

# 17 INTRUSIONE SALINA

LUIGI TOSI<sup>1</sup>, ELOISA DI SPIO<sup>2</sup>, LAURA CARBOGNIN<sup>1</sup>, †GIOVANNI MARIA ZUPPI<sup>3</sup>, ANTONIO GALGARO<sup>4</sup>, PIETRO TEATINI<sup>1</sup>, VALENTINA BASSAN<sup>5</sup>, ANDREA VITTURI<sup>5</sup>

## 17.1. PREMessa

Fin dagli anni '970, le indagini realizzate dal III° Gruppo di lavoro "Geologia-Geofisica-Geotecnica" del "Comitato per lo studio dei Provvedimenti a Difesa della Città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali" (Ministero dei Lavori Pubblici) avevano evidenziato che l'intrusione salina interessava gran parte dell'area costiera perilagunare veneziana (BENVENUTI E NORINELLI, 1974). Lo studio di questo fenomeno, tuttavia, passò in secondo piano rispetto a quello di altri processi ritenuti all'epoca prioritari per la salvaguardia di Venezia e della sua laguna, quali la subsidenza e l' "acqua alta". Negli anni '990, grazie a una Unità Operativa del progetto Strategico CNR "Ambiente e Territorio" (1994-1997) coordinata dall'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, ISDGM, del CNR di Venezia (oggi Istituto di Scienze Marine) il problema dell'intrusione salina fu riconsiderato ed emerse una grave situazione idrologica, con particolare criticità nel settore veneziano meridionale (BIXIO *et al.*, 1998).

Dal canto suo la Provincia di Venezia, conscia dei gravi effetti che l'intrusione salina poteva avere nei confronti dell'ambiente e della fiorente attività agricola di tipo orticolo, con particolare riferimento al comune di Chioggia, diede avvio nel 1998 al progetto "Cuneo Salino" per esaminare la situazione dell'intrusione di acque saline nel sottosuolo (assieme alla subsidenza) nella parte meridionale del proprio territorio.

In considerazione degli studi che l'ISDGM aveva già condotto su tali problematiche, i due Enti decisero concordemente di convogliare le conoscenze e le risorse in un progetto comune<sup>6</sup>.

La Provincia di Venezia e l'Istituto CNR promossero quindi diversi incontri con gli altri Enti preposti alla gestione del territorio, per sensibilizzarli sulla gravità dei processi di intrusione salina e subsidenziale in atto, del conseguente impatto ambientale e socio-economico che potevano indurre, e per evidenziare la necessità di produrre una cartografia di base delle aree critiche e di istituire adeguate reti di monitoraggio. In breve tempo vi fu l'adesione di tutti i soggetti competenti (Province, Comuni, Consorzi di Bonifica, Magistrato alle Acque) per il settore meridionale delle Province di Venezia e Padova, mentre per quello settentrionale non vi furono espressioni di interesse, probabilmente per il minor impatto del processo, a quel tempo, sull'attività agricola-orticola. Alla fine degli anni '990 si avviarono quindi i due Progetti "Cuneo Salino" (1998-2000)<sup>7</sup> e "ISES" (1999-2002)<sup>8</sup> che rappresentarono un primo importante programma di indagini con lo scopo di approfondire le cono-

scenze 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, di determinare l'estensione del fenomeno e valutarne la criticità in relazione alle attività economiche di tipo agricolo-orticolo. Dopo aver ottenuto la "fotografia" della situazione idrogeologica, si passò all'individuazione di interventi specifici per contrastare il processo; ad esempio nell'ambito del Progetto BRENTA (2003-2004)<sup>9</sup>, furono condotte le indagini preliminari per la realizzazione della paratoia mobile alla foce del Brenta-Bacchiglione al fine di ostacolare la dispersione di acqua marina che risale con la marea le aste terminali dei fiumi e canali. Parallelamente si avviarono altri progetti di ricerca per ulteriori approfondimenti sulla dinamica del processo e per la realizzazione di modelli matematici specifici per la simulazione di interventi idonei a mitigare il processo della contaminazione salina negli acquiferi e nei suoli coltivati: il Progetto CORILA 3.10<sup>10</sup> (2004-2007) e il Progetto VECTOR- Cliven, Attività 3 -Morfodinamica<sup>11</sup> (2007-2010).

Il settore settentrionale, successivamente al Progetto Strategico CNR "Ambiente e Territorio", non fu inte-

<sup>1</sup> Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Venezia.

<sup>2</sup> Facoltà di Architettura, Università IUAV di Venezia.

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari di Venezia - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.

<sup>4</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.

<sup>5</sup> Provincia di Venezia - Servizio Geologico e Difesa del Suolo.

<sup>6</sup> A partire da questa collaborazione il Servizio Geologico della Provincia ha avviato una serie di iniziative con altri enti, mettendo così in atto sinergie tecniche ed economiche assai vantaggiose in un periodo di contrazione di risorse.

<sup>7</sup> Finanziato dalla Provincia di Venezia; col coordinamento scientifico ISMAR-CNR (già ISDGM).

<sup>8</sup> ISES, acronimo per Intrusione Salina E Subsidenza, variamente finanziato da 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; coordinamento scientifico ISMAR-CNR (già ISDGM).

<sup>9</sup> Finanziato dal Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione; coordinamento scientifico ISMAR-CNR.

<sup>10</sup> Finanziato dal CORILA (fondi MIUR); coordinatore operativo IDPA-CNR.

<sup>11</sup> Finanziato da CORILA (fondi MIUR); coordinamento scientifico dell'Attività 3 (Morfodinamica) Dip. IMAGE (Univ. Padova) e ISMAR-CNR.

ressato da ulteriori progetti di ricerca. Studi specifici rivolti a una maggiore conoscenza del fenomeno nel settore compreso tra il margine lagunare e il fiume Piave hanno avuto nuovo slancio a partire dal 2004 attraverso una serie di tesi di laurea e di dottorato dell'Università Ca' Foscari di Venezia e dell'Università degli Studi di Padova, e attraverso il progetto di ricerca dell'Università Ca' Foscari di Venezia finanziato con fondi PRIN 2005 "Gli acquiferi profondi della Pianura Padana come risorse regionali: acquitardi nella idrodinamica, generatrici di acque chimicamente e termicamente anomale, luogo idoneo per l'intrappolamento della CO<sub>2</sub> atmosferica".

Si segnalano, inoltre, per il settore centrale della laguna, alcune recenti ricerche riguardanti il sottosuolo del centro storico di Venezia, condotte dall'Università IUAV di Venezia, in cui si evidenzia la presenza della contaminazione salina all'interno degli acquiferi superficiali (ZEZZA, 2008; ZEZZA *et al.*, 2008).

## 17.2. INTRODUZIONE

L'area costiera è una zona di transizione dove i processi idrologici continentali interagiscono con quelli marini giocando un ruolo critico sui fattori che potenzialmente possono aumentare il rischio idrogeologico. Le aree costiere sono importanti risorse economiche e sociali, molto sensibili ai cambiamenti dell'ecosistema indotti sia da cause naturali che dalle attività antropiche. Qui spesso si possono innescare disastri ambientali, quale ad esempio quello della desertificazione che, essendo indotto prevalentemente dai cambiamenti climatici, è aggravato dall'innalzamento relativo del mare e dall'intrusione salina (CARBOGNIN *et al.*, 2004, 2010).

Nell'area costiera veneziana l'attività agricola-orticola, che è una delle più importanti fonti di economia locale, è messa in pericolo dal processo di contaminazione salina.

In questo capitolo vengono riportati i principali risultati ottenuti da una serie di studi sulla contaminazione salina nell'area perilagunare veneziana, realizzati nell'ambito di progetti di ricerca, ai quali ha partecipato in vario modo la Provincia di Venezia, che hanno avuto tra gli obiettivi quello applicativo del trasferimento delle conoscenze verso gli enti proposti alla gestione del territorio.

L'*area di studio settentrionale*, situata in parte del territorio nord-orientale della provincia, interessa l'area compresa tra il corso dei fiumi Piave e Sile tra gli abitati di Portograndi, Jesolo e Cavallino, per un'estensione complessiva di circa 157 km<sup>2</sup> (Fig. 17.1).

L'assetto attuale dell'entroterra, caratterizzato dalla presenza di paleoalvei, paleocanali lagunari, dossi fluviali, dune costiere e depressioni, è il risultato di processi evolutivi di erosione, sedimentazione, variazioni del livello del mare e subsidenza dovuti all'azione degli agenti morfologici fluviali, marini e antropici attivi durante il Quaternario. Sulla base delle caratteristiche altimetriche e morfologiche<sup>12</sup> è possi-

bile suddividere quest'area di studio in tre settori: i) la sinistra idrografica del Sile, costituito in prevalenza da terreni soggiacenti il livello medio mare (fino a -2 m s.l.m.); ii) tra i fiumi Piave e Sile, in cui tracce di antichi percorsi fluviali e lagunari si alternano a depressioni locali; iii) la fascia costiera, caratterizzata da cordoni di dune disposti parallelamente alla linea di spiaggia, sopraelevati rispetto alla pianura circostante (fino a 3 m) o spianati per scopi turistici o agricoli. I sedimenti superficiali sono costituiti essenzialmente da sabbie in corrispondenza dei principali percorsi fluviali, pensili rispetto alla pianura circostante, e da argille, limi, limi argillosi e torbe in corrispondenza dei terreni sottratti alla laguna nel corso dei secoli. Nelle aree bonificate<sup>13</sup>, soggiacenti al livello medio del mare, la superficie freatica viene mantenuta artificialmente depressa attraverso il sollevamento idraulico mediante idrovore, mentre le zone ad alta permeabilità (paleoalvei e paleocanali) favoriscono il processo di salinizzazione rendendo necessaria un'attenta valutazione delle possibili ricadute economiche sulle attività agricole e turistiche prevalenti nella zona.

L'*area di studio meridionale* è situata a sud-ovest e a sud della Laguna di Venezia, copre circa 400 km<sup>2</sup> di pianura costiera ed è attraversata da due importanti fiumi, il Brenta e il Bacchiglione, che scorrono in direzione NO-SE (Fig. 17.1). Buona parte del territorio giace sotto il livello del mare; quote ad esso superiori si riscontrano solo nel suo settore orientale, dove i depositi di origine eolica conservano ancora un debole rilievo.

La zona è caratterizzata da un'economia prevalentemente agricola e il mantenimento della superficie della falda al di sotto del piano campagna è garantito con bonifica meccanica. Ciò si realizza tramite una fitta rete di canali di scolo che convoglia le acque di drenaggio a numerosi impianti idrovori i quali sollevano le acque e le restituiscono in laguna.

Dal punto di vista geomorfologico e sedimentologico, nell'area esaminata sono presenti morfologie e depositi di ambiente alluvionale, deltizio e litoraneo<sup>14</sup>. In sintesi essa può essere suddivisa in due parti: il settore centro-occidentale, dove sono tuttora riconoscibili antichi dossi fluviali, paleoalvei e rare evidenze di cordoni litoranei spianati, e il settore orientale, caratterizzato dalla presenza di numerose tracce, o relitti, di vecchi cordoni dunosi. La presenza di estesi affioramenti di torbe, il cui spessore supera raramente i 2 m, è particolarmente rilevante nel settore meridionale, in corrispondenza delle zone che in passato furono sede di paludi e canneti (RIZZETTO *et al.*, 2003). In termini di altimetria, queste sono anche le aree più depresse (con quote fino a -4 m s.l.m.), essenzial-

<sup>12</sup> Vedi anche i capitoli 1 "Microrilievo", 7 "Geomorfologia" e 8 "Geologia".

<sup>13</sup> Vedi anche il capitolo 4 "Idrografia e bonifica idraulica".

<sup>14</sup> Vedi anche i capitoli 1 "Microrilievo", 7 "Geomorfologia" e 8 "Geologia".

mente a causa della subsidenza per perdita di massa conseguente all'ossidazione dei terreni organici (TEATINI *et al.*, 2005; TOSI *et al.*, 2009a)<sup>15</sup>.

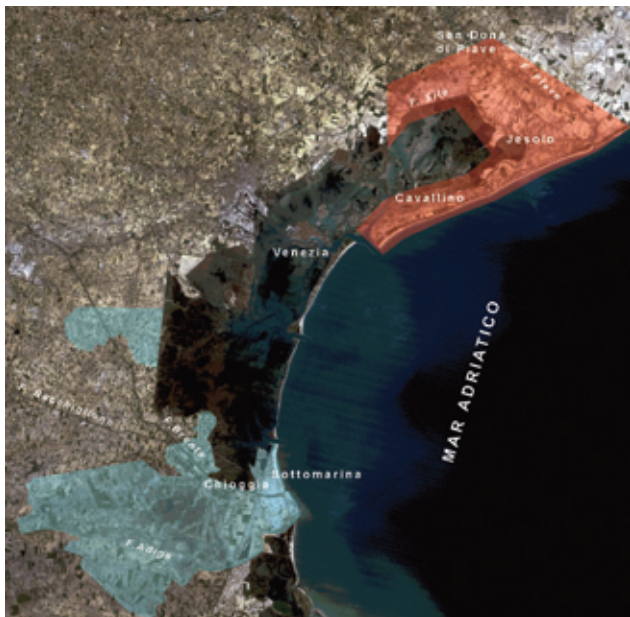


Fig. 17.1 - Ubicazione dell'area di studio: in rosso il settore settentrionale, in azzurro il settore meridionale della Provincia oggetti di studio.

### 17.3. INQUADRAMENTO DESCRITTIVO DEL PROCESSO D'INTRUSIONE SALINA

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.

Negli acquiferi l'acqua dolce, per la minor densità 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 e trascurando il mescolamento tra acque dolci e salate, 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;  $\rho_m$  = densità dell'acqua di mare (mediamente di  $1027 \text{ kg/m}^3$ , con circa  $42.000 \text{ mg/l}$  di contenuto salino);  $\rho_d$  = densità dell'acqua dolce di falda (circa  $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

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 sopraccitati si ottiene che  $H_i = 37 H_p$ , 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.

17.2a). Le frequenti eterogeneità e 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 il passaggio tra i due tipi di fluidi avviene gradualmente attraverso una zona di diffusione o di transizione, a salinità decrescente dal basso verso l'alto (Fig. 17.2b). 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. 17.2). Quando la superficie della falda si abbassa, per cause naturali o attività antropiche, l'acqua salata intrude maggiormente nell'acquifero sostituendosi all'acqua dolce (Fig. 17.3). L'acqua dolce più leggera si trova sopra a quella salata, ed è presente una zona di transizione 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.

