo fine sono state predisposte altresì delle banche dati per l'elaborazione delle informazioni e la loro archiviazione, mantenendo gli standard utilizzati nel corso del progetto.

Sulla base delle campagne di misura effettuate e dei risultati conseguiti, sono state indicate le modalità operative e le frequenze da adottare per i monitoraggi futuri, sia per le acque sotterranee e superficiali che per l'altimetria. A tal proposito si ribadisce l'importanza della struttura della rete di monitoraggio altimetrico *ISES* che è stata studiata per permettere ai singoli Enti di effettuare misure in aree anche limitate, senza alcuna rilevante perdita di precisione, e riducendo notevolmente i costi.

4.1 INTRUSIONE SALINA

Lo studio sul processo di contaminazione salina è stato sviluppato con due obiettivi principali:

- definire il fenomeno nelle tre dimensioni spaziali, ed effettuare quindi una zonazione del processo stesso nei livelli individuando le aree critiche e quelle a diverso grado di rischio;
- istituire una rete di monitoraggio per il controllo dell'evoluzione temporale del processo.

La determinazione dei livelli superficiali e profondi dell'acqua salina è stata effettuata con lo scopo pri-

mario di fornire indicazioni sulla qualità delle acque per l'uso agricolo-orticolo.

È stata quindi adottata la seguente classificazione:

aree critiche, nelle quali il livello dell'acqua salata/salmastra è prossimo al piano campagna (0-5 m), generalmente localizzate lungo il margine lagunare;

aree ad alto rischio, con il livello dell'acqua salata compreso mediamente tra 5 e 10 metri, in molti casi risaliente di qualche metro in condizioni sfavorevoli, riguardano due settori non in comunicazione tra loro, ubicati grossomodo nella parte centrale dell'area *ISES*;

aree a rischio via via decrescente, nelle quali il processo si esplica con grado da medio a basso;

aree esenti da contaminazione, ove con le indagini effettuate non è stata rilevata la presenza di acque saline.

Benché non tutta l'area *ISES* sia coinvolta nel processo di contaminazione salina, è emersa una situazione decisamente più critica di quanto era stato ipotizzato al tempo della pianificazione del progetto e della programmazione delle indagini. E' stata appurata la dinamicità del processo che risente notevolmente di diversi fattori quali i prelievi d'acqua, le condizioni meteorologiche, l'attività delle idrovore, ed in maniera molto consistente i rilasci irrigui. Questi ultimi in particolare, effettuati nel periodo estivo, favoriscono la mitigazione del processo di salinizzazione, mentre gli eccessivi abbassamenti del livello freatico ne inducono un deciso aumento. Giocano altresì un ruolo non trascurabile nella dinamica del processo le dispersioni dell'acqua di marea che risale le foci dei fiumi e dei canali, nonché il contributo delle numerose strutture geologiche e geomorfologiche sub-superficiali che, se in alcuni casi inducono un'azione di contrasto alla contaminazione salina, in altri ne agevolano la propagazione.

L'intrusione salina può essere considerata un tipo particolare di inquinamento e, come per gli altri, una volta che accade è difficile da contenere e invertire. Malgrado ciò, essa potrebbe essere controllata attraverso il mantenimento di un gradiente idraulico di acqua dolce in direzione del mare. Ciò comporta la presenza di una "barriera di pressione idraulica" che potrebbe essere creata attraverso l'immissione diretta di acqua dolce nell'acquifero attraverso una rete di

appositi pozzi (ricarica artificiale). Questa operazione è comunque pressoché inattuabile utilizzando le acque sotterranee, in quanto, richiedendo una enorme disponibilità di acqua dolce, potrebbe indurre depressioni piezometriche tali da causare subsidenza, e provocare un richiamo delle acque saline fossili con caratteristiche chimiche e organolettiche diverse che, in presenza di suoli argillosi, potrebbero avviare processi di collasso con conseguente compattazione e quindi ulteriore subsidenza.

Anche la creazione di una barriera idraulica che capti l'acqua salina in fase di ingressione prima che invada la falda non è una soluzione facilmente realizzabile. Si tratterebbe infatti di attuare una serie di pozzi paralleli alla costa, ubicati tra quest'ultima e le zone di estrazione, che emungano l'acqua salata da reimmettere in mare, ma così facendo si creerebbe un aumento graduale della salinità nei pozzi di pompaggio che dovrebbero operare ininterrottamente affinché la barriera fosse *effettiva*. Oltre all'enormità dei costi, questo tipo di operazione potrebbe creare seri problemi logistici ed ambientali.

Considerando che il rilascio nella rete idraulica di acqua per uso irriguo può essere di contrasto al processo, una soluzione attuabile andrebbe ricercata nell'ottica del mantenimento costante di alti livelli idrometrici e quindi dei massimi livelli freatici, compatibilmente con il franco di bonifica.

