

## L'intrusione salina nel comprensorio lagunare veneziano. Il bacino meridionale

Laura Carbognin<sup>1</sup>, Federica Rizzetto<sup>1\*</sup>, Luigi Tosi<sup>1</sup>, Pietro Teatini<sup>2</sup>, Giuseppe Gasparetto-Stori<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Istituto di Scienze Marine, C.N.R., Venezia – nome.cognome@ismar.cnr.it

<sup>2</sup>Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Padova – teatini@dmsa.unipd.it

<sup>3</sup>Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione, Conselve (Pd) – stori@adigebacchiglione.it

\*Autore corrispondente: Federica Rizzetto, Istituto di Scienze Marine, C.N.R., San Polo 1364, 30125 Venezia. Fax: 041 2602340

*Saltwater intrusion in the Venice watershed, Italy. The southern catchment.*

**ABSTRACT:** The salt water contamination process in the Venice watershed between the southern edge of the lagoon of Venice and the Adige River was investigated through hydrogeological and geophysical surveys and a new monitoring network of surface water and shallow groundwater (ISES Network). The results show that: the presence of saline water extends up to 20 km inland from the coast; the depth of the fresh/salt-water interface varies from 2 to 30 m below the ground level and exhibits a significant, mainly seasonal, time variation; the bottom of the contaminant plume penetrates from 10 even to 100 m depth in the subsoil. Further investigations, still in progress, are showing that the dynamics of the soil salinization process is especially sensitive to the changes in the river (Brenta, Bacchiglione, Adige, Gorzone) discharge, water levels in a complex drainage network regulated by a number of pumping stations, and climatic conditions. Other important factors are fresh-water releases for irrigation purpose and riverbed seepage. The latter is influenced by the tide dynamics which, together with river discharge, control the sea water encroachment along the river mouths. In summer 2003, for example, characterized by a severe drought, salt water flowed up the Brenta and Bacchiglione rivers for about 20 km. The saltwater intrusion has been enhanced by the ground elevation generally below the mean sea level, especially in the southern sector where land subsidence, mainly due to peat soil oxidation, has induced an elevation loss greater than 1 m over the last few decades.

*Key terms:* saltwater intrusion, Venice coastland, monitoring, Brenta River.

*Termini chiave:* intrusione salina, pianura costiera veneziana, monitoraggio, Fiume Brenta.

### Riassunto

Attraverso indagini idrogeologiche e geofisiche ed il monitoraggio di acque superficiali e di falda (Rete ISES) è stato caratterizzato il processo di contaminazione salina nel sottosuolo dell'area costiera compresa tra il margine meridionale della Laguna di Venezia ed il Fiume Adige. I risultati hanno evidenziato che l'intrusione massima si spinge oltre 20 km dalla costa, favorita da quote topografiche generalmente inferiori al livello marino. L'interfaccia acqua dolce/acqua salata varia da circa 2 a 30 m dal piano campagna, mentre il letto della contaminazione da 10 ad oltre 100 m dal p.c.. Indagini in corso stanno evidenziando che la dinamica del processo di salinizzazione è particolarmente sensibile alle variazioni di portata dei fiumi, ai livelli idrometrici della rete di bonifica mantenuti dagli impianti idrovori ed alle condizioni climatiche. Inducono effetti importanti anche i rilasci irrigui e la dispersione dagli alvei (qui generalmente pensili), quest'ultima influenzata dalle condizioni mareografiche, le

quali, congiuntamente all'entità delle portate fluviali, controllano la risalita delle acque marine lungo le foci. La subsidenza in atto nel bacino scolante meridionale, prevalentemente dovuta all'ossidazione di terreni torbosi, ed il previsto innalzamento del livello marino per variazioni climatiche potranno ulteriormente aggravare una condizione già oggi critica per lo sviluppo economico dell'area.

