

F. SARTORI (*), R. LEVI-MINZI (**)

I TERRENI TORBOSI DEL BACINO DEL LAGO DI MASSACIUCCOLI:
I. FERTILITÀ CHIMICA, CARATTERI GEOCHIMICI
E CLASSIFICAZIONE (***)

Riassunto — Si riportano i risultati delle analisi fisico-chimiche relative a 10 profili di terreni torbosi e ad un suolo inorganico compresi nel bacino del lago di Massaciuccoli. Dal punto di vista della fertilità chimica essi presentano, nell'insieme, caratteristiche sostanzialmente positive, anche se non ottimali; gli ostacoli principali ad una loro generalizzata utilizzazione agronomica sono rappresentati da un basso pH (che però è fortemente limitativo solo nel caso dei terreni a nord del lago), da una salinità non trascurabile, anche se normalmente circoscritta agli orizzonti profondi (~ 40 cm) dei profili peggio drenati e determinata prevalentemente da solfati, nonché da una carenza in fosforo assimilabile, peraltro correggibile con concimazioni minerali.

La geochimica dell'ambiente è caratterizzata da una generale immobilità di quasi tutti gli elementi chimici maggiori; solo Ca, soprattutto come solfato, mostra una notevole mobilità lungo i profili.

Tutti i terreni torbosi di Massaciuccoli sono degli Histosuoli; nell'ambito di questo ordine i suoli di più antica bonifica e meglio drenati sono classificabili come «medisaprist», quelli con più scarso drenaggio presentano i caratteri dei «sulfohemist».

Abstract — *The peaty soils of Massaciuccoli Lake basin (Tuscany): I. Chemical fertility, geochemical characteristics and classification.* Samples were collected from 10 peaty soil profiles and 1 non-peaty soil within the Massaciuccoli Lake drainage basin; the results of the physicochemical analyses are reported. From a chemical fertility point of view these soils present, as a whole, fairly good agronomic properties; the main difficulties inherent in their generalized use are: a low pH, which appears highly crop restrictive only for soils of the northern part of the basin; a

(*) Istituto di Mineralogia e Geologia, (**) Istituto di Chimica Agraria, Facoltà di Agraria dell'Università di Pisa e (*) Dipartimento di Scienze della Terra, Facoltà di Scienze M.F.N. dell'Università di Pisa.

(***) La ricerca è stata eseguita con il contributo finanziario del M.P.I.

salinity not negligible, but caused mainly by sulfates and confined mostly to the lower horizons (~ 40 cm deep) of the more poorly drained profiles; an available phosphorus deficiency, which can be corrected by mineral fertilizer application.

The geochemistry of the environment is characterized by a general immobility of nearly all the major elements; only calcium (mainly the fraction associated with sulfate anions) results rather mobile in the water table fluctuation zone.

All the Massaciuccoli peaty soils are Histosols; those of earlier reclamation and better drainage can be classed as «medisaprist», while the soils affected by poor drainage conditions are still «sulfohemist».

Key words — Peat, peaty soils, Tuscany, Central Italy, chemical fertility, geochemistry, classification.

INTRODUZIONE

Le torbe attuali occupano una porzione non trascurabile della superficie totale delle terre emerse (~ 0.7%; NIKONOV, 1948). Esse sono state estesamente studiate sotto vari aspetti, soprattutto quello della geochimica delle sostanze organiche vegetali e delle relazioni fra queste e certi elementi chimici. Molti studi sono stati in particolare dedicati alla struttura chimica dei composti naturali che fungono da precursori alla formazione dei carboni e ai processi di concentrazione di elementi chimici da parte delle sostanze organiche contenute nelle torbe (MANSKAYA e DROZDOVA, 1968). Tali studi sono però, per la maggior parte, limitati a torbe delle regioni temperate-fredde, o addirittura a torbe delle regioni boreali, della Russia, Scandinavia e Nord-America, con poche eccezioni concernenti torbe di zone sub-tropicali (CASAGRANDE e ERCHULL, 1976, e letteratura ivi citata). Queste formazioni rappresentano, quasi sempre, torbe decisamente acide, formatesi in condizioni di scarso apporto minerale, con basso contenuto in ceneri e con caratteristiche geochimiche del tutto particolari. Molto meno abbondanti sono i dati concernenti le torbe eutrofiche delle regioni temperate (ad es., BRENNER et al., 1978) e ancor meno numerosi quelli riguardanti i terreni su di esse sviluppati in seguito alla loro bonifica (RAVIKOVITCH, 1948; DUCHAUFOR, 1977). Come contributo alle indagini sulle interazioni «sostanza organica-componenti mineralogici dei suoli» è sembrato interessante dedicare uno studio approfondito ai suoli torbosi di Massaciuccoli, i quali rappresentano appunto terreni sviluppati su torbe eutrofiche di pianura che si sono formate in condizioni di clima temperato-

mediterraneo (*). La presente nota concerne la caratterizzazione chimico-fisica e l'inquadramento sistematico dei terreni di Massaciuccoli; lo studio delle variazioni, trasformazioni e neogenesi mineralogiche riscontrate nel particolare ambiente pedologico in cui si sono evoluti costituisce l'oggetto di una seconda nota (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985).

INQUADRAMENTO AMBIENTALE

Il campionamento dei terreni studiati è stato effettuato nel bacino del lago di Massaciuccoli, che comprende il settore meridionale della pianura versiliese e parte di quella pisana. È una zona di pianura costiera, lunga 15-18 Km, larga 4-9 Km, compresa tra il mare e il versante occidentale dei monti di Massarosa e d'Oltre Serchio, estrema propaggine meridionale delle Alpi Apuane.

