

P. GIANI (*), L. BELLUCCI (*), C. PANICHI (*), F. PODDA (**)

STUDIO SULLA PRESENZA DI ACQUA DI MARE NEL TRATTO TERMINALE DEL FIUME ARNO CON METODOLOGIE CHIMICO-ISOTOPICHE

Riassunto - Nell'ambito di una ricerca sulle interazioni tra il fiume Arno e gli acquiferi della Piana di Pisa, si sono ottenuti risultati significativi riguardo la penetrazione di acqua di mare sia nell'alveo del fiume che nelle falde sotterranee.

Le variazioni osservate nei contenuti in ^{18}O , ^2H e Cl^- nelle acque del fiume ed in quelle dei pozzi sono state utilizzate per valutare l'esistenza ed entità del mescolamento con acqua di mare.

Valori relativi a campioni del fiume prelevati a distanze progressive dalla foce e a varie profondità permettono di descrivere la stratificazione delle acque salmastre indotta dal cuneo di intrusione marina.

Campioni prelevati nell'arco di un anno, in differenti periodi stagionali, mettono in evidenza la forte dipendenza della presenza e della morfologia dell'intrusione salina dai valori di portata del fiume.

Parole chiave - Composizione isotopica; cuneo salino; fiume Arno

Abstract - *Application of isotopic techniques to evaluation of marine intrusion in the Arno River.* A study of the interactions between the river Arno and the aquifers of the Pisan plain has also produced some significant data on seawater infiltration of the river bed and the underground aquifers.

The variations in ^{18}O , ^2H and Cl^- in the river and well waters have been used to determine the presence and extension of mixing with seawater.

Values obtained for river water samples, taken at increasing distances from the river mouth, and at different depths, have led to a definition of the salt water stratification produced by the salt-water wedge.

Samples taken in different seasons, over a 12-month period, have highlighted the strong influence of river flow-rate on the presence and morphology of the seawater intrusion.

Key words - Isotopic composition; salt-water wedge; Arno river.

INTRODUZIONE

La qualità e la natura delle acque del reticolo fluviale e delle acque sotterranee della Pianura di Pisa possono essere influenzate dalla presenza del mare al bordo della pianura stessa.

Quando le acque salate vengono in contatto con quelle dolci, le prime tendono a penetrare verso l'interno al di sotto delle seconde, per effetto della maggior densità dell'acqua di mare. Tale fenomeno può verificarsi,

com'è noto, sia nelle falde, freatiche o in pressione, sia nei tronchi terminali dei corsi d'acqua che hanno quote d'alveo inferiori al livello del mare: questo è anche il caso dell'Arno, interessato negli ultimi decenni ed in particolar modo a partire dagli anni '50 da progressivo abbassamento del talweg, che si suppone superi quota zero solo a circa 25 Km dalla foce, all'altezza del Ponte di Caprona (Cavazza & Panico, 1977; Giani, 2001).

Nel caso di fiumi che hanno alvei in terreni permeabili l'ingressione marina può favorire l'insalinamento delle falde limitrofe anche a grande distanza dal mare, qualora vi siano condizioni idrauliche favorevoli alla alimentazione delle stesse da parte del fiume.

Questo fenomeno è stato descritto per il fiume Serchio (Ghezzi *et al.*, 1994), dove le acque salmastre possono risalire fino all'altezza di Rigoli (a circa 17 Km dalla foce) nel punto in cui la quota del fondo alveo del fiume supera il livello del mare, formando una barriera morfologica naturale che impedisce l'ulteriore risalita del cuneo salino.

La dinamica del rapporto tra l'acqua salata di origine marina ed i corpi di acqua dolce è essenzialmente legata, da un lato, al carico idraulico di questi ultimi e dall'altro al livello del mare (maree, venti). Per questi motivi la posizione dell'interfaccia $\text{H}_2\text{O}_{[\text{dolce}]}/\text{H}_2\text{O}_{[\text{salata}]}$ non è fissa e comunque in ogni caso si viene a creare un'ampia zona di mescolamento che ha forma, ampiezza e profondità anch'essa variabile nel tempo (Custodio & Llamas, 1976).

INFLUENZA DEL MARE SULLA COMPOSIZIONE ISOTOPICA E CHIMICA DELLE ACQUE DELL'ARNO

Per definire l'esistenza e l'entità del cuneo salino nel tratto terminale dell'Arno, è stata studiata in dettaglio la composizione chimica ed isotopica di campioni raccolti in superficie, sul fondo ed a profondità intermedie nei punti indicati in Figura 1. I dati ottenuti sono stati confrontati con quelli relativi all'Arno che ne descrivono le caratteristiche isotopiche e chimiche nelle situazioni in cui l'effetto dell'intrusione marina è nullo.

La Figura 2 riporta le relazioni tra i valori di δD , Cl e d^{18}O di campioni rappresentativi di diverse situazioni stagionali e quindi in differenti condizioni di portata dell'Arno e relativi al tratto di fiume compreso tra S. Giovanni alla Vena e la foce.

(*) CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse, Via A. Moruzzi 1, 56127 Pisa.

(**) Istituto di Mineralogia, Via Trentino 51, 09127 Cagliari.

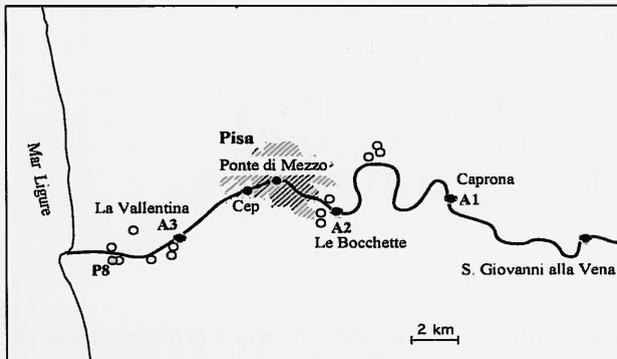


Fig. 1 - Ubicazione dei punti di campionamento. I punti A1, A2, A3 sono stati utilizzati per descrivere le variazioni temporali delle caratteristiche chimico-isotopiche dell'acqua dell'Arno. Del pozzo freatico P8 viene riportata nel testo una selezione di dati che ne descrive le variazioni chimiche discusse compiutamente nella Tesi di Laurea di P. Giani (2001). I cerchi vuoti rappresentano la localizzazione dei pozzi freatici e profondi oggetto di studio nella Tesi di Laurea succitata.