### Introduzione

Già a partire dagli anni '970 fu evidenziato che l'intrusione salina interessava gran parte della pianura costiera veneziana (Benvenuti et al., 1973); 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. Nell'ambito degli "studi a salvaguardia" dell'area lagunare, il problema dell'intrusione salina nell'area centro-settentrionale fu riconsiderato alla fine degli anni '990, relativamente al sistema artesiano multi-acquifero che si sviluppa tra 55 e

340 m di profondità ed il cui sfruttamento fu la causa primaria della subsidenza veneziana (Carbognin et al., 2005). L'analisi del rischio di intrusione fu analizzato con simulazioni numeriche per diversi scenari di pompaggio ed i risultati ottenuti assicurarono la trascurabilità del problema negli acquiferi profondi (Bixio et al., 1998). Nel contesto idrogeologico del comprensorio veneziano, solo l'acquifero superficiale risulta essere a rischio di salinizzazione; in particolare, tale processo appare più esteso nel bacino meridionale a causa delle caratteristiche geomorfologiche dell'area, dove crea di conseguenza le maggiori preoccupazioni.

Per la crescente consapevolezza della gravità dell'impatto ambientale e socio-economico qui indotto dalla salinizzazione del sottosuolo, nel 2000-2003 è stato finanziato un primo programma di indagini finalizzato alla determinazione dell'estensione del fenomeno ed alla zonizzazione della sua criticità in relazione alle attività economiche dell'area, principalmente di tipo agricolo-orticolo (Carbognin e Tosi, 2003).

Per le modalità con cui il processo si esplica, 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 pertanto essere usati per indicare solo l'ingresso di acqua marina negli acquiferi costieri. Infatti, il processo naturale di intrusione di acqua salata dovuta alla vicinanza del mare e della laguna è aggravato da una serie di fattori, tra i quali assume particolare rilevanza la quota critica del territorio (fino a -4 m s.l.m.). Subsidenza ed eustatismo (Carbognin et al., 2004) sono quindi strettamente collegati alla contaminazione salina. La dispersione di acqua marina e lagunare da fiumi e canali, che in situazioni di magra può risalire la foce per 20 km, ed eventi siccitosi talida impedire un'adeguata ricarica delle falde sono fattori che, quando agiscono congiuntamente, possono indurre un aumento della soglia di rischio di desertificazione dei suoli.

Attualmente sono in corso specifiche ricerche per approfondire le conoscenze sulla dinamica della salinizzazione dei suoli, individuarne le relazioni causa-effetto, per poi studiare possibili misure di contrasto e mitigazione del processo di desertificazione della pianura costiera.

### Area di studio

L'area di studio, situata a sud-ovest ed 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 ed il Bacchiglione, che scorrono in direzione NO-SE (Fig. 1). Buona parte del territorio giace sotto il livello del mare; quote ad esso superiori si riscontrano solo nel settore orientale, dove i depositi di origine eolica conservano ancora un debole rilievo (Rizzetto et al., 2003).

La zona è caratterizzata da un'economia

prevalentemente agricola ed il mantenimento della superficie della falda al di sotto del piano campagna è garantito mediante 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.

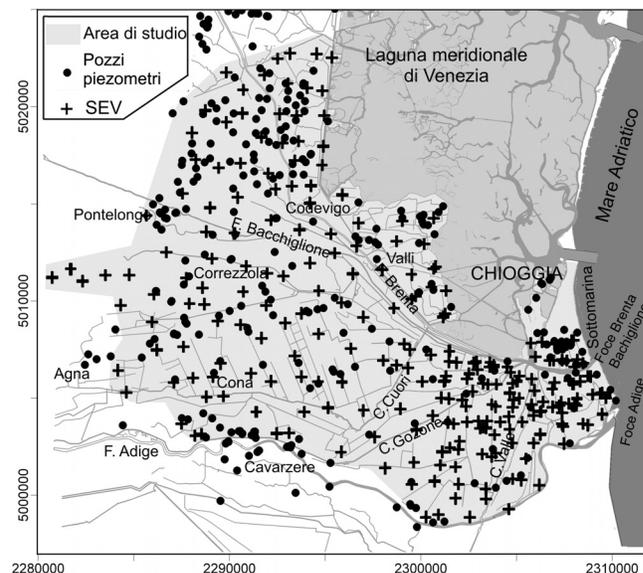


Fig. 1 – Area di studio e ubicazione dei pozzi e dei SEV.  
*Study area together with the well and SEV locations.*