Si ricorda infine che, malgrado gli effetti dell'opera di ostacolo alle maree realizzata in passato nel Fiume Adige non sembrano estendersi ad una larga area del territorio⁽¹⁷⁾, non si può escludere a priori l'efficacia di questo sistema in particolare alla luce delle nuove tecnologie costruttive.

Per chiarezza va detto che, data la complessità del processo, non è pensabile di adottare una soluzione unica a mitigazione e/o prevenzione del fenomeno, dovendosi invece procedere con un sistema integrato, inevitabilmente costoso ma che sicuramente dovrà essere studiato a breve termine in quanto la realizzazione dello stesso potrebbe richiedere diversi anni. Condizione basilare per qualunque tipo di intervento è la dettagliata conoscenza del processo e dell'ambiente fisico ove questo si esplica. E' quindi di fondamentale importanza proseguire il monitoraggio della istituita rete *ISES* che, oltre ad essere un sistema di allarme nel caso il processo si aggravi, fornirà nel tempo anche serie di dati elaborabili statisticamente per calcolare le tendenze evolutive del fenomeno e che rappresentano l'input indispensabile per i modelli matematici di simulazione e previsione futura della contaminazione salina.

Alla luce degli studi condotti e dei risultati ottenuti, si dovrebbero:

- approfondire le conoscenze sui parametri idrogeologici del sistema acquifero, attualmente solo stimati in termini qualitativi;
- condurre idonee analisi chimiche per determinare i sali presenti nei livelli acquiferi, e analisi isotopiche per discriminare la natura e l'origine delle acque saline;
- integrare i monitoraggi con strumentazioni in continuo che combinino misure di marea, piovosità, livelli idrometrici e qualità delle acque dei corsi d'acqua e delle falde.

Lo studio completo della salinizzazione delle falde e dei terreni richiede un modello complesso che, oltre all'effetto dell'intrusione salina proveniente direttamente dalla linea di costa o dalla conterminazione, lagunare, deve tenere conto anche dei processi che favoriscono la contaminazione, quali: la risalita dell'onda di marea lungo le foci dei fiumi e canali; la risalita dell'onda di marea lungo la rete di bonifica attraverso manufatti (botti a sifone, porte vinciane, sostegni, ecc.) in contatto con corpi idrici salati, che periodicamente o perennemente consentono riflusso verso monte; la risalita di acque sotterranee salate per l'azione di mantenimento del franco di bonifica delle idrovore; la contaminazione causata dall'intercettazione dei livelli salati sotterranei durante il dragaggio o scavo di canali della rete di bonifica e la risalita delle acque fossili profonde.

4.2 SUBSIDENZA

La subsidenza, pur esplicandosi in modo differenziale nel tempo e nello spazio, interessa tutto il comprensorio lagunare e le zone limitrofe, risultando indotta da processi sia naturali che antropici. Nell'area *ISES* in particolare l'abbassamento del suolo si è sviluppato, anche in tempi non recenti, con entità rilevanti producendo effetti a volte disastrosi sul territorio e sulle infrastrutture esistenti. Proprio attraverso la *visione diretta* di queste conseguenze si sono avute importanti indicazioni della gravità del fenomeno. Purtroppo infatti oggi non ci è dato di seguirne l'evoluzione temporale attraverso misure altimetriche in quanto la maggior parte dei capisaldi - rete *ISES* - sono di nuova istituzione laddove i dati disponibili non risultano confrontabili o la subsidenza non è mai stata misurata. Ciò malgrado, alcuni dati storici puntuali, coadiuvati dall'*interpretazione* delle evidenze sul territorio, testimoniano di abbassamenti

⁽¹⁷⁾ E' da precisare che nell'ambito del Progetto *ISES* non era prevista un'indagine ad hoc per la verifica a posteriori della funzionalità di quest'opera, quindi i risultati a questo proposito sono relativi ad una valutazione di massima.

generalizzati che raggiungono tassi fino a 3 cm/anno soprattutto nelle aree interessate da passate estese bonifiche e/o dove la presenza di suoli organici, altamente comprimibili, esalta il fenomeno. La prima analisi comparativa in grado di fornire informazioni attendibili e precise sull'attuale tendenza evolutiva del processo deve essere rinviata al primo monitoraggio dell'intera rete *ISES*.

Con la livellazione *ISES* 2000 è stata rilevata anche l'altimetria dei settori settentrionale e litoraneo del comprensorio veneziano, lungo linee geodetiche delle esistenti reti CNR ed IGMI non appartenenti all'area di studio in senso stretto, e che oggi sono divenute parte integrante dell'intera rete *ISES*.

E' stato di qui possibile collegare la rete all'area trevigiana, da sempre ritenuta stabile, e avere così anche per la nuova rete lo stesso riferimento, nonché effettuare i confronti altimetrici con le precedenti misure, in particolare quelle CNR 1993 per il comprensorio lagunare, e quelle IGMI per altri settori di competenza delle province di Venezia e di Padova.

