

A. MERIGGI (\*), R. SPANDRE (\*\*)

## STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA ALL'INTERNO DEL PADULE E DEL LAGO DI MASSACIUCCOLI

**Riassunto** - L'obiettivo principale del presente studio è quello di determinare la circolazione idrica superficiale e sotterranea all'interno del Lago e del Padule di Massaciuccoli.

L'azione antropica ha portato nel tempo a sostanziali modifiche morfologiche della zona, dando luogo alla formazione di numerosi invasi che hanno sostituito i substrati semisommersi, ricchi di vegetazione e tipici dell'ambiente palustre. Così facendo si è venuto a creare un sistema di circolazione, che ha favorito l'entrata nel padule di acque salmastre che, provenienti dal mare e risalenti il Canale Burlamacca, sono arrivate ad interessare le zone più interne del sistema lacustre.

Sono stati effettuati controlli conducimetrici mensili e analisi chimiche sui contenuti dei cloruri in punti opportunamente scelti all'interno dei canali e nelle cave di sabbia. L'esame dei profili verticali di conducibilità e temperatura ha permesso l'individuazione di un diverso tipo di stratificazione delle acque nel settore est ed in quello ovest.

Inoltre lo studio ha permesso la schematizzazione del flusso superficiale e la comprovazione del ruolo svolto dalle cave di estrazione delle sabbie silicee nel complicato sistema idrodinamico superficiale e sotterraneo.

**Parole chiave** - Idrogeologia, idrochimica, Lago di Massaciuccoli.

**Abstract** - *Study of the water's circulation in the the Padule and in the Lake of Massaciuccoli.* The aim of this report is the determination of the water's circulation inside the system of the Lake and Padule of Massaciuccoli.

During last years many works, especially made in order to exploit silica sands, had substantially modified the hydro-morphology of the area.

In fact birth of quarries and peateries had permitted that these works replaced the half-submerged substrate which was covered by autochthonous vegetation and palustrine plants, typical of the marshy habitat.

This matter, with the environmental deterioration and with the bad maintenance of the installations (sluices, channel etc.) had consequently permitted, in the Padule, a salty water's income, which ascending Burlamacca's Canale, reached the more internal areas of the Lake.

The monthly check of the conducibility and the chemical analysis of the superficial waters allowed to distinguish two different water stratifications, which are different in the east and in the west area of the system. The streams inside the lake has been determinate by the techniques of the «drifts». The study of «drifts» and water-flows has permitted to understand the double effect which quarries have: in fact they are «deposits» of harvest of the brackish waters which arrive from Canale Burlamacca and, at the same time, they drain aquifer in the sands.

The quarry which hold the most important role about the relationship between lake and aquifer is the big quarry of San Rocchino, which is placed along the road of Montramito.

This quarry has a depth of about 20 meters and interrupts Canale Burlamacca in its run toward the sea; besides, in its inland, salty waters which go up through Canale Burlamacca (about 2-2,5 meters depth) accumulate and stratify.

Presence of waters with high salinity and constant gradient during the year in the other «hollows» which are placed in the inland of the swamp, have to be attributed to the aquifer in the sand which radially bequeaths salty waters from S.Rocchino to all the other excavations.

This effect is absent on the oriental band of the swamp where a huge presence of sweet water stops salty waters permit a reduction of the volume and of the salt's concentrations.

**Key words** - Hydrogeology, hydrochemistry, Lake of Massaciuccoli (Tuscany).

### CENNI STORICI

Le prime opere di bonifica del «padule» viareggino risalgono all'epoca romana. Guardando la rappresentazione della zona in Fig. 1 si nota che stranamente i canali del padule sono disposti in modo sub-parallelo alla linea di costa; questo è avvenuto perché i Romani, che per primi curarono la disciplina degli scoli d'acqua nella zona, trovarono più agevole scavare là dove affiorava la sabbia, anziché dov'era lo strato torboso più compatto. Il Fosso Le Venti, che dista circa 4 Km dalla linea di riva marina attuale, fu scavato proprio dove il piano assiale di quella duna sabbiosa intersecava il piano di campagna (Pandolfi, 1974).

Inoltre gli antichi canali, cioè il Canale Burlamacca, il Malfante, il Fosso Le Venti ed il Fosso Le Quindici, prima di sboccare in mare confluivano nel Burlamacca stesso assieme alle acque perenni del torrente Selice e della Gora di Stiava, che assicuravano la foce aperta durante tutto l'arco dell'anno.

Durante il VI secolo d.C. i Lucchesi deviarono il corso del Serchio dall'antica sua confluenza nell'Arno all'attuale foce.

Probabilmente, quando il Serchio andava in piena, molta della sua acqua si riversava nel lago che, avendo scarsa capienza e difficile deflusso verso mare, vedeva esondare le sue acque che si riversavano sui terreni circostanti.

(\*) Via di Montenero 21A, 57128 Livorno.

(\*\*) Dipartimento Scienze della Terra, Via S. Maria 53, 56124 Pisa.

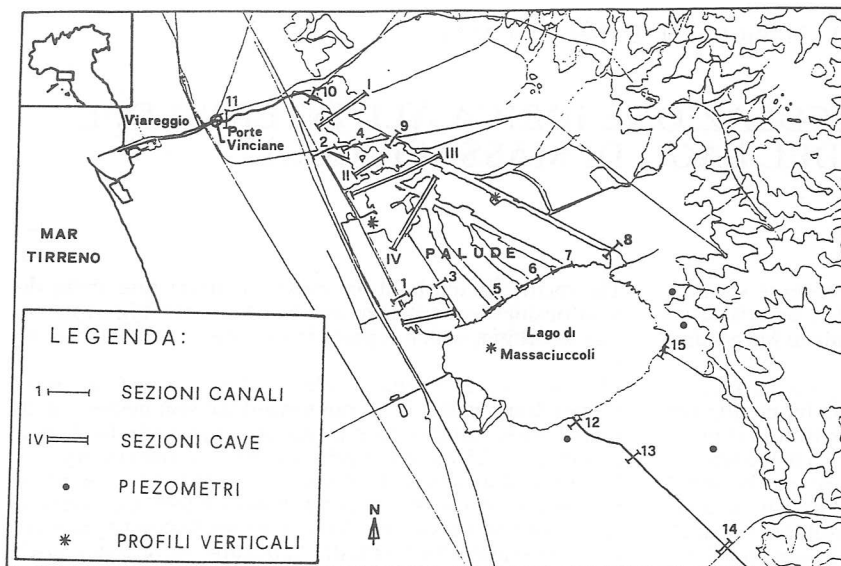


Fig. 1 - Ubicazione geografica dell'area di studio.

A seguito dei ricorrenti allagamenti fu scavato il Fosso della Bufalina che è stato l'unico emissario con direzione est-ovest cioè da monte verso mare. Durante i periodi di deflusso nullo, nella stagione estiva, la foce di questo fosso si insabbiava per opera della corrente marina litoranea settentrionale.

Nel periodo che va dal 1000 al 1250 i porti di Massarosa e Massaciuccoli ebbero il loro massimo sviluppo poiché rappresentavano l'unico sbocco al mare per la città di Lucca.

Agli inizi del 1300 si diffuse la malaria che perdurò fino al 1750, epoca in cui la Repubblica di Lucca, preoccupata della decimazione delle popolazioni residenti nei paesi circostanti al lago e al padule, chiamò un matematico veneto, lo Zendrini, che progettò e fece costruire le note «Porte Vinciane» (Pandolfi, 1974).

Si tratta di un sistema di porte a bilico situate nel Quartiere Soldati a Viareggio (Fig. 1) all'interno del Canale Burlamacca (attualmente unico emissario delle acque del lago in mare), che bloccano l'acqua marina quando il livello del lago si trova al di sotto di quello del mare cioè impediscono all'acqua marina di rifluire verso il lago.

Sconfitta la malattia, i paesi cominciarono a ripopolarsi sempre più e di conseguenza si rese necessario acquisire nuove terre coltivabili.

Furono bonificati e messi a coltura in pochi anni oltre 1000 ettari di terreni. Nel periodo che va dal 1800 al 1850 furono proposti alcuni progetti intesi a deviare il Serchio attraverso le colline di Filettole per colmare il Padule e il Lago di Massaciuccoli con i detriti apportati dalle torbide del fiume. C'è chi pensò addirittura di prosciugare l'intera area (palude più lago).

Ma, quando ormai di progetti ne erano stati fatti molti, l'Areonautica Militare bloccò ogni possibile intervento sul lago perché indispensabile come scalo per gli idrovolanti.

Nel 1894 il marchese Ginori Lisci (allora proprietario del lago e di parte dei terreni circostanti) condusse i primi tentativi di distillazione e di fabbricazione di coke dalla torba che già era usata come concime e come fonte di energia per il riscaldamento domestico. Nel 1918 lo sfruttamento industriale del giacimento di torba prevalentemente come fonte energetica raggiunse un primo massimo (per gli aumentati fabbisogni dovuti alla guerra). I Canali Punta Grande e Centralino sono il risultato dell'estorbazione operata negli anni intorno al 1920-22 dalla Società Torbiere d'Italia che nel 1927 venne messa in liquidazione perché fallimentare (Gemina, 1962).