Dal punto di vista geomorfologico e sedimentologico, nell'area esaminata sono presenti morfologie e depositi di ambiente alluvionale, deltizio e litoraneo. 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, ed il settore orientale, caratterizzato dalla presenza di numerose tracce, o rimanenze, di vecchi cordoni dunosi (Rizzetto et al., 2003). La presenza di estesi affioramenti di torbe, il cui spessore non supera i 2 m, è particolarmente rilevante nel settore meridionale, in corrispondenza delle zone che in passato furono sede di paludi e canneti. In termini di altimetria, queste sono anche le aree più depresse (con quote fino a -4 m.s.l.m), essenzialmente a causa della subsidenza per perdita di massa conseguente all'ossidazione dei terreni organici (Gambolati et al., 2005).

### Materiali e metodi

La caratterizzazione dell'estensione della contaminazione salina è stata condotta utilizzando indagini litostratigrafiche, idrologiche e geoelettriche (Carbognin e Tosi, 2003).

Ci si è avvalsi di circa 700 prove geognostiche esistenti (dati stratigrafici e prove penetrometriche), 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) ed in corrispondenza di alcuni Sondaggi Elettrici Verticali (SEV) per definire i litotipi

principali e per la calibrazione delle indagini geoelettriche.

Sono stati censiti circa 400 pozzi/piezometri (Fig. 1), tra i quali sono stati selezionati quelli più idonei alle misure del tenore salino. Sono stati elaborati 257 SEV (Fig. 1), di cui 170 di nuova esecuzione. 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 (ERT).

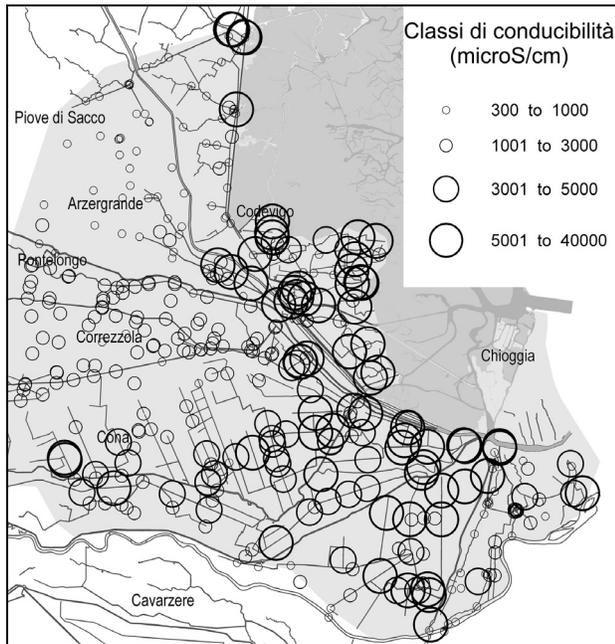


Fig. 2 - Conducibilità elettrica nelle acque di superficie. *Electrical conductivity in the water of the surficial net.*

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.

Parallelamente sono state eseguite misure di salinità delle acque superficiali (fiumi, canali, scoli) in 400 siti (Fig. 2), 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.

La classificazione del tenore salino delle acque è stata condotta facendo riferimento a quella adottata nell'area di indagine per l'uso delle acque a scopo agricolo-orticolo, in funzione, pertanto, dei limiti accettabili per le principali colture. Sono state quindi stabilite tre classi di qualità dell'acqua: salate, se presentano valori di conducibilità elettrica superiori a 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e resistività elettrica del terreno inferiori a 4.5  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ ; salmastre, quando la conducibilità elettrica dell'acqua è compresa tra 5000 e 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e la resistività elettrica del terreno ricade tra 4.5

e 7  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ ; 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 8  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ . Le acque denominate "salate" possono raggiungere tenori salini analoghi a quelli della laguna e del mare (circa 35 g/l); quelle classificate "salmastre" hanno concentrazioni normalmente superiori a 1 g/l e generalmente non sono idonee all'uso irriguo.