La Figura 2a descrive il mescolamento delle acque dell'Arno con l'acqua di mare, la quale produce arricchimenti in ^{18}O fino a 6-7‰ ed in D fino a 40-50‰ rispetto ai valori dell'Arno non interessato dall'intrusione. Questi ultimi si distinguono in due gruppi con caratteristiche isotopiche distinte, riflettendo una diversa collocazione stagionale. Un gruppo presenta valori di $\delta^{18}\text{O} < -6\text{‰}$ e di $\delta\text{D} < -35\text{‰}$ che si riferiscono al periodo piovoso autunnale e sono allineati lungo la retta che descrive le precipitazioni che avvengono nel bacino (La Ruffa & Panichi, 2000). L'altro gruppo, con valori in $\delta^{18}\text{O}$ compresi tra -4.7 e -6‰ e in δD compresi tra -35 e -40‰ è costituito da campioni prelevati per la maggior parte all'altezza di S. Giovanni alla Vena e di Caprona, nel periodo compreso tra Giugno e la prima metà di Ottobre. In questo periodo il fiume era caratterizzato da basse portate e le sue acque sottoposte a forte evaporazione, la quale a sua volta ha determinato le variazioni di composizione isotopica descritte dalla retta (4) di Figura 2a proposta da La Ruffa & Panichi (2000).

Data la variabilità stagionale di composizione isotopica riscontrata nell'acqua dell'Arno in campioni non contaminati dalla presenza del cuneo, il mescolamento con acqua marina dovrebbe produrre rette con differente pendenza, convergenti al punto rappresentativo dell'acqua di mare.

In realtà la retta di mescolamento tra l'acqua del fiume e quella marina (n°3 di Fig. 2a) è il risultato del best fitting di tutti i campioni contaminati con acqua di mare. Questa osservazione suggerisce che nella maggior parte dei casi l'instaurarsi del cuneo salino nel fiume è favorito da condizioni al contorno simili (periodo secco e basse portate), con le dovute eccezioni, come quelle osservate in Marzo e Maggio '01, con portate dell'Arno relativamente elevate (vedi Fig. 2b).

I dati raccolti in superficie in Marzo e Maggio '01 in due delle stazioni di prelievo, nel momento in cui le portate dell'Arno erano rispettivamente di 162 e 88 m^3/s , mostrano tenori in cloruri (poco più di 400 e 1600

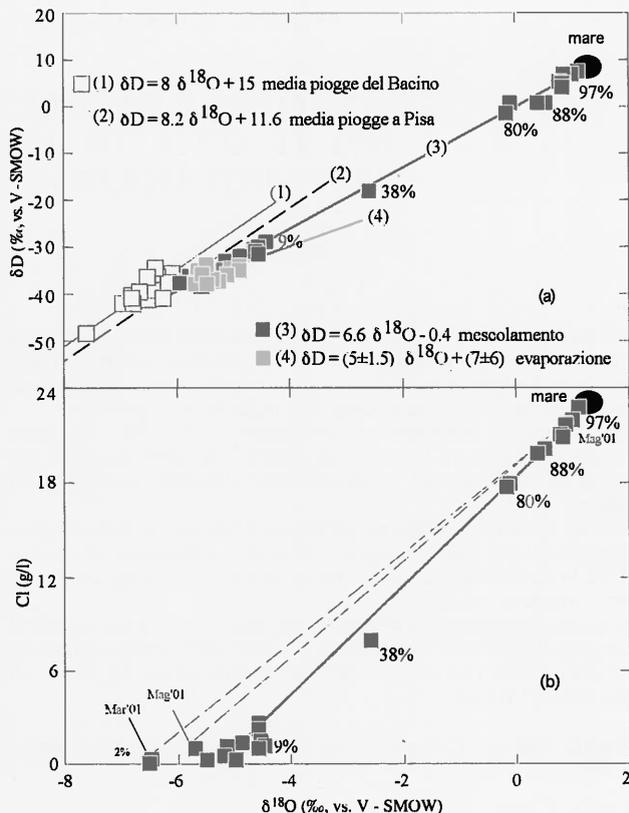


Fig. 2 - Relazioni tra $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD (a) e $\delta^{18}\text{O}$ vs. Cl (b) nei campioni dell'Arno raccolti nell'arco di un anno (Mag. '00-Mag. '01) e relativi al tratto di fiume compreso tra S. Giovanni alla Vena ed il sito La Vallerntina (5 Km dalla foce). Gli effetti del mescolamento con acqua di mare e della evaporazione superficiale sulla composizione isotopica dell'acqua dell'Arno sono descritti dalle rette 3 e 4 rispettivamente (vedi testo). La retta 2 è stata calcolata sulla base di dati inediti dell'I.I.R.G. (Pisa).

ppm rispettivamente) decisamente più elevati di quelli dei valori di base dell'Arno (sempre inferiori a 100 ppm) e attribuibili al mescolamento, seppur minimo, con acqua di mare.

Le percentuali di acqua di mare sono state calcolate sulla base dei valori isotopici dell'ossigeno, considerando per il mare un valore di $\delta^{18}\text{O} = +1.34\text{‰}$ e per l'Arno i diversi valori stagionali osservati all'altezza del ponte di Caprona (campione A1), dove il fiume è privo di un qualunque apporto marino. Fanno eccezione le percentuali relative ai campionamenti di Giugno '00 e Marzo '01, valutate sulla base del contenuto in cloruri, dal momento che i campioni mostrano piccole variazioni di composizione isotopica che sono dello stesso ordine dell'errore di misura. In tal caso è stata considerata per il mare una concentrazione in cloruri di 23g/l.