La pianura ha la sua parte più depressa in corrispondenza del lago, il quale è ubicato al centro di un'area allungata, dell'ampiezza di circa 12 Km per 3 Km, delimitata dall'isoipsa di metri 1; il lago in sé occupa una superficie di soli 7 Km².

Il campionamento è stato effettuato appunto nella zona depressa, al di sotto dell'isoipsa di metri 1, gravitante sul lago di Massaciuccoli. In tale zona sono ubicati i terreni più francamente torbosi.

Le caratteristiche geomorfologiche, climatiche e floristiche del bacino, nonché le modalità della sua genesi, sono state ampiamente illustrate e discusse da PEDRESCHI (1956); ci limiteremo a riportare qui alcune notizie generali utili soprattutto ad inquadrare la natura dei terreni compresi in tale bacino e la possibile provenienza dei loro materiali inorganici.

La parte pianeggiante del bacino è costituita da una fascia litoranea sabbiosa a dune (tomboli), da un'altra parte più interna e più bassa, occupata dal lago e dalle circostanti paludi, e da una strettissima striscia pedemontana. Tutta la zona ha incominciato a formarsi nel quaternario recente, ma i suoi lineamenti fondamentali attuali sono stati raggiunti solo in epoca storica.

(*) La torba affiorante in superficie è una torba olocenica di clima temperato; i sondaggi rivelano però che in profondità sono presenti anche livelli di torbe tipiche di clima freddo, per lo più separate dalle prime da orizzonti di argille lacustri o di sabbie marine (BLANC et al., 1953).

Alla sua genesi ha contribuito in modo notevole proprio la formazione dei cordoni di dune sabbiose, sviluppatasi specialmente durante le fasi di clima più caldo e asciutto, i quali, a loro volta, hanno provocato l'instaurarsi, nel retroterra, di estesi laghi salmastri o di acqua dolce. In queste condizioni si sono formati qua e là livelli torbosi.

La stratigrafia mostra come questa zona di pianura costiera sia stata interessata da complicate vicende di trasgressioni e regressioni marine quaternarie (BLANC et al., 1953).

Secondo PEDRESCHI (1956) i principali agenti colmatori della depressione sono stati il Serchio a sud, il Camaioire a nord, i corsi d'acqua che scendono dai monti vicini ad est e il mare ad ovest. Mentre in passato il Serchio, il Camaioire ed il mare sono stati relativamente i più attivi, oggi, in seguito all'allontanamento del mare e alle arginature poste dall'uomo ai due fiumi, solo i torrenti dei rilievi orientali contribuiscono all'ulteriore interrimento del bacino.

I quattro agenti colmatori hanno formato quattro piani inclinati, convergenti verso il punto più basso, situato presso la riva occidentale del lago. Il piano del Serchio è ampio e si compone di terre sabbiose, che diventano sempre più argillose man mano che ci si avvicina al lago. Quello del Camaioire, alquanto più esteso in lunghezza, ha le stesse caratteristiche. Il piano inclinato orientale si è spinto variamente innanzi, ma in genere è strettissimo e non si allontana troppo dalla base dei rilievi. Quello del mare, infine, non costituisce, in senso stretto, un vero piano inclinato, ma una serie di piani inclinati, ossia di elevazioni e di depressioni.

La vicinanza del mare, la prevalenza dei venti meridionali, e la presenza, verso nord e nord-est, della catena delle Apuane, che funge da barriera ai venti freddi settentrionali, fanno sì che tutta la regione sia attualmente caratterizzata da un clima mite, che si può definire di tipo «mediterraneo-marittimo». Le temperature medie annue si aggirano sui 14-15°C, con minime invernali superiori a 7°C e massime estive di 21-22°C. Le precipitazioni sono, nel complesso, moderate, aggirandosi su di un valore medio annuo di 1025 mm, di poco superiore a quello medio toscano, ma di gran lunga inferiore a quello delle vicinissime Alpi Apuane.

Per quanto riguarda la natura dei terreni, nella zona pianeggiante i terreni torbosi e quelli sabbiosi sono di gran lunga i più diffusi. A cominciare da ovest, si osserva infatti la serie seguente:

terreni sabbiosi di origine fluvio-marina, molto sciolti, fini e poco umidi, non particolarmente idonei alle colture (anche perché in essi i materiali sabbiosi raggiungono talora percentuali superiori al 90%), per un'ampiezza di 4 Km, ma con una potenza sempre minore mano a mano che si procede verso nord; terreni torbosi, tutto intorno al lago, ma soprattutto nelle aree paludose a nord di esso; terreni alluvionali misti, con argille e tracce più o meno forti di torba nelle zone bonificate a nord e a sud del lago, ma più distanti da quest'ultimo; terreni ghiaiosi, o addirittura ciottolosi, nella zona pedemontana (PEDRESCHI, 1956).

Per quanto riguarda il tipo di vegetazione della zona è opportuno sottolineare che la vegetazione naturale è attualmente limitata alle zone ancora paludose più adiacenti al lago e alla zona occupata dai terreni più propriamente sabbiosi, cioè quella adiacente al mare. Nelle prime essa è tipicamente palustre, con prevalenza di vegetali superiori a sviluppo erbaceo, con caratteristiche nutrizionali piuttosto esigenti, quali *Phragmites communis*, *Carex stricta*, *Carex paludosa*, *Juncus conglomeratus*, *Scirpus lacustris*, *Equisetum palustris*, *Cyperus longus*, *Typha latifolia*, *Claudium mariscus*. Nella seconda zona la vegetazione arborea è caratterizzata dalla dominanza di essenze quali *Pinus pinaster* e *Pinus pinea* (introdotti dall'uomo), inframezzati da più rari tigli e querce; nel sottobosco prevalgono invece lentisco, corbezzolo ed anche elicriso e cisto.