I risultati sulla evoluzione della subsidenza dal 1993 al 2000, rispetto al precedente periodo 1973-1993, confermano la tendenza alla stabilità altimetrica relativamente alla laguna centrale, alla terraferma compresa tra Treviso e Mestre e all'area immediatamente a sud di Mira-Dolo.

Le quote dei capisaldi della linea circumlagunare indicano ancora tassi di subsidenza generalmente crescenti man mano che ci si avvicina alle estremità lagunari nord e sud, benchè sia stato qui evidenziato un netto miglioramento per il settore Chioggia e Pellestrina, da mettere in relazione agli estesi interventi di bonifica operati nell'ambito dei progetti a salvaguardia. Permane invece il picco di subsidenza in prossimità della zona di "Valli" (laguna meridionale) ove le cause non sono state ancora ben definite e quantificate, ma si riportano principalmente ai fenomeni di perdita di massa per ossidazione delle torbe, particolarmente abbondanti in quest'area di bonifica, ed a probabili fenomeni tettonici.

L'abbassamento accresce in questo settore la intrinseca situazione di rischio idrogeologico (esondazioni, intrusione salina, ecc.).

E' stato inoltre appurato un aggravamento dei tassi di abbassamento lungo il cordone litorale di Cavallino-Jesolo dove i nuovi sfruttamenti di acque sotterranee (dagli inizi del '90 si concedono nuovamente i permessi per l'apertura di pozzi artesiani) sembrano giocare un ruolo non trascurabile nella dinamica del processo: non sono comunque state condotte verifiche in merito, non previste nella pianificazione degli studi.

Molto meno critico, ma da tenere sotto osservazione,

è invece l'abbassamento del litorale di Lido.

La subsidenza della struttura litoranea potrebbe comportare anche l'aumento dei processi erosivi costieri. Già nel 1992 fu osservato a Cavallino un lieve incremento di pendenza dei fondali (fino all'isobata dei 5 m) in corrispondenza dei punti di maggior subsidenza; questa valutazione fu comunque di carattere qualitativo non potendo procedere ad una specifica analisi correlativa in considerazione dei modesti valori in gioco.

Si segnala infine che il centro storico veneziano rimane mediamente stabile, salvo ridotte eccezioni, ed esente da abbassamenti degni di nota o generalizzati. Val la pena di ricordare che l'area dove è posizionato il mareografo di Punta della Salute, importante per gli studi eustatismo/subsidenza, risulta decisamente stabile.

Le aree più meridionali della provincia veneziana, da Brondolo a Cavanella d'Adige, hanno risposto positivamente al notevole ridimensionamento dei consumi artesiani, ed esibiscono oggi tassi di subsidenza dell'ordine millimetrico, ascrivibili principalmente alla componente naturale.

L'altimetria recente dei territori della provincia di Padova, ubicati lungo il tragitto che da Mestre arriva a Battaglia Terme, ne mette in rilievo la "quasi stabilità", ad eccezione dell'area termale Mezzavia-Battaglia dove sono tuttora attive, sia pure ridimensionate, le estrazioni di fluidi dal sottosuolo.

Allo stato attuale si ritiene che la rete di monitoraggio altimetrico *ISES* del settore meridionale di nuova istituzione non richieda particolari ampliamenti in quanto risponde in modo adeguato alle esigenze di controllo del territorio. Tuttavia non è da sottovalutare l'utilizzo futuro di alcune stazioni fisse di misure GPS da porre in opera e collegare a quelle già esistenti del Magistrato alle Acque per la Laguna di Venezia (MAV), dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), dell'Università di Padova e alla rete GPS Internazionale, sia per un riferimento controllato in continuo sia per il monitoraggio dei movimenti tettonici regionali.

Di più immediata applicazione potrà essere l'utilizzo dell'interferometria differenziale radar da satellite (InSAR e IPTA) che fornisce una visione sinottica spazio-temporale dei movimenti del suolo delle aree urbane che, a parte il caso di Venezia, sono inadeguati, per le altre zone menzionate.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare sentitamente: Luigino Busatto, Presidente della Provincia di Venezia; Delia Murer, Assessora alla Protezione Civile della Provincia di Venezia; Luigi Alberotanza Direttore dell'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del Consiglio Nazionale delle Ricerche; Vittorio Casarin Presidente e Domenico Riolfatto Assessore all'Ambiente della Provincia di Padova, Fortunato Guarnieri Sindaco e Sergio Vianello Assessore all'Ambiente della Città di Chioggia; Maria Giovanna Piva Presidente del Magistrato alle Acque per la Laguna di Venezia; Antonio Salvan Presidente del Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione; Francesco Arduini Presidente del Consorzio di Bonifica Delta Po Adige; Alessandro Ghio Presidente del Consorzio di Bonifica Bacchiglione Brenta; Marino Bianchi Presidente del Consorzio di Bonifica Polesine Adige Canal Bianco; Alessandro Goio Segretario Generale dell'Autorità di Bacino del Fiume Adige che, con la loro illuminata iniziativa e con i finanziamenti erogati, hanno consentito la realizzazione del Progetto.