L'utilizzo dei cloruri nella valutazione delle percentuali di acqua di mare presenti nelle acque dei pozzi deriva dal fatto che lo ione Cl^- , così come i contenuti in ^{18}O e D, è una grandezza conservativa e quindi utilizzabile per valutazioni di termini di mescolamento di due fluidi a composizione differente.

VARIAZIONI STAGIONALI DELLA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DELLE ACQUE DELL'ARNO

I campioni dell'Arno prelevati in superficie mostrano nel tempo sensibili variazioni di composizione isotopica, tanto maggiori quanto più il prelievo è avvenuto vicino alla foce. La Figura 3 mostra infatti le maggiori variazioni per il sito A3 posto a soli 5 Km dalla foce, mentre sono progressivamente attenuate per A2 e A1, localizzati rispettivamente a 15 e 25 Km dalla foce.

Nel periodo Giugno-Ottobre '00 la composizione isotopica dell'acqua si mantiene distinta da un punto di prelievo all'altro, mentre nel periodo Novembre '00-Aprile '01 tende ad assumere valori praticamente uguali. Il campionamento di Maggio '01 mostra nuovamente una differenza isotopica significativa tra i diversi punti come quella già evidenziata in Maggio '00.

L'intervallo di composizione isotopica osservato è legato ai seguenti fattori: i) variazioni stagionali delle piogge, ii) fenomeni di evaporazione subiti dall'acqua dell'Arno, iii) penetrazione nel fiume di acqua marina. Il campione A1, che mostra le minori variazioni nel tempo, è stato prelevato a monte della soglia morfologica presente in corrispondenza del ponte di Caprona, quindi sicuramente è esente da contaminazione salina, e riflette le sole variazioni stagionali di composizione

isotopica delle piogge del bacino a cui possono sommarsi fenomeni di evaporazione, soprattutto nei mesi estivi.

I campioni più a valle (A2 e A3), che mostrano importanti arricchimenti in isotopi pesanti rispetto a quelli osservati in A1, indicano che è avvenuto un mescolamento con acqua di mare, caratterizzata da contenuti in ^{18}O e D notevolmente maggiori rispetto all'acqua del fiume. I campioni che descrivono la presenza del cuneo salino rappresentano una situazione "istantanea", riferibile esclusivamente al giorno in cui il campionamento è stato eseguito e facendo comunque anche in tal caso una notevole approssimazione. Infatti, forma ed entità di penetrazione del cuneo verso l'interno subiscono variazioni, oltre che per le maree, anche per le repentine modifiche di altri fattori, tra cui la portata del fiume e la direzione ed intensità dei venti sono i principali.

La Figura 3 mostra chiaramente che il fenomeno dell'ingressione marina lungo il corso dell'Arno può risultare tutt'altro che trascurabile, in particolare in occasione di basse portate del fiume, come quelle che hanno caratterizzato i campionamenti di Giugno, Luglio, Agosto ed Ottobre '00. Infatti, per il campione A3, raccolto in Luglio e caratterizzato da $\delta^{18}\text{O} = -2.6\%$, è stato stimato un grado di mescolamento con acqua di mare intorno al 40%. Il valore è da considerarsi molto elevato in quanto i campioni qui descritti sono stati prelevati in superficie, mentre è noto che il cuneo penetra preferenzialmente in profondità, per la maggior densità dell'acqua salata rispetto a quella dolce.

La mancanza di significative variazioni isotopiche tra i vari punti di prelievo nel periodo Novembre '00-Aprile '01, lascerebbe supporre l'assenza del cuneo salino nel fiume, per lo meno fino a distanze dal mare superiori a 5 Km. In effetti i prelievi effettuati a varie profondità nei campionamenti di Gennaio ed Aprile '01 non mostrano variazioni di composizione rispetto a quelli raccolti in superficie, facendo escludere fenomeni di mescolamento con acqua di mare. In occasione del campionamento effettuato il 2 Marzo '01 l'Arno era caratterizzato da portata ($162 \text{ m}^3/\text{s}$) superiore rispetto a quella di Gennaio ($120 \text{ m}^3/\text{s}$). Nonostante ciò, il campione più vicino alla foce (A3) ha mostrato un incremento di concentrazione delle specie chimiche (Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e SO_4^{2-}) arricchite nell'acqua di mare rispetto a quella del fiume. Così, sulla base del contenuto di ione cloruro, è stato valutato, per tale campione, un grado di mescolamento con acqua di mare dell'ordine del 2%, che, in termini di composizione isotopica, produce variazioni che rientrano nell'errore standard di misura allo spettrometro di massa e quindi non osservabili.

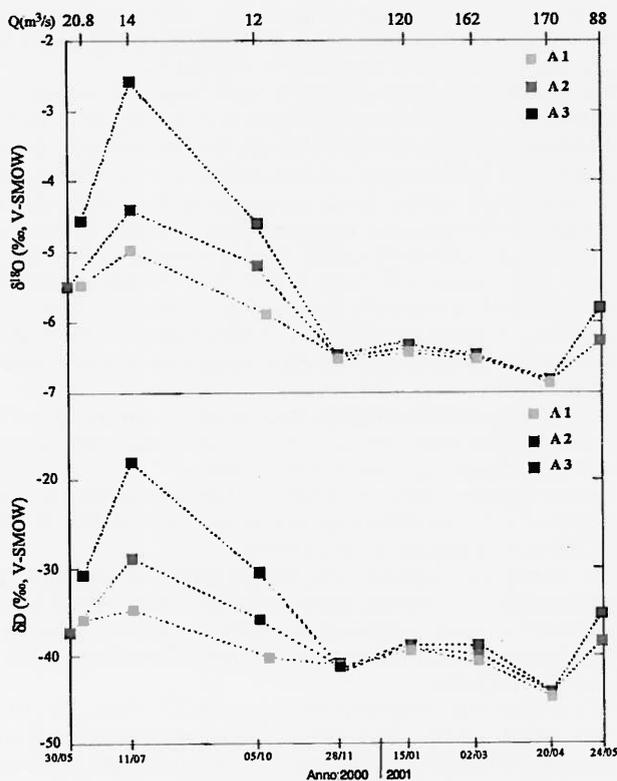


Fig. 3 - Variazioni stagionali della composizione isotopica delle acque dell'Arno campionate nei punti A1, A2 e A3 di Figura 1. I valori di Q si riferiscono alle portate dell'Arno nei vari giorni di campionamento rilevate presso la stazione idrometrografica di S. Giovanni alla Vena (dati Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa).