Dopo il 1927 si formarono i Consorzi di Bonifica che costruirono i grandi canali collettivi sopraelevati (es. Fosso della Barra) ed installarono i potenti impianti idrovori; questi ultimi pompavano le acque accumulate nelle zone più depresse e le riversavano nei canali sopraelevati, dai quali defluivano al lago e poi in mare per la sola forza di gravità.

Sin dalla fine del 1700 la «rena silicea» del Lago di Massaciuccoli veniva utilizzata negli Opifici di Serravezza (vetrerie, segherie, etc.) perché più omogenea e più dura delle altre sabbie. Le primissime cave, dove l'estrazione era del tutto artigianale, sorsero in località San Rocchino. Dopo il 1921 si crearono le prime società di estrazione, tra cui l'Unione Sabbifera Carrarese e più tardi la S.I.S.A. che utilizzò gli impianti della cessata Soc. «Torbiere d'Italia». La S.I.S.A. ebbe lunga vita e dette il nome allo specchio d'acqua dal quale estraeva la sabbia (Pedreschi, 1956).

Si arriva così agli anni '40 in cui, nonostante l'enorme quantità d'acqua proveniente dai terreni bonificati, le acque del lago risultavano ancora estremamente limpide, infatti (Brunelli & Cannicci, 1942) il Lago di Massaciuccoli era un luogo ambito da molti per le sue acque estremamente limpide che addirittura avevano carattere oligotrofico.

Molti anziani che vivono nei paesi che circondano il lago e il padule, ben ricordano i tempi in cui l'acqua era talmente bella che «si poteva bere senza timore».

Parallelamente all'aumento dello sfruttamento del territorio, mediante le opere di bonifica (post 1920) e soprattutto con l'introduzione di fertilizzanti in quantità massicce a partire dalla prima fase industriale del dopoguerra, si è registrato un forte peggioramento della qualità delle acque del Lago di Massaciucoli, sia dal punto di vista chimico che organolettico.

Il problema ecologico si accentua ulteriormente nel periodo estivo quando l'emungimento di notevoli quantità di acqua dal lago, principalmente a scopi irrigui, associato alla scarsità di precipitazioni e alla forte evapotraspirazione, provoca una risalita delle acque salmastre nell'area palustre lungo il Canale Burlamacca, creando seri problema all'equilibrio biologico.

#### CARATTERI FISIOGRAFICI

Il Lago di Massaciucoli presenta in generale tutte le caratteristiche dei laghi costieri, anche se, per la sua forma e per la distanza dal mare (circa 4 km) non ne osserva strettamente i canoni.

In realtà questi ultimi aspetti trovano la loro giustificazione nel fatto che l'azione del mare (onde e drift verso nord) ha allineato contro il lago grandi quantità di depositi fluviali provenienti dal sistema Arno-Serchio. Il lago, in origine, non doveva essere lontano dal mare. Per quanto riguarda la sua forma non allungata in direzione della costa essa può essere attribuita sia al progressivo interrimento naturale che all'opera di bonifica da parte dell'uomo soprattutto in direzione di Pisa.

Il fondale è tipico dei bacini costieri, con una profondità che raramente supera, in condizioni naturali, i 2,50 m, stabilendosi in quasi tutto lo specchio d'acqua tra 1,00 e 2,50 m (Duchi *et al.*, 1990).

Il Lago e il Padule di Massaciucoli in Toscana costituiscono una zona di circa 1700 ettari di notevole importanza ecologica

L'area paludosa presenta la tipica disposizione parallela alla linea di costa ed ospita (AA.VV., 1994) molte specie di uccelli, di piante (182 unità tra cui alcune molto rare) e di pesci (circa 26 specie di cui 13 tipiche di acqua dolce, 11 eurialine e 2 esclusivamente marine).

Al piede delle colline è presente una fascia di depositi alluvionali, costituiti per lo più da sabbie e da limi-sabbiosi. Nel settore centrale dell'area, occupata dal padule e dal lago, dominano le torbe. Nella fascia costiera (ampia circa 4 Km), affiorano le sabbie eoliche che, nella sua parte orientale, assumono una componente limosa prima di essere sostituite dalle torbe. Una striscia larga circa 100-150 m, a partire dalla riva del mare, è costituita dalle sabbie della spiaggia emersa attuale.

I grandi cordoni di dune sabbiose, che corrono paralleli alla linea di costa, rappresentano gli antichi profili della riva del mare.

#### IDROLOGIA

##### *Situazione idrometrica del lago*

Attualmente le arginature fatte dall'uomo al Fiume Serchio, l'allontanamento del lago dal mare e la mancanza quasi assoluta di torbide provenienti dai

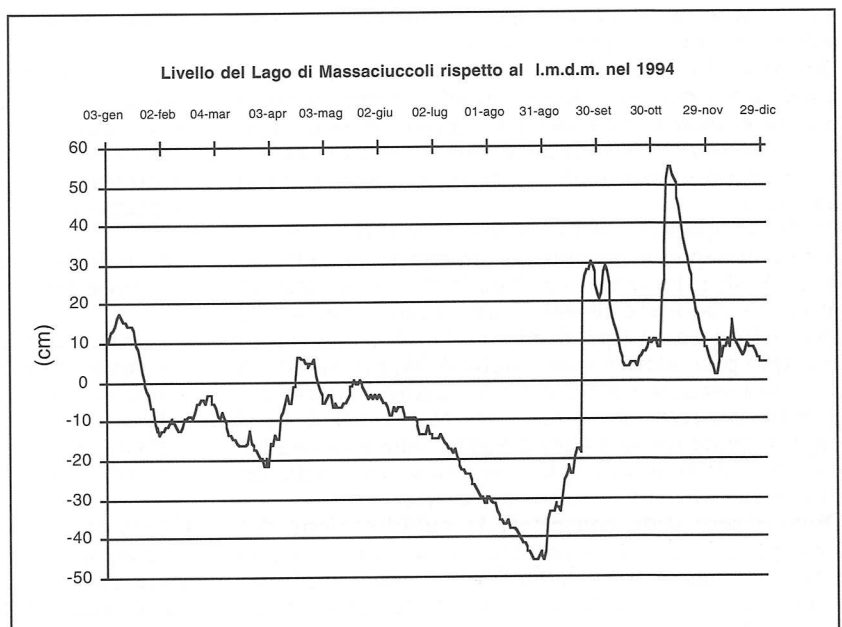


Fig. 2 - Livelli giornalieri del Lago di Massaciucoli (1994).

torrenti dei rilievi orientali hanno limitato il processo naturale di interrimento del bacino, lasciandone il «compito» ai canali di scolo meccanico che, in determinate epoche dell'anno, trascinano grandi quantità di sedimenti dalle aree di bonifica che circondano il lago.

Il livello medio del lago è generalmente superiore a quello marino nel periodo Novembre-Febbraio, mentre nei mesi di Giugno, Luglio ed Agosto le quote si abbassano sotto il livello del mare.

Negli altri mesi le condizioni meteorologiche possono creare fasi alterne, più o meno lunghe, di equilibrio o di leggere oscillazioni al di sopra e al di sotto di detto livello (Fig. 2).

Questa «stagionalità» delle quote del lago provoca una evidente inversione del flusso delle acque superficiali che, durante i mesi in cui la quota del lago è positiva, scorrono verso mare e, durante i mesi in cui la quota del lago è negativa, in senso opposto con portate nettamente inferiori perché tamponate dal sistema di chiuse denominato «Porte Vinciane»; in quest'ultimo caso si ha un richiamo delle acque salmastre dal mare che, risalendo il Canale Burlamacca, introducono all'interno del bacino elevati contenuti in sali marini. Durante il periodo invernale il flusso si inverte dato che il livello del lago si colloca ad una quota positiva, scaricando le sue acque verso la foce del Canale Burlamacca.

Negli altri periodi dell'anno il movimento delle acque dolci superficiali dipende dalla concomitanza di vari fattori:

– le precipitazioni e gli apporti provenienti dalle aree di bonifica che provocano l'innalzamento del livello del lago facilitandone il deflusso

– l'altezza della marea e la spinta dei venti con prevalenza occidentale che provocano l'innalzamento del livello marino ostacolando il deflusso a mare.

Tutti gli scambi lago-mare dovrebbero essere regolati dal sistema di paratie noto come Porte Vinciane il cui controllo e verifica del funzionamento è stato uno degli obiettivi dello studio.

Dovendo effettuare una campagna di misurazioni dei flussi idrici per un sistema idraulico simile a quello lagunare, qual'è il bacino del Lago di Massaciuccoli, è stato opportuno condurre una ricerca preliminare sul comportamento delle maree in questo particolare sito.

Ai fini di questo studio era necessario poter prevedere, con l'approssimazione di almeno un'ora, gli orari delle A.M. (alte maree) e delle B.M. (basse maree), in modo che fosse possibile effettuare le misure di flusso in base al tipo d'informazione ricercata: ad esempio prevedere l'orario delle A.M. per verificare la tenuta «stagna» delle Porte Vinciane, l'orario delle B.M. per misurare i massimi deflussi verso mare, oppure quale fosse il periodo delle maree di quadratura per ottenere dei valori di flusso in condizioni più vicine al livello medio del mare.