La zona bonificata, dove sono concentrati i terreni più o meno fortemente torbosi, è completamente sottoposta a coltura da parte dell'uomo. La coltura dominante è quella del mais, che si adatta molto bene ai terreni subacidi o anche relativamente acidi, talora in rotazione con quella del grano. Su superfici molto meno estese sono presenti anche colture orticole, comprendenti cavolo, cavolfiore, cavolo-verza, spinacio, pomodoro, melone e cocomero.

CAMPIONAMENTO

Il prelievo dei campioni da analizzare è stato effettuato, in parte manualmente, in parte mediante carotatore, in 11 località differenti, in ciascuna delle quali sono stati raccolti da 2 a 3 campioni, a differenti profondità.

Il primo campione di ogni profilo comprende materiali raccolti manualmente in superficie; il secondo è rappresentato da una «carota» prelevata a profondità intorno ai 20-30 cm; il terzo campione (presente solo in alcuni profili) è costituito da una «carota» prelevata ad una profondità intorno ai 40-50 cm. Per il profilo 2 è stata analizzata anche un'argilla azzurra prelevata ad una profondità di circa 7 metri da un carotatore dell'impresa SNAM, che effettuava sondaggi nella zona durante la nostra campagna di campionamento (autunno 1981).

Una descrizione generale di tutti i campioni raccolti è sintetizzata in Tab. 1. I vari campioni sono stati contraddistinti da una sigla costituita da due numeri, il primo dei quali indica il profilo di appartenenza e quindi la località dove esso è stato prelevato (vedi mappa, fig. 1), mentre il secondo rappresenta la profondità di prelievo, espressa in centimetri.

Maggiori dettagli meritano due particolari profili per i motivi che hanno dettato la loro inclusione fra quelli da analizzare. Il profilo 4 è stato campionato lungo un taglio da noi effettuato sull'argine di un piccolo fosso di bonifica. Esso rivelava, già all'osservazione macroscopica, ad una certa profondità, la presenza di un sottile livello di colore arancio-vivo, che poteva lasciar supporre la mobilitazione e la successiva riprecipitazione di quantità considerevoli di ferro. Per studiare in dettaglio questo processo il campionamento è stato effettuato ad intervalli di profondità più ravvicinati di quelli relativi agli altri profili.

Il profilo 8 rappresenta un terreno assolutamente non torboso, appartenente alla fascia pedemontana di transizione fra il bacino del lago di Massaciuccoli e le colline di Massaciuccoli e Quiesa. La scarsità di sostanza organica era ben intuibile, anche macroscopicamente, sulla base del colore rossastro dominante; e tuttavia il campionamento è stato effettuato ugualmente al fine di ottenere dati sulla composizione mineralogica dei materiali argillosi che derivano dall'alterazione delle formazioni rocciose immediatamente prospicienti il lago di Massaciuccoli.

Rimane comunque da sottolineare che in tutti i casi non si tratta mai di profili naturali, ma sempre di terreni agrari e pertanto più o meno modificati dall'azione antropica. Non è stato purtroppo possibile campionare in alcun punto terreni naturali, poiché questi ultimi sono oggi limitati a zone di falascheti, che sono per la maggior parte dell'anno ricoperti da un velo d'acqua.

Tab. 1 - Localizzazione e descrizione generale dei campioni.

Camp.	Località	Profondità di prelievo (cm)	Colore (Scala Munsell*)		Caratteristiche
			Terr. umido	Terr. secco	
1/0	Case Rosse (zona a sud del lago)	0	7.5YR 2/1	5YR 4/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a mais, a riposo.
1/40A	Idem	40	7.5YR 2/1	5YR 4/1	Idem
1/40B	Idem	40	7.5YR 2/1	5YR 2/1	Idem. Prelevato nella zona più centrale del campo.
2/0	Fosso Bellino, nei pressi della fattoria "La Costanza" (zona a sud del lago)	0	7.5YR 1.7/1	5YR 1.7/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a mais, a riposo.
2/40	Idem	40	7.5YR 1.7/1	5YR 1.7/1	Idem
2/50	Idem	50	7.5YR 1.7/1	5YR 1.7/1	Idem
2/700	Idem	700	10Y 4/1	10Y 6/1	Argilla lacustre, grigio-azzurra, compatta. Sondaggio SNAM, profondità ~ 7m.
3/0	Strada della Bonifica, nei pressi dell'idrovora di Massaciuccoli.	0	7.5YR 1.7/1	5YR 3/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a riposo.
3/40	Idem	40	7.5YR 1.7/1	5YR 3/1	Idem
4/0	Fosso La Cava, a ~ 1 km dalla stazione ferroviaria di Massarosa (zona a nord del lago)	0	7.5YR 2/1	10YR 3/2	Terreno bruno scuro, probabilmente di riporto, costituente la parte sommitale dell'argine di una scollina.
4/25	Idem	25	5YR 3/1	10YR 4/4	Terreno grumoso, di colore prevalentemente rosso-arancio; i grumi rossastri risultano fortemente magnetizzabili.
4/28	Idem	28	5YR 3/3	10YR 4/6	Idem; appare ancora più concentrato il materiale rosso-arancio.
4/40	Idem	40	7.5YR 2/1	10YR 3/2	Terreno bruno scuro, fortemente torboso, simile a quello superficiale.
5/0	Fattoria Corsi (zona a sud-ovest del lago)	0	5Y 2/2	2.5Y 2/1	Terreno bruno. Coltivo a riposo.
5/25	Idem	25	5Y 2/2	2.5Y 2/1	Idem
5/45	Idem	45	5Y 2/1	2.5Y 4/2	Idem. Livello saturo d'acqua.
6/0	Fattoria Gambini (zona a sud del lago)	0	5Y 2/1	2.5Y 3/1	Terreno bruno. Coltivo a mais, a riposo.
6/25	Idem	25	5Y 2/1	2.5Y 3/1	Idem
6/40	Idem	40	5Y 2/1	2.5Y 3/1	Idem
7/0	Dintorni del "Casotto dei Cacciatori" (zona a ovest del lago, verso Torre del Lago)	0	2.5Y 3/2	10YR 4/3	Terreno bruno chiaro. Coltivo a mais, a riposo.
7/25	Idem	25	2.5Y 3/2	10YR 4/3	Idem
7/40	Idem	40	2.5Y 3/2	10YR 4/3	Idem
8/0	Dintorni di Massaciuccoli. Conoide di deflazione alla base del Monte Niquila (zona pedemontana a est del lago)	0	10YR 3/3	10YR 5/6	Terreno rosso-ocra, con scheletro abbondante. Coltivo a riposo.
8/25	Idem	25	10YR 3/3	10YR 5/6	Idem
8/45	Idem	45	10YR 3/3	10YR 5/6	Idem
9/0	Fosso Burlamacca, a ~ 1.5 km dalla stazione ferroviaria di Massarosa (zona a nord del lago)	0	10R 1.7/1	10R 1.7/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a riposo.
9/40	Idem	40	10R 1.7/1	10R 1.7/1	Idem
9/50	Idem	50	10R 1.7/1	10R 1.7/1	Idem
10/0	Campo a nord del Fosso Pantaneto (zona a nord del lago)	0	10R 1.7/1	10YR 2/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a riposo.
10/35	Idem	35	10R 1.7/1	10YR 2/1	Idem. Livello saturo d'acqua.
11/0	Dintorni dell'idrovora di Fosso Portovecchio (zona a nord del lago)	0	5YR 1.7/1	5YR 2/1	Terreno bruno scuro. Coltivo a mais, a riposo.
11/25	Idem	25	5YR 1.7/1	5YR 2/1	Idem
11/40	Idem	40	5YR 1.7/1	5YR 2/1	Idem. Sviluppo di gas (prevalentemente H ₂ S) durante il prelievo.