VARIAZIONI STAGIONALI DELLA COMPOSIZIONE CHIMICA DELLE ACQUE DELL'ARNO

Le variazioni nel tempo degli elementi chimici maggiori disciolti nelle acque dell'Arno mostrano un andamento analogo a quello della composizione isotopica,

con i campioni a maggiore salinità localizzati in prossimità della foce (Fig. 4).

La concentrazione dei singoli ioni assume i valori massimi, come era da aspettarsi, durante la stagione secca, che è caratterizzata da portate minime e da importanti fenomeni di evaporazione. Al contrario, l'effetto di diluizione prodotto dalle copiose piogge autunnali, determina una forte diminuzione dei valori, prossimi allo zero per alcuni elementi.

Il risultato di un diverso grado di mescolamento con acqua di mare è visibile in Figura 4 per i dati relativi ai campioni A2 e A3 i quali mostrano valori elevati di Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e SO_4^{2-} elementi questi contenuti nell'acqua marina in concentrazioni fino a due ordini di grandezza superiori rispetto alla concentrazione di base dell'Arno.

I valori più alti spettano al periodo estivo, quando le basse portate dell'Arno favoriscono la maggior risalita del cuneo salino nel fiume, e vengono raggiunti valori di Cl^- superiori a 8000 ppm.

Variazioni minime o nulle si registrano in Marzo quando solo il campione più vicino alla foce risulta contaminato da acqua di mare.

Lo ione bicarbonato ha un comportamento anomalo rispetto agli altri soluti. Infatti, le concentrazioni dello ione HCO_3^- sono dello stesso ordine di grandezza nelle acque del fiume e del mare (ed in particolare i valori maggiori spettano all'Arno), perciò non ci si possono aspettare grosse variazioni e differenze per effetto di un diverso grado di mescolamento. Tuttavia si può osservare che il campione A3, che risente maggiormente del cuneo, presenta i valori minimi, presumibilmente diluiti dall'acqua di mare, solo nei primi due campionamenti, mentre successivamente è il campione A1 ad assumere i valori più bassi. Tale variabilità di composi-

zione tra i diversi siti può essere il risultato di processi diversi, tra cui il mescolamento con acque reflue della città di Pisa che tenderebbero ad aumentare la concentrazione di HCO_3^- nei due campioni a valle. Infatti il campione intermedio (A2), nonostante rappresenti una situazione di mescolamento con acqua di mare (seppur di lieve entità), presenta valori di HCO_3^- superiori al campione A1, come conseguenza di un importante contributo antropico di bicarbonato che "maschera" il contributo dell'acqua di mare. Nelle vicinanze della foce, poi, il mescolamento con acqua di mare è maggiore e perciò il HCO_3^- decresce.

INFLUENZA DEL CUNEO SALINO SULLA COMPOSIZIONE ISOTOPICA E CHIMICA DELLE ACQUE DI FALDA ADIACENTI ALL'ARNO

Le acque dei pozzi della Piana di Pisa sono state oggetto di diversi studi che hanno fornito utili indicazioni sulle caratteristiche chimiche e isotopiche degli acquiferi freatici e artesiani (Rossi & Spandre, 1994, 1995; Grassi & Rossi, 1996). Anche lo studio delle interazioni tra fiume e falda è stato positivamente affrontato (Pierotti & Tessitore, 1997), fornendo dati interessanti sull'interscambio in un regime idraulico definito.

Uno studio di dettaglio è stato recentemente condotto sull'interazione fiume-falda (Giani, 2001), utilizzando le acque prelevate nell'arco di un anno da 13 pozzi la cui localizzazione è riportata in Figura 1.

La possibilità di osservare e descrivere le eventuali interazioni tra l'acqua dell'Arno e le acque delle falde limitrofe all'asta fluviale dipende essenzialmente dalle differenze nella composizione chimica e isotopica dei diversi corpi idrici: tanto più grande è la differenza, tanto più elevata sarà la capacità di valutare mescolamenti di proporzioni anche molto limitate. Gli effetti delle interazioni dell'Arno con la falda vengono perciò esaltati dalla eventuale presenza in alveo di acque salmastre, le quali modificano il chimismo di base del fiume con un peso ovviamente maggiore avvicinandosi alla foce.

I dati a disposizione hanno indicato il pozzo freatico P8 come emblematico per descrivere l'influenza del cuneo salino presente nel fiume sulla falda.

Questo pozzo è ubicato a circa 50 m dal fiume, in riva sinistra, a 2 Km dalla foce ed ha una profondità di 3.6 m dal p.c. (Spandre *et al.*, 1999).

Le acque campionate mostrano forti variazioni che interessano la maggior parte delle specie chimiche considerate, le quali raggiungono spesso valori di concentrazione nettamente superiori a quelli rilevati negli altri pozzi della zona.

Gli andamenti temporali delle specie Cl^- , Na^+ , Br^- , B^- , Sr^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} sono pressoché identici, con i valori massimi rilevati in Agosto ed i minimi nel periodo invernale, come si osserva in Figura 5.