### Monitoraggi

I monitoraggi del tenore salino delle acque di falda e della rete scolante, programmati con cadenza semestrale, sono stati condotti a partire dal 2000.

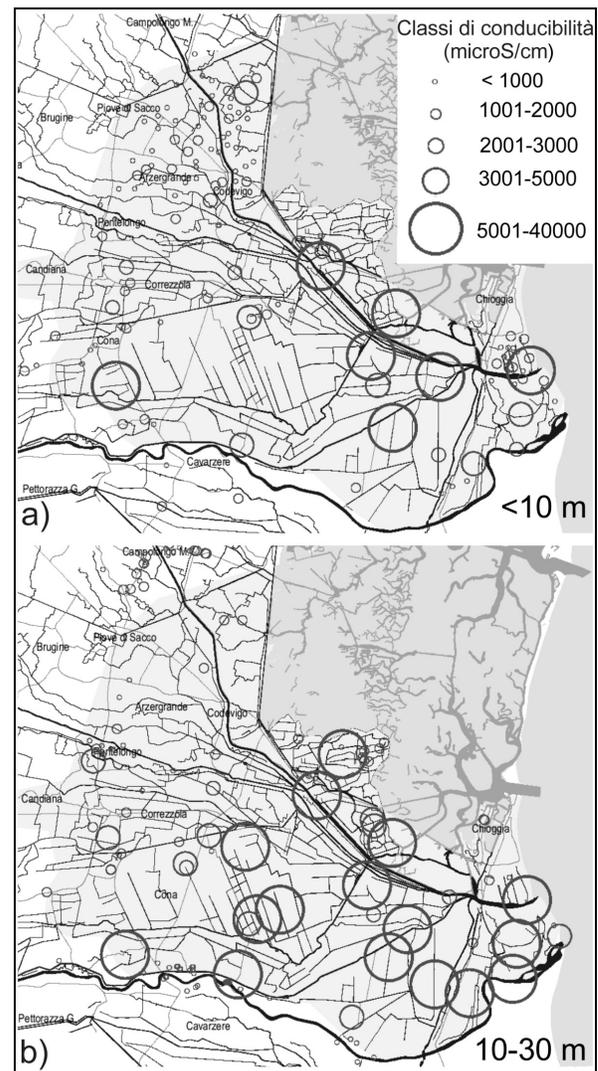


Fig. 3 - Conducibilità elettrica nelle acque di falda per profondità (a) fino a 10 m e (b) tra 10 e 30 m. *Groundwater electrical conductivity for the depth ranges (a) 0-10 m and (b) 10-30 m.*

Per quanto concerne le acque sotterranee, oltre alle determinazioni della salinità eseguite in ogni pozzo (Fig. 3),

sui piezometri di nuova istituzione, filtrati per tutta la loro lunghezza, sono stati eseguiti alcuni log di salinità (Fig. 4). Per le acque della rete scolante, le analisi sono state effettuate puntualmente o a diverse quote negli alvei con profondità superiore a 1.5 m; il monitoraggio è iniziato dal 2000. In occasione dell'istituzione della rete di misura delle acque superficiali sono state condotte circa 600 misure (Fig. 2).