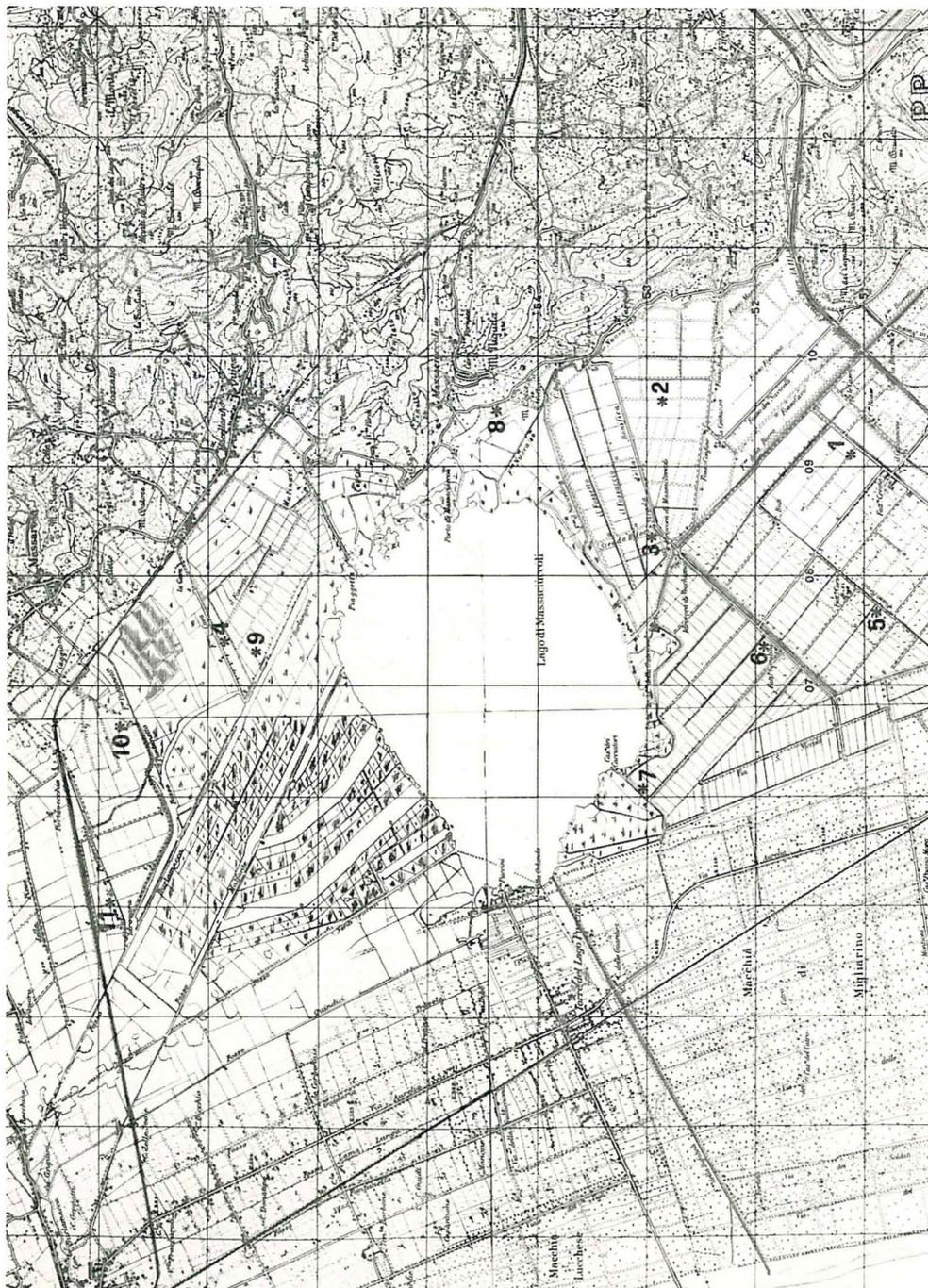


Fig. 1 - Ubicazione dei profili studiati.