I dati indicano chiaramente la penetrazione in falda di acque salate. La notevole distanza del pozzo dal mare, l'estrema vicinanza all'asta fluviale e la coincidenza delle concentrazioni maggiori nell'acqua di falda al periodo estivo, quando l'Arno è maggiormente interes-

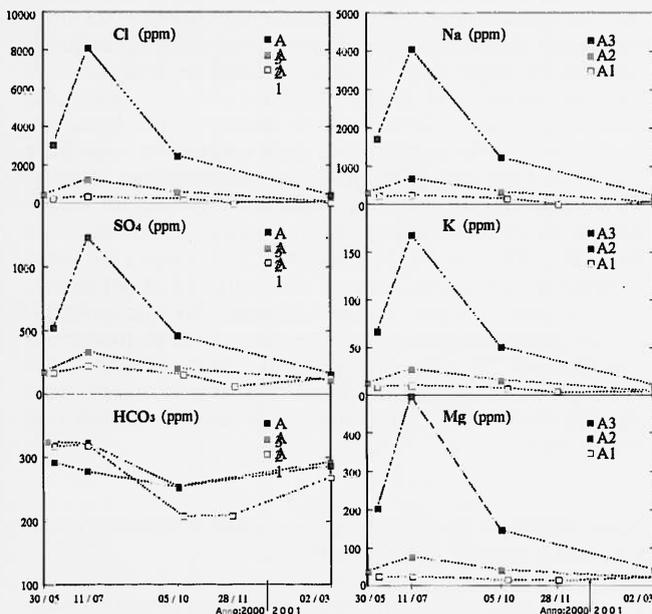


Fig. 4 - Variazioni stagionali della composizione chimica delle acque dell'Arno campionate nei punti A1, A2 e A3 di Figura 1.

sato da mescolamento con acqua di mare (cuneo salino), fanno ritenere l'Arno stesso il veicolo principale di queste acque salate.

In effetti, confrontando le variazioni degli elementi maggiori dei campioni dell'Arno (Fig. 4) con quelle del pozzo P8 si può notare che gli andamenti sono simili, a meno dello sfasamento prodotto dal tempo necessario affinché le acque del fiume raggiungano il pozzo in questione.

Contrariamente a quanto avviene per la concentrazione dei soluti, le variazioni di composizione isotopica sono generalmente piccole e comunque non tali da riflettere in maniera evidente l'avvenuto mescolamento con acqua di mare.

Sulla base del contenuto in cloruri nell'acqua di mare (circa 23 g/l) e del valore di base presente nel pozzo (circa 100 ppm), è stato valutato che, per ottenere la concentrazione di Cl⁻ del campione a più alta salinità (circa 700 ppm), è sufficiente una percentuale di acqua di mare inferiore al 2%.

Un così basso grado di mescolamento tra acqua di mare ed acqua di falda può produrre variazioni importanti solo per quegli elementi la cui differenza percentuale tra i due corpi idrici è maggiore, ovvero soprattutto per lo ione cloruro ($[Cl^-]_{mare}/[Cl^-]_{falda}=220$), il sodio ed il bromo, con rapporti anch'essi intorno a 200. Anche nel caso del SO₄²⁻, B⁻, Sr²⁺ e Mg²⁺, caratterizzati da rapporti

compresi tra 20 e 60, gli effetti del mescolamento con acque marine sono facilmente evidenziabili.

Per quanto riguarda gli isotopi, le variazioni che si possono osservare con un mescolamento inferiore al 2%, come dedotto utilizzando le concentrazioni dello ione cloruro, rientrano nell'errore standard della misura allo spettrometro di massa, per cui tale fenomeno non produce variazioni significative, al contrario di quello che accade nell'Arno quando questo è interessato dal cuneo salino.

VARIAZIONI STAGIONALI DELL'ENTITÀ DI PENETRAZIONE DEL CUNEO SALINO

Le modalità di risalita del cuneo salino, legate alla diversa densità dei due corpi idrici (mare e fiume) che interagiscono, determinano una potenziale stratificazione delle acque nel tratto interessato. Ciò impone la necessità di effettuare prelievi a varie profondità, che sono stati eseguiti nei giorni 11 Agosto e 5 Ottobre '00, caratterizzati entrambi da basse portate dell'Arno, di poco superiori a 10 m³/s, ed il 23 Gennaio '01, quando invece la portata era di circa 120 m³/s.

Buone indicazioni possono essere comunque ricavate dall'analisi dei campioni superficiali, per confronto con i dati prelevati su profili verticali.

Le Figure 6, 7 e 9 collocano nello spazio e nel tempo i campioni dell'Arno, con l'esclusione di quelli prelevati a S. Giovanni alla Vena, mettendo in evidenza per ciascuno di essi la percentuale di acqua di mare che li caratterizza, allo scopo di definire l'esistenza e l'entità del processo di intrusione marina in Arno nelle varie stagioni.

In Agosto (Fig. 6), i campioni presi in esame mostrano alti gradi di mescolamento con acqua di mare. Infatti, in corrispondenza della città di Pisa e più precisamente all'altezza del Ponte di Mezzo (a circa 11 Km dalla foce), in superficie era presente una discreta percentuale di acqua marina (7%), mentre a soli 2.5 m di profondità il contributo marino era già del 92% arrivando sul fondo al 96%. Presso il Ponte delle Bocchette la situazione era analoga a quella sopra descritta: la percentuale di acqua di mare è passata dal 6% all'84% in soli 1.5 m per salire sul fondo all'87%.

In entrambi i casi, quindi, le variazioni più importanti si sono verificate nei livelli più superficiali del fiume; in altre parole l'incremento di salinità è fortemente disomogeneo con la profondità.