Tengono inoltre a ringraziare in modo particolare i componenti del Gruppo Ristretto: Giuseppe Gasparetto Stori, Consorzio di Bonifica Adige-Bacchiglione; Annamaria Licini, Provincia di Padova; Roberto Rosselli, Servizio Informativo del Magistrato alle Acque di Venezia; Paolo Spagna, Comune di Chioggia; Andrea Vitturi, Provincia di Venezia, per l'attenta e competente partecipazione e per la loro sensibilità alle problematiche ambientali e territoriali in esame.

Un ringraziamento ai collaboratori: Valentina Bassan, Vittorio Bisaglia, Gianfranco Castelli, Barbara Chiozzotto, Enrico Conchetto, Enrico Farinatti, Marco Giada, Rossella Merola, Marco Sabbatani e Pietro Zangheri che hanno condotto le indagini con particolare impegno, meticolosità e precisione conseguendo risultati di alto livello tecnico.

Uno speciale ringraziamento a Pietro Teatini che, oltre alla direzione lavori, ha contribuito allo studio scientifico del processo di subsidenza; a Tazio Strozzi e a Giuseppe Gambolati per aver fornito dei dati relativi ai progetti "Venezia" (European Space Agency) e "Voss" (Co.Ri.La.) che hanno consentito di dettagliare in alcune aree lo studio dell'abbassamento del suolo e a Federica Rizzetto per il valido aiuto alle indagini geomorfologiche nell'area di studio.

Si ricorda inoltre il consistente contributo dei dati inediti forniti dall'Arpav, oltre che dagli Enti partecipanti al Progetto.

Infine un ringraziamento particolare a Pietro Zangheri per il prezioso aiuto alla realizzazione del presente volume.

5. Citazioni bibliografiche

1. ALBEROTANZA L. & SERANDREI BARBERO R. (1974) - *Rapporto preliminare sul sondaggio VE 2 CNR*. TR n. 87, CNR-ISDGM, Venezia.
2. AGIP Mineraria (1962) - *La Pianura Padano-veneta*. In voce: *Italia, Geologia e Ricerca Petrolifera*, Enciclopedia Petrologia e Gas Naturali, ENI, Ed. Colombo, Milano,
3. ARCA S. & BERETTA G.P. (1985) - *Prima sintesi geotettonico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia Settentrionale (1897-1957)*. Boll. Geod. e Aff., XLIV, 125-156.
4. ARTIOLI R. (Anno Accademico 1998-99) - *Indagine geoelettrica e georadar per la valutazione dell'intrusione salina negli acquiferi costieri del comprensorio meridionale veneziano*. Tesi di laurea; relatore: Prof. G. Benvenuti, correlatore: Dott. L. Tosi. Università degli Studi di Padova, Facoltà di Scienze MM.FF.NN., Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica.
5. ARTIOLI R., GALGARO G., FINZI E. & TOSI L. (1999) - *Indagini geofisiche nel sottosuolo litoraneo di Chioggia*. Atti del Convegno "Conoscenza e Salvaguardia delle Aree di Pianura - Il contributo delle Scienze della Terra-", Ferrara, 8-11 Novembre 1999, Sess. Poster 128-130.
6. BAGLIONI A. & F. TOFFOLETTO (1998) - *Applicazione di metodologie geofisiche nello studio sedimentologico-stratigrafico del sottosuolo veneziano*. TR n. 219, CNR - ISDGM, 29 p., Venezia.