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 dei pozzi (Fig. 17.3e). Emungimenti importanti d'acqua di falda sono infatti responsabili di un'inversione del naturale gradiente idraulico da monte a valle, con la conseguenza che il deflusso sotterraneo ha luogo dalla costa verso l'entroterra dove sono ubicati i pozzi. L'acqua salata ha quindi la possibilità di intrudere maggiormente nell'entroterra.

L'intrusione salina è un problema grave non solo per l'inquinamento delle acque sotterranee, ma anche perché può innescare, con la salinizzazione dei sedimenti, un collasso delle argille superficiali per la variazione del chimismo delle loro acque interstiziali e quindi una ulteriore subsidenza (CARBOGNIN & TOSI, 2003; TOSI *et al.*, 2009)<sup>16</sup>.

Come si vedrà in dettaglio più avanti, per le modalità con cui il processo di salinizzazione degli acquiferi si esplica nel comprensorio veneziano, il suo termine più idoneo sarebbe quello di "contaminazione salina". Quest'ultimo meglio descrive la complessità della

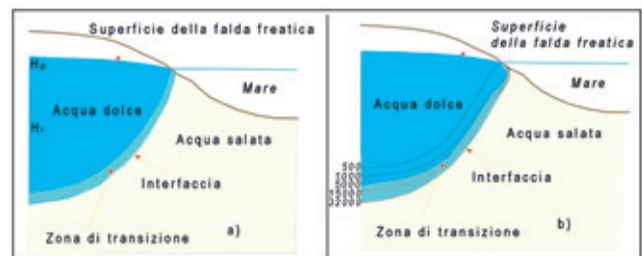


Fig. 17.2 - Schema teorico dei rapporti tra acqua dolce e acqua salata negli acquiferi costieri e variazione del tenore salino ( $\text{mg/l}$ ) nella zona di transizione (da CARBOGNIN & TOSI, 2003).

<sup>15</sup> Vedi anche il capitolo 6 "Suoli".

<sup>16</sup> Vedi anche il capitolo 16 "Subsidenza".

situazione idrogeologica veneziana dove più componenti contribuiscono a questo processo. Infatti, oltre alla componente di intrusione di acqua salata dovuta alla vicinanza del mare e della laguna (Fig. 17.3a-f), ne esistono altre come la dispersione nel sottosuolo dell'acqua marina che risale le foci fluviali (Fig. 17.3g) (DE FRANCO *et al.*, 2009; VIEZZOLI *et al.*, 2010) e la presenza di acque saline fossili.

#### 17.4. METODI DI INDAGINE

Lo studio del processo di contaminazione salina è stato condotto attraverso indagini geofisiche, litostratigrafiche, idrologiche, idrogeologiche, geochimiche, isotopiche e geomorfologiche.

In particolare, la caratterizzazione dell'estensione della contaminazione salina è stata realizzata con:

- SEV: il sondaggio elettrico verticale (SEV) è un metodo di indagine geofisica indiretta, di tipo elettrico attivo che, attraverso l'immissione di corrente continua nel terreno, permette di misurare la proprietà fisica della resistività di un terreno, legata a diversi parametri tra cui il livello di saturazione dei sedimenti e la quantità di ioni in soluzione presenti. Consiste in un dispositivo quadripolare allineato simmetricamente: attraverso due elettrodi esterni (o di corrente) A e B è immessa nel terreno la corrente fornita da un sistema energizzante mentre, con due elettrodi interni (o di potenziale) M e N, si misura la differenza di potenziale nel sottosuolo (d.d.p.). Dopo ogni misura, gli elettrodi di corrente (AB) sono progressivamente allontanati rispetto al centro del dispositivo per incrementare la profondità di penetrazione della corrente e quindi la profondità di investigazione (NORINELLI, 1986; REYNOLDS, 2001). La strumentazione utilizzata per acquisire la misura è nota come Georesistivimetro. L'interpretazione e la modellazione dei dati permettono la ricostruzione di un modello geoelettrico del sottosuolo.
- ERT: la tomografia elettrica (o tomografia della resistività elettrica ERT) è una tecnica geofisica volta alla determinazione della resistività elettrica del sottosuolo mediante l'impiego di una serie d'elettrodi (16, 32, 48 ecc.), disposti lungo un profilo a intervalli fissi, usati alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale. In questo modo è possibile acquisire una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle

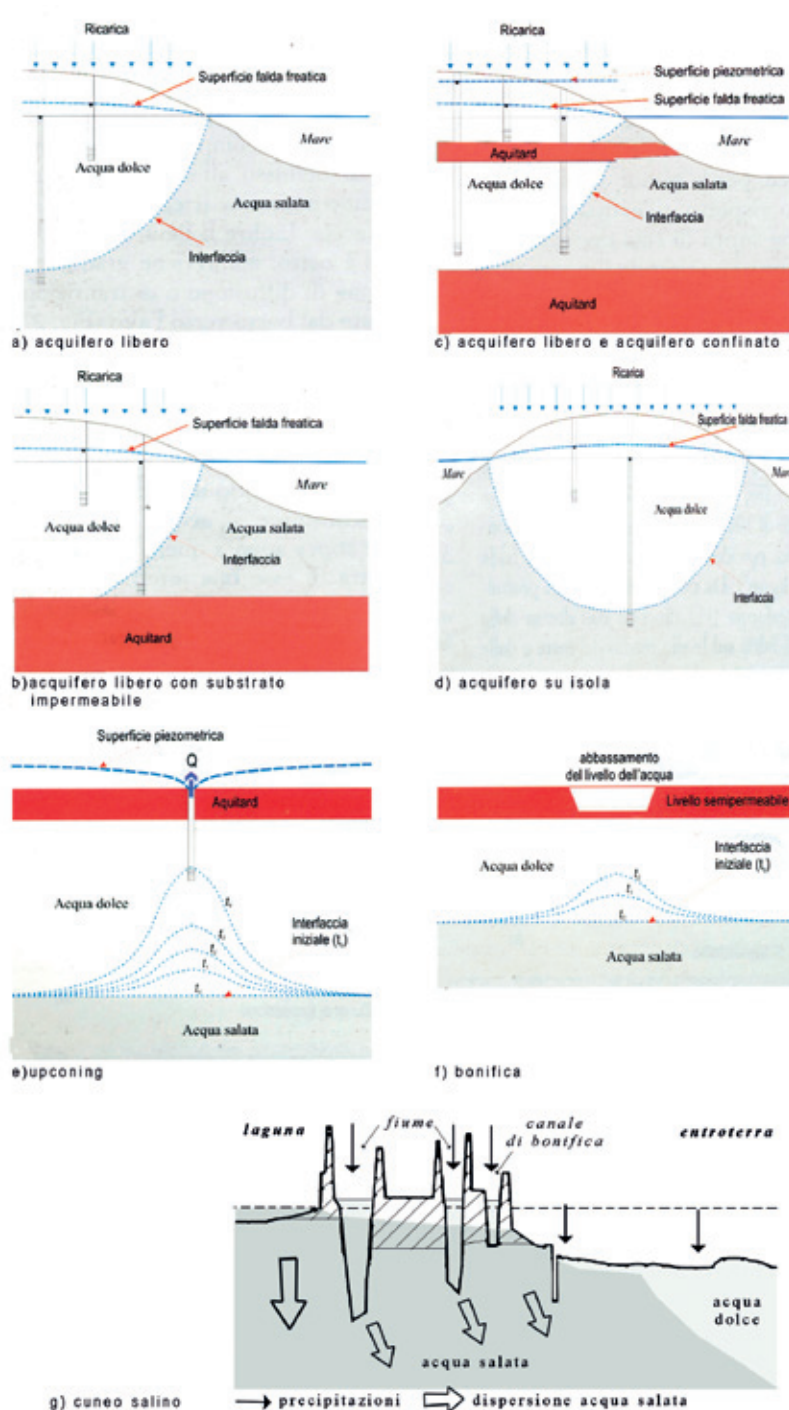


Fig. 17.3 - Rappresentazione schematica di diverse situazioni idrogeologiche naturali in aree costiere (a-d); risalita dell'interfaccia indotta da pompaggi e bonifica (e-f); dispersione di acqua salata per infiltrazione dall'alveo di fiumi pensili (g) (da CARBOGNIN & TOSI, 2003).

variazioni laterali che verticali (Tomografia Elettrica) lungo un allineamento. L'utilizzo appropriato di programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico e di ridurre in maniera iterativa la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati. La profondità d'esplorazione è mediamente 1/6 della lunghezza dello stendimento.

- Analisi delle acque: analisi chimiche e isotopiche

sono state eseguite su campioni di acqua raccolti nei piezometri presenti nelle due aree di studio individuate, per caratterizzarle dal punto di vista geochimico e per valutare la presenza di processi di diluizione e mescolamento. Profili di conducibilità elettrica, misure di alcalinità e di pH sono stati determinati *in situ*. I campioni di acqua sono stati filtrati a  $0,45 \mu$  e conservati in bottiglie di vetro o polietilene. Il contenuto in anioni ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) è stato determinato grazie ai metodi della cromatografia ionica, dell'elettroforesi e, relativamente ai cloruri, della potenziometria (Cozzi *et al.*, 1987). La concentrazione di cationi ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) ed elementi in traccia ( $\text{Br}^-$ ), invece, è stata quantificata attraverso i metodi della spettrometria di emissione atomica al plasma induttivo (ICPS-AES), di assorbimento atomico e di cromatografia ionica (BEATYI *et al.*, 1993). Le analisi isotopiche per gli isotopi stabili dell'idrogeno e dell'ossigeno ( $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) sono state eseguite utilizzando degli spettrometri di massa Finnigan (MAT 250 e Delta Plus). La composizione isotopica dell'idrogeno ( $\delta^2\text{H}$ ) è stata misurata per riduzione dell'acqua su zinco metallico, mentre quella dell'ossigeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) con la messa in equilibrio dell'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) a  $25^\circ\text{C}$ , in accordo con le procedure descritte in letteratura (CLARK e FRITZ, 1997; GONFIANTINI *et al.*, 1995). I risultati sono espressi quindi secondo la normalizzazione convenzionale V-SMOW e presentano un errore pari rispettivamente a  $\pm 1$  e  $\pm 0,1\%$ .

#### 17.4.1. Area di studio settentrionale

Nell'area di studio settentrionale si riscontra una scarsa disponibilità di punti di controllo per l'analisi delle acque sotterranee.

Sono stati considerati 15 piezometri della Provincia di Venezia, di profondità inferiore ai 6 m e completamente finestrati, e 5 piezometri di proprietà della società Alisea, installati a profondità comprese tra 6 m e 17,5 m dal piano campagna, insistenti sull'acquifero freatico superficiale<sup>17</sup> (Fig. 17.4).

Al fine di fornire una prima valutazione del grado di salinizzazione delle rete idrografica superficiale e delle sue relazioni con le oscillazioni dei livelli freatici e di marea, misure di conducibilità in superficie e al fondo sono state ripetute nel periodo agosto 2004-maggio 2005 in circa 60 punti di misura lungo i fiumi, canali e scoli, la cui batimetria, a eccezione dei due corsi d'acqua principali (Sile e Piave), raramente supera i 2 m di profondità (Fig. 17.5). Sono stati eseguiti 38 nuovi SEV con stendimento AB pari a 130 m a completamento di 34 SEV, opportunamente revisionati e rielaborati, realizzati negli anni '970-'980 dall'Università degli Studi di Padova, caratterizzati da stendimenti AB di 1000 m, (Fig. 17.6). La profondità di indagine raggiunta si è attestata, nel primo caso, intorno ai 25-30 m, nel secondo sui 300 m circa, con valori massimi di 800 m.

Due pozzi Agip (Eraclea1 e Jesolo1), spinti fino a

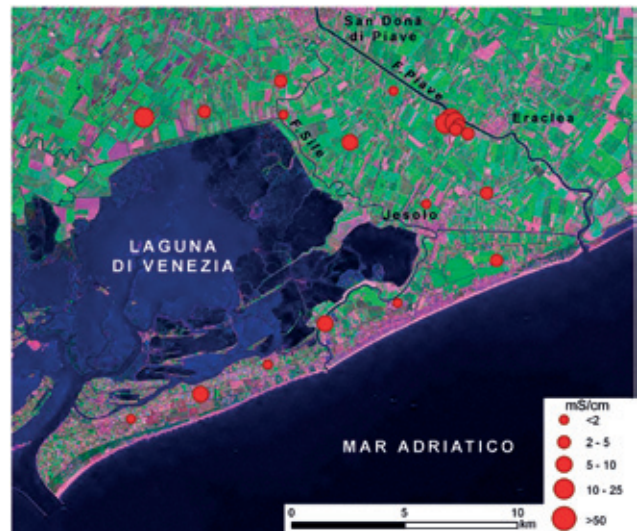


Fig. 17.4 - Rete di monitoraggio dei piezometri nell'area di studio settentrionale con indicazione della conducibilità elettrica espressa in mS/cm rilevata *in situ*.

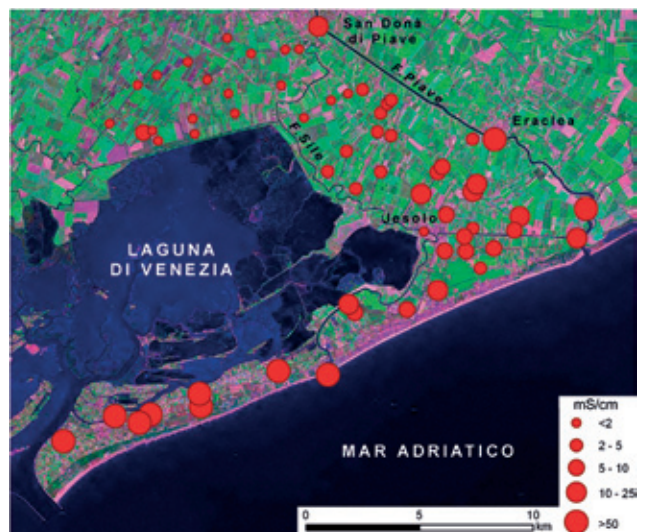


Fig. 17.5 - Rete di monitoraggio delle acque superficiali nell'area di studio settentrionale con un'indicazione della conducibilità elettrica espressa in mS/cm rilevata *in situ*.