Dopo essere stata consultata la pubblicazione dell'Istituto Idrografico della Marina «Tavole di Marea» relativa all'anno 1994, sono stati confrontati gli orari previsti per le A.M. e per le B.M. dei porti più vicini a Viareggio, cioè Livorno e La Spezia, con gli

orari registrati dal mareografo sito a valle delle Porte Vinciane.

E' stata subito evidenziata una maggiore similitudine degli orari misurati a Viareggio con quelli previsti per il porto di Livorno ulteriormente confermata dalla maggiore somiglianza della linea di costa e della struttura portuale di questi due porti. Il confronto per l'intero anno '94 riporta uno scarto medio che oscilla tra -25 minuti e +46 minuti.

In conclusione è stato sufficiente condurre le misure di flusso presso le Porte Vinciane circa mezz'ora prima dell'orario previsto dalle «Tavole» relativo alla marea del porto di Livorno corrispondente a quella ricercata.

### 3.2. Sezioni per le misure di portata all'interno del sistema dei canali

Dopo un'accurata indagine sono stati scelti 15 punti nei quali collocare le sezioni per la valutazione delle portate attraverso i punti «chiave» dei principali canali all'interno del bacino. La scelta del sito idoneo in cui ubicare le sezioni per le misure di portata è stata fatta considerando i seguenti fattori:

- geometria regolare delle sponde
- distanza ridotta tra le due sponde
- vegetazione poco sviluppata
- linearità del canale a monte e a valle del punto scelto
- ondale il più regolare possibile
- luogo riparato dai venti
- posizione «strategica» rispetto ai nodi di intersezione dei vari canali.

I canali scelti (Fig. 3) sono elencati a continuazione (tra parentesi il numero di sezioni per canale).

Canale Burlamacca (4)	Fosso le Venti (2)
Canale Malfante (1)	Fosso le Quindici (2)
Canale Centralino (1)	Fosso della Barra (3)
Canale Punta Grande (1)	Fossa Nuova (1)

Le tracce delle sezioni, indicate da 1 a 15, sono riportate nella Figura 1.

Nelle otto sezioni seguenti sono stati inoltre prelevati dei campioni per l'analisi dei cloruri e sono state effettuate in situ le misure di conducibilità, pH e temperatura.

- Canale Burlamacca: Porte Vinciane (lato lago)
- Canale Burlamacca: Chiaro di S.Rocchino (lato mare)
- Canale Burlamacca: attraversamento FF.SS
- Canale Burlamacca: Piaggetta
- Fosso le Venti: attraversamento FF.SS
- Fosso Quindici: attraversamento FF.SS
- Fosso della Barra: allo sbocco nel lago
- Fossa Nuova: allo sbocco nel lago.

La ricostruzione del profilo delle sezioni è stata realizzata mediante lo scandagliamento dei fondali con uno strumento manuale, munito alla sua estremità di una griglia metallica di forma quadrata e di lato 20 cm, per evitare lo sprofondamento della zavorra nei se-



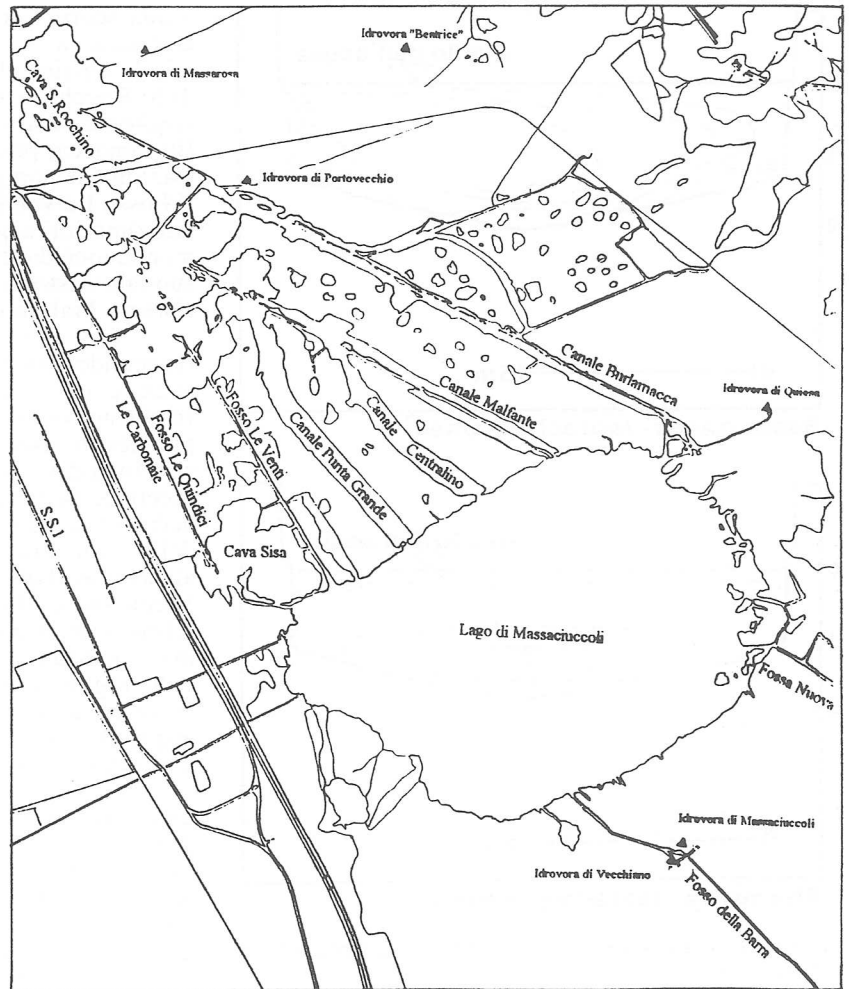


Fig. 3 - Canali e cave all'interno del Padule di Massaciucoli.

dimenti limosi e torbosi del fondo del canale. La perpendicolarità delle sezione rispetto alle sponde è stata controllata con l'ausilio di una bussola-goniometro.

Le misure di portata ( $Q$ ) sono state eseguite circa ogni 50 cm di profondità per mezzo di un mulinello idrometrico della SIAP mod. ME4001 e registrati con un contatore CE6015 e con un correntometro tipo EKMAN-MERZ n. 22 dei lab. Pagan di Trieste.

Per ciascuna sezione è stata costruita una tabella riassuntiva delle misure di flusso effettuate e successivamente sono state tracciate sulle sezioni stesse le curve isotachie adottando il metodo grafico della triangolazione. In Figura 4 è stato riportato un esempio dei flussi misurati in corrispondenza della Sez. 11: la sezione in alto riporta le isotachie relative a condizioni di B.M quando il flusso è diretto verso mare, mentre quella in basso riporta le isotachie nel caso di condizioni di A.M. In quest'ultimo caso, trattandosi di acque marine provenienti dal mare e quindi con densità maggiore rispetto a quelle provenienti dal lago, le isotachie sono compresse verso il fondo del canale dove si concentra il flusso stesso.

Nella Sez. 11 inoltre è stato segnalato un fatto registrato in data 5/03/1995, nel cui giorno, e coincidendo con l'alta marea, le acque della Gora di Stiava, che in quel momento era in piena, bloccate dall'alta marea risalente il Canale Burlamacca, rientravano attraverso le Porte Vinciane e risalivano il canale verso il lago di S. Rocchino. Le misure, effettuate alle ore 11:10 (AM porto di Livorno ore 10:55), a 180 cm dal fondo del «centro canale» davano una velocità delle acque di 0,007 m/sec in direzione del lago. Che si trattasse di un passaggio d'acqua con salinità medio/bassa è dimostrato dal fatto che la conducibilità non superava i 2,15 mS/cm.

#### *Circolazione idrica superficiale*

La circolazione delle acque nel complicato sistema di canali, fossi e specchi lacustri assume configurazione diversa a seconda delle diverse condizioni meteorologiche stagionali.

La spinta meccanica esercitata dagli impianti delle idrovore, ubicate in vari settori del bacino, contribui-

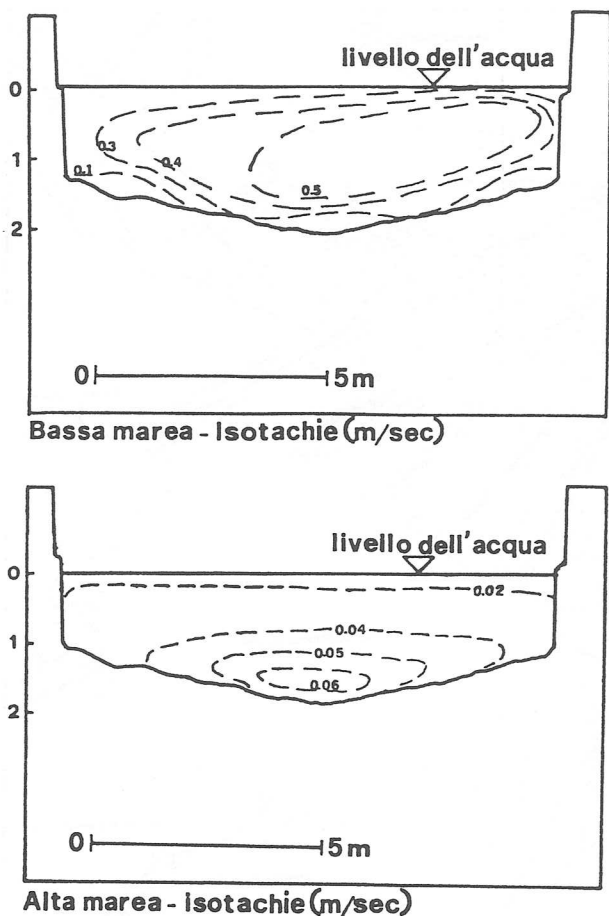


Fig. 4 - Misure di flusso nella sez. 11 - Canale Burlamacca/Porte Vinciane (lato lago).

sce a complicare ancor più questo sistema idraulico. Il periodo di osservazione (novembre '94-agosto '95), in base all'andamento del clima (pluviometria e termometria), è stato suddiviso in due sottoperiodi denominati Periodo Umido (dicembre-maggio) e Periodo Secco (giugno-agosto).