7. BENVENUTI G. (a cura di) (1974) - *Ricerche stratigrafiche superficiali e di falde acquifere mediante sondaggi elettrici a sud-ovest della laguna di Venezia*. Ministero dei Lavori Pubblici, Comitato per lo studio dei Provvedimenti a Difesa della Città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, III Gruppo di lavoro: Geologia - Geofisica - Geotecnica. Società Cooperativa Tipografica. Padova.
8. BENVENUTI G., GALGARO A. & TOSI L. (1998) - *Indagine geoelettrica per la valutazione dell'intrusione salina negli acquiferi costieri del comprensorio meridionale veneziano*. TR n. 222, CNR - ISDGM, 30 p., Venezia.
9. BENVENUTI G., NORINELLI A. & ZAMBRANO R. (1973) - *Contributo alla conoscenza del sottosuolo dell'area circumlagunare veneta mediante sondaggi elettrici verticali*. Boll. di Geofisica teorica e applicata, XV, 57, 23-38.
10. BERGAMASCO A., TEATINI P. & CARBOGNIN L. (1993) - *Confronto critico tra Kriging e analisi oggettiva*. Il Nuovo Cimento 16 (3), 289 - 302.
11. BIXIO A.C. (1997): *Some salt intrusion problems in confined coastal aquifers simulated with the SATC3 code*, TR n. 215, CNR - ISDGM, 48 p., Venezia.
12. BIXIO A.C., PUTTI M., TOSI L., CARBOGNIN L. & GAMBOLATI G. (1998): *"Finite Element Modeling of Salt water Intrusion in the Venice Aquifer System"*, In "Computational Methods in Water Resources", Vol. 2, pp. 193-200, Eds. Burganos V. N., G.P. Karatzas, A.C. Payatakes, C.A. Trebbia, W.G. Gray and G.F. Pinder, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA.
13. BOARETTO C. (1983) - *Studio sull'eventuale relazione tra lo sfruttamento idrico sotterraneo e la subsidenza nell'area compresa tra Piove di Sacco e Chioggia (entroterra meridionale della Laguna Veneta)* - Tesi di laurea; relatori: R. Antonelli e P. Gatto. (Anno Accademico 1982-83).
14. BONARDI M. & TOSI L. (1995) - *Caratterizzazione e differenziazione mineralogica dei livelli sabbiosi tardo quaternari del litorale veneziano*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, Vol. 8, fasc. 2, pp. 315-322, 1995.
15. BONDESAN M., ELMI C. & MAROCCO R. (con il contributo di Favero V.) (2001) - *Forme e depositi di origine litoranea e lagunare*. In: CASTIGLIONI G. B. & PELLEGRINI G. B. (a cura di), "Note illustrative della Carta Geomorfológica della Pianura Padana", Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 4, 105-118.
16. BONDESAN M., FAVERO V. & VINALS M. J. (1995) - *New evidence on the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene*. Quat. Int., 29/30, 105-110.
17. BONDESAN M., GATTI M. & RUSSO P. (2000) - *Subsidence in the Eastern Po Plain (Italy)*. In: Land Subsidence (ed. by L. Carboognin et al.), La Garangola, Padova (Italy), Proc. SISOLS Vol. I, 193-204.