Fig. 17.6 - Ubicazione dei SEV (Sondaggi Elettrici Verticali) nell'area di studio settentrionale.

<sup>17</sup>Vedi anche il capitolo 12 "Idrogeologia".

oltre 2000 m di profondità, sono stati considerati per la taratura delle indagini geoelettriche (AGIP, 1994). La ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo, completata dall'analisi di 45 stratigrafie della Provincia di Venezia<sup>18</sup>, con profondità non superiore ai 6 m, è essenziale per una corretta interpretazione dei dati geofisici (profili verticali di conducibilità e SEV) e per la modellazione idrogeologica del terreno. In particolare, le sezioni litostratigrafiche del settore centrale di quest'area di studio, con direzione prevalente E-O, mostrano come l'alveo del Piave insista su terreni permeabili, veicolo di dispersione delle acque dal fiume verso l'entroterra, mentre quelle orientate NNO-SSE rivelano l'estrema variabilità litologica dell'area, dovuta all'alternanza di lenti permeabili e livelli impermeabili. Il litorale, invece, è costituito essenzialmente da uno spesso accumulo di sabbie (v. Fig. 17.11).

#### 17.4.2. Area di studio meridionale

Ci si è avvalsi di circa 700 prove geognostiche esistenti (dati stratigrafici e prove penetrometriche)<sup>19</sup>, integrate da 25 nuovi sondaggi a carotaggio continuo terebrati a profondità variabile (due a 100 m, uno a 50 m e gli altri a profondità comprese tra 15 e 25 m) in corrispondenza di alcuni SEV per definire i litotipi principali e per la calibrazione delle indagini geoelettriche. Sono stati censiti circa 400 pozzi/piezometri, tra i quali sono stati selezionati quelli più idonei alle misure del tenore salino. Sono stati elaborati 257 SEV (Fig. 17.7), di cui 170 di nuova esecuzione, con stendimento medio AB=400 m. La profondità di indagine è risultata variabile da 70 a 100 m. Per ottenere una maggior risoluzione, in situazioni anomale sono state effettuate anche alcune tomografie elettriche.

Al termine dello studio preliminare si è istituita una rete di monitoraggio (Rete ISES) della piezometria e del tenore salino nelle acque di falda, composta da 96 punti di misura: 71 pozzi/piezometri sono stati selezionati tra quelli censiti e 25 corrispondono a quelli di nuova realizzazione (Fig. 17.8).

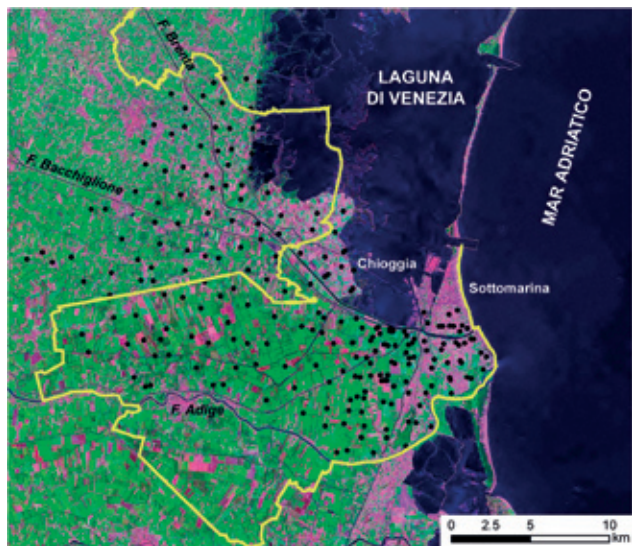


Fig. 17.7 - Ubicazione dei SEV nell'area di studio meridionale.

Parallelamente sono state eseguite misure di salinità delle acque superficiali (fiumi, canali, scoli) in 400 siti, per verificare la connessione tra le acque della rete scolante e della falda freatica e per monitorare la risalita della marea lungo le aste terminali di fiumi. Allo scopo di mantenere sotto controllo questi aspetti, è stata quindi allestita una rete di monitoraggio composta da 144 punti di misura (Fig. 17.9).

#### 17.5. ANALISI DELL'ESTENSIONE DEL PROCESSO

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

##### 17.5.1. Sezioni interpretative

Le sezioni interpretative del processo di contaminazione salina sono state effettuate combinando tra loro le indagini geoelettriche (SEV, ERT), litostratigrafiche, idrogeologiche e della conducibilità delle acque superficiali e dei livelli freatici.

Data la complessità del processo di salinizzazione, cui contribuiscono molteplici cause, e data la struttura del sottosuolo, caratterizzata da un'elevata variabilità litologica laterale e verticale anche a distanze ravvicinate, si è resa necessaria l'adozione di alcuni criteri di classificazione, riportati in una legenda appositamente elaborata, in grado di sintetizzare la situazione emersa dalle indagini multidisciplinari.

Il problema principale affrontato nella fase interpretativa è consistito nella discriminazione dei livelli limo-argillosi dalle falde contenenti acque a tenori salini medio-bassi. Infatti, le indagini geoelettriche, che costituiscono la principale fonte di informazioni per la realizzazione delle sezioni, forniscono una risposta elettrostratigrafica analoga relativamente a entrambe le situazioni indicate. 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.

La classificazione del tenore salino delle acque è stata condotta facendo riferimento a quella adottata nel Progetto ISES per l'uso delle acque a scopo agricolo-orticolo (CARBOGNIN & TOSI, 2003), in funzione, pertanto, dei limiti accettabili per le principali colture (Tab. 17.1).

Si è quindi stabilito di classificare le acque in:

- salate, quelle che presentano valori di conducibilità elettrica, misurati in pozzi e canali, superiori a 5 mS/cm e resistività elettrica del terreno inferiore a 3-4,5 ohm·m;
- salmastre, quelle che presentano valori di conducibilità elettrica dell'acqua dei pozzi e canali compresa tra 5 e 2 mS/cm e resistività elettrica del terreno compresa tra 3-4,5 e 15 ohm·m;

<sup>18</sup> Vedi anche il capitolo 5 "Banche dati".

<sup>19</sup> Vedi anche il capitolo 5 "Banche dati".

Conducibilità elettrica	Qualità dell'acqua		Grado di utilizzazione irrigua dell'acqua
0.2-1	da bassa a media	Buona	tutte le piante
1.001-2	medio-alta	Tollerabile	piante meno tolleranti la salinità
2.001-3	alta	Dubbia	piante più tolleranti la salinità in condizioni di buon drenaggio
3,001-5	molto alta	Inutilizzabile	non adatta
5,001-16			

Tab. 17.1 - Valori di conducibilità elettrica (mS/cm) suddivisi per classi in funzione dell'attitudine del loro utilizzo per uso irriguo (da CARBOGNIN & TOSI, 2003).

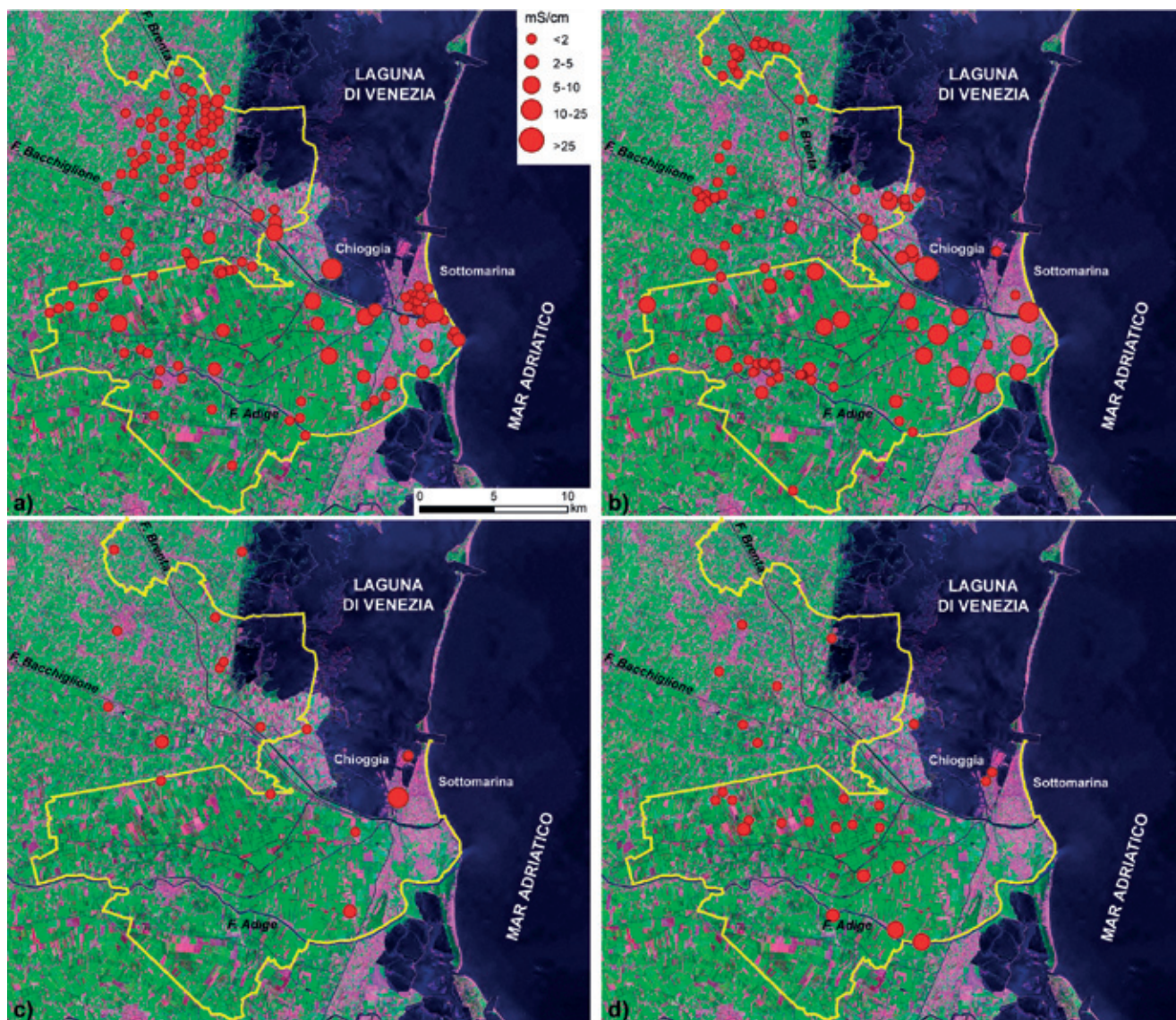


Fig. 17.8 - Rete di monitoraggio dei pozzi nel settore meridionale della provincia insistenti su acquiferi posti a diversa profondità dal piano campagna: a) 0-10 m; b) 10-50 m; c) 50-150 m; d) 150-300 m con un'indicazione della conducibilità elettrica espressa in mS/cm rilevata *in situ*.

- dolci, quelle con conducibilità elettrica, misurata in pozzi e canali, inferiore a 2 mS/cm e resistività elettrica del terreno superiore a 15 ohm·m.

Le acque classificate come salmastre hanno un tenore salino normalmente superiore a 800-1000 mg/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 35.000 mg/l). Considerando invece il solo contenuto in cloruri, le acque possono essere definite salate quando il cloro è presente in quantità uguali o maggiori a 10.000 mg/l, dolci se è uguale o inferiore a 300 mg/l e salmastre nella fascia compresa tra questi due estremi (OUDE ESSINK, 2001; VANDENBOHEDE *et al.*, 2006).

Si ricorda che acque con tenori di NaCl superiori

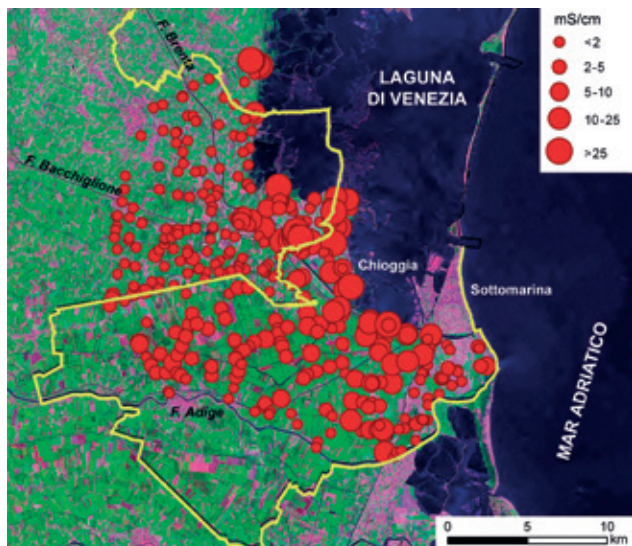


Fig. 17.9 - Rete di monitoraggio delle acque nell'area di studio meridionale con un'indicazione della conducibilità elettrica espressa in mS/cm rilevata *in situ*.

a 2000 mg/l non sono utilizzabili a scopi agricoli nell'area di indagine.

#### 17.5.2. Settore settentrionale

Nell'area settentrionale indagata, i valori di conducibilità elettrica acquisiti nel 2005 nei piezometri a disposizione mostrano variazioni significative sia con

la profondità sia con la distribuzione areale. Solo in cinque piezometri situati in prossimità del fiume Sile e delle dune costiere il livello di salinità dell'acqua risulta costante con la profondità e tipico di acque dolci (valori  $< 1$  mS/cm, P5, Fig. 17.10a), mentre le acque campionate negli altri punti di osservazione, in presenza di paleoalvei, in prossimità del fiume Piave e nelle zone interdunali, rivelano alti valori di conducibilità elettrica, crescenti con la profondità e variabili tra 3,5 e 12,8 mS/cm (P2-P7-P1, Fig. 17.10b-c-d). Inoltre, le misure di conducibilità effettuate nel periodo agosto 2004-maggio 2005 lungo i fiumi Piave e Sile permettono di osservare l'avanzamento dell'intrusione salina dal mare verso l'entroterra e di valutarne l'estensione sul letto dei fiumi. I due corsi d'acqua hanno un comportamento differente: lungo l'alveo del Piave il cuneo di intrusione risale fino a circa 20 km dalla foce (San Donà di Piave), facilitato dalla presenza, a Eraclea, di una depressione topografica in grado di favorire la propagazione e la dispersione delle acque salate nei territori circostanti; lungo il Sile, invece, la contaminazione, presente alla foce, è efficacemente attenuata dalla dispersione di acqua dolce proveniente dalle sorgenti di pianura che alimentano il fiume stesso (Di Sipiò *et al.*, 2008).