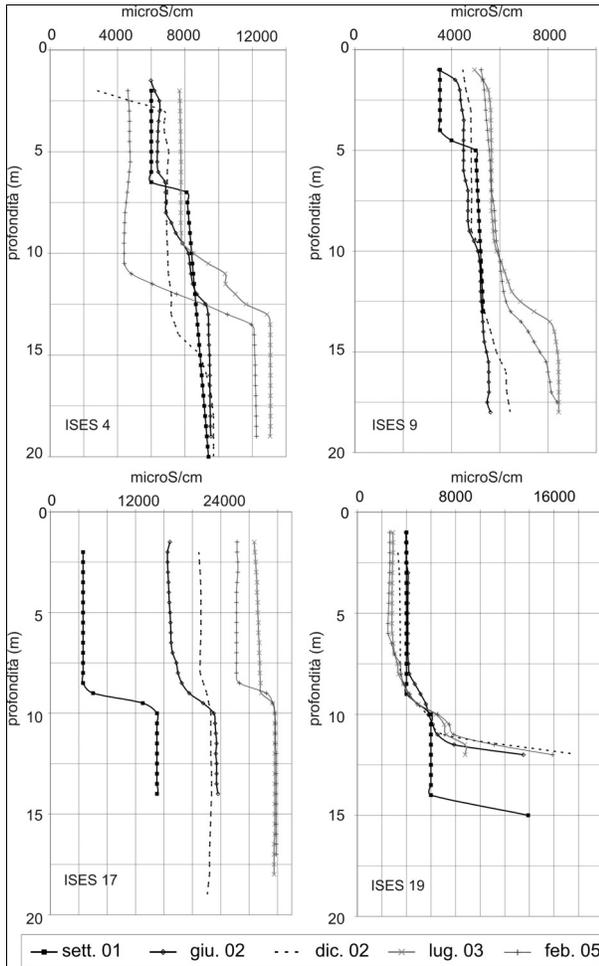


Fig. 4 - Log di conducibilità elettrica in alcuni pozzi della rete ISES.

*Electrical conductivity logs in four wells of the ISES network.*

Inoltre, nell'estate 2003, in concomitanza con l'emergenza idrica per la nota siccità del periodo, sono state eseguite, nell'ambito del "Progetto BRENTA" (Consorzio di Bonifica Adige-Bacchiglione, 2003), alcune campagne di misura lungo le aste fluviali di Brenta e Bacchiglione per valutare l'estensione della risalita delle acque di mare lungo i due corpi idrici (Fig. 5).

**Risultati delle indagini ed analisi dei dati**

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, di cui un esempio sintetizzato è riportato in Figura 6, e di due mappe che forniscono la giacitura del tetto e del letto dell'acqua salata/salmastra (Fig. 7). La mappa del tetto rappresenta la profondità dal p.c. 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 mappa di Fig. 7a risulta essere una rappresentazione mediata dello sviluppo del processo.

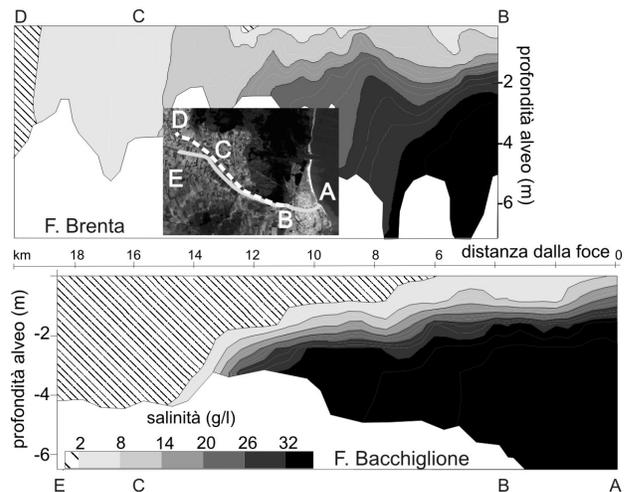


Fig. 5 - Risalita dell'acqua marina lungo le foci dei fiumi Brenta e Bacchiglione nell'estate del 2003.