METODI

L'analisi granulometrica della frazione minerale dei terreni torbosi di Massaciuccoli non è stata effettuata per l'impossibilità di eliminare la maggior parte della sostanza organica e quindi di ottenere una buona dispersione degli aggregati mineral-organici. A causa dei tenori in sostanza organica molto alti (valori compresi fra il 20% ed il 40%, con punte massime sino al 58%) anche i trattamenti ossidanti più energici si sono infatti rivelati sempre largamente inefficaci.

A questo quadro generale fanno eccezione il campione 2/700 e quelli del profilo 8 che, essendo essenzialmente inorganici (soprattutto gli ultimi), non presentano particolari problemi di dispersione. Essi sono stati quindi sottoposti ad analisi fisico-meccanica con le consuete tecniche della setacciatura e della sedimentazione in acqua; il primo campione è risultato qualificabile come un sedimento limo-sabbioso, gli altri come orizzonti di un terreno sabbio-limoso (Soil Taxonomy, U.S.D.A., 1975).

Per quanto concerne gli altri parametri fisico-chimici si sono utilizzati i seguenti metodi analitici: il pH è stato determinato potenziometricamente su sospensioni 1:2.5 terreno-acqua; la conducibilità elettrica è stata misurata mediante conducimetro sull'estratto acquoso 1:5; per la capacità di scambio cationico è stato utilizzato il metodo proposto da CECCONI e POLESELLO (1956); la determinazione del carbonio organico è stata effettuata per ossidazione con miscela cromo-solforica (LOTTI, 1956), mentre l'azoto totale è stato determinato con il metodo Kjeldahl; il fosforo assimilabile è stato dosato colorimetricamente con il metodo proposto da JOHN (1970), previa estrazione con il reattivo di Morgan (acetato di sodio, pH 4.4); il potassio assimilabile è stato determinato con il metodo proposto da COTTENIE et al. (1979).

Una valutazione grossolana della quantità di sostanza organica è stata ricavata moltiplicando il tenore in carbonio organico per un fattore di conversione (1.724) comunemente usato in letteratura e consigliato, fra gli altri, da FITZPATRICK (1971).

Tutti i valori relativi alle suddette determinazioni fisiche e chimiche sono riportati in tabella 2.

Le analisi chimiche dei componenti maggiori (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe, S) delle «ceneri» sono state eseguite mediante fluorescenza X, secondo il procedimento proposto da FRANZINI e LEONI

Tab. 2 - Principali caratteristiche chimico-fisiche e principali elementi di fertilità.

Campione	pH	Conducibilità mS/cm	C.S.C. meq/100 g*	C organico %*	N totale % _{ss} *	C/N	Sost. organ.* totale (% _{ss})	P ₂ O ₅ assimilab. mg/100 g*	K ₂ O assimilab. mg/100 g*
	in H ₂ O								
1/0	5.75	0.70	58.50	12.85	8.57	14.99	22.15	10.0	15.1
1/40A	6.10	0.89	46.00	13.33	9.82	13.57	22.98	9.6	24.2
1/40B	5.40	1.70	63.37	17.66	12.35	14.30	30.44	6.2	14.4
2/0	4.95	1.78	74.25	22.11	12.23	18.01	38.12	11.1	13.3
2/40	5.95	1.52	67.62	21.96	13.69	15.73	37.86	15.8	20.5
2/50	6.00	2.19	74.50	26.10	14.72	17.73	45.00	7.3	12.6
2/700	7.80	0.58	26.25	2.45	1.09	22.47	4.22	6.8	33.1
3/0	4.95	2.35	66.00	15.56	10.74	14.49	26.82	15.1	35.2
3/40	5.55	4.78	59.87	30.80	14.47	21.29	53.10	6.6	33.1
4/0	4.90	2.43	72.62	18.38	11.96	15.36	31.69	10.7	31.6
4/25	5.65	2.00	75.75	12.42	9.97	12.97	21.41	4.4	16.9
4/28	6.05	1.73	52.12	7.99	5.30	15.07	13.77	10.0	19.3
4/40	4.85	1.43	72.25	33.55	18.52	18.11	57.84	5.3	11.6
5/0	6.85	0.62	62.25	11.70	5.46	21.43	20.17	8.0	38.5
5/25	6.40	0.53	58.50	11.12	5.83	19.07	19.17	7.5	40.7
5/45	5.80	0.48	65.75	14.76	8.17	18.45	25.45	7.7	34.3
6/0	7.00	1.78	46.25	14.13	9.92	14.24	24.36	53.0	90.3
6/25	6.60	1.12	63.75	14.14	10.16	13.92	24.38	22.5	60.2
6/40	6.30	1.97	69.87	15.08	10.09	10.00	26.00	33.7	53.6
7/0	6.55	3.73	55.62	9.83	9.02	10.90	16.95	65.0	90.3
7/25	6.60	3.08	49.62	9.96	8.56	11.63	17.17	22.0	52.1
7/40	5.85	4.70	43.50	7.71	7.10	10.86	13.29	7.2	43.1
8/0	8.00	0.89	14.50	0.75	0.75	10.00	1.29	11.1	16.0
8/25	8.20	0.61	15.00	0.36	0.40	9.00	0.62	8.6	11.7
8/45	8.00	1.31	17.12	0.30	0.24	12.50	0.51	4.0	11.6
9/0	5.85	0.81	66.50	22.46	14.90	15.07	38.72	6.3	48.2
9/40	6.00	0.62	41.25	21.21	15.16	13.99	36.57	10.0	45.2
9/50	6.15	1.21	68.75	27.85	15.86	17.56	48.01	5.2	33.7
10/0	6.90	1.13	57.25	18.33	11.61	15.79	31.60	9.0	32.5
10/35	7.00	1.54	62.00	17.74	11.00	16.13	30.58	18.0	40.1
11/0	4.35	0.91	42.00	20.33	13.09	15.53	35.04	9.5	47.0
11/25	4.50	0.99	60.75	22.22	13.30	16.70	38.31	10.8	22.9
11/40	5.40	2.67	67.25	30.16	14.93	20.20	52.00	4.6	21.1

*Espressi sulla sostanza secca (110°C).