La rete idrografica superficiale mostra, invece, un progressivo incremento dei valori di conducibilità elettrica avvicinandosi alla costa: in sinistra Sile, tra gli abitati

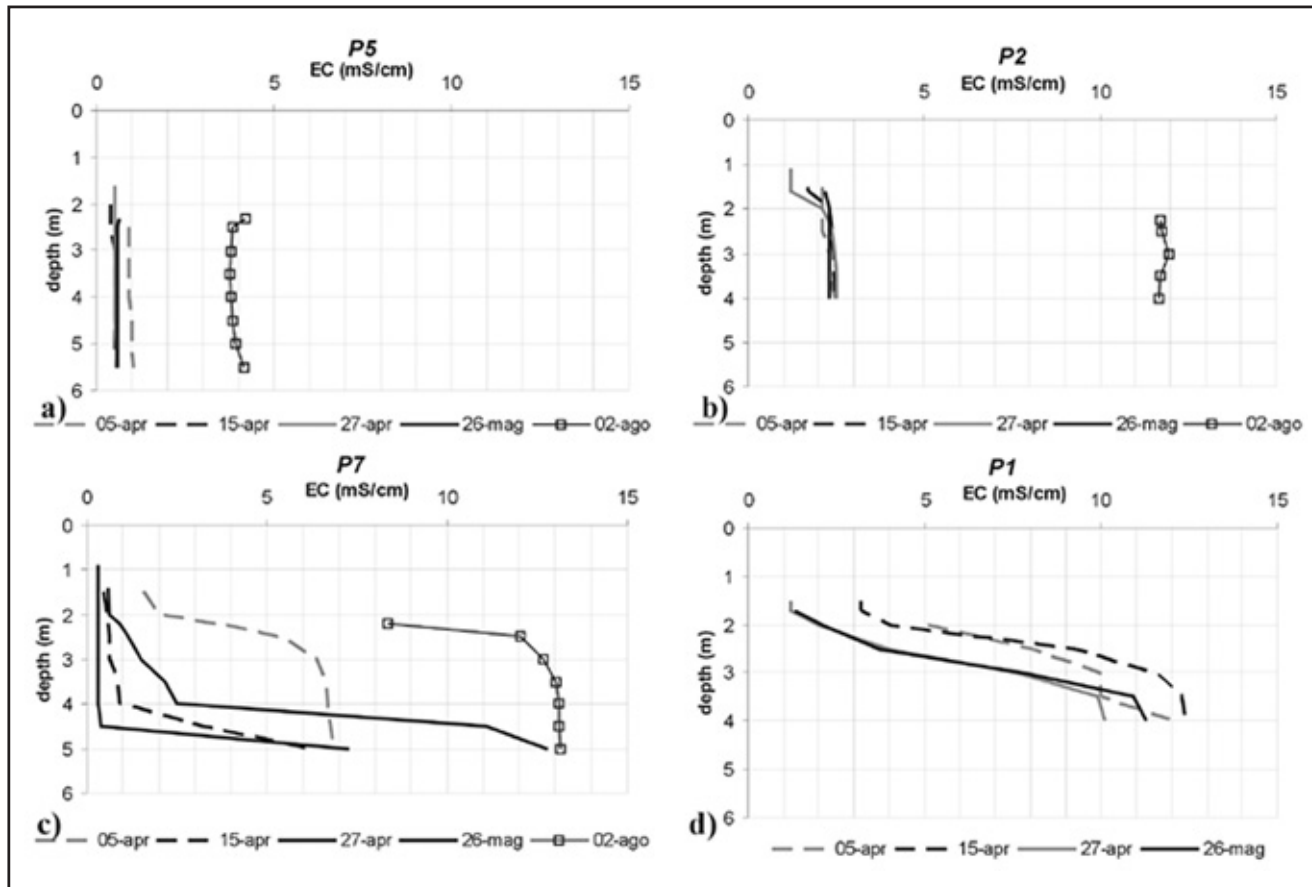


Fig. 17.10 - Valori di conducibilità elettrica per piezometri caratterizzati da basso (P5) ed elevato contenuto in sali (da Di Sipiò *et al.*, 2008).



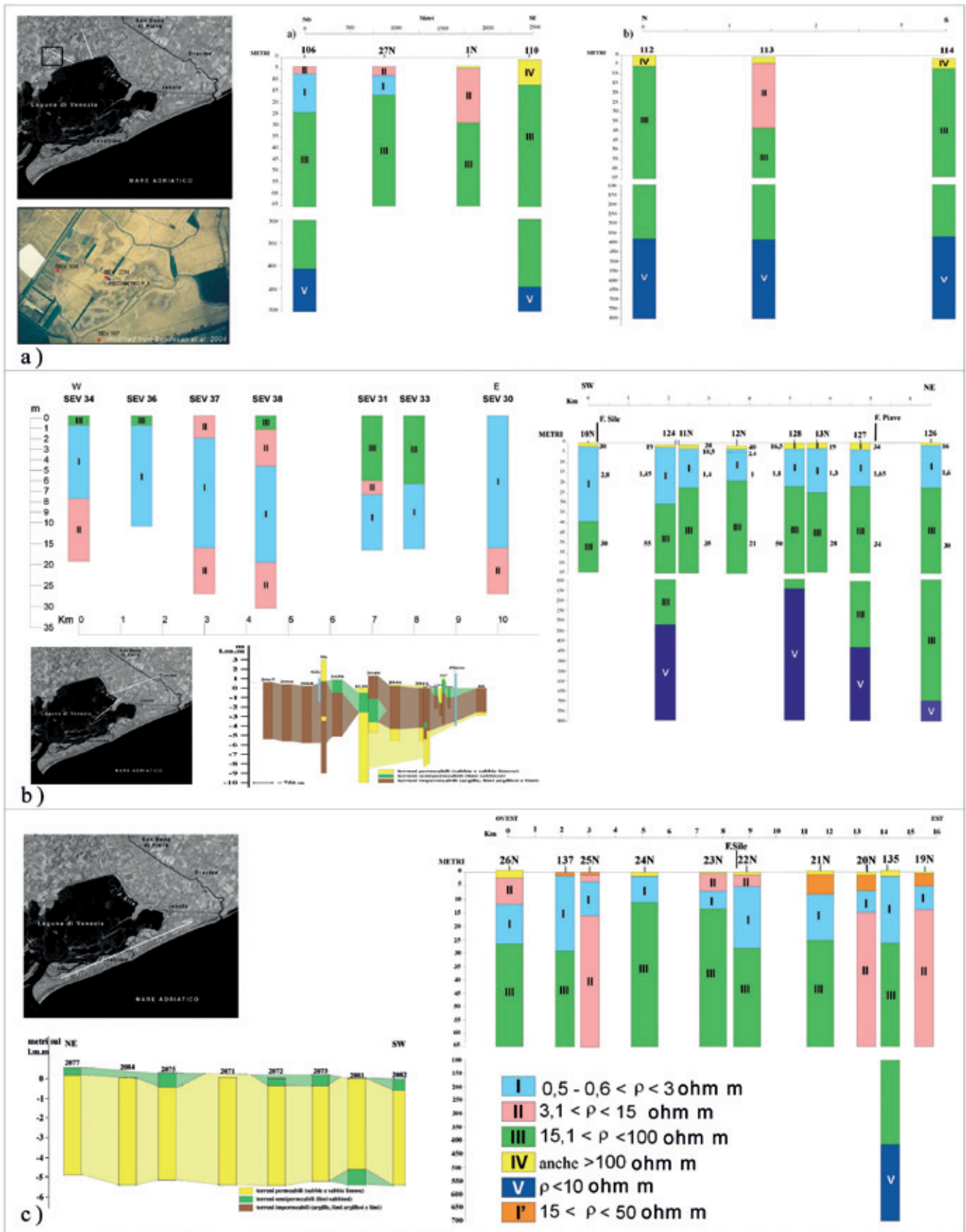


Fig. 17.11 - Sezioni elettrostratigrafiche per: a) territorio in sinistra idrografica del Sile (immagine satellitare dei paleovalvi da BONDAN *et al.*, 2004a); b) settore compreso tra i corsi del fiume Piave e Sile; c) fascia costiera.

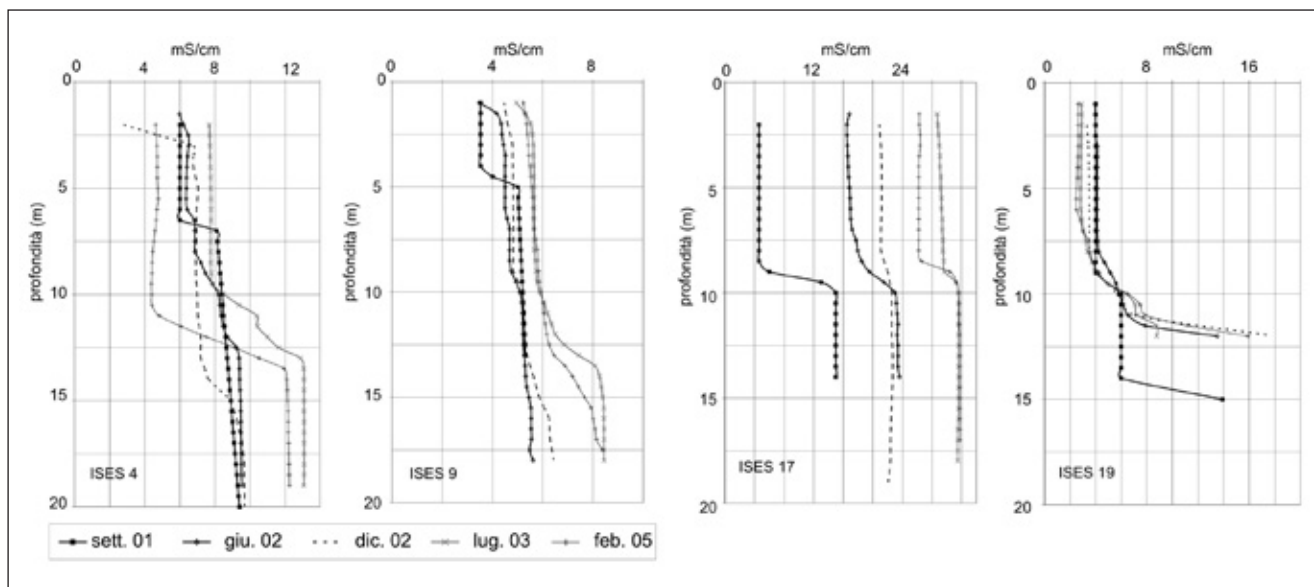


Fig. 17.12 - Variazioni stagionali della conducibilità elettrica (mS/cm) misurate in alcuni pozzi dell'area di studio meridionale (da CARBOGNIN *et al.*, 2005). L'ubicazione dei piezometri è riportata in Fig. 17.13.

di Portegrandi e Jesolo, i valori, generalmente inferiori a 2 mS/cm, indicano un basso tenore salino all'interno dei canali e una buona qualità delle acque; tra i corsi dei fiumi Piave e Sile, alti valori di conducibilità, compresi tra 2 e 15 mS/cm, sono tipici di un significativo deterioramento della qualità idrica delle acque, mentre lungo la fascia costiera la conducibilità elettrica supera spesso 25 mS/cm e le acque superficiali risultano inutilizzabili a fini irrigui (DI SPIO *et al.*, 2008). La stessa suddivisione della contaminazione tra il settore settentrionale, quello centrale e quello costiero indagati sembra confermata dai risultati ottenuti dalle indagini geofisiche. I profili elettrostratigrafici ottenuti dalla modellazione diretta e inversa dei dati acquisiti *in situ* rivelano la presenza di due substrati conduttivi: il primo, esteso fino a una profondità massima di circa 30 m, dovuto al fenomeno di intrusione salina superficiale; il secondo, a profondità di 400-800 m, legato alla presenza a grande profondità di acque saline fossili (BENVENUTI *et al.*, 1973; BENVENUTI *et al.*, 1974; DI SPIO *et al.*, 2005, 2006).

Il substrato conduttivo superficiale (resistività < 3 ohm·m), rappresentativo di un sottosuolo contaminato da acqua salata, in accordo con i dati di conducibilità elettrica e con i risultati delle analisi chimiche, è individuato in tutta l'area considerata. In sinistra idrografica del Sile, dove il fiume scorre parallelamente alla laguna e il territorio è soggiacente rispetto al livello medio del mare, lo strato altamente conduttivo si riscontra in corrispondenza di antichi canali lagunari o percorsi fluviali, come in prossimità del piezometro P1 (Fig. 17.11a), mentre, allontanandosi progressivamente dal margine lagunare, tende a essere sostituito da un livello più resistivo, associato alla presenza di materiali argilloso-limosi a basso tenore salino. Nel settore centrale, tra i fiumi Piave e Sile, bassi valori di resistività indicano in tutta l'area la presenza di terreni

interessati da falde a elevato tenore salino. Il letto di questo elettrostrato conduttivo può raggiungere i 35 m di profondità (Fig. 17.11b). L'elevato contenuto in sali è dovuto alla concomitanza di diverse condizioni critiche, quali la vicinanza delle laguna; la soggiacenza di estesi territori rispetto al livello medio del mare; la dispersione di acqua marina dal fiume Piave, pensile sul territorio, durante la fase crescente di marea e nei periodi di magra; la presenza di paleoalvei e paleocanali lagunari ad alta permeabilità, che costituiscono vettori preferenziali di trasmissione di acque ad alto tenore salino; l'attività di bonifica idraulica, che richiama in superficie acqua salata dalle zone più profonde; il fenomeno della subsidenza.

Nella fascia costiera, costituita principalmente da depositi sabbiosi, lo strato conduttivo mostra che il processo di salinizzazione delle acque di falda interessa i primi 25-35 m del sottosuolo. Talvolta, in superficie, si registrano valori di resistività compresi tra 15 e 50 ohm·m, corrispondenti a lenti di acqua dolce ospitate in apparati dunari costieri (Fig. 17.11c).

### 17.5.3. Settore meridionale

Nel settore meridionale, le analisi di conducibilità elettrica nei piezometri evidenziano l'esistenza di una oscillazione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata in corrispondenza delle variazioni idrauliche e meteorologiche stagionali (Fig. 17.12).