Nella campagna di Ottobre la portata dell'Arno (12 m³/s) si è mantenuta sugli stessi valori di Agosto (11 m³/s) determinando condizioni ancora favorevoli alla risalita nel fiume del cuneo di intrusione marina. In questo caso sono stati prelevati campioni al pelo d'acqua ed in profondità in altri due siti indicati con CEP e La Vallentina, posti a valle dei precedenti e rispettivamente a 5 ed a circa 9.5 Km dalla foce. La Figura 7 mostra un grado di mescolamento elevato anche per i campioni raccolti in superficie e naturalmente maggiore in vicinanza della foce (La Vallentina), dove l'acqua dell'Arno conteneva una quantità di acqua di mare del 18% che scendeva al 14% presso il CEP ed al 10%

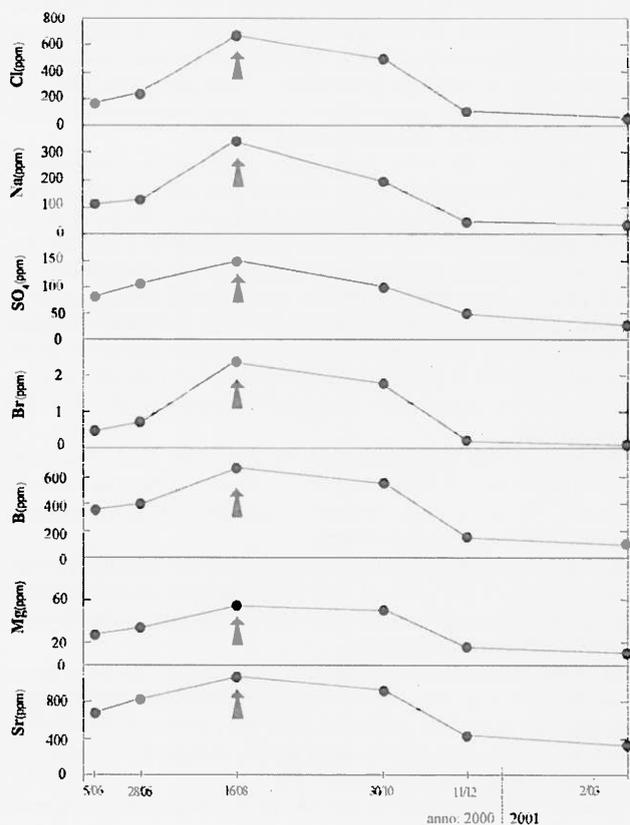


Fig. 5 - Variazioni stagionali della composizione chimica delle acque del pozzo freatico P8.

Agosto 2000

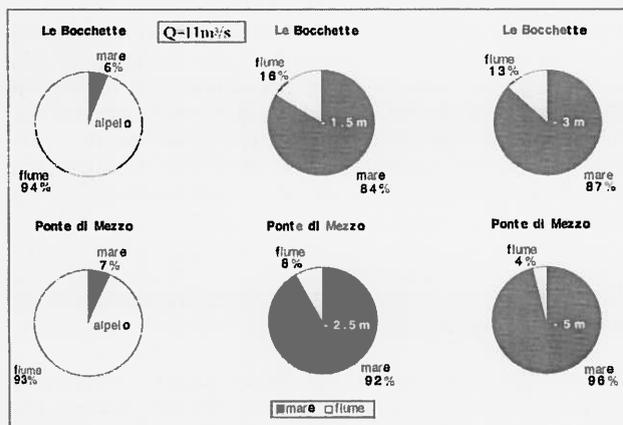


Fig. 6 - Rappresentazione del grado di mescolamento con acqua di mare per i campioni dell'Arno prelevati in superficie e a varie profondità all'altezza del Ponte di Mezzo (11 Km dalla foce) e del Ponte delle Bocchette (15 Km dalla foce) il giorno 11 Agosto 2000, con portata del fiume di $11\text{ m}^3/\text{s}$.

Ottobre 2000

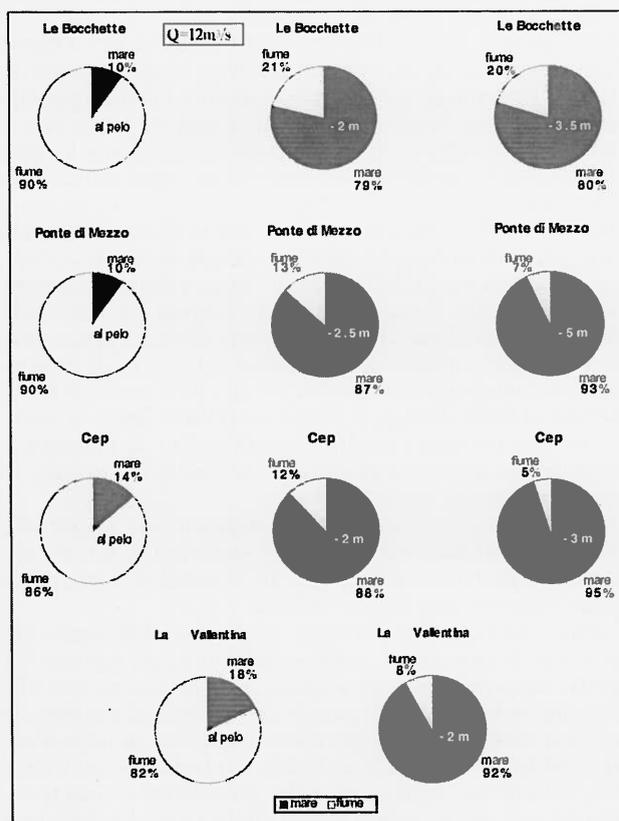


Fig. 7 - Rappresentazione del grado di mescolamento con acqua di mare per i campioni dell'Arno prelevati il 5 Ottobre 2000, con portata del fiume di $12\text{ m}^3/\text{s}$, nei siti La Vallentina (5 Km dalla foce), Cep (9.5 Km dalla foce), Ponte di Mezzo (11 Km dalla foce), Ponte delle Bocchette (15 Km dalla foce).

all'altezza del Ponte di Mezzo, stabilizzandosi su questo valore anche nel punto di campionamento più a monte (Le Bocchette). Anche in tal caso, così come messo in evidenza per il campionamento di Agosto, possiamo notare che il mescolamento non è graduale dal pelo al fondo, ma le variazioni maggiori si verificano nei livelli più superficiali, dal momento che già a partire da 2 m di profondità si trovano percentuali di acqua di mare dell'80% o superiori.