*Salt water encroachment along the Brenta and Bacchiglione rivers in summer 2003.*

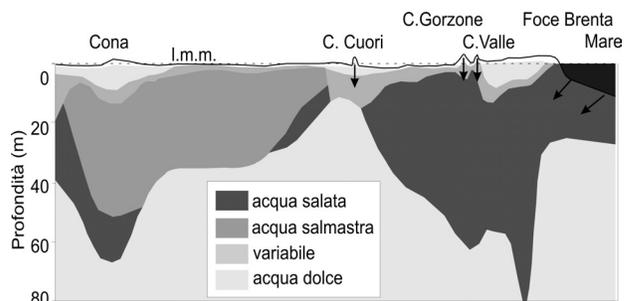


Fig. 6. Schema interpretativo del processo di contaminazione lungo una sezione ovest-est.

*Pattern of the salt water contamination along a west-east section.*

In particolare, le variazioni sono più sensibili nell'intervallo di profondità 0-10 m. La mappa 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.

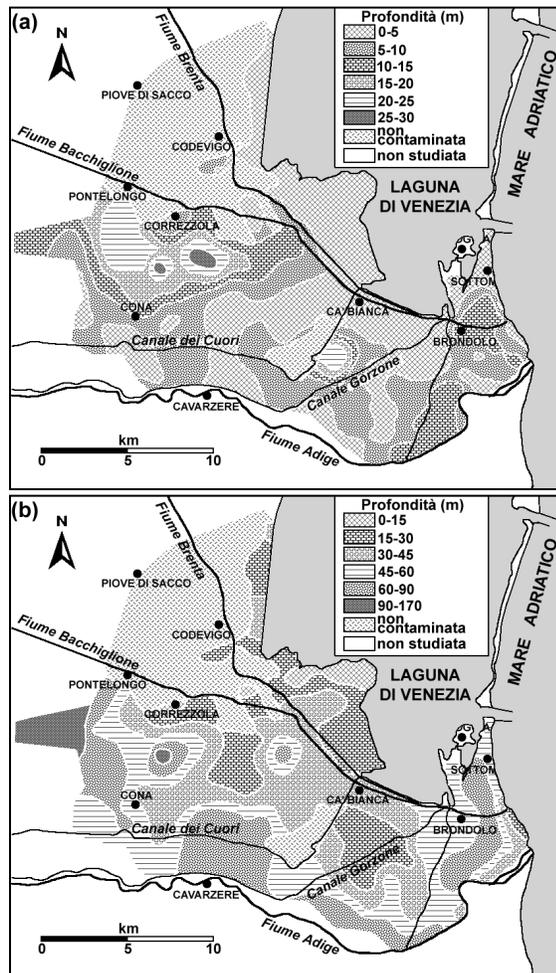


Fig. 7: Assetto della contaminazione salina: (a) tetto e (b) letto. *Maps of salt water contamination: (a) top and (b) bottom.*

Anche per il letto della contaminazione salina, benché di secondaria importanza in relazione all'uso agricolo dei suoli, è stata eseguita un'analogha 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. La Fig. 7b mostra come, in generale, la base della contaminazione salina si approfondisca procedendo da nord verso sud, partendo da una profondità media di 15-30 m

fino ad arrivare a 60-75 m. 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 ad 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 ad 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, ad eccezione di una ristretta fascia a ridosso del margine lagunare, non è presente acqua salata.

### Considerazioni conclusive

Le attività di ricerca sull'estensione ed evoluzione della contaminazione salina, iniziate nel 2000 con il Progetto ISES e tuttora in corso sotto l'egida di altri progetti, hanno fornito un quadro interpretativo alquanto significativo del processo in atto.

Benché non tutta l'area sia interessata dalla contaminazione, è emersa una situazione decisamente critica e particolarmente preoccupante nelle 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 (Rizzetto et al., 2003).

Non va dimenticato inoltre che, ad aggravare il problema, 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 (Teatini et. al, 2005).