Come detto in precedenza, combinando tra loro i risultati degli studi settoriali (indagini geoelettriche, litostratigrafiche e idrogeologiche), sono state elaborate diverse sezioni interpretative del processo di contaminazione salina al fine di fornire un quadro complessivo del fenomeno in esame. Alcuni esempi sono riportati in Fig. 17.13.

Il profilo della *Sezione 1* ha direzione Est-Ovest e attraversa la stretta lingua di terra che separa la

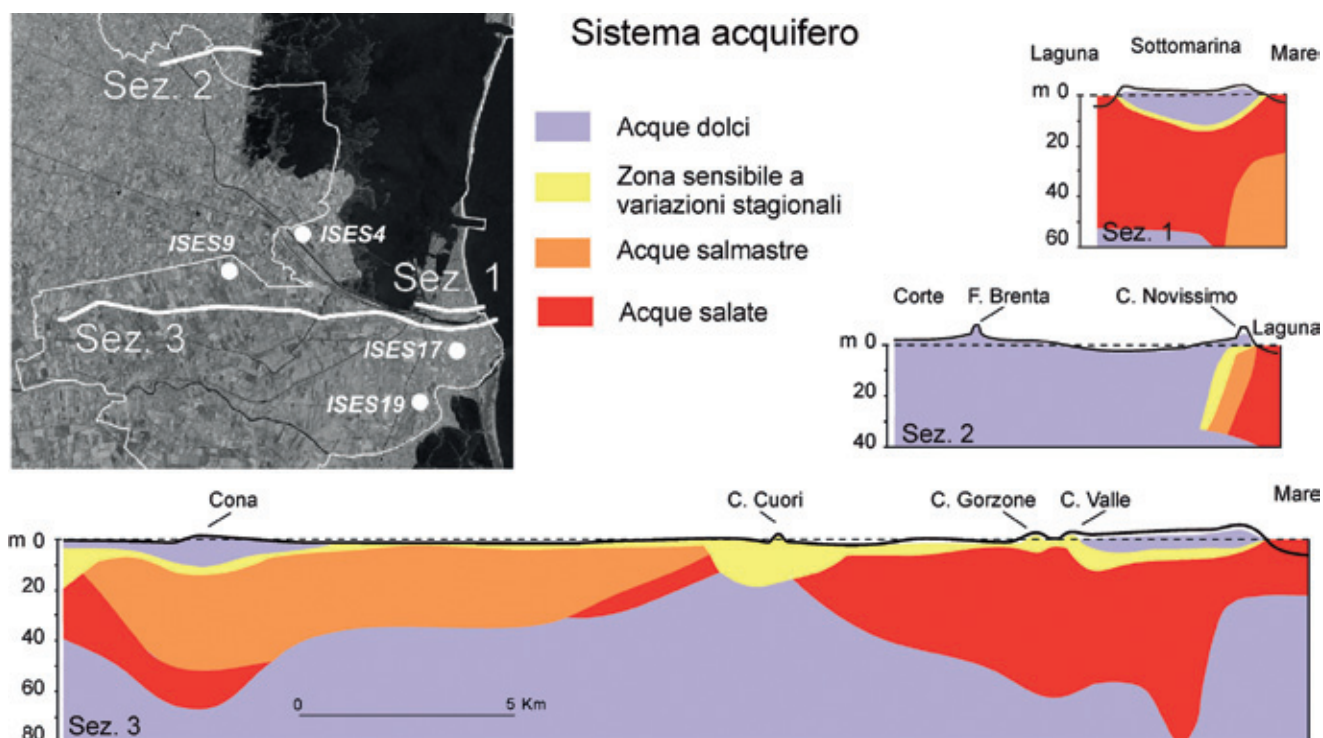


Fig. 17.13 - Sezioni rappresentative della contaminazione salina nell'area di studio meridionale con ubicazione dei piezometri riportati in Fig. 17.12.

laguna dal mare, passando attraverso la località di Brondolo.

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 m, e in pozzi e in piezometri superficiali, hanno indicato la presenza di acque dolci. Trasversalmente al cordone dune di Sottomarina, GALGARO *et al.* (2000) hanno realizzato un rilievo Georadar sperimentale che ha consentito di individuare l'interfaccia acqua dolce-salata e la sua relazione con le strutture geomorfologiche sepolte come le antiche linee di costa.

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 dal mare che dalla laguna.

La *Sezione 2* mostra come nell'area settentrionale la propagazione del cuneo salino è decisamente limitata, molto probabilmente per l'alimentazione delle falde da parte dei fiumi Brenta e Bacchiglione.

La *Sezione 3* ha origine a ovest di Cona e termina sulla costa, immediatamente a sud della foce del fiume Brenta. Gran parte del territorio in corrispondenza di questa sezione è contaminato da acqua salata o salmastra. Nella estremità occidentale 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 costa attuale.

Il Canale dei Cuori, nel settore centrale di quest'area, in corrispondenza dell'estremità meridionale del Bacino Zennare, assume stagionalmente un ruolo positivo nella mitigazione del processo di contaminazione salina, in concomitanza al rilascio di acque dolci per l'irrigazione (Sez. 3).

Spostandosi già di poco verso la parte orientale della sezione ritorna prepotentemente la presenza di acqua salina che è da attribuire senza dubbio 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 e Gorzone contribuisce ad aggravare la già preoccupante situazione della fascia costiera.

A 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 e ai paleocordoni litoranei, la falda freatica dolce può raggiungere 10 m di spessore e garantire così un buon franco di coltivazione, malgrado in alcune aree le oscillazioni stagionali siano di entità non trascurabili.

A 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.

#### 17.5.4. Area di studio settentrionale

L'interpretazione complessiva dei dati ottenuti sia dall'analisi dei *logs* di conducibilità sia dall'elaborazione dei SEV permette di tracciare una mappa di delimitazione della contaminazione salina superficiale che include i primi 25-30 m del sottosuolo (Fig. 17.14). L'area interessata da acque ad alto tenore salino e quindi potenzialmente critica corrisponde alla fascia costiera e al territorio compreso tra il corso dei due fiumi principali. Un'elevata salinizzazione del territorio si registra anche in corrispondenza di paleoalvei e paleocanali lagunari, che agiscono nel sottosuolo come veri e propri vettori preferenziali di movimento per le acque ad alto tenore salino. Le aree a bassa salinizzazione o esenti da contaminazione salina, invece, legate alla presenza nel sottosuolo di acque dolci di

origine continentale con bassi valori di conducibilità elettrica, coincidono con i terreni situati all'estremità settentrionale dell'area di studio e, inoltre, con le aree circoscritte all'interno delle zone a elevata salinizzazione in prossimità del fiume Sile o lungo le dune costiere. Infine, la zona di transizione, che collega le prime due, è interessata da terreni saturi d'acqua a medio tenore salino, comunque non utilizzabile a scopo irriguo.

Semplificando, lo schema di diffusione delle acque ad alto tenore salino dall'alveo del Piave lungo la direttrice NE-SO (Fig. 17.15) individua un terreno di copertura (A) non interessato da salinizzazione. La fascia a bassa resistività, legata alla diffusione delle acque ad alto tenore salino (B), a profondità variabile tra 3-5 m fino a 20-35 m dal piano campagna, è caratterizzata i) dalla presenza delle strutture sepolte degli antichi percorsi fluviali e dei paleocanali lagunari, ii) dagli acquiferi superficiali, iii) dal contatto diretto con l'alveo del Piave, iv) dall'assenza di comunicazione diretta con l'alveo del Sile, inserito in sedimenti imper-

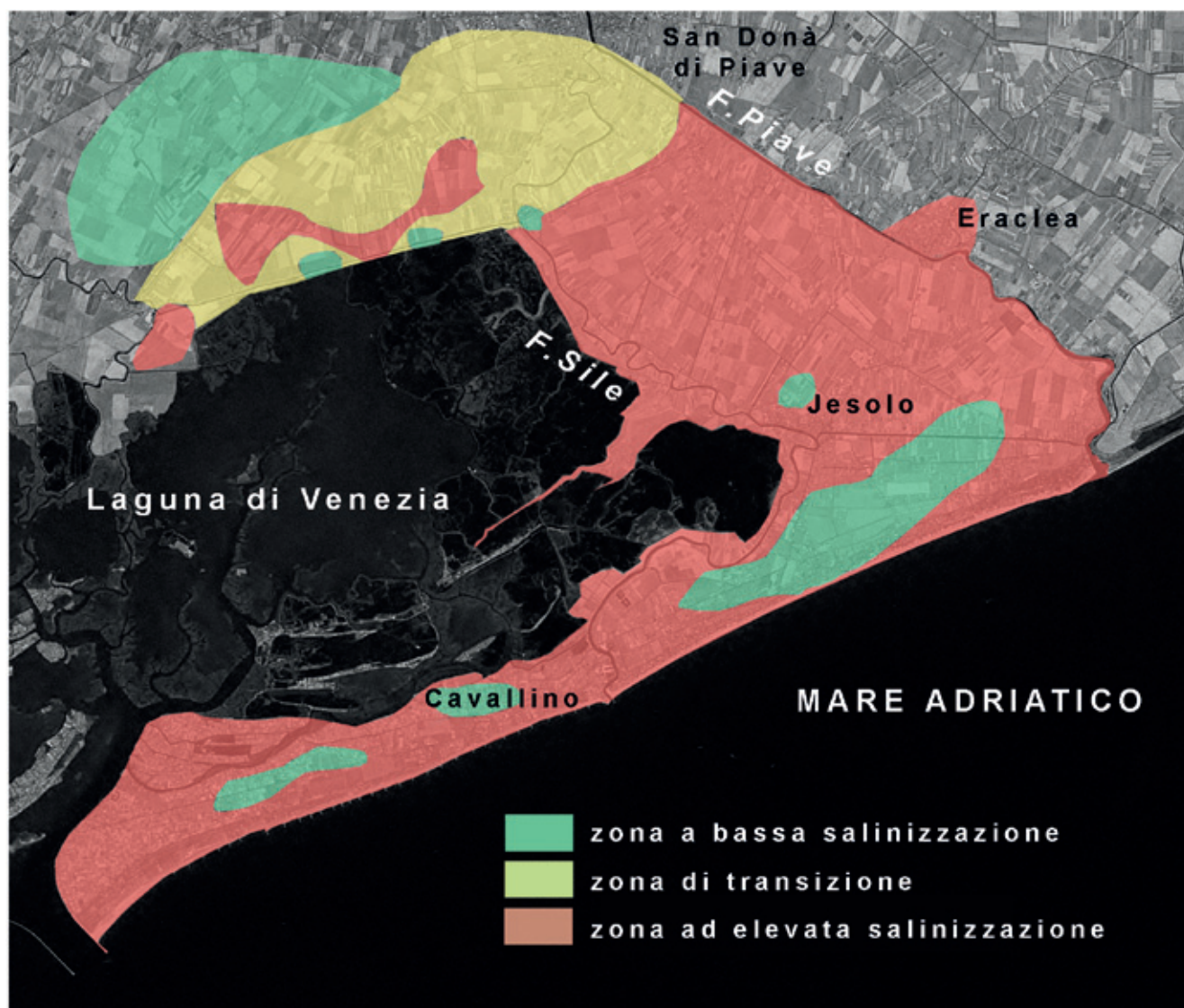


Fig. 17.14 - Mappa di delimitazione della contaminazione salina superficiale nell'area di studio settentrionale.

meabili, v) dalla comunicazione diretta con la laguna. La presenza dell'elettrostrato conduttivo può essere dovuta sia al contatto diretto con la laguna sia alla dispersione diretta delle acque del cuneo salino dal letto del Piave. Pertanto tutta l'area è classificata ad alto grado di salinizzazione.

Il tetto dell'elettrostrato conduttivo superficiale si trova a 2-4 m di profondità dal piano campagna in sinistra idrografica del Sile (settore settentrionale) fino a raggiungere 8-9 m di profondità allontanandosi progressivamente dal margine lagunare in direzione nord; nel settore compreso tra Piave e laguna, invece, si attesta generalmente a 2 m dalla superficie; lungo la costa, infine, è rilevato a 10 m di profondità in corrispondenza dei cordoni dunari, dove la presenza di lenti di acqua dolce con spessore variabile da 2 a 8 m determina l'approfondimento delle acque ad alto tenore salino di provenienza marina. In direzione SO, verso Cavallino, il tetto dell'elettrostrato a bassa resistività torna prossimo alla superficie del piano campagna (-2 m).

Le analisi geochemiche-isotopiche delle acque condotte su campioni d'acqua prelevati nei piezometri a disposizione confermano l'esistenza del fenomeno di intrusione salina proveniente da mare e da laguna, confermando i risultati raggiunti dalla metodologia geofisica. La composizione delle acque di falda è estremamente varia e si possono distinguere diverse facies idrogeochemiche: acque arricchite in ioni  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  legate al drenaggio del Sile; acque cloruro solfato magnesiate tipiche di acquiferi sospesi in dune sabbiose e di acquiferi freatici in sinistra idrografica del Sile; acque di mescolamento con valori di  $\text{Cl}^-$  compresi tra 7 e 14 mg/l trovate nei piezometri situati in destra idrografica del Piave; acque a prevalenza di ioni  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ , indicative di un'elevata contaminazione salina. In sintesi, è possibile riconoscere un arricchimento in cloruri nelle acque di falda prelevate in prossimità del fiume Piave, in corrispondenza di antichi canali lagunari e paleoalvei in grado di eludere la barriera idraulica costituita dal Sile, nonché nella zona costiera, negli acquiferi superficiali sabbiosi non ospitati all'interno di dune sabbiose. Mar Adriatico e Laguna di Venezia si confermano le principali fonti di contaminazione.

Le analisi isotopiche (Fig. 17.16), d'altro canto, confermano l'evoluzione chimica delle acque da termini prettamente marini verso acque di tipo continentale (ZUPPI & SACCHI, 2004). Si distinguono acque di origine alpina, soggette a ricarica sotterranea, in pozzi artesiani profondi (GW); acque freatiche superficiali, influenzate dal corso del fiume Sile (Sile W); acque di mescolamento (MW), che tendono ad indirizzarsi verso valori tipicamente marini e lagunari, e acque tipicamente lagunari (LW, L-SW). L'ingresso di acqua salata dal mare e dalla laguna riesce a diffondersi in tutto il territorio esaminato, a eccezione di alcune zone costiere, in cui l'effetto è mitigato dalle lenti di acqua dolce ospitate nei depositi dunari, e delle aree

più prossime al Sile, in cui la contaminazione è mitigata dalla presenza e dalla dispersione delle acque dolci provenienti dal fiume di risorgiva.