*Sostanza organica calcolata dal contenuto in C organico, applicando il fattore di conversione 1.724 (Fitzpatrick,1971).

(1973); esse sono state effettuate sulle polveri dei campioni globali, calcinate a 850°C, che rappresentano appunto le «ceneri» dei terreni torbosi. La metodologia delle analisi in fluorescenza non avrebbe comunque consentito la determinazione della composizione chimica della frazione organica, poiché lo spettrometro in dotazione può ana-

lizzare solo gli elementi chimici con numero atomico superiore a 9. Inoltre l'eliminazione di tutta la sostanza organica preliminare all'esecuzione dell'analisi chimica è necessaria per evitare i problemi connessi con la determinazione del coefficiente di assorbimento di massa (rispetto alla radiazione X) della matrice e quindi anche della frazione organica (FRANZINI e LEONI, 1973).

RISULTATI E DISCUSSIONE

Principali caratteristiche chimico-fisiche e principali elementi di fertilità

Come già posto in evidenza nella parte metodologica, non è stato possibile effettuare l'analisi granulometrica dei terreni torbosi di Massaciuccoli. Tuttavia una valutazione molto approssimativa della tessitura della loro frazione minerale può essere tentata sulla base dei dati mineralogici. I contenuti di (quarzo + plagioclasio + K-feldspato) di tale frazione sono, in genere, compresi nell'intervallo 21-31%; essendo questi minerali i principali costituenti della sabbia e del limo, è plausibile ammettere che i terreni studiati abbiano una composizione tessiturale con percentuali massime di (sabbia + limo) di circa il 30% o, più probabilmente, ancora più basse, se si tiene conto del fatto che quantità più o meno grandi di quarzo e di feldspati possono essere presenti anche nella frazione argillosa. Essi sono quindi da qualificarsi come terreni a granulometria prevalentemente argillosa o argillo-limosa.

Tali terreni non sono quasi mai estremamente acidi; secondo la scala proposta da PRINCIPI (1964) essi possono essere qualificati come variabili dal sub-acido all'acido (profili 1, 2, 3 e 4), uniformemente sub-acidi (profilo 9) o variabili dal neutro al sub-acido (profili 5, 6 e 7), mentre il profilo 10 è addirittura uniformemente neutro; soltanto il profilo 11 è classificabile da peracido ad acido. Normalmente si osserva una acidità lievemente crescente con la profondità, ma in qualche caso i pH più bassi si riscontrano in superficie (profili 2 e 11).

Quanto ai campioni non torbosi (profilo 8 e camp. 2/700), essi sono classificabili come sub-alcalini.

Il pH dei campioni analizzati appare fortemente influenzato dal tenore in sostanza organica e dal contenuto in ioni Ca e Mg; è stata

riscontrata infatti una correlazione negativa significativa ($P = 0.01$) fra i valori del pH e quelli del rapporto $S.O./(CaO + MgO)$. Questo fatto è in buon accordo con il ruolo essenziale svolto dai carbonati dei due metalli alcalino-terrosi come tamponi principali dell'acidità della sostanza organica (e anche dell'acidità minerale). Fanno eccezione all'andamento lineare i due soli campioni 11/0 e 11/25, qualificabili come peracidi, nei quali evidentemente l'acidità è più fortemente influenzata anche dall'ossidazione di solfuri, mentre il contenuto di ioni alcalino-terrosi è insufficiente a neutralizzarla in discreta misura.

La conducibilità elettrica, funzione della concentrazione di sali ionizzati nel terreno, mostra valori indicativi di salinità variabili da «medie» ad «alte», a «molto alte» (DAVIDESCU e DAVIDESCU, 1982). I dati chimici globali (Tab. 3) indicano che tali sali solubili sono rappresentati prevalentemente da solfati, soprattutto di calcio, e, in minor misura, anche da sali di Mg e di Na.

Nella maggior parte dei profili i valori della conducibilità elettrica hanno un andamento crescente con la profondità; ciò è in buon accordo con un quadro di lisciviazione di sali solubili dai livelli superiori verso quelli inferiori. Salinità «molto alte» sono deducibili solo per alcuni degli orizzonti più profondi e per tutti i livelli dei profili 3 e 7. Nel caso di quest'ultimo la conducibilità particolarmente alta è probabilmente conseguente ad una recente concimazione minerale, della quale erano evidenti le tracce nel periodo di campionamento.

La capacità di scambio cationico presenta valori piuttosto elevati, in buon accordo con gli alti tenori in sostanza organica e il discreto grado di decomposizione di quest'ultima; nei campioni dove questa è scarsa (profilo 8 e camp. 2/700) si fa sensibile anche l'influsso dei fillosilicati.

La sostanza organica è presente, nella maggior parte dei casi, in tenori compresi fra il 20% e il 40%; in tre campioni supera addirittura il 50% della sostanza secca. Questi valori sono molto prossimi a quelli riportati per i terreni di Massaciuccoli da ROTINI e CARLONI (1970). La distribuzione di questo componente nei vari profili appare, in generale, uniforme nei due livelli più alti (superficiale e 25-35 cm) e mostra un considerevole aumento in quello più profondo (40-50 cm); fa eccezione il solo profilo 7, che presenta un andamento inverso. Questa distribuzione può essere il risultato di più fattori quali: a) una originaria stratificazione e quindi disomogenei-

Tab. 3 - Composizione chimica della frazione inorganica (espressa in percentuali rispetto al campione calcinato a 850°C; la perdita alla calcinazione è riportata, in parentesi, nell'ultima colonna).