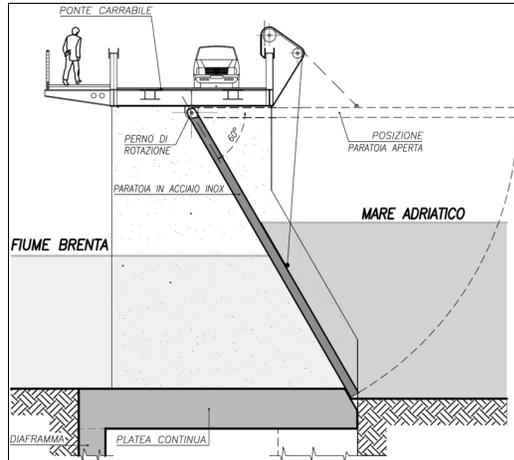


Fig. 8: Opera mobile di sbarramento della marea alla foce del Brenta.

*Sluice gate against sea water encroachment at the Brenta river mouth.*

L'intrusione salina può essere considerata una tipologia di inquinamento delle falde; il suo contenimento, mitigazione e bonifica risultano problematici. E' 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. Una soluzione attuabile andrebbe pertanto ricercata nell'ottica del mantenimento di alti livelli idrometrici e quindi dei

massimi livelli freatici, compatibilmente con il franco di bonifica richiesto dalle pratiche agricole e da una gestione in sicurezza della bonifica stessa. A questo proposito, il Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione ha avuto dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali l'incarico di redigere un progetto preliminare per la creazione di una paratoia mobile alla foce del Brenta che intercetti l'acqua di marea durante le portate di magra dei fiumi (Fig. 8). L'opera, il cui costo è stato stimato in 15 milioni di euro, genererebbe nel tratto terminale dell'alveo dei fiumi Brenta-Bacchiglione-Gorzone e Canale di Valle un volume d'acqua dolce di oltre  $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , ora occupato da acqua salata.

Va comunque sottolineato che, data la complessità della geomorfologia sub-superficiale della zona di studio e la molteplicità delle sorgenti di contaminazione, non è possibile individuare una soluzione univoca per la mitigazione e/o prevenzione del fenomeno, dovendosi invece procedere con diversi approcci tra loro integrati, inevitabilmente costosi, ma che sicuramente dovranno essere studiati in breve termine. Condizione basilare per qualunque tipo di intervento è comunque una dettagliata conoscenza del processo e dell'ambiente fisico in cui esso si esplica. Di qui la necessità di proseguire sia i monitoraggi sulla Rete ISES, sia gli approfondimenti conoscitivi del sottosuolo. Si potrà così disporre di un sistema di allarme nel caso la contaminazione si aggravi e di un'adeguata banca dati, elaborabili statisticamente, per individuare le tendenze evolutive del fenomeno e per predisporre modelli numerici di simulazione e previsione del processo e della sua possibile mitigazione.

### Ringraziamenti

Le ricerche sono state svolte nell'ambito dei Progetti ISES (Intrusione Salina e Subsidenza), BRENTA e Co.Ri.La Research Program 2004-2006, Linee di Ricerca 3.10 e 3.16.

### Bibliografia

- 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.
- 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: Burganos V.N. et al. (Eds.), *Computational Methods in Surface and Ground Water Transport*, 2, 193-200, Southampton, UK.
- 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. © Progetto ISES, 95 p, 12 Tav. f.t., Graf. Erredici, Padova.
- Carbognin, L., Teatini, P., Tosi, L., 2004. Eustasy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4), 345-353.
- Carbognin, L., Teatini, P., Tosi, L., 2005. Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects. *Giornale di Geologia Applicata (Italian Journal of Applied Geology)*, 1, 5-11.
- Consorzio di bonifica Adige-Bacchiglione, 2003. Sbarramento antintrusione salina alla foce del Fiume Brenta in comune di Chioggia (VE). Progetto preliminare, Relazione illustrativa, 42 p.
- Gambolati, G., Putti, M., Teatini, P., Camporese, M., Ferraris, S., Gasparetto-Stori, G., Nicoletti, V., Rizzetto, F., Silvestri, S., Tosi, L., 2005. Peatland oxidation enhances subsidence in the Venice watershed. *EOS Trans. AGU*, 86(23), 217-224.
- 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*, 463-470, Wallingford, UK.
- 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.