L'influenza del fiume Piave sul territorio circostante è ben illustrata nella Fig. 17.17, in cui il profilo idrografico del corso del fiume è messo in relazione con l'altimetria e il modello elettrostratigrafico del territorio e confrontato con i contenuti in  $\text{Cl}^-$  e in  $\delta^{18}\text{O}$  ottenuti dalle acque campionate. Il Piave, pensile rispetto alla pianura circostante, possiede un livello idrometrico in grado di alimentare per carico idraulico maggiore gli acquiferi superficiali. Tale processo è favorito dalla presenza di un alveo permeabile formato prevalentemente da sabbie.

Se si considera un profilo idrografico orientato E-O, appare subito evidente il maggior carico idraulico del Piave rispetto al Sile e la presenza di zone altimetricamente soggiacenti il livello medio mare. Il deflusso sotterraneo ha direzione prevalente E-O e l'elevato grado di salinizzazione del sottosuolo, come risulta dai SEV, è legato anche alla dispersione di acqua marina dall'alveo del Piave verso la laguna. Il contenuto in  $\text{Cl}^-$  delle acque è molto elevato in prossimità del Piave e diminuisce progressivamente verso ovest. I valori isotopici dell'ossigeno confermano la presenza del processo di diluizione tra acque dolci continentali e acque marine. Pertanto i fiumi ricaricano direttamente la falda, ma il Piave contribuisce attivamente alla salinizzazione del territorio disperdendo le acque di ingressione marina che risalgono lungo il suo letto, veicolandole nuovamente verso la laguna. Non bisogna comunque dimenticare il contributo dei canali di irrigazione in fase di alimentazione della falda e dei processi di evaporazione, che si inseriscono all'interno del quadro appena tracciato.

#### 17.5.5. Area di studio meridionale

Sulla base di tutti i dati emersi dalle analisi e dalle prime rappresentazioni a sezione, si sono elaborate due mappe di zonizzazione del processo relativamente alla morfologia del tetto e del letto della contaminazione salina, in grado di fornire una visione sinottica dell'evoluzione tridimensionale del processo. La mappa del tetto (Fig. 17.18) 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 situ* 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 m, come già evidenziato nelle sezioni interpretative illustrate nei paragrafi precedenti.

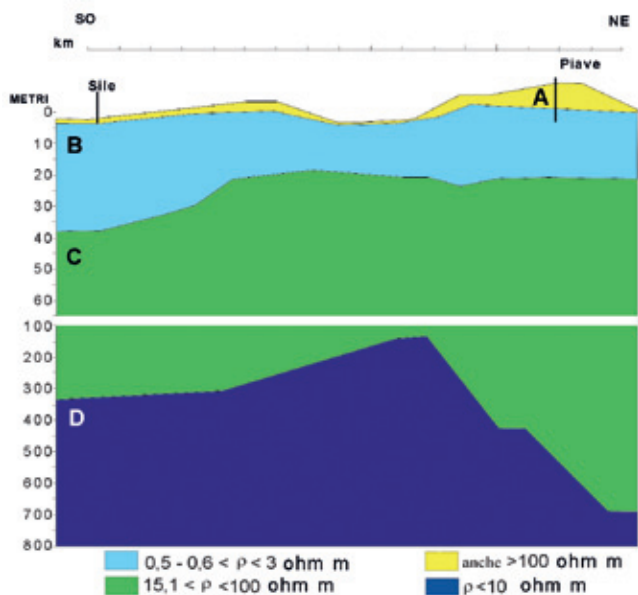


Fig. 17.15 - Schema semplificato dell'andamento della resistività elettrica nel sottosuolo lungo la direttrice NE-SO, direttamente collegato alla diffusione della contaminazione salina nell'entroterra (bassi valori di resistività indicano un alto tenore salino).

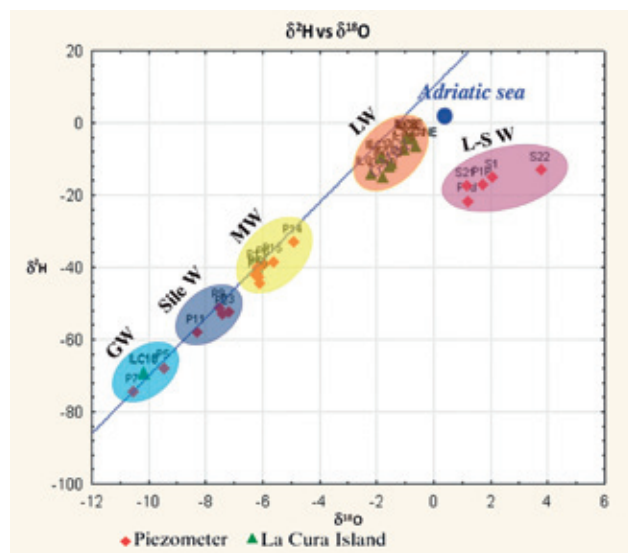


Fig. 17.16. Analisi isotopica delle acque dell'area di studio settentrionale: GW = acque di ricarica alpina, Site W = acque freatiche; MW = acque di mescolamento; LW e L-SW = acque lagunari e marine; GMWL = *global meteoric water line* (da Di SIPIO *et al.*, 2008; RAPAGLIA *et al.*, 2010).



**Legenda elettrostratigrafica**  
**I** 0,5 -0,6 <math>\rho < 3 \text{ ohm m}</math>  
**IV** res >100 ohm m

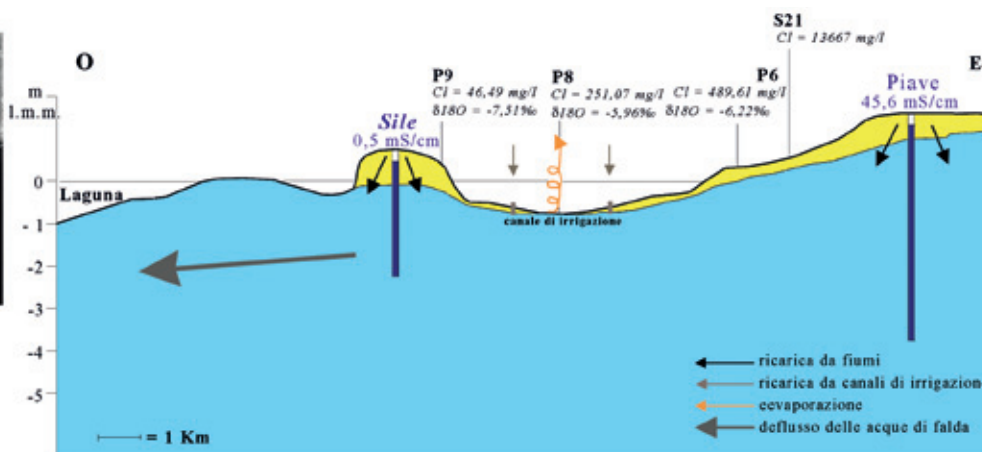


Fig. 17.17 - Profilo idrografico su base altimetrica del corso del fiume Piave in direzione O-E. Il sottosuolo è rappresentato su base elettrostratigrafica, tarata mediante confronto con i sondaggi litostratigrafici disponibili, ed è corredato da informazioni di carattere chimico e isotopico.

La mappa è stata suddivisa in 6 classi di profondità equidistribuite da 0 a 30 m. 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 (PD);
- una ristretta area all'interno del Bacino Zennare.

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

- tutto il margine lagunare che include Fogolana, Santa Margherita, Conche (PD), 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, Valgrande, Valcerere Dolfina e l'area poco a NO 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'Abbà in corrispondenza dell'idrovora Presa, poco a NO dell'idrovora Barbegara (a sud di Correzzola-PD); l'area fra Conetta e Fra Piero a NE di Agna; l'area tra l'Idrovora Tassi e Marcanta (poco a nord di Ca' Venier); un'area interna al Bacino

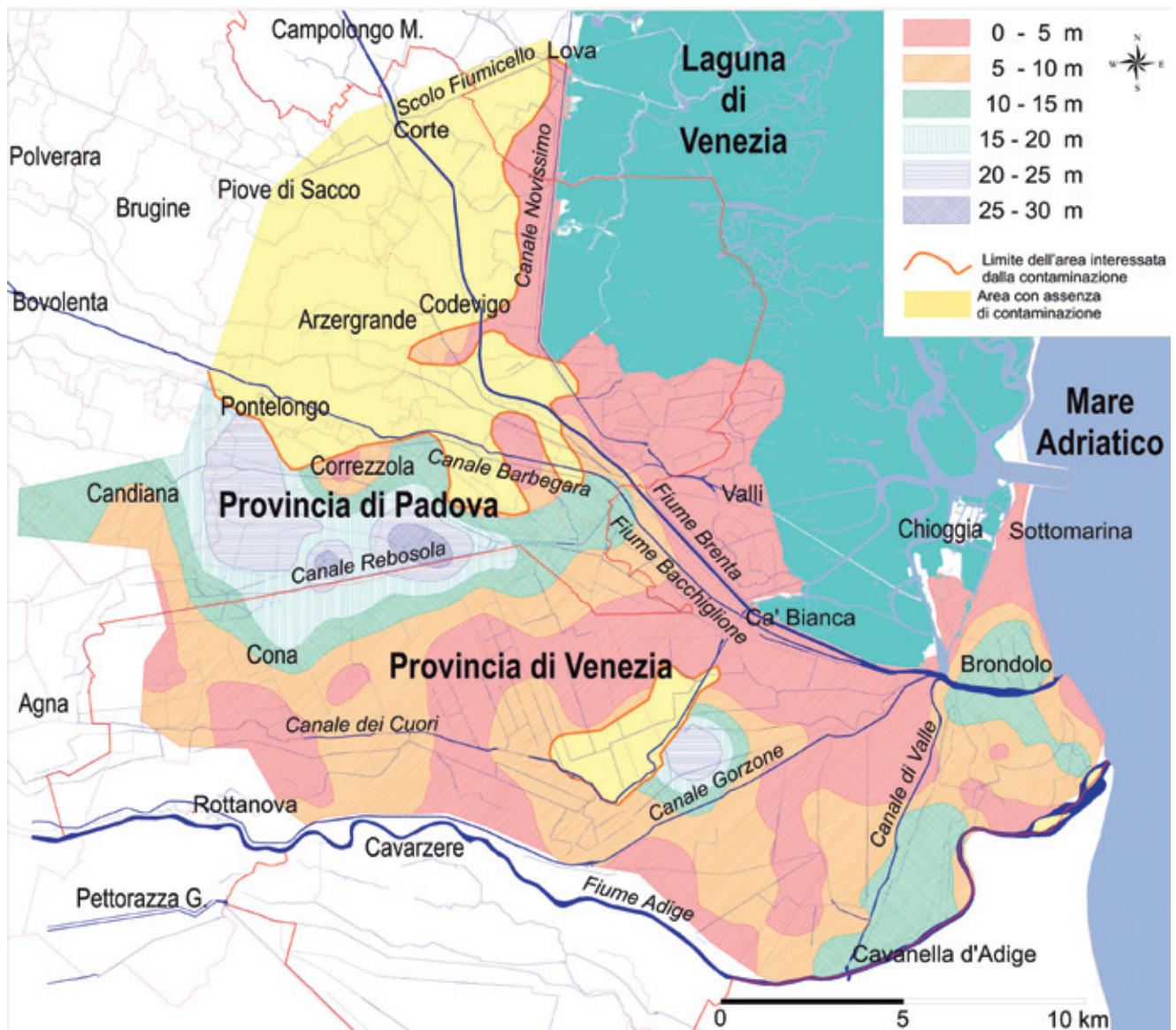


Fig. 17.18 - Mappa della profondità del tetto dell'elettrostrato conduttivo che corrisponde a quella dell'interfaccia acqua dolce-salata (da CARBOGNIN e TOSI, 2003).

Civrana tra Corte Duoda e Corte Emo; una fascia prossima al fiume Adige compresa tra Buoro 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 m 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 (PD), Cona, l'area tra Cive, La Sista e Ca' Rossa, l'Idrovora Civrana, Ca' Venier, Cavarzere, Motta Molara, Valcerere, Motta Contarina, Idrovora San Pietro, Tenuta Alfieri e Ca' Lino.

Le aree a rischio via via decrescente vengono menzionate suddivise per il settore 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 in esame sono:
  - l'area di Arre (PD), Foresto, Cive, Treponti e, in misura minore, Pegolotte, Villa del Bosco, Conca dalbero 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 paleovalvi, gli antichi cordoni litorali e le dune costiere. Infatti, è possibile individuare una certa relazione tra le forme prodotte dalla zonazione e quelle delle strutture geomorfologiche principali sub-affioranti. 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 accumu-

larsi è in grado di deprimere il tetto del cuneo salino fino a circa 15 m 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 17.13 (Sez. 1).

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 m, 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 di questa parte del territorio provinciale 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 m, che in questo caso è anche di origine fossile, e in parte cattura le acque saline.