18. BORTOLAMI G., CARBOGNIN L. & GATTO P. (1984) - *Natural subsidence in the lagoon of Venice*. In: Land Subsidence (ed. by A. I. Johnson et al.), Publ. IAHS n.151, Proc. 3rd Int. Symp. on Land Subsidence, 777-784.
19. CAPORALI A., DALLAPORTA G., MARZARI F., RUSCONI A., CURIOTTO S., FACCHINELLI F. & ZAMBON G. (1989) - *Rete geodetica GPS in territorio veneziano*. In: 3° Conv. Nazionale AIT. 1-13 e 5 figg. f.t.
20. CAPUTO M., FOLLONI G., GUBELLINI A., PIERI L. & UNGUENDOLI M. (1972) - *Survey and Geometric Analysis of Subsidence in the Region of Venice and its Hinterland*. TR n. 9, CNR- Lab. SDGM, 20 p., Venezia.
21. CAPUTO, M., PIERI, M. & UNGUENDOLI (1970) - *Geometric investigation of the subsidence in the Po River Delta*. Boll. Geof. Teor. ed Appl., Vol. 13/47, pp. 187-207.
22. CARBOGNIN L. (1985) - *Land subsidence: a worldwide environmental hazard*, Nature and Resources, XXI, 1, 1-12.
23. CARBOGNIN L., GAMBOLATI G., MARABINI F., TARONI G., TEATINI P. & TOSI L. (2000): - *Analisi del processo di subsidenza nell'area veneziana e sua simulazione con un modello tridimensionale non lineare*. - IN "LA RICERCA SCIENTIFICA PER VENEZIA - IL PROGETTO SISTEMA LAGUNARE VENEZIANO"; Vol. II, Tomo II, MODELLISTICA DEL SISTEMA LAGUNARE VENEZIANO-STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE, 1017-1050.
24. CARBOGNIN L. & GATTO P. (1976) - *A methodology for hydrogeological data collection in the Venetian Plain*. IBM Seminar on Regional Ground-water Hydrology and Modelling, Venice, Italy, May 25-26, 1976, 267-291.
25. CARBOGNIN L., GATTO P. & MARABINI F. (1984) - *Correlation between shoreline variations and subsidence in the Po River Delta, Italy*. In: Land Subsidence (ed. by A. I. Johnson et al.), Publ. IAHS n.151, Proc. 3rd Int. Symp. on Land Subsidence, 367-373.
26. CARBOGNIN L., GATTO P., MARABINI F., MOZZI G. & ZAMBON G. (1982) - *Le trend evolutif du littoral Emilien-Romagnol, Italie*. Oceanologica Acta, N. Sp., 73-77.
27. CARBOGNIN L., GATTO P., MOZZI G., GAMBOLATI G., RICCERI G. (1976) - *New trend in the subsidence of Venice*. In: Land Subsidence (ed. by J.C. Rodda), Publ. IAHS n. 121, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, 65-81.
28. CARBOGNIN L., GATTO P. & MOZZI G. (1981) - *La riduzione altimetrica del territorio veneziano e le sue cause*, ISVLA, Rapporti e Studi, Vol. VIII, 55-83, Venezia.
29. CARBOGNIN L., MARABINI F. & TOSI L. (1995) - *Land subsidence and degradation of the venetian littoral. Keynote lecture*, In: Land Subsidence (ed. by F.B.J. Barends et al.), Publ. IAHS n. 234, Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, 391-402.
30. CARBOGNIN L. & TARONI G. (1996) - *Linearità tra due variabili: piezometria e subsidenza nell'area veneziana*. - IVSLA, Classe di Scienze Fis., Mat. e Nat. delle Scienze, Tomo CLIV (1995-1996), 33-52, Venezia.
31. CARBOGNIN L. & TARONI G. (1996) - *Eustatismo a Venezia e Trieste nell'ultimo secolo*. Atti IVSLA, Classe di Scienze Fis., Mat. e Nat., Tomo CLIV (1995-1996), 281-298.
32. CARBOGNIN L., TEATINI P. & TOSI L. (1995) - *Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland (Italy)*, In: Land Subsidence (ed. by F.B.J. Barends et al.), A. A. Balkema, Rotterdam, 129-137.
33. CARBOGNIN L. & TOSI L. (1995) - *Situazione altimetrica attuale del comprensorio veneziano e i suoi riflessi sull'ambiente lagunare*. Geologia Applicata e Idrogeologia, ed. Cotecchia, Vol. XXX, 303-313.
34. CARBOGNIN L., CECCONI G. & ARDONE V. (2000). *Interventions to safeguard the environment of the Venice Lagoon (Italy) against the effects of land elevation loss*. In: Land Subsidence (ed. by L. Carbognin et al.), La Garangola, Padova (Italy), Proc. SISOLS Vol. I, 113-126.
35. CARBOGNIN L. & TOSI L. (2002) - *Interaction between Climate Changes, Eustacy and Land Subsidence in the North Adriatic Region, Italy* - Marine Ecology, 23, Suppl. 1, 38-50. Ed. Blackwell Verlag, Berlin.
36. CARBOGNIN, L., TEATINI, P. & TOSI, L. (2003) - *Eustacy and Land subsidence in the Venice Lagoon, at the beginning of the New Millennium*. Journal of Marine Systems (In press).
37. CARMINATI E. & DI DONATO G. (1999) *Separating natural and anthropogenic vertical movements in fast subsiding areas: the Po Plain (N. Italy) case*. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 15, 2291-2294.
38. CASTIGLIONI G. B. (1978) - *Il ramo più settentrionale del Po nell'antichità*. Atti e Mem. Acc. Patav. SS. LL. AA., 90 (3), 157-164.
39. CELICO P. (1986) - *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori Ed., 2 vv. pp. 1263, Napoli.