Camp.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ *	SO ₃	Tot.	(P.C.) [†]
1/0	0.88	3.96	21.32	56.04	0.28	3.05	3.34	0.94	0.15	9.49	0.55	100.00	(30.83)
1/40A	0.88	4.00	21.07	55.36	0.28	3.00	4.39	0.94	0.15	9.64	0.29	100.00	(35.54)
1/40B	0.91	3.91	20.90	54.48	0.31	3.00	5.18	0.95	0.15	9.99	0.22	100.00	(42.67)
2/0	0.87	3.98	21.00	53.51	0.44	2.93	5.99	0.92	0.14	10.04	0.18	100.00	(46.28)
2/40	0.81	3.80	19.82	50.22	0.49	2.74	10.20	0.86	0.17	9.55	1.34	100.00	(52.19)
2/50	0.84	3.84	18.22	45.06	0.53	2.34	16.63	0.79	0.20	8.94	2.61	100.00	(61.79)
2/700	1.10	4.84	18.36	56.09	0.13	3.12	4.86	0.83	0.23	8.01	2.43	100.00	(10.27)
3/0	1.12	4.20	22.13	55.18	0.39	3.44	3.06	0.93	0.09	9.08	0.38	100.00	(37.87)
3/40	1.81	4.44	17.46	40.81	0.41	2.35	12.39	0.64	0.12	9.16	10.41	100.00	(65.63)
4/0	0.79	2.95	20.66	53.96	0.45	2.61	5.29	0.78	0.53	9.27	2.71	100.00	(44.98)
4/25	0.92	2.70	20.58	58.12	0.35	2.37	3.57	0.75	0.31	9.75	0.58	100.00	(30.09)
4/28	0.91	2.63	21.47	57.49	0.39	2.40	2.79	0.76	0.26	10.27	0.63	100.00	(20.37)
4/40	0.84	2.92	18.30	42.18	0.56	1.75	13.87	0.64	0.69	10.59	7.66	100.00	(69.97)
5/0	0.93	4.21	20.77	56.30	0.25	3.41	3.54	0.91	0.11	8.64	0.93	100.00	(27.91)
5/25	0.88	4.35	21.17	56.34	0.24	3.41	3.21	0.91	0.10	8.62	0.77	100.00	(29.23)
5/45	0.89	4.23	21.11	56.08	0.24	3.43	3.44	0.92	0.10	8.70	0.86	100.00	(32.52)
6/0	0.83	4.06	20.74	53.20	0.50	3.38	6.19	0.87	0.11	7.93	2.22	100.00	(34.29)
6/25	0.83	4.15	21.43	53.93	0.41	3.43	5.10	0.89	0.10	8.27	1.46	100.00	(34.13)
6/40	0.87	4.06	20.98	53.33	0.45	3.37	5.76	0.88	0.10	8.44	1.76	100.00	(37.57)
7/0	1.04	4.64	19.96	55.50	0.43	3.52	3.19	0.87	0.31	9.74	0.80	100.00	(27.17)
7/25	1.01	4.73	20.15	56.08	0.35	3.51	2.55	0.86	0.29	9.94	0.53	100.00	(25.16)
7/40	1.02	4.84	20.57	55.84	0.19	3.57	2.07	0.87	0.16	9.97	0.90	100.00	(20.39)
8/0	1.80	2.46	13.70	69.54	0.17	2.46	4.52	0.55	0.11	4.54	0.15	100.00	(6.27)
8/25	1.77	2.68	14.50	68.21	0.16	2.54	4.83	0.59	0.11	4.50	0.11	100.00	(5.84)
8/45	1.73	2.68	15.48	69.76	0.14	2.52	2.03	0.61	0.10	4.84	0.11	100.00	(7.78)
9/0	0.68	3.00	18.43	49.11	0.67	2.87	9.75	0.70	0.49	9.51	4.79	100.00	(54.83)
9/40	0.73	2.90	17.94	52.05	0.55	2.46	9.18	0.67	0.48	8.47	4.57	100.00	(50.26)
9/50	0.92	4.26	14.69	36.24	0.50	1.72	18.73	0.51	0.30	8.10	14.03	100.00	(70.73)
10/0	0.96	2.96	18.36	48.42	0.54	2.48	11.15	0.68	0.24	8.53	5.68	100.00	(47.15)
10/35	1.07	2.94	18.12	51.06	0.55	2.46	10.57	0.68	0.24	8.47	3.84	100.00	(42.04)
11/0	1.06	2.93	19.30	60.94	0.42	2.94	2.57	0.82	0.10	8.63	0.29	100.00	(46.66)
11/25	1.12	3.02	19.65	59.29	0.38	2.80	3.11	0.84	0.08	9.13	0.58	100.00	(48.26)
11/40	2.06	4.53	17.06	39.96	0.46	1.80	14.48	0.65	0.39	9.49	9.12	100.00	(71.35)

* Ferro totale espresso come Fe₂O₃

† P.C. = Perdita alla calcinazione a 850°C (espressa in percentuali rispetto al campione essiccato a 110°C)

tà del terreno, con maggiore contributo di materiali alluvionali alla genesi degli strati più vicini alla superficie attuale; b) un processo di illuviazione di sostanza organica nei livelli profondi da quelli superficiali; c) una maggiore ossidazione, e quindi mineralizzazione,

della sostanza organica in prossimità della superficie ed una sua più lunga conservazione in profondità.