#### Periodo Umido

Gli scambi lago/mare si realizzano essenzialmente attraverso due sistemi:

- I Canali Le Venti e Burlamacca, regolati dal «polmone» del laghetto di S.Rocchino
- Il Fosso Le Quindici

Il primo sistema raccoglie le acque provenienti dalla parte orientale del lago, dai fossi sottomonte e dalle idrovore. Il Canale Burlamacca riceve, oltre alle acque provenienti dal lago e dai canali di acque alte, anche quelle spinte dall'Idrovora Beatrice nel Fosso Pantaneto, dall'Idrovora di Pioppogatto (Massarosa) e parte delle acque che provengono dal sistema di sollevamento di Portovecchio (Fig. 3); queste ultime seguono due vie preferenziali:

– una scorre verso S.Rocchino attraverso il Canale Burlamacca

– l'altra arriva al Fosso Le Venti e da qui al laghetto di S. Rocchino, mediante un canale di circa 15 m di larghezza, con una profondità simile a quella del Burlamacca, posto proprio di fronte all'uscita della stazione di pompaggio.

Il Fosso Le Venti, nel quale sono state misurate portate superiori a quelle del Burlamacca, riceve un'alimentazione dal lago e dal sistema di canali posto sul suo lato destro, che raccoglie le acque circolanti nel sistema Malfante-Centralino-Punta Grande.

Il secondo sistema è composto dal Fosso Le Quindici che corre lungo il margine occidentale del padule. In questo fosso è stata riscontrata la portata d'acqua più elevata rispetto a quella misurata negli altri fossi. Ciò si deve probabilmente al fatto che il canale è recettore di tutti i drenaggi provenienti dal bordo occidentale e dai centri abitati, oltre all'alimentazione delle acque che arrivano dal lago e che sono spinte, attraverso il Fosso della Barra, dalle Idrovore di Vecchiano e Massaciuccoli.

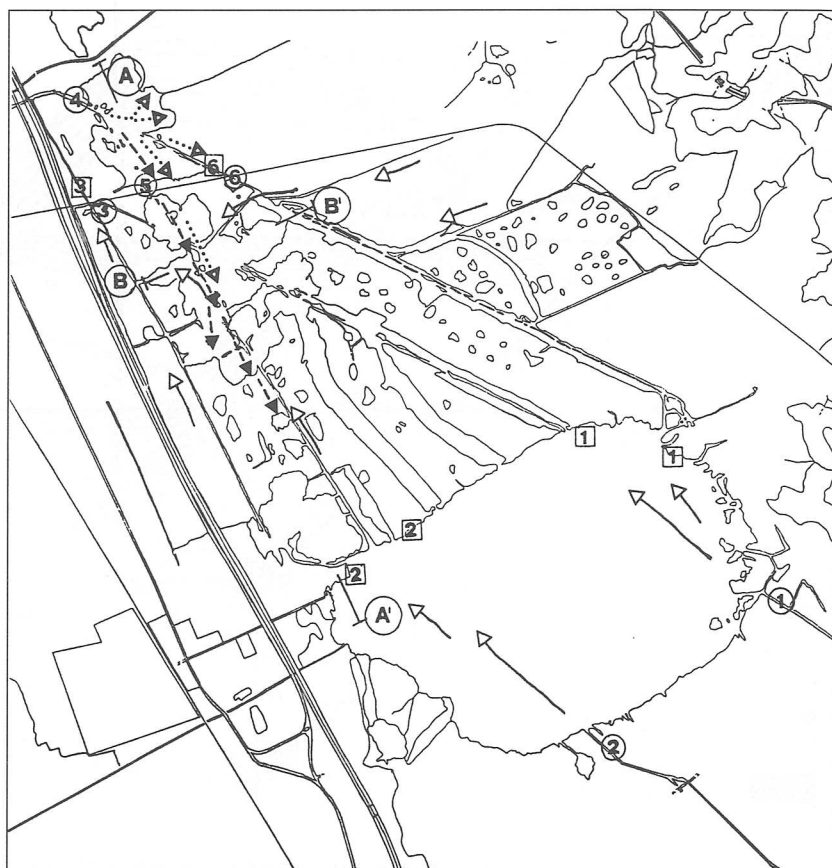
Il flusso idrico proveniente dal Fosso della Barra porta in sospensione un elevato particellato solido che una volta raggiunto il lago si deposita sul fondo creando un vero e proprio piano inclinato verso nordovest; le acque che entrano nel lago seguono questa direttrice e proseguono verso i Fossi Le Venti e Le Quindici.

Tutto ciò è stato verificato mediante la tecnica dei drifts, che fin'ora era stata usata esclusivamente per lo studio delle correnti marine litoranee o di grandi bacini. I drifts sono «ombrellini» costruiti in materiale plastico e hanno una densità tale che gli permette il galleggiamento a pelo d'acqua in modo da non risentire dell'azione dei venti; inoltre possono essere zavorrati con sale in modo che, permanendo in profondità per un tempo stabilito (misurato sperimentalmente, funzione della velocità dello scioglimento del sale), possano essere trascinati dalle correnti di fondo.

I siti dove i drifts sono stati lanciati e successivamente recuperati sono indicati nella Carta della circolazione (Fig. 5).

Per quanto riguarda la circolazione mare/lago, è stato registrato un comportamento «anomalo» del lago nel periodo umido, nel quale, in teoria non ci dovrebbero essere importanti inversioni di flusso. Invece è stato verificato un abbassamento al di sotto del l.m.m. quando i giorni di maree sigiziali coincidevano con una settimana poco piovosa. L'apertura automatica delle Porte Vinciane causa il veloce svuotamento dell'intera area lacustre, portando il livello degli specchi d'acqua ad una quota inferiore a quella del l.m.m.

Le acque che provengono dal mare e che, spinte dalle maree, risalgono il Canale Burlamacca dovrebbero essere fermate dalle «Porte Vinciane». Il funzionamento di questo sistema di chiuse non ha mai efficacemente ostacolato l'ingresso di acqua marina (Spandre, 1975); la scarsa tenuta d'acqua è causata anche



Legenda

SEZIONE CAVE ①			②		
Drifts lanciati			Drifts recuperati		
N°	Data	Ora	N°	Data	Ora
①	17/02/95	12.30	①	19/02/95	17.00
②	17/02/95	12.10	②	19/02/95	17.30
③	26/08/95	15.45	③	30/08/95	13.30
④	26/08/95	14.30			
⑤	26/02/95	15.10			
⑥	26/02/95	17.15	⑥	30/08/95	11.30

## FLUSSI di

Acque dolci	—————▶
Acque salmastre	.....▶
Acque salmastre sotterranee	- - - - -▶

Fig. 5 - Schema della circolazione superficiale e sotterranea all'interno del Padule.

da negligenza e da cattiva manutenzione. Infatti durante i sopralluoghi è stato riscontrato che il funzionamento delle porte era lasciato a se stesso: il «Portone» destro lato lago è rimasto aperto per l'intero periodo di osservazione (novembre '94-agosto '95) [In questa situazione la tenuta d'acqua risultava dimezzata].

Accertato che le Porte Vinciane consentivano una «fuga» importante d'acqua risalente dal mare, sono stati misurati i flussi d'acqua esistenti sul fondo dei canali. Le conclusioni raggiunte, per questo periodo (umido), sono le seguenti:

La quasi totalità delle acque salmastre risale lungo il fondo del Canale Burlamacca fino al laghetto di

S. Rocchino. Solo una piccolissima parte riesce a entrare nel sistema palustre attraverso il Fosso Le Quindici. Infatti, a circa 500 m dalla confluenza tra questo fosso e il Canale Burlamacca il fondo si trova ad una profondità di circa 1,4 m e agisce da soglia idraulica.

La causa della presenza di acque con una salinità elevata è da imputare quindi al Canale Burlamacca, come veicolante delle perdite delle Porte Vinciane, e al laghetto di S. Rocchino, come «magazzino» distributore agli altri canali.