40. CHIESA (1998) – *Inquinamento delle acque sotterranee*. Hoepli, Milano 2 ed., pp. 556.
41. CIABATTI M. (1967) - *Ricerche sull'evoluzione del delta padano*, *Giornale di Geologia* (2), Vol. XXXIV, Fasc. 2, 26 pp.
42. C.N.R. (1971) - *Sondaggi profondi per lo studio della subsidenza. Relazioni sul Pozzo VE 1 CNR, 1° FASE*. CNR, Lab. ISDGM, TR n. 14 a n. 21, Venezia.
43. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (1971) - *Livellazione geometrica di precisione della città di Venezia, 1970*. TR n. 11, CNR, Lab. SDGM, Venezia.
44. CONSORZIO DI BONIFICA ADIGE – BACCHIGLIONE (1996) – Studio del fenomeno della subsidenza nei bacini Orientale, Zennare, Punta Gorzone e Foresto Centrale, ricadenti nel comprensorio consorziale. *Relazione Tecnica* a cura di G. Gasparetto-Stori, Padova.
45. DAZZI R., GATTO G., MOZZI G. & ZAMBON G. (1994) - *Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo*. Parte prima: *relazione generale*, 44 p, Parte seconda: *la rete di monitoraggio delle pressioni di stato*, 131 p. Parte terza: *andamento evolutivo delle pressioni di stato*, 103 p., CNR-ISDGM, Venezia.
46. DEVEREL, S. J. & ROJSTACZER, S. (1996) - *Subsidence of agricultural lands in the Sacramento – San Joaquin Delta, California: Role of aqueous and gaseous carbon fluxes*. *Water Resour. Res.*, 32(8), 2359-2367.
47. FARINATTI E., MEROLA R. (2001) - *Studio del fenomeno di ingressione del cuneo salino in comune di Chioggia*. Rapporto inedito reperibile presso la Provincia di Venezia.
48. FAVERO V. & SERANDREI BARBERO R. (1978) - *La sedimentazione olocenica nella piana costiera tra Brenta ed Adige*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 19, 337-343.
49. FORNASIERO A., GAMBOLATI G., PUTTI M., TEATINI P., FERRARIS S., PITACCO A., RIZZETTO F., TOSI L., BONARDI M., & GATTI P. (2002) – *Subsidence due to peat soil loss in the Zennare Basin (Italy): design and set-up of the field experiment*. Scientific Research and Safeguarding of Venice, CoRiLa Research Program 2001 Results (ed. by P. Campostrini), IVSLA Venezia, 201-216.
50. FRANCESE R., GALGARO A., TEATINI P., PUTTI M., RIZZETTO F., TOSI L. & FARINATTI E. (2002) - *Geophysical Investigation within the “Ca’ Zennare Basin” (Venice)*. Scientific Research and Safeguarding of Venice, CoRiLa Research Program 2001 Results (ed. by P. Campostrini), IVSLA Venezia, 229-240.
51. GALGARO A., FINZI E. & TOSI L. (2000) - “*An experiment on a sand-dune environment in Southern Venetian coast based on GPR, VES and documentary evidence*”. *Annali di Geofisica*, Vol. 43, N. 2, 289-295.
52. GALGARO A. & TOSI L. (1999) - *Studio dell'intrusione salina negli acquiferi costieri del comprensorio meridionale veneziano: risultati preliminari*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, 2/99, 39-45, Roma.
53. GAMBOLATI G., GATTO P. & FREEZE R.A. (1974) - *Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2. Results*, “*Water Resour. Res.*”, Vol. 10, no. 3, 563-577.
54. GAMBOLATI G. & TEATINI P. (1997) - *Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin*. In: CENAS Project, *Study on the Coastline of the Eastern Po Plain Due to Sea Level Change Caused by Climate Variation and to Natural and Anthropogenic Subsidence*, 105-134.
55. GATTO P. (1984) - *Il cordone litoraneo della laguna di Venezia e le cause del suo degrado litorali*. IVSLA, Rapporti e Studi, IX, 163-193.
56. GATTO P. & CARBOGNIN L. (1981) - *The Lagoon of Venice - Natural environmental trend and man-induced modification*. *Hydrological Sciences Bulletin*, 26/4/12, 379-391.
57. GATTO P. & PREVIATELLO P. (1974) - *Significato stratigrafico, comportamento meccanico e distribuzione nella laguna di Venezia di una argilla sovraconsolidata nota come caranto*. - TR n. 70, CNR Lab. SDGM, 45 p., Venezia.
58. GOTTARDI, G., PREVIATELLO, P. & SIMONINI P. (1995) - *An extensive investigation of land subsidence in the Euganean geothermal basin, Italy*. In: *Land Subsidence* (ed. by F.B.J. Barends et al.), Publ. IAHS n.234, Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, 21-30.
59. HAMILL L. & BELL F.G. (1986) - *Groundwater resource development*, Butterworth Heinemann Ltd., Oxford, England.
60. ISVLA (1963) - *Livellazione geometrica di precisione della città di Venezia*. *Comm. Studio Prov. Conserv. della Laguna e della città di Venezia*, IVSLA, Vol. II, Venezia.
61. KENT V.D., RIO D., MASSARI F., KUKLA G. & LANCI L. (2002) - *Emergence of Venice during the Pleistocene*. *Quaternary Science Review*, 21, 1719-1727.
62. LEONARDI P. (1968) - *Trattato di geologia*. Torino, UTET.
63. MINISTERO LAVORI PUBBLICI (1973) - *Pozzi Lido 1 e Marghera 1*. Comitato per lo studio dei