Con i dati isotopici di Ottobre si è tentata la ricostruzione della morfologia del cuneo di intrusione marina nel fiume, limitatamente agli ultimi 15 Km del fiume (Fig. 8).

Un risultato del tutto analogo si poteva ottenere utilizzando le concentrazioni dello ione cloruro, come è stato messo in evidenza in letteratura (La Ruffa & Panichi, 2000).

Si deve notare che la ricostruzione di Figura 8 non tiene conto della reale morfologia del fondo; d'altra parte i profili del talweg disponibili si riferiscono a circa 30 anni fa quindi avrebbero rappresentato anch'essi una notevole approssimazione della situazione reale. Tuttavia l'elemento essenziale di Figura 8 riguarda la stratificazione delle acque salate, che varia con la distanza dalla foce e con gradiente maggiore nelle parti più superficiali.

Il confronto dei dati relativi ai campioni prelevati a Le Bocchette ed al Ponte di Mezzo riportati nelle Figure 6 e 7 mostra che in estate i campioni superficiali presentano un grado di mescolamento con la componente marina minore rispetto a quello autunnale, mentre in profondità si verifica il contrario; ciò dimostra che l'estrapolazione in profondità dei dati superficiali può portare ad errori di valutazione.

In Gennaio '01 tutte le acque campionate risultavano esenti da contaminazione marina per effetto delle elevate portate che hanno caratterizzato l'Arno già da Novembre '00 e che si sono protratte per tutta la stagione invernale respingendo il cuneo verso la foce.

La Figura 9 mostra i rapporti percentuali valutati per le altre aliquote prelevate in Arno nel periodo Giugno '00-Maggio '01; si tratta per la maggior parte di campioni raccolti al pelo con soli due prelievi in profondità eseguiti in Aprile e Maggio '00 presso il sito La Vallentina.

A Giugno '00 la percentuale di acqua di mare presente in superficie a 5 Km dalla foce era del 13% e si riduceva all'1% a 11 Km, mentre a Luglio '01 si osservano valori nettamente superiori.

Le basse portate estive hanno permesso infatti di rilevare, in quel periodo, il più alto grado di mescolamento con acqua di mare per un campione superficiale (38% a 5 Km dalla foce).

In quest'occasione ci saremmo aspettati di registrare anche per Le Bocchette una percentuale nettamente superiore a quelle relative agli altri periodi in studio, ma in realtà è risultata addirittura inferiore rispetto al campionamento di Ottobre '00.

Queste osservazioni mettono in evidenza la notevole complessità del fenomeno dell'ingressione di acque marine in un fiume, essendo la presenza e la forma del cuneo legata a molti fattori, variabili nel tempo, che

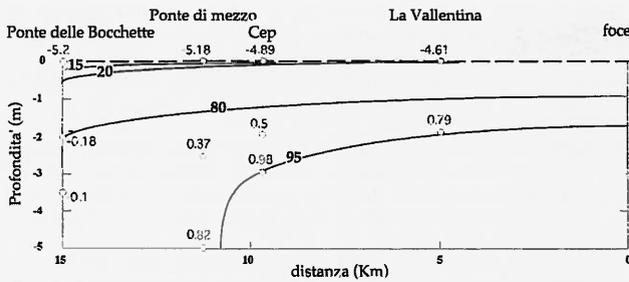


Fig. 8 - Morfologia del cuneo di intrusione marina nel fiume Arno, ricostruita attraverso i valori di $\delta^{18}\text{O}$. La ricostruzione non tiene conto della reale morfologia del fondo (vedi testo).

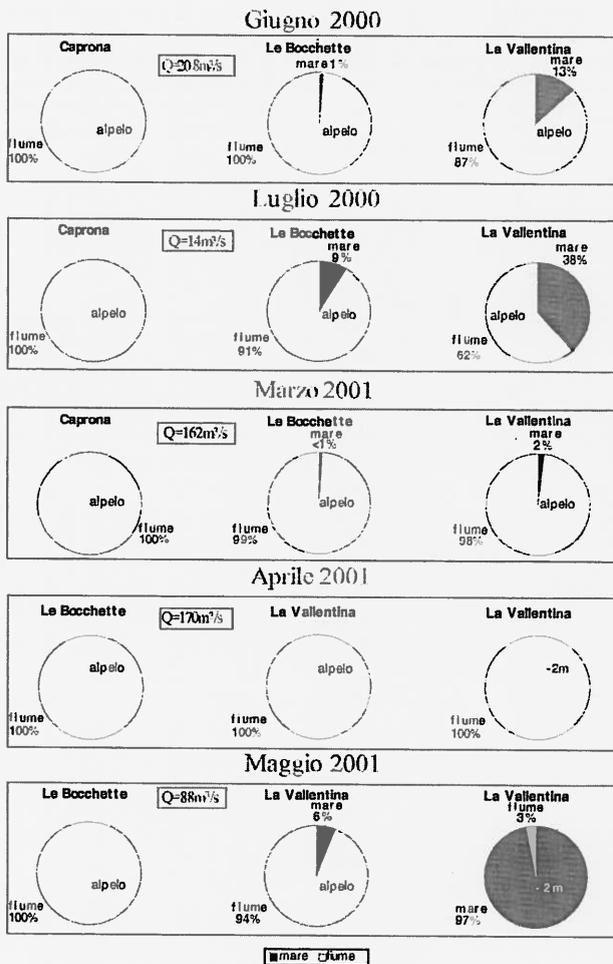


Fig. 9 - Rappresentazione grafica delle percentuali di acqua di mare osservate in campioni del fiume Arno in differenti periodi stagionali. Per ogni campionamento è indicata la portata dell'Arno registrata a S.Giovanni alla Vena.

producono ogni volta caratteristiche morfologiche differenti.

Così, singoli dati superficiali, oltre a non consentire previsioni attendibili relativamente al grado di mescolamento in profondità, non possono essere utilizzati per

eventuali "estrapolazioni" verso monte del fenomeno oggetto di studio.