Periodo Secco

I sistemi di circolazione sono gli stessi già descritti





### Ricostruzione litostratigrafica e caratteristiche geomeriche

L'analisi delle stratigrafie ricavate da pozzi, piezometri e sondaggi geognostici ripresi da numerosi lavori svolti in quest'area (Gemina, 1962; Pandolfi, 1974; Ferrari, 1984), ha permesso la ricostruzione di sei sezioni stratigrafiche di cui tre orientate parallelamente alla linea di costa e tre circa ortogonali alle precedenti. Queste sezioni, opportunamente ridisegnate in proiezione assonometrica, offrono una chiara visione dell'andamento delle formazioni sedimentarie più superficiali del comprensorio lacustre (Fig. 6). Generalmente tutta l'area è caratterizzata da un potente deposito di sabbia, coperto in superficie dalle torbe e caratterizzato nella metà superiore da una granulometria omogenea media (sabbie silicee), in quella inferiore da una granulometria più fine (sabbie marine miste a sedimenti limosi).

Le torbe soprastanti aumentano il loro spessore nelle vicinanze della zona collinare, conferendo all'acquifero in sabbia caratteristiche di artesianità. Un sottile strato di limi e di argille, più o meno torbose, si trova intercalato in alcune zone del bacino, soprattutto sul fondo del lago, contribuendo quindi ad un maggiore isolamento tra le acque superficiali e sotterranee.

Per poter definire esattamente la fisionomia e l'importanza delle cave di sabbia silicea nel contesto della circolazione superficiale e sotterranea del lago è stata ricostruita un'accurata batimetria dei fondali cor-

rispondenti alle aree di coltivazione (riportata indicativamente in Fig. 7). Lo scandagliamento è stato effettuato mediante un ecoscandaglio SEAFARER-700 con scala digitale da 0-20 m.

Questa indagine ha evidenziato come la profondità massima della cave si situa (salvo eventuali eccezioni non rilevate) per tutte intorno ai 18-20 metri di profondità, livello in cui abbiamo generalmente la transizione tra le sabbie silicee e quelle marine miste a sedimenti limosi.

L'attività estrattiva ha praticamente cancellato ogni traccia del letto originale in lunghi tratti dei canali principali la cui profondità, intorno ai 2 m precipita bruscamente fino a -8 m e da qui scende a -19/-20 m nel raggio di 40-100 m. Il fondo delle cave raggiunge i 20-22 m di profondità (limite assunto generalmente come transizione tra i diversi tipi di sabbie), in un susseguirsi di sali e scendi dovuti al metodo di estrazione delle sabbie mediante pompe aspiranti.

### Caratteristiche chimico-fisiche delle acque

Le caratteristiche chimico-fisiche delle acque residenti all'interno delle cave possono essere osservate nelle Figure 8 e 9, che indicano la situazione registrata rispettivamente nel periodo che va dal dicembre '94 fino al mese di maggio del '95 e nel periodo giugno '95 - agosto '95.

Durante i mesi nei quali il flusso proviene dal lago, la conducibilità mantiene un valore pressoché costante

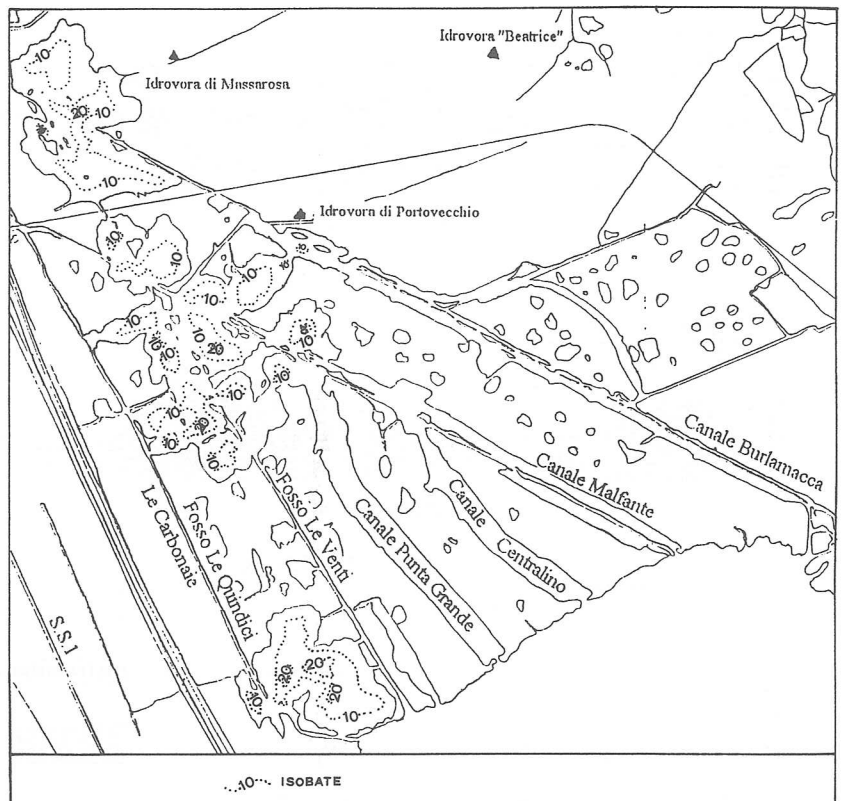


Fig. 7 - Batimetria delle cave di sabbia.

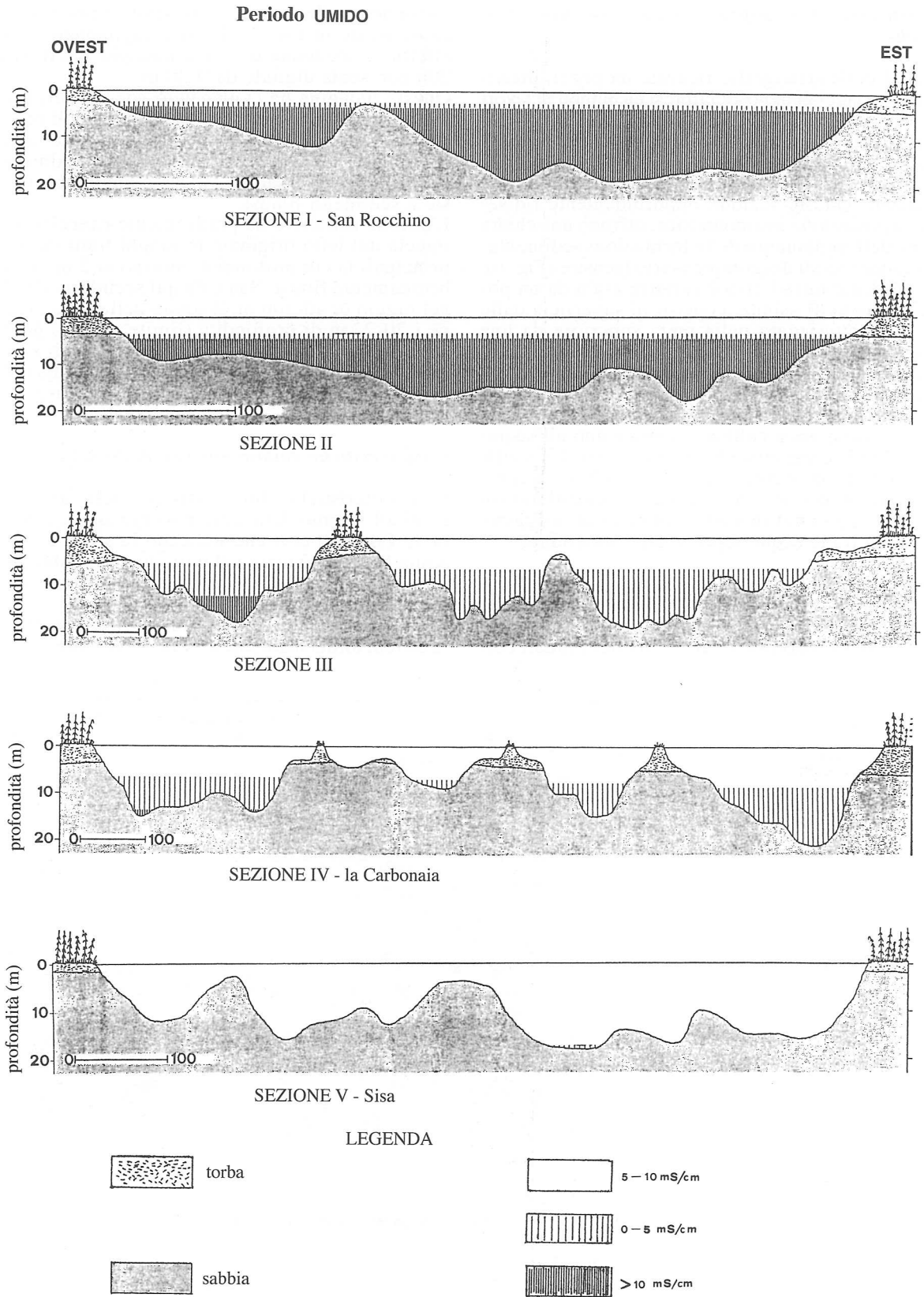
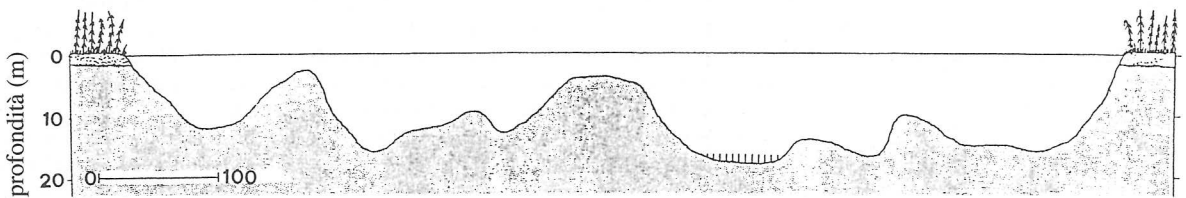
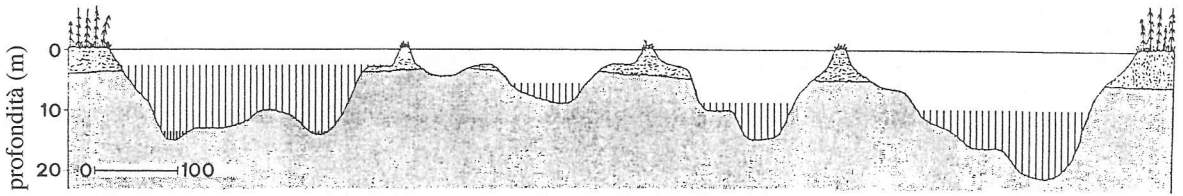
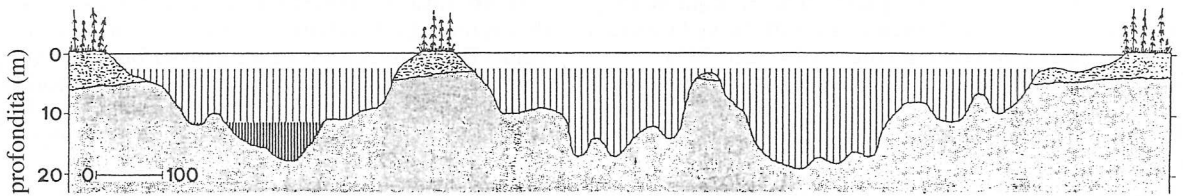
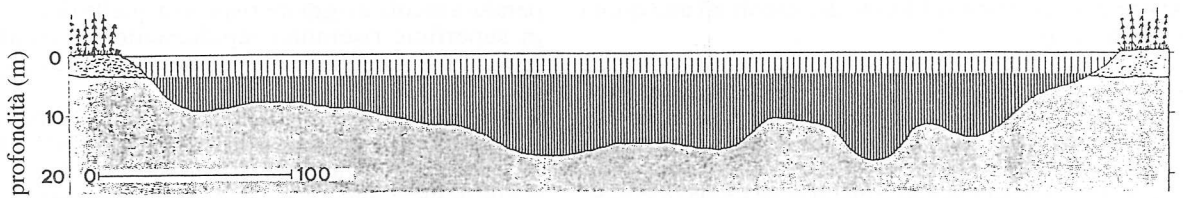
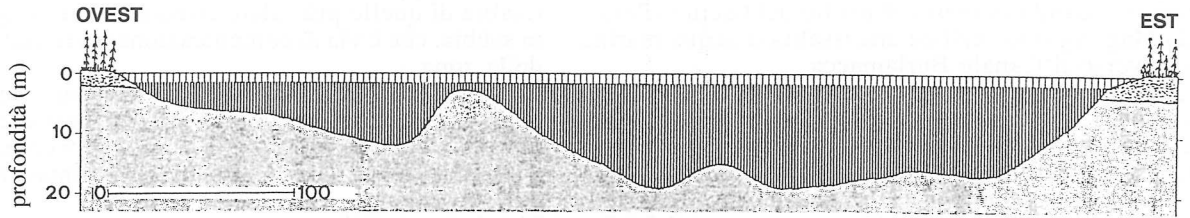