- Provvedimenti a Difesa della Città di Venezia, III gruppo di lavoro, fascicolo con allegati.
64. MINUZZO L. (1997) – *Carta delle unità geomorfologiche della provincia di Padova*. Padova. Rapporto inedito reperibile presso la Provincia di Padova.
65. MINUZZO L. (1999) – *Carta delle unità geomorfologiche della provincia di Venezia*. Padova. Edita a scala ridotta (1:100.000) in: PROVINCIA DI VENEZIA–*Programma di Previsione e Prevenzione in materia di Protezione Civile*. Venezia.
66. PROVINCIA DI PADOVA, ASSESSORATO TUTELA AMBIENTE (1998) – *La qualità biologica dei corsi d'acqua in provincia di Padova*. Rapporto inedito reperibile presso la Provincia di Padova.
67. PROVINCIA DI VENEZIA (1994) - *Studio geomorfologico e geopedologico del territorio provinciale di Venezia, parte meridionale*. A cura di BASSAN V., FAVERO V., VIANELLO G. e VITTURI A. Servizi Grafici Editoriali, Padova, 262 pp.
68. PROVINCIA DI VENEZIA (2000) - *La fauna ittica della Provincia di Venezia*. SannioPrint, Benevento, 174 pp.
69. RIZZETTO F., TOSI L., BONARDI M., FORNASIERO A., GAMBOLATI G., PUTTI M. & TEATINI P. (2002) - *Geomorphological Evolution of a Part of the Southern Catchment of the Venice Lagoon (Italy): The Zennare Basin*. Scientific Research and Safeguarding of Venice, CoRiLa Research Program 2001 Results (ed. by P. Campostrini), IVSLA Venezia, 217-228.
70. RIZZETTO F., TOSI L., CARBOGNIN L., BONARDI M. & TEATINI P. (2003) - *Geomorphological setting and related hydrogeological implications of the coastal plain south of the Venice Lagoon (Italy)*. IAHS Red Book (in press).
71. SALVIONI, G. (1957) - *I movimenti del suolo nell'Italia centro-settentrionale. Dati preliminari dedotti dalla comparazione di livellazioni*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, XVI(3), 325-366.
72. STROZZI T., TOSI L., CARBOGNIN L. WEGMÜLLER U. & GALGARO A. (1999) - *Monitoring Land Subsidence in the Euganean Geothermal Basin with Differential SAR Interferometry*. Proc. of 2nd Int. Workshop on ERS SAR Interferometry Fringe '99, Liège, Belgium, 10-12 Nov. 1999. Pubblicazione edita su CD.
73. STROZZI T., WEGMÜLLER T., TOSI L., BITELLI G. & SPRECKELS V. (2001) - *Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (2001) v. 67 n. 11, 1261-1270.
74. STROZZI T., TOSI L., WEGMÜLLER U., TEATINI P., CARBOGNIN L. & ROSSELLI R. (2002) - *Thematic and Land Subsidence Maps of the Lagoon of Venice from ERS SAR Interferometry* - Scientific Research and Safeguarding of Venice, CoRiLa Research Program 2001 Results (ed. by P. Campostrini), IVSLA Venezia, 345-356.
75. TEATINI P., GAMBOLATI G. & TOSI L. (1995) - *A New 3-D Non-linear Model of the Subsidence of Venice*. - In: Land Subsidence (ed. by F.B.J. Barends et al.), Publ. IAHS n. 234, Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, 353-361.
76. TOSI L. (1994) - *I sedimenti tardo quaternari dell'area litorale veneziana: analisi delle caratteristiche fisico-mecchaniche*. Geologia Tecnica e Ambientale, 2/94, 44-60.
77. TOSI L., CARBOGNIN L., TEATINI P., ROSSELLI R. & GASPARETTO STORI G. (2000) - *The ISES Project subsidence monitoring of the catchment basin south of the Venice Lagoon (Italy)*. In: Land Subsidence (ed. by L. Carbognin et al.), La Garangola, Padova (Italy), Proc. SISOLS Vol. II, 113-126.
78. TOSI L., CARBOGNIN L., TEATINI P., STROZZI T. & WEGMÜLLER U. (2002) - *Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations*. - Gephys. Res. Lett., vol. 29, 10.1029/2001 GL 013211.
79. TSIMPLIS M. N. & BAKER T. F. (2000) - *Sea level drop in the Mediterranean Sea: an indicator of deep water salinity and temperature changes?* - Gephys. Res. Lett., 27(12), 1731-1734.
80. UNIONE REGIONALE VENETA DELLE BONIFICHE DELLE IRRIGAZIONI E DEI MIGLIORAMENTI FONDIARI (1996) – *I Consorzi di Bonifica per il monitoraggio della qualità delle acque di irrigazione nella Regione Veneto*. Attività e risultati del triennio 1991 - 1993. Venezia.
81. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1964) – *Removal of Water and Rearrangement of Particles During the Compaction of Clayey Sediments-Review*. (By Meade R.H.). U.S.G.S Professional Paper 497-B, 23p, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C. 20402.
82. WEGMÜLLER U., STROZZI T. & TOSI L. (2000) - *Differential SAR Interferometry for land subsidence monitoring: methodology and examples*. In: Land Subsidence (ed. by L. Carbognin et al.), La Garangola, Padova (Italy), Proc. SISOLS Vol. II, 93-106.
83. ZANGHERI P. (2002) - *Vulnerabilità degli acquiferi della Provincia di Venezia. Indagini in corso e problemi aperti*. Atti del Convegno Nazionale “Le risorse idriche sotterranee: conoscerle per proteggerle” (Venezia, 14 -

15 novembre 2001). Regione del Veneto – Provincia di Venezia. Pubblicazione edita su CD.

84. ZANGHERI P. & AURIGHI M. (2001) – *Indagine idrogeologica del territorio provinciale – Rete di monitoraggio*. Pubblicazione edita su CD. Regione Veneto - Provincia di Venezia.
85. ZUNICA M. (1971) - *Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane. Le spiagge del Veneto*. Tipografia Antoniana, Padova, 144 pp.

FINITO DI STAMPARE NEL MESE DI FEBBRAIO 2003
PER CONTO DEL PROGETTO *ISES*
DA GRAFICHE ERREDICI - PADOVA