Anche per il letto della contaminazione salina, benché per l'uso agricolo dei suoli sia di importanza ridotta rispetto alla morfologia del tetto, è stata redatta la mappa della sua superficie morfologica (Fig. 17.19) e 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

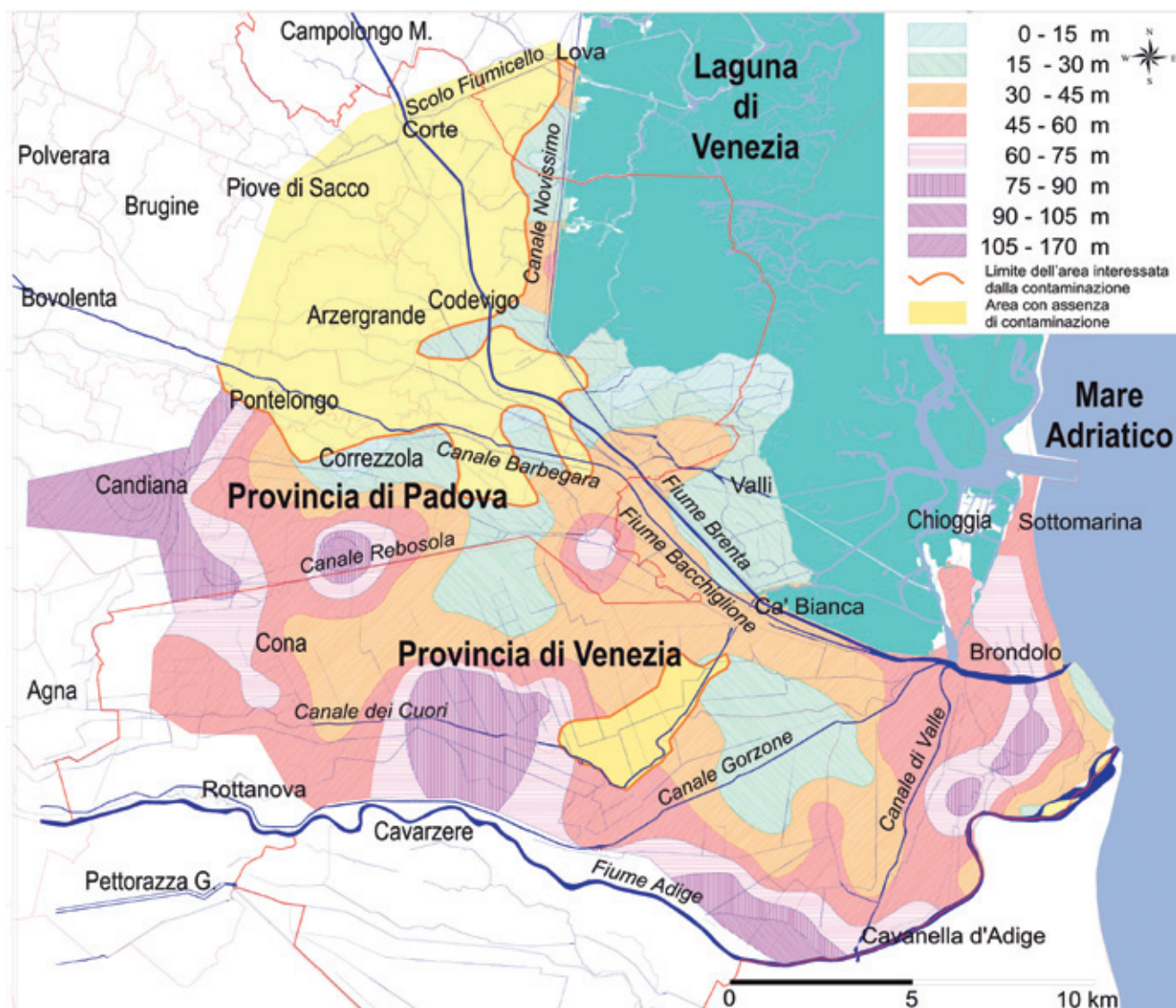


Fig. 17.19 - Mappa della profondità del letto dell'elettrostrato conduttivo (da CARBOGNIN & TOSI, 2003).



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 m sette classi di profondità con intervalli di 15 m e quindi 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 m per arrivare a 60-75 m. Approfondimenti localizzati sono stati individuati fino a 90 m in corrispondenza delle aree di Ca' Lino e del Villaggio Busonera di Cavarzere; fino 100 m e oltre a NO di Cavanella d'Adige e Pegolotte e, addirittura, fino a 170 m a Candiana (PD).

La conoscenza della morfologia del tetto e della base della contaminazione salina, oltre a 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 a essere sfruttati in quanto le loro caratteristiche di permeabilità-trasmissività idraulica potrebbero essere scadenti, come pure la qualità biochimica 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 valutato, di volta in volta, con indagini specifiche che abbiano come punto di partenza quanto ottenuto col presente studio.

La caratterizzazione idrogeochimica delle acque, per esempio, permette di distinguere tre facies differenti: a) acque cloruro alcaline, arricchite in ioni  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ , definite come salate e/o salmastre a seconda del contenuto in cloruri (mg/l), tipiche di acque lagunari, marine e di livelli freatici contaminati; b) acque bicarbonato alcaline, ad alto tenore di ioni  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ , appartenenti alla circolazione idrica sotterranea o al sistema idrico superficiale (fiumi, acque dolci continentali); c) acque continentali a composizione intermedia, rinvenute nei canali di irrigazione, in stazioni di pompaggio e in diversi pozzi di riferimento (GATTACECCA *et al.*, 2009).

Le analisi isotopiche confermano l'esistenza nel sottosuolo di un processo di mescolamento tra acque salate di origine marina e acque dolci continentali. I valori di deuterio e ossigeno-18 determinati in laboratorio permettono di discriminare i diversi gruppi interagenti tra loro (Fig. 17.20). Le acque dolci continentali, impoverite in  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , derivano sia dalle acque di ricarica alpina e prealpina (GW) della circolazione idrica sotterranea, attiva a scala regionale, sia dalle acque freatiche (FW) legate al contributo della dispersione fluviale e delle precipitazioni meteoriche.

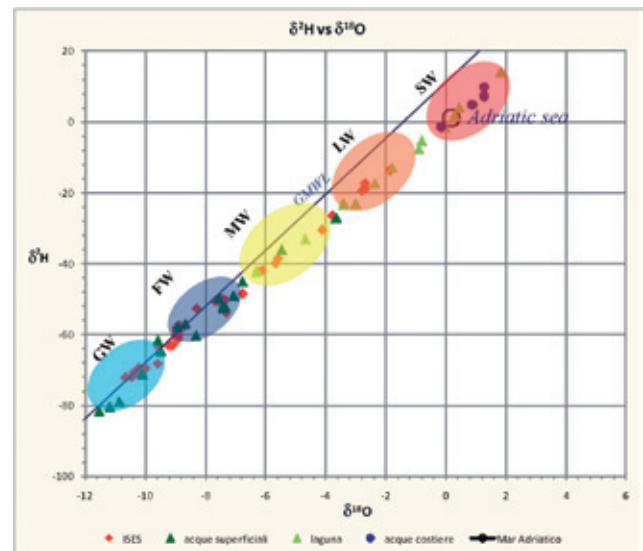


Fig. 17.20 - Analisi isotopica delle acque del settore meridionale: GW = acque di ricarica alpina, FW = acque freatiche; MW = acque di mescolamento; LW e SW = acque lagunari e marine; GMWL = *global meteoric water line* (dati da GATTACECCA *et al.*, 2009).

Sono rinvenute principalmente nei piezometri ubicati nell'entroterra, lontano dalla linea di costa, verso NO, dove il tasso di subsidenza è relativamente basso e le quote altimetriche sono superiori al livello medio del mare (Di SPIO *et al.*, 2007; TEATINI *et al.*, 2005).

Nei campioni prelevati nei piezometri situati in posizione intermedia tra costa ed entroterra, in corrispondenza di aree subsidenti soggiacenti al livello medio del mare, la composizione isotopica è compresa tra i due termini estremi delle acque dolci continentali e delle acque salate di origine marina (valori positivi di  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  sono tipici del Mar Adriatico - SW), individuando nel sottosuolo acque salmastre di mescolamento (MW) in accordo con i dati geochimici in precedenza ottenuti. In prossimità della fascia costiera e della gronda lagunare, invece, ad un ulteriore incremento del tenore in  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  corrispondono valori isotopici assimilabili a quelli delle acque lagunari (LW). La contaminazione salina dei livelli freatici superficiali risulta, pertanto, particolarmente elevata in corrispondenza della fascia costiera e lagunare e, come rilevato anche dai dati geofisici, nelle aree altimetricamente depresse ai margini dei corsi fluviali, pensili sul territorio circostante e interessati dal fenomeno di risalita del cuneo salino lungo il loro alveo.

## 17.6. ANALISI DELLE COMPONENTI DEL PROCESSO

I fattori che intervengono a innescare o aggravare il processo di contaminazione salina sono da ricercare, in generale, nelle condizioni meteoroclimatiche che spesso condizionano l'attività delle idrovore, prelievi/rilasci d'acqua dolce, nelle dispersioni dell'acqua di marea che risale le foci dei fiumi e dei canali e anche nella presenza/assenza di particolari caratteristiche geomorfologiche del sottosuolo.

### 17.6.1. Area di studio settentrionale

La contaminazione salina interessa tutto il territorio esaminato, a eccezione di alcune zone costiere e di alcune aree in prossimità del Sile, in cui l'effetto è mitigato, rispettivamente, dalle lenti di acqua dolce sospese nei depositi dunari e dalle acque disperse dal fiume di risorgiva. Fonti principali della salinizzazione, come indicato dalle analisi geofisiche e idrogeochimiche, sono il Mar Adriatico, la Laguna e il fiume Piave: le acque penetrano nell'entroterra sfruttando le caratteristiche litologiche e geomorfologiche del territorio, quali la presenza di paleoalvei, paleocanali lagunari e di zone di bonifica soggiacenti al livello medio del mare (DI SIPIO *et al.*, 2008; RAPAGLIA *et al.*, 2010).

L'intenso sfruttamento agricolo e turistico del territorio determina nel lungo periodo l'incremento dei prelevamenti dal sottosuolo con conseguente deterioramento della qualità delle acque e possibili ripercussioni sull'attività agricola dominante. L'interfaccia acqua dolce-acqua salata si trova a ridosso della superficie topografica, prevalentemente a 2 m di profondità: un suo eventuale innalzamento potrebbe portare alla perdita dei raccolti in seguito alle mutate condizioni ambientali (peggioramento della criticità dell'area) e alla necessità di sostituire le colture con altre più tolleranti alla presenza dei sali. A nord di Portegrandi, invece, verso l'entroterra, a una maggiore lontananza dal margine lagunare corrisponde una diminuzione delle condizioni di salinizzazione.

Per ridurre il tenore salino delle acque degli acquiferi non confinati, potrebbe essere utilizzata efficacemente la rete idrografica superficiale dei canali di bonifica e di scolo. In corrispondenza di un periodo relativamente piovoso, infatti, si è osservato un progressivo abbassamento dei valori di conducibilità della rete idrografica superficiale e, di conseguenza, un miglioramento della qualità dell'acqua a fini irrigui.

### 17.6.2. Area di studio meridionale

Benché non tutta l'area meridionale sia interessata dalla contaminazione, è emersa una situazione decisamente critica e particolarmente preoccupante nelle sue aree centro-meridionali, dove il tetto dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata è prossimo al piano campagna e lo spessore dell'acqua dolce è frequentemente ridotto a circa 1 m.

In generale, si è appurato che l'evoluzione spaziotemporale della contaminazione risente di diversi fattori, quali i prelievi/rilasci d'acqua dolce, le condizioni meteorologiche e l'attività delle idrovore. 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 subsuperficiali che, se in alcuni casi sono delle riserve di acqua dolce, in altri dirigono i flussi salati dalla laguna al bacino scolante.

Non va dimenticato inoltre che, ad aggravare il pro-

blema, vi sono gravi fenomeni di subsidenza per lo più ascrivibili all'ossidazione dei terreni organici superficiali, particolarmente abbondanti in quest'area di bonifica, ma in parte anche dovuti a processi neotettonici e di consolidazione naturale residua (CARBOGNIN & TOSI, 2003; BRAMBATI *et al.*, 2003).

L'intrusione salina può essere considerata una tipologia di inquinamento delle falde; il suo contenimento, mitigazione e bonifica risultano problematici. È stato verificato che i rilasci irrigui, effettuati nel periodo estivo, diluiscono il tenore salino, mentre gli eccessivi abbassamenti del livello freatico in primavera-inverno, imposti per evitare il rischio di alluvionamenti, inducono il richiamo delle acque saline verso i terreni coltivati.

## 17.7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi congiunta delle indagini ha fornito una visione globale del processo di contaminazione salina in atto. La visualizzazione del fenomeno è stata eseguita per mezzo di sezioni interpretative e di mappe che forniscono la giacitura del tetto e del letto dell'acqua salata/salmastra. La mappa del tetto rappresenta la profondità a cui compare la prima falda salata, ovvero l'interfaccia acqua dolce/acqua salata e, approssimativamente, lo spessore dell'acqua dolce sovrastante, se si esclude il primo sottile livello insaturo. Dato che, come si è visto nelle indagini dirette in sito e nell'elaborazione dei parametri monitorati, la profondità a cui si rinviene l'interfaccia acqua dolce/acqua salata varia con le diverse condizioni idrauliche e meteorologiche, la sua mappatura risulta essere una rappresentazione mediata dello sviluppo del processo. In particolare, le variazioni sono più sensibili nell'intervallo di profondità 0-10 m.

L'intenso sfruttamento agricolo e turistico del territorio comporta un incremento dei prelevamenti di acqua dal sottosuolo e favorisce il processo di contaminazione salina degli acquiferi costieri, con conseguente deterioramento della loro qualità.

Le analisi chimiche e isotopiche delle acque hanno permesso di confermare i risultati delle indagini geofisiche contribuendo alla valutazione dell'estensione del fenomeno e delle sue modalità di diffusione e alla determinazione dell'effettiva origine delle acque. Acque di origine marina e lagunare sono responsabili della salinizzazione delle falde acquifere superficiali, come indicato dal progressivo incremento del tenore salino e dall'arricchimento dei valori isotopici di ossigeno-18 e deuterio in prossimità della fascia costiera. La risalita di acqua marina lungo l'alveo dei fiumi e la presenza di paleoalvei e paleocanali lagunari, vettori preferenziali di trasporto della contaminazione salina verso l'entroterra in virtù della loro elevata conducibilità idraulica, contribuiscono efficacemente al processo di salinizzazione, in particolare in concomitanza con periodi di magra dei fiumi e di elevati livelli di marea, quando il fenomeno non è efficacemente contrastato dal deflusso delle acque continentali.

Le analisi isotopiche, d'altra parte, confermano l'evoluzione chimica delle acque da termini prettamente continentali verso l'entroterra ad acque salmastre lungo la costa: si distinguono acque alpine, soggette a ricarica sotterranea, acque freatiche superficiali, influenzate dal corso dei fiumi e delle precipitazioni, e acque di mescolamento che tendono a indirizzarsi verso valori tipicamente marini e lagunari.

#### 17.7.1. Area di studio settentrionale

La carta di delimitazione della contaminazione salina superficiale, ottenuta incrociando i dati di conducibilità elettrica con quelli di resistività, individua tre zone che, nell'immediato sottosuolo, a seconda dei valori determinati, sono dette a elevata salinizzazione, bassa salinizzazione o di transizione (Fig. 17.14).