Fig. 8 - Sezioni e distribuzione della salinità in corrispondenza delle cave di sabbia (periodo umido).

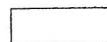
Periodo SECCO



LEGENDA

 torba

 sabbia

 0 - 5 mS/cm

 5 - 10 mS/cm


 >10 mS/cm

Fig. 9 - Sezioni e distribuzione della salinità in corrispondenza delle cave di sabbia (periodo secco).

negli strati superficiali (fino a 4 m di profondità), mentre quando decresce il livello del bacino (Periodo Mag-Ago) si verifica una risalita d'acqua marina attraverso il Canale Burlamacca.

Questa ingressione, anche con le Porte Vinciane «chiuse», viene messa in evidenza nei profili verticali di conducibilità da un forte incremento registrato nel mese di maggio tra 1,5 m e 3 m di profondità e che successivamente si incrementa sempre di più con l'arrivo della stagione secca; in pratica la differenza più significativa tra il periodo umido e quello secco è legata unicamente all'arrivo delle acque salmastre che scorrono sul fondo dei canali ad una quota di circa -2 m.

La conducibilità, man mano che si procede da S. Rocchino verso il lago, assume valori gradatamente minori a causa di un'evidente dispersione delle acque salate (Fig. 8 e 9); inoltre è osservabile una crescente disomogeneità tra i profili verticali di conducibilità del settore occidentale e quelli della fascia orientale, visibile soprattutto nei profili misurati lungo la Sez. IV- la Carbonaia e riportati in fig 10. Tali profili sono relativi al periodo secco ma questo tipo di andamento è stato registrato costantemente durante tutta la durata della campagna di ricerca (dic. '94 / ago. '95).

Nella Sezione IV i profili esaminati sono tre e vengono indicati come Profilo-ovest, Profilo-centro e Profilo-est in accordo alla loro posizione geografica relativa.

I tre profili sono estremamente indicativi per quanto riguarda il comportamento della circolazione all'interno del sistema cave/canali.

Il profilo-ovest mostra una chiara omogeneità di comportamento per quanto riguarda la conducibilità elettrica per i primi 5 metri d'acqua, poi si osserva un primo flesso intorno ai 6,5 m di profondità con valori che variano dai 3 ai 6-7 mS/cm a seconda del periodo e dello stato di agitazione delle acque; la situazione assume quindi un andamento stabile intorno ai 7 mS/cm fino ad arrivare ad un nuovo flesso, assai importante, situato a circa 13 m dalla superficie. Questa impennata che porta i valori fino ai 20 mS/cm in prossimità del fondo si deve alle acque più dense e salate che ristagnano in profondità. Queste acque quasi sicuramente non provengono da una circolazione laminare superficiale, scendendo poi verso il basso per densità, ma da un apporto diretto via falda dalle cave situate tra la sezione studiata ed il giacimento di S. Rocchino.

Il corrispondente profilo-est si discosta notevolmente da quello ovest, infatti le acque, al di sotto del tipico flesso tra i -6 m e i -7 m, mantengono dei valori di conducibilità praticamente costanti e ridotti a quasi la metà dei precedenti. I valori più bassi si devono al fatto che le acque, risalenti il Canale Burlamacca, seguono delle vie preferenziali di flusso, ubicate verso la parte ovest del bacino (F.so Le Quindici e Le Venti), raggiungendo in quantità minore la parte a est dove evidentemente vengono tamponate dalle acque dolci provenienti dai canali, dai fossi pedemontani e da quelle spinte dalle idrovore nel sistema idrico superficiale orientale. Tutto ciò provoca un «tamponamento» delle acque più salate che riescono a superare la «trappola» di S. Rocchino.

Inoltre l'apporto di acque dolci riduce l'effetto di risalita di quelle più salate circolanti nell'acquifero in sabbia, che è via di comunicazione tra le varie cave della zona.

Soltanto gli strati più superficiali d'acqua risentono della stagione estiva, poiché sono interessati dalla miscelazione con le acque salmastre provenienti dai vari canali a loro volta alimentati dal «magazzino» di S. Rocchino.

L'andamento della temperatura in profondità segue in maniera molto attenuata l'andamento della conducibilità, visto che le acque marine hanno una temperatura media maggiore rispetto a quelle dolci, mentre in superficie risentono rapidamente dei cambi stagionali passando dagli 11°C in dicembre ai 30°C nel mese di luglio).

Il pH lungo il piano orizzontale mantiene pressoché invariati i suoi valori, mentre lungo la verticale passa da 8,3 m a -1 m dalla superficie, a 7,1 m ad -8 m e diminuisce ancora verso il fondo dei laghetti.

Sono stati effettuati inoltre altri tre profili verticali (indicati con gli asterischi in Fig. 1) di conducibilità e temperatura, rispettivamente nella cava presso la discarica «Le Carbonaia», nella cava da noi battezzata «Burlamacca» e nella grossa buca creata per la «Sperimentazione idraulica mediante approfondimento del fondale del Lago di Massaciuccoli» (Regione Toscana, 1990), direttamente all'interno dello specchio lacustre, di fronte a Torre del Lago.

Il primo sito è stato scelto per vedere se avvicinandosi alla discarica «Le Carbonaia» esisteva un incremento della salinizzazione delle acque. Il profilo ricavato (Fig. 11) è risultato analogo a quelli misurati più a nord e a sud senza mostrare variazioni significative.

Il secondo punto è stato individuato dopo una verifica dei fondali lungo il canale delle cave che corre parallelo al Canale Burlamacca. Il profilo misurato conferma l'assenza del flesso dei -14 m, che invece caratterizza i profili verticali occidentali. A partire dal mese di luglio cominciano ad arrivare apporti di acqua salmastra direttamente dal C. Burlamacca.