In Marzo '01 l'Arno aveva una portata di circa 160 m³/s e l'intrusione marina era rilevabile in superficie a soli 5 Km dalla foce. Si noti tuttavia che tale effetto non era visibile a Gennaio '01 nonostante la portata fosse relativamente più bassa (120 m³/s).

Ciò può trovare giustificazione nel fatto che mentre la campagna di Gennaio era stata preceduta da un lungo periodo di piena dell'Arno, il mese di Febbraio, al contrario, è stato scarso di precipitazioni (a Pisa sono caduti soli 19 mm di pioggia) e quindi caratterizzato da portate molto basse, che hanno consentito l'ingresso nel fiume delle acque marine, ancora parzialmente presenti in occasione del campionamento del 2 Marzo.

L'elevata portata dell'Arno (circa 170 m³/s) registrata il 20 Aprile '01 ha fatto sì che non solo i campioni raccolti in superficie, ma anche quello prelevato a 2 m di profondità ed a soli 5 km dalla foce fossero esenti da contaminazione marina.

Infine, a Maggio 01, con portata dell'Arno dimezzata rispetto a quella di Aprile, si osserva nuovamente, per i campioni prelevati a La Valentina, il mescolamento con acqua di mare, prossimo al 100% per l'aliquota raccolta a 2 m di profondità.

CONCLUSIONI

Le condizioni per cui il cuneo salino penetra maggiormente si verificano allorché il fiume è in magra: infatti in tal caso le portate fluviali defluiscono verso la foce al di sopra delle acque salate, le quali sono caratterizzate da un movimento molto più lento ed in senso alternato in dipendenza dalle maree. È probabile che la massima risalita di acque marine si sia verificata successivamente al campionamento di Agosto, dal momento che in tutto l'intervallo di tempo compreso tra il 13/08 ed il 31/08/00 le portate dell'Arno si sono mantenute inferiori a 10 m³/s, con il minimo assoluto per l'anno 2000 registrato il 28/08 (5.9 m³/s).

Con l'aumentare della portata il cuneo viene respinto verso la foce, ma solo in occasione delle piene possiamo considerare l'alveo totalmente occupato da acqua dolce.

Per valutare l'entità del mescolamento tra i due corpi idrici, mare e fiume, che interagiscono, è consigliabile conoscere i tenori in ione cloruro dei campioni studiati poiché basse percentuali di acqua di mare producono variazioni di composizione isotopica limitate che possono rientrare nell'errore standard di misura del $\delta^{18}\text{O}$ ($\pm 0.1\%$) e quindi impedirne la loro utilizzazione.

L'interazione fiume-falda è estremamente sensibile alle quote idrometriche e piezometriche, e poiché quest'ultime nella piana di Pisa sono in genere di poco superiori al livello del mare (Cavazza, 1994), occorre prestare attenzione a tutti gli interventi tendenti a modificarle, in quanto si possono produrre drastici cambiamenti di salinità delle acque.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Prof. R. Spandre, l'Istituto di Mineralogia di Cagliari, l'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa ed il Dr. M. Cenni (ARPAT) per l'ampia collaborazione fornita durante la Tesi di Laurea di P. Giani, da cui sono stati tratti i dati di questa nota.

BIBLIOGRAFIA

- Cavazza S., 1994. L'idrologia attuale. La natura e i molteplici interventi umani. In: *La Pianura di Pisa e i rilievi contermini: la natura e la storia; Parte Terza - Problemi storici e geografici del territorio attuale*, Mem. Soc. Geogr. Ital., 50: 431-461.
- Cavazza S. & Panico A., 1977. Note preliminari sulle variazioni morfologiche del tronco terminale del fiume Arno. Atti del Convegno di Studi per il riequilibrio della costa tra il fiume Magra e Marina di Massa. Massa, 2-4 Giugno 1977, 157-162.
- Custodio E. & Llamas M.R., 1976. Relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras. In: *Hidrologia Subterranea*, Tomo II, Sec. 13, Ed. Omega S.A., Barcelona, 1318-1389.
- Ghezzi G., Ghezzi R. & Porsia D., 1994. La dinamica del cuneo salino nel fiume Serchio ed i suoi rapporti con la falda superficiale. In: *Il Serchio: una possibile soluzione dei problemi idrici di Pisa e Livorno*. Pisa, 19 Febbraio 1994, 39-76.
- Giani P., 2001. Nuova metodologia di valutazione dei rapporti tra acque superficiali e sotterranee. Il caso della Piana di Pisa. Tesi di Laurea, Anno Accademico 2000-2001.
- Grassi S. & Rossi S., 1996. Il cloro delle acque sotterranee della Pianura di Pisa. *Atti Soc. Toscana Sci. Nat., Mem., Ser. A*, 103: 135-142.
- La Ruffa G. & Panichi C., 2000. Caratterizzazione chimico-isotopica delle acque fluviali: il caso del fiume Arno. 101pp., Pubblicazione n. 2031 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (CNR), Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, Pisa.
- Pierotti L. & Tessitore S., 1997. Studio idrostratigrafico ed idrochimico degli acquiferi freatici della Pianura Pisana con particolare riferimento ai rapporti fiume Arno-falda. Tesi di Laurea, Anno Accademico 1996-1997.
- Rossi S. & Spandre R., 1994. L'intrusione marina nella falda artesiiana in ghiaia nel litorale pisano. *Acque sotterranee*, 3 (43): 51-58.
- Rossi S. & Spandre R., 1995. Caratteristiche idrochimiche della prima falda artesiiana in sabbia nei dintorni di Pisa. *Acque sotterranee*, 4 (48): 27-48.
- Spandre R., Ceragioli M. & Spinicci A., 1999. Realizzazione di una carta di vulnerabilità degli acquiferi della Pianura Pisana compresa tra la linea di costa, il canale Scolmatore, il fosso della Bufalina e la città di Pontedera. Provincia di Pisa, Settore Pianificazione del territorio.