Nel primo caso, l'elettrostrato conduttivo sub-superficiale presenta valori di resistività inferiori ai 3 ohm·m, caratteristici di falde freatiche a elevato tenore salino, e spessori medi di 25-30 m. È responsabile della creazione di condizioni ambientali estremamente critiche per la coltivazione di numerosi prodotti agricoli. Il tetto dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata si trova in media a 2 m di profondità dal piano campagna, ma può spingersi quasi ad affiorare in superficie, come nei pressi della località Salsi (nel settore centrale, tra i corsi dei fiumi Piave e Sile), o approfondirsi fino a 8 m, come nel settore costiero, dove la presenza di acqua dolce all'interno delle dune è in grado di contrastare l'ingressione marina. Nel sotto-settore settentrionale, la zona a elevata criticità è circoscritta all'estensione del paleocanale lagunare in grado di eludere la barriera idraulica del Sile. Il letto della contaminazione salina si trova in genere a profondità variabili tra 15 e 35 m, a seconda della variabilità litologica riscontrata nel sottosuolo e all'alternanza di livelli permeabili e impermeabili.

Le zone a bassa salinizzazione coincidono o con la progressiva scomparsa o con l'approfondimento dell'elettrostrato a bassa resistività. In sinistra idrografica del Sile all'aumentare della distanza dal margine lagunare l'elettrostrato conduttivo viene sostituito da elettrostrati a resistività maggiore (anche superiore a 100 ohm·m), indicando la sostituzione, nei livelli freatici del sottosuolo, di acque a elevato tenore salino con acque dolci di tipo continentale. Nel settore litoraneo, invece, le riserve di acqua a basso tenore salino ospitate nelle dune sabbiose presentano valori di resistività tra 15 e 50 ohm·m (tipici di acque dolci) e spessori pari a 2-8 m, tipici di aree a basso grado di salinizzazione all'interno di settori fortemente contaminati. In prossimità del Sile, invece, valori di EC inferiori a 1 mS/cm permettono di circoscrivere ulteriori zone non particolarmente soggette a fenomeni di contaminazione.

La zona di transizione, infine, mostra in superficie un altro conduttore superficiale, caratterizzato da valori di resistività compresi tra 3,1 e 15 ohm·m, attribuiti alla presenza sia di terreni argillosi sia di terreni limoso-

sabbiosi imbibiti di acqua salmastra, che si trovano nelle aree bonificate comprese tra gli abitati di Portograndi e San Donà di Piave.

L'approccio multidisciplinare utilizzato ha permesso di migliorare la conoscenza delle condizioni di contaminazione salina all'interno del territorio e di valutare l'estensione del fenomeno e delle sue modalità di diffusione. In particolare, si è potuto osservare come il fiume Piave sia in grado di influenzare il processo di salinizzazione delle falde superficiali mentre il fiume Sile ha un effetto mitigante nella migrazione di acque a elevato tenore salino dal margine lagunare nord-occidentale verso l'entroterra. È stato possibile realizzare una mappa della salinizzazione dell'area e discriminare la presenza di un elettrostrato conduttivo profondo, riconducibile a terreni con acque a elevato tenore salino di origine fossile. Infine, nel litorale le dune costituiscono una riserva d'acqua a basso tenore salino; paleoalvei e paleocanali lagunari fungono da vettori preferenziali di trasporto delle acque salate, mentre precipitazioni locali e maree hanno una certa influenza nei processi di contaminazione della rete idrografica superficiale e delle falde freatiche.

Le analisi geochimiche e isotopiche confermano l'esistenza del fenomeno di intrusione salina proveniente da mare e da laguna e, in particolare, evidenziano il diverso ruolo esercitato dai fiumi Piave e Sile. Il primo, di origine alpina, soggetto a risalita di acqua marina lungo il suo alveo, disperde efficacemente acque ad alto tenore salino negli acquiferi superficiali, come confermato, per esempio, dalla progressiva diminuzione del tenore in cloruri nelle acque sotterranee da valori superiori a 10.000 mg/l in prossimità del Piave a valori inferiori a 50 mg/l in corrispondenza del fiume Sile, lungo una direttrice E-O (Fig. 17.17). Il fiume Sile, invece, è in grado di contrastare efficacemente la risalita del cuneo salino alla foce e di disperdere acque dolci nel territorio circostante, eccetto in presenza di antichi percorsi fluviali e lagunari: in genere, le acque di falda prelevate nelle immediate vicinanze del fiume di risorgiva (P5-P9) presentano bassi tenori in cloruri (< 50 mg/l). Lungo la fascia costiera, infine, serbatoi naturali di acqua dolce (Cl < 50 mg/l) si rinvenivano solamente all'interno delle dune costiere, come già evidenziato dai profili geofisici.

#### 17.7.2. Area di studio meridionale

La mappa del tetto della contaminazione salina (Fig. 17.18) è stata suddivisa in 6 classi di profondità equidistribuite da 0 a 30 m. Le aree che appartengono alla prima classe (0-5 m) sono quelle decisamente critiche, poiché in tal caso 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 a rischio via via decrescente.

Anche per il letto della contaminazione salina, benché di secondaria importanza in relazione all'uso agricolo dei suoli, è stata eseguita un'analoga mappatura. Tale mappa è rappresentativa della profondità alla quale avviene il passaggio da litotipi a bassissima permeabilità (*aquitard*), che fungono da "barriera" alla propagazione in profondità dell'acqua salata, agli acquiferi dolci sottostanti. La morfologia del letto dipende principalmente dallo sviluppo degli orizzonti argillosi, dalla loro permeabilità, nonché dal loro spessore e continuità. Si ricorda che raramente sono stati individuati livelli impermeabili con ampia continuità spaziale, a causa della complessa storia geologica di queste aree. Per quanto riguarda la base della contaminazione salina, questa si approfondisce procedendo da nord verso sud, partendo da una profondità media di 15-30 m fino ad arrivare a 60-75 m (Fig. 17.19). Sono state individuate zone locali a profondità maggiore, ovvero fino a 90, 100 e 170 m.

In generale il settore litoraneo e quello di entroterra presentano entità e modalità di propagazione della contaminazione salina differenti. Nella fascia litoranea, costituita principalmente da sabbie di dune eoliche e di antichi cordoni litoranei, risiede una lente di acqua dolce di 5-10 m di spessore che contrasta la risalita dell'acqua salata. Al di sotto, la contaminazione salina è generalmente presente fino a 60-70 m (primo/secondo acquifero del sistema multifalde artesiane) e, per le acque fossili, oltre i 200-300 m. Nell'entroterra, invece, lo spessore dell'acqua dolce nella falda freatica è frequentemente ridotto fino a valori minori di 1-2 m, a causa dell'altimetria critica

del territorio, del mantenimento del franco di bonifica a opera degli impianti idrovori e della dispersione dell'acqua di marea da fiumi e canali. Più in dettaglio, nella zona prossima alla laguna si sono rilevati forti variazioni della profondità del tetto del cuneo salino, che, da circa 5 m, si riduce fino a pochi decimetri; nella zona più meridionale di indagine, a ridosso del fiume Adige, l'acqua salata si riscontra a profondità inferiori a 15 m; in quella più occidentale (provincia di Padova) è stata individuata una significativa area contaminata, che si ipotizza possa essere stata richiamata a pochi metri dal piano campagna da emungimenti di acqua dolce dalla falda freatica, in corrispondenza a un alto morfologico di origine fluviale. Il settore meno sensibile al problema della contaminazione salina è quello più settentrionale, tra i fiumi Brenta e Bacchiglione, ove, a eccezione di una ristretta fascia a ridosso del margine lagunare, non è presente acqua salata.

Da un punto di vista geochimico, la presenza di corsi d'acqua (Brenta e Bacchiglione) e di un sistema di drenaggio/irrigazione pensili sul territorio circostante, dotati di un carico idraulico superiore a quello della laguna, consente un continuo apporto di acqua dolce in grado di rinnovare le acque sotterranee superficiali e di contrastare la contaminazione salina diffusa nelle zone subsidenti. Un elevato tenore in cloruri si registra lungo la fascia costiera, mentre nell'entroterra, al di sotto della lente di acqua dolce superficiale creatasi per infiltrazione di acque meteoriche o per dispersione da fiumi e canali, si riscontra l'esistenza nel sottosuolo di acque salmastre di mescolamento.

## Riferimenti bibliografici

- AGIP, 1994. Acque dolci sotterranee, Inventario dei dati raccolti dall'Agip durante la ricerca di idrocarburi in Italia dal 1971 al 1990. Roma, Italy, Agip S.p.A., 515 pp.
- Beatty, R.D., Kerber J.D., 1993. Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry, Perkin-Elmer Corporation, Norwalk
- Benvenuti, G., Norinelli, A., Zambrano, R., 1973. Contributo alla conoscenza del sottosuolo dell'area circumlagunare veneta mediante sondaggi elettrici verticali. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* XV (57), 23-38.
- Benvenuti, G., Norinelli A., 1974. Studio geofisico di interfaccia acqua dolce- acqua marina nell'area circumlagunare veneta e nella zona delle sorgenti del Chidro (Taranto), *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, 1974, vol. XXXI, 1-16
- 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 Surface and Ground Water Transport*, 2, 193-200, Burganos V.N. et al. (Eds.), Suthampton, UK.
- Bondesan, A., Meneghel, M., 2004. Geomorfologia della Provincia di Venezia: Note Illustrative della Carta Geomorfologica della Provincia di Venezia, Esedra Editrice
- Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., Tosi, L., 2003. The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence. *Episodes*, 26(3), 264-268.
- Carbognin, L., Tosi, L., 2003. Il Progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle Province di Padova e Venezia. *Grafiche Erredici Padova (Italy)*, 95 pp.
- Carbognin, L., P. Teatini & L. Tosi, 2004, Eustasy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. *Journal of Marine Systems*, 51, 345-353.
- Carbognin L., Teatini P. & L. Tosi, 2005. Land Subsidence in the venetian area: known and recent aspects. *Giornale di Geologia Applicata* 1,2005, 5-11, doi: 10.1474/GGA.2005-01.0-01.0001.
- Carbognin, L., Teatini, P., Tomasin, A., Tosi, L., 2009. Global change and relative sea level rise at Venice: what impact in term of flooding. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0617-5.
- Clark I., Fritz P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis Publisher, 1997
- Cozzi R., Protti P., Raro T. 1987. *Analisi chimica: Moderni metodi strumentali*, ESU Spa
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters, *Science* 133, 1702-1703
- De Franco, R., Biella, G., Tosi, L., Teatini, P., Lozej, A., Chiozzotto, B., Giada, M., Rizzetto, F., Claude, C., Mayer, A., Bassan, V., Gasparetto-Stori, G., 2009. Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 69, 117-130.
- Di Sipio E., Galgaro A., Zuppi G.M. and Zangheri P., 2005. Detecting the origin of salt water contamination in groundwater in a lagoon area by the combined use of geophysical and geochemical tools: the example of the southern Venice Lagoon mainland. *Groundwater and saline intrusion. Proceedings of the 18<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Spain, *Hidrogeología y Aguas Subterráneas Series*, 15, 373-384
- Di Sipio, E., Galgaro, A., Zuppi, G. M., 2006. New geophysical knowledge of groundwater systems in Venice estuarine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 66, 6-12.
- Di Sipio, E., Galgaro, A., Zuppi, G. M., 2007. Contaminazione salina nei sistemi acquiferi dell'entroterra meridionale della Laguna di Venezia, *Giornale di Geologia Applicata*, 6, 01-08.
- Di Sipio, E., Galgaro, A., Rapaglia J., Zuppi G.M., 2008. Salt water contamination on Venice Lagoon mainland: new evaluation of origin, extension and dynamics. *Proceedings 1st SWIM-SWICA Int. Joint Saltwater Intrusion Conference*, , Cagliari-Chia Laguna, Italy, 3ESSE Commerciale, (CA), 195-204
- 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. *Annals of Geophysics*, 43(2), 289-295.
- Gattacceca, J. C., Vallet-Coulomb, C., Mayer, A., Claude, C., Radakovitch, O., Conchetto, E., Hamelin, B., 2009. Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland. *Journal of Hydrology* 378 (1-2), 46-61.
- Gonfiantini R., Stichler W., Rozanski K., 1995. Standards and intercomparison materials distributed by the International Atomic Energy Agency for stable isotope measurements. *Reference and Intercomparison Material of Stable Isotopes of Light Elements*. IAEA-TECDOC-825, Vienna, 13-29
- Norinelli A., 1986. *Elementi di geofisica applicata*, Patron Editore, Bologna
- Oude Essink G.H.P., 2001. Improving fresh groundwater supply problems and solutions, *Ocean & Coastal Management*, 44, 2001, 429-449
- Rapaglia J., Di Sipio E., Bokuniewicz H., Zuppi G.M., Zaggia L., Galgaro A., Beck A., 2010. Groundwater connections under a barrier beach: a case study in the Venice Lagoon, *Continental Shelf Research*, 30 (2), 119-126
- Reynolds J.M., 2001. *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley & Sons Editors
- 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). In: Servat, E., et al. (eds.), *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Publ. n. 278, Wallingford, UK. pp. 463-470.
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Wegmüller, U., Rizzetto, F., 2005. Mapping regional

- land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of Environment* 98, 403-413.
- Tosi, L., Teatini, P., Carbognin, L., Brancolini, G., 2009a. Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy, *Tectonophysics*, 474(1-2), 271-284.
- Viezzoli, A., Tosi, L., Teatini, P., Silvestri, S., 2010. Surface water-groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: the Venice Lagoon example. *Geophysical Research Letters*, 37, L01402.
- Vandenbohede A., Lebbe L., 2006. Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium, *Hydrogeology Journal*, 14, 2006, 462-472.
- Zeza F., Di Sipio E., 2008. Salt Water Intrusion in The Shallow Aquifers of Venice, *Proceeding of the 20th Salt Water Intrusion Meeting SWIM*, Naples, Florida, USA, June 23-27, 2008, 59-62
- Zeza F., 2008: Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia. Secondo Convegno 'La riqualificazione delle città e dei territori', *Geologia e Progettazione nel centro storico di Venezia* in Quaderni IUAV n. 54 pp. 9-41. Ed. Il Poligrafo, Padova
- Zuppi G.M., Sacchi E. 2004. Dynamic processes in the Venice Region outlined by environmental isotopes. *Isotopes in environmental and health studies*, 40, 35-44