Il terzo punto è stato scelto perché corrisponde ad una possibile superficie permeabile ai flussi dell'acqua di falda. Infatti tutto il resto del fondale del lago è ricoperto da uno strato di limo che lo ha reso meno permeabile. Il profilo misurato (Fig. 12) ha confermato questi caratteri di superficie drenante. Infatti specialmente la misura effettuata il 28-luglio evidenzia acque più fredde e più dolci sul fondo. Facendo le opportune correzioni al valore di conducibilità dovute alla minore temperatura, si è ottenuto un valore di conducibilità sempre inferiore. Ciò è stato anche verificato mediante l'analisi dei cloruri.

#### *Schema di circolazione sotterranea*

Nella fascia costiera, caratterizzata da cordoni di dune sabbiose con quote medie di 2 m s.l.m., è insediata una falda di acqua dolce dello spessore di circa venti metri (Aquater, 1980), che, data la minima attività antropica svolta in quest'area, può essere considerata ancora valida.



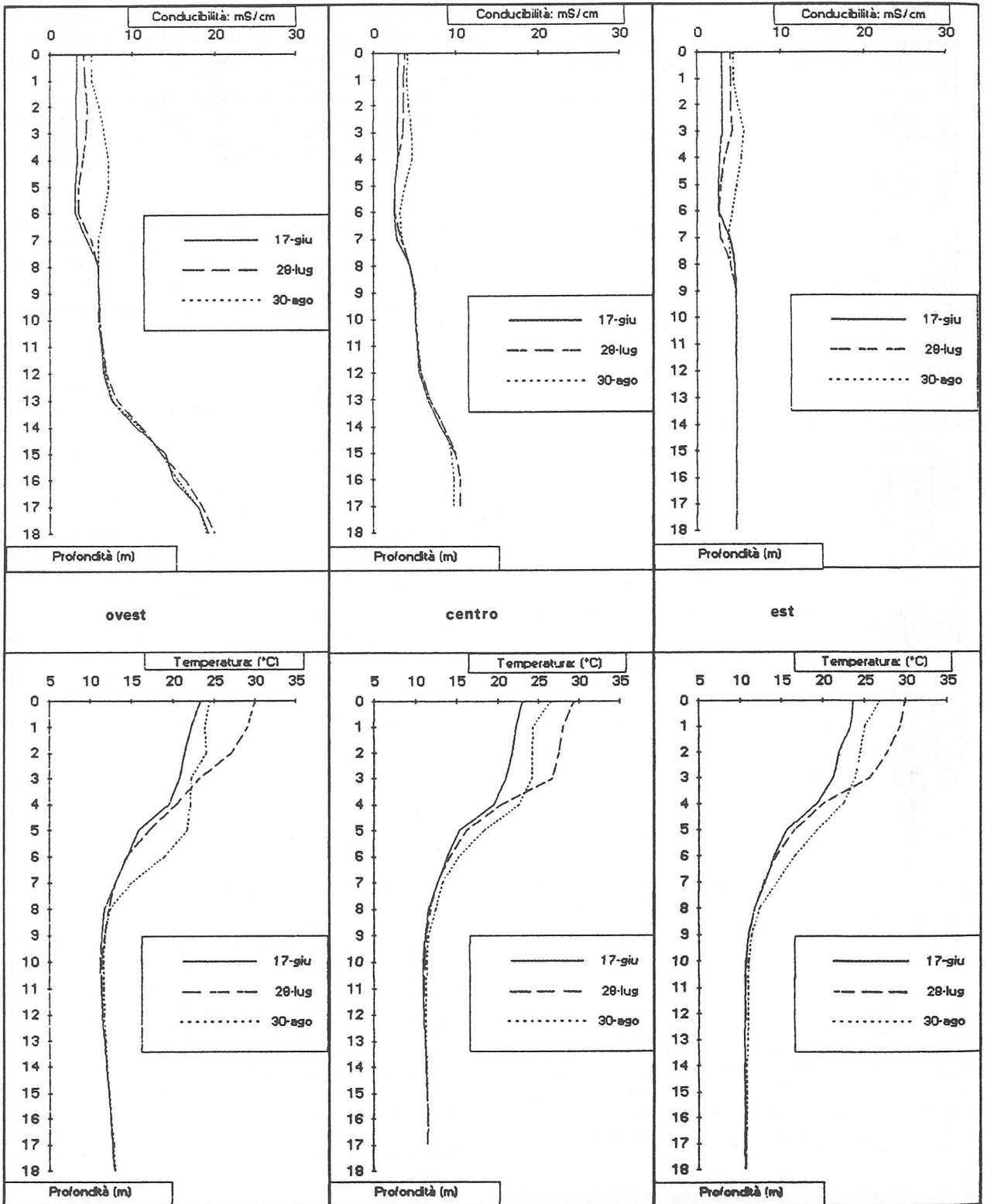


Fig. 10 - Profili verticali di conducibilità e temperatura nella sez. IV - La Carbonaia.

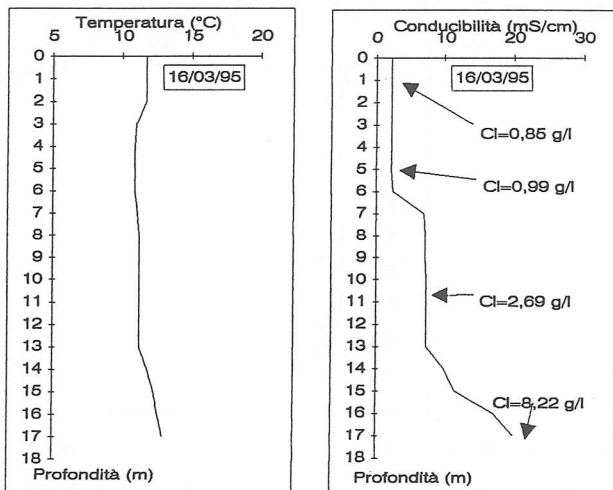


Fig. 11 - Profilo verticale di conducibilità e temperatura nella cava di sabbia presso la discarica della Carbonaia.

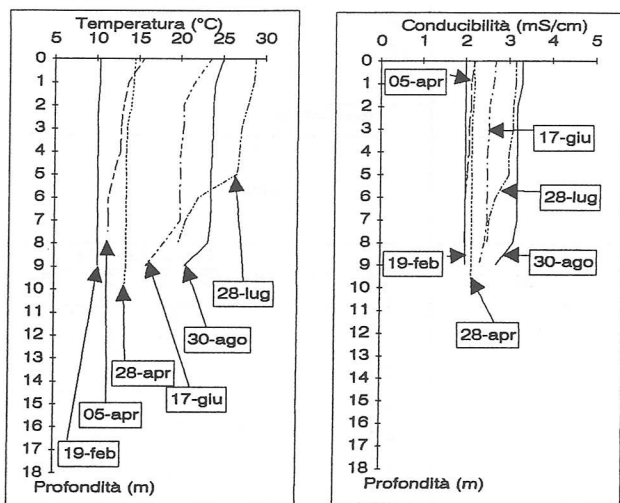


Fig. 12 - Profilo verticale di conducibilità e temperatura nella buca creata per le «Sperimentazione idraulica mediante approfondimento del fondale del Lago di Massaciuccoli».

Lungo il margine orientale di tale fascia esistono tre pozzi, situati in località Sisa, Le Carbonaie e La Morina (Ferrari, 1984). Le acque emunte manifestano le caratteristiche di qualità riscontrate per le acque stratificate nelle cave della fascia occidentale del padule. Il pozzo realizzato in località Mercato presso Torre del Lago (circa 1 Km ad ovest del porticciolo, a quota +2 m s.l.d.m), drena l'acquifero in sabbia per tutto il suo spessore (stratigrafia semplificata: da 0 a 20 m - sabbie silicee, da 20 m a 35 m - limo sabbioso, da 35 m a 38 m - argilla compatta) e non risente minimamente di inquinamento salmastro (Ferrari, 1984). Più a nord, in località S. Rocchino, le dune sabbiose sono state appianate per favorire l'insediamento urbano e industriale, al quale sono legati emungimenti

dall'acquifero che dovrebbero facilitare la risalita del cuneo salino. Tale effetto non è stato riscontrato nei corrispondenti profili verticali di conducibilità e temperatura che presentano un andamento analogo a quelli della fascia orientale del padule (un solo flesso). Evidentemente l'assenza del secondo flesso posto a 13 m di profondità testimonia l'assenza dell'intrusione del cuneo salino attraverso l'acquifero in sabbia.

Come si osserva nella carta della circolazione superficiale e sotterranea (Fig. 5), le acque sotterranee presenti nelle sabbie soffrono una salinizzazione dovuta principalmente alla risalita di acque salmastre dal mare, le quali, una volta accumulate nel laghetto di S. Rocchino, si diffondono all'interno dell'acquifero in sabbia, passando così da una cava all'altra.

Il passaggio sotterraneo dell'acqua avviene per lo più attraverso le sabbie silicee. Infatti siamo portati a ritenere che questa sia la via di flusso (almeno nei primi 18 m) più agevole sia per la maggior permeabilità delle sabbie, sia per i numerosi laghetti ivi scavati (profondità media 15 m) che esercitano un'azione drenante sull'acquifero. La permeabilità del primo strato di sabbie, che arriva a circa -15 m, è stata stimata mediante prove di pompaggio su alcuni pozzi nel lavoro di R. Ferrari «Studio Idrogeologico della piana Versiliese» uguale a  $3,7 \times 10^{-4}$  m/sec.

Inoltre come si può vedere dalla ricostruzione stratigrafica superficiale relativa all'area lacuo-palustre (Fig. 6) il contatto sabbie-argille si approfondisce leggermente andando verso Torre del Lago, dopo di che risale in corrispondenza della Cava Sisa.

Tutti questi fattori facilitano il verificarsi di questo flusso sotterraneo.

L'effetto «tampone» delle acque provenienti dai «canali delle acque alte» e da quelli di bonifica nella parte orientale, impedisce l'aumento dello strato salinizzato all'interno delle cave, cosa che evidentemente non succede nel lato occidentale, dove gli apporti d'acqua dolce sono più scarsi.

La presenza dello strato limoso sul fondo del Lago di Massaciuccoli, impedisce il ravvenamento diretto dall'acquifero in sabbia.

L'acqua sotterranea, che un tempo entrava nel lago attraversando le torbe molli di neoformazione e soprattutto attraverso le numerose superfici permeabili create dalle frequenti opere di estorbazione e di cavatura della sabbia, oggi penetra solo attraverso il fondo di alcune cave recenti.

L'acqua di falda una volta entrata sul fondo di queste grandi «buche» si trova a contatto con un'acqua salmastra e, per differenza di densità, risale in superficie e da qui, come già descritto, il suo destino dipende dalla combinazione del regime pluviometrico con quello delle fasi mareali.

## CONCLUSIONI

Per prima cosa è stato verificato il funzionamento del sistema di chiuse denominato «Porte Vinciane»,

che è risultato inefficace persino durante il periodo umido; infatti se una settimana poco piovosa coincideva con condizioni di marea di sigize, i livelli del lago scendevano di alcuni centimetri sotto il livello medio del mare, provocando la risalita di acque salmastre provenienti dal mare stesso.

Le direzioni di flusso preferenziale di superficie sono state evidenziate mediante l'uso dei drifts che hanno permesso l'identificazione dei principali elementi di equilibrio del sistema:

– il Canale Burlamacca compie bene il suo «dovere» di collegamento tra il lago ed il mare;

– le cave di sabbia svolgono un doppio compito: da una parte sono «depositi» di raccolta delle acque salmastre che arrivano dal Canale Burlamacca e dall'altra drenano la falda presente nelle sabbie.

Tra le cave quella che riveste un ruolo fondamentale nelle relazioni lago/falda è senza dubbio la Cava di San Rocchino, posta lungo la strada di Montramito, che interrompe il Canale Burlamacca nel suo percorso verso il mare. Questa «buca» la cui profondità supera di poco i 20 m è diventata praticamente un secondo lago; nel suo interno si accumulano e si stratificano le acque salmastre che risalgono il Canale Burlamacca, la cui profondità massima si aggira intorno ai 2-2,5 m. La mancanza di correnti di fondo, la debole variazione termica, l'alta densità delle acque giacenti all'interno della buca e soprattutto il grande dislivello esistente tra i canali e il fondo delle cave, rendono praticamente impossibile una risalita delle acque salate dal fondo.

La presenza quindi di acque con elevata salinità nelle cave poste nella palude è da attribuire, a nostro avviso, all'acquifero in sabbia che trasmette le acque salate da S. Rocchino, attraverso le «sabbie silicee» a tutte le altre escavazioni.

Il fatto che spostandoci da ovest verso est le acque profonde delle cave vedono diminuire la loro concentrazione in sali, si deve probabilmente al fatto che dal lato orientale proviene un'ingente quantità di acqua dolce che «frena» le acque salate tamponandole, riducendone quindi il volume e la concentrazione di sali.

Muovendoci da nord verso sud è osservabile come la concentrazione delle acque profonde decresce costantemente fino a giungere alla Cava Sisa, che trovandosi in diretta relazione con il lago e ricevendo acque dolci da apporti laterali gode di una limitazione delle concentrazioni saline presenti nelle sue acque.

– Il Fosso della Barra porta non pochi problemi per la sopravvivenza del bacino in quanto le sue torbide spinte e create dalle Idrovore di Vecchiano e Massaciuccoli all'interno del bacino lacustre, contribuiscono, e non poco, alla colmatazione del lago e al trasporto dei nutrienti che sono la causa principale dello stato precario di salute dello specchio d'acqua.

– La Fossa Nuova contribuisce in maniera positiva alla vita del lago, apportandogli vigore con le acque raccolte nella fascia pedemontana. Queste acque generalmente dure perché provenienti da un acquifero costituito da rocce carbonatiche fessurate sono di estrema utilità per la conservazione della biosfera lacustre e la limitazione dell'eutrofia del lago.

I tenori in cloruri e i valori di conducibilità registrati all'interno dello specchio lacustre non mostrano valori elevati, non risentendo quindi il lago vero e proprio degli effetti descritti anteriormente per il sistema cave-canali.

#### BIBLIOGRAFIA

- Aquater, 1980. Accertamenti ed indagini per la salvaguardia dall'inquinamento del Lago di Massaciuccoli e del suo territorio, I e II fase. 89 pp., E.T.S., Pisa.
- Blanc, A.C., Settepassi, F. e Tongiorgi, E., 1953. Excursion au Lac de Massaciuccoli (plaine côtière de la basse Versilia). 313 pp., INQUA, 4° Congress International - Roma, Pisa.
- Caporali, F., Palmerini, M., Tomei, P.E., Gaspari, G. e Caselli, R., 1981. Il bacino di Massaciuccoli; Consorzio idraulico di 2a categoria, canali navigabili Burlamacca, Malfante, Venti e Quindici. 46 pp., Pacini, Pisa.
- Cenni, M., Focardi, P., Macchi, L., Molino, C. e Regattieri, M., 1991. Sperimentazione idraulica mediante approfondimento del fondale del Lago di Massaciuccoli. 18 pp., Regione Toscana, Firenze.
- Federici, P.R. Stato attuale delle conoscenze geomorfologiche e geologiche del bacino del Massaciuccoli in Versilia (Toscana). In: Cenni, M., Simoni, F., Baldaccini, G.N., Bianucci, P., Bernacchi, G., Federici, P.R., Tomei, P.E. e Maracci, P., 1987. Il bacino di Massaciuccoli; Consorzio idraulico di 2a categoria, canali navigabili Burlamacca, Malfante, Venti e Quindici. 3a edizione. 57 pp., Pacini, Pisa.
- Duchi, G., Matraia M. e Viti, C., 1990. Contributo alle conoscenze scientifiche sul bacino del Lago di Massaciuccoli, compilata dalla Massaciuccoli s.r.l. .61 pp., inedito, Viareggio.
- Ferrari, R., 1984-1986. Studio idrogeologico della piana versiliese. 85 pp., Associazione Intercomunale Versilia.
- Focardi, A., Focardi, P., Franchi, M. e Molino, C., 1992. Risultati di uno studio annuale di monitoraggio sul Lago di Massaciuccoli. Convegno su «Piani di Bacino». 17 pp., Studi di geologia applicata e geologia dell'ambiente N°26, Firenze.
- Gemina, 1962. La Torba di Massaciuccoli. Ligniti e Torbe dell'Italia continentale: 171-185.
- Istituto Idrografico della Marina, 1993. Tavole di Marea 1994. 96 pp., Genova.
- Istituto Idrografico della Marina, 1994. Tavole di Marea 1995. 96 pp., Genova.
- Masini, R., 1958. I bacini costieri delle Alpi Apuane (studi geoidrologici sulle acque sotterranee). Boll. Serv.geol. ital. Vol. 80 (4-5): 662-681.
- Pandolfi, D., 1974. La sabbia silicea della bassa Versilia e i suoi impieghi. 385 pp., S.E.A. Viareggio.
- Parco Naturale Migliarino San Rossore Massaciuccoli, 1994. Eutrofizzazione del Lago di Massaciuccoli, Atti del Convegno: «Problemi di eutrofizzazione e prospettive di risanamento del Lago di Massaciuccoli». 223 pp., Massarosa Dicembre 1992, Editrice Universitaria Felici.
- Pedreschi, L., 1956. Il lago di Massaciuccoli e il suo territorio. 226 pp., Soc. geografica ital.
- Rome, A., Del Prete, C., Tomei, P.E. e Valli, S. 1980. Il Bacino di Massaciuccoli, Consorzio Idraulico di 2a Categoria, Canali Navigabili Burlamacca, Malfante, Venti e Quindici. 61 pp., 1a edizione Pacini, Pisa.
- Somigli, G. e Catelani, A., 1951. Le sabbie silicee di Torre del Lago e le loro applicazioni in fonderia. 15 pp., «La Metallurgia Italiana. N° 7.
- Spandre, R., 1975. Studio e bilancio idrogeologico del bacino del lago di Massaciuccoli. Tesi di Laurea Rel. Prof. S. Cavazza. Istituto di Geologia e Paleontologia. Università degli Studi di Pisa.
- Trevisan, L., 1983. Problemi di acque salate e dolci. La Provincia Pisana n°4, a.IX: 34-36.

(ms. pres. il 3 luglio 1996; ult. bozze il 17 settembre 1997)