È probabile che i fattori b) e c) siano quelli che hanno avuto una maggiore influenza nel processo di distribuzione della sostanza organica; naturalmente la pratica dell'aratura porta ad una omogeneizzazione della zona più superficiale.

Per quanto concerne l'azoto totale, esso risulta presente in quantità normali per terreni ad alto contenuto in sostanza organica. La sua distribuzione è ovviamente strettamente correlata al contenuto in sostanza organica, essendo l'azoto organico di gran lunga prevalente su quello minerale.

Il rapporto C/N dei terreni torbosi analizzati risulta compreso tra 10 e 21; tali valori rientrano fra quelli indicati come caratteristici delle «torbe eutrofiche» da DUCHAUFOR (1977). Secondo questo autore le «torbe acide» hanno valori di C/N molto più alti, addirittura superiori a 30, indici di una umificazione estremamente ridotta. Nei terreni di Massaciuccoli ritroviamo valori che indicano invece una umificazione della sostanza organica da considerevole (nel caso del profilo 7, caratterizzato da un buon drenaggio) a media. Ciò è evidentemente conseguente all'abbassamento della falda freatica operata dalla bonifica, che ha avuto per conseguenza un aumento delle attività della microflora e della mesofauna, con suddivisione fine del materiale organico iniziale (formazione d'umina ereditata, aumento del contenuto in acidi fulvici e acidi umici, ecc.), per cui si può affermare che tale sostanza organica presenta i caratteri di un «muck» o «sapist».

CRESCINI (1969) osserva che i principali terreni di palude italiani sono estremamente ricchi in azoto e in potassa, mentre difettano in anidride fosforica, e consiglia quindi la concimazione fosforica come mezzo per incrementarne la fertilità. Infatti se si caratterizzano i terreni torbosi di Massaciuccoli sulla base della scala riportata da LOTTI e GALOPPINI (1980), si rileva che il fosforo assimilabile in essi contenuto è: «piuttosto scarso» o «molto scarso» in circa la metà dei campioni, «appena sufficiente» nell'altra metà ($P_2O_5 > 8$ mg/100 g). Fanno eccezione tutti i livelli del profilo 6 ed i livelli più superficiali del 7, che presentano valori assai superiori a tutti gli altri, giungendo a 65 mg/100 g di terreno; per questi ultimi c'è da ipotizzare la possibilità di una concimazione fosfatica in un periodo ravvicinato rispetto a quello del campionamento.

Al contrario il contenuto in potassio assimilabile, tenuto conto

della tessitura e della C.S.C. dei terreni torbosi di Massaciuccoli, appare, in generale, da «alto» a «molto alto» (COTTENIE et al., 1979); solo i profili 1 e 2 presentano un contenuto di K_2O assimilabile che può essere definito «basso» e pertanto necessiterebbero di una integrazione del suo contenuto tramite concimazione. Il profilo 8, che costituisce un terreno assolutamente non torboso, a tessitura sabbio-limoso, appare il più povero in potassio assimilabile.

Composizione chimica della frazione minerale

La composizione chimica dei campioni studiati (tab. 3) è caratterizzata da una generale uniformità per la maggior parte dei componenti. Fanno eccezione i campioni del profilo 8, che non rappresentano terreni torbosi e che hanno una mineralogia del tutto particolare (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985; tab. 1); essendo infatti caratterizzati da grande abbondanza di componenti detritici propri della frazione sabbio-limoso (quarzo, K-feldspato, plagioclasio e calcite) mostrano anche valori piuttosto alti di SiO_2 e Na_2O e, di converso, valori piuttosto bassi di MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 rispetto a tutti gli altri campioni.

Analizziamo ora in dettaglio le variazioni dei vari componenti chimici nell'ambito di tutti i campioni torbosi, trattando quindi solo marginalmente i campioni 8. Per un confronto corretto si è cercato di minimizzare gli effetti delle migrazioni dei sali solubili più abbondanti (i solfati di calcio), ricalcolando i contenuti percentuali dei vari componenti in assenza di $CaSO_4$; le cospicue concentrazioni locali (soprattutto nei livelli più profondi) di tali sali indurrebbero infatti diminuzioni solo apparenti degli altri componenti.

Na_2O : le variazioni sono piuttosto piccole e, all'incirca nei due terzi dei campioni, rispecchiano fedelmente le variazioni del contenuto in plagioclasio; considerando quest'ultimo come albite pura, si nota una coincidenza molto buona fra sodio totale e sodio del feldspato. Tale fatto implica evidentemente che per questi campioni, che rappresentano, in generale, la parte superiore dei profili, il catione alcalino non contribuisca in maniera determinante alla composizione del complesso di scambio o a quella delle soluzioni del terreno.

Negli orizzonti più profondi di quasi tutti i profili si nota invece che il contenuto in sodio è decisamente più alto di quello che ci si potrebbe aspettare dalla quantità del plagioclasio. Per questi li-

velli i valori della conducibilità elettrica da «alti» a «molto alti» (e comunque superiori a quelli della zona sovrastante del profilo) fanno ritenere probabile che parte di questo sodio sia contenuto nelle soluzioni del terreno.

MgO: i contenuti di questo elemento sono piuttosto uniformi in tutti i campioni; si notano solo alcuni valori leggermente più alti in alcuni di essi, fra cui il campione 2/700. Mentre per quest'ultimo la lieve anomalia positiva riflette l'abbondanza di clorite e anche la presenza di fasi carbonatiche, negli altri casi essa si accompagna a valori particolarmente elevati della conducibilità elettrica e quindi può essere messa in relazione con la presenza di ioni Mg in soluzione (orizzonti profondi dei profili 3, 4, 9 e 11).

Al₂O₃: i contenuti di questo componente appaiono estremamente uniformi. Se si elimina infatti l'effetto della distribuzione dei solfati di calcio, ricalcolando le percentuali di *Al₂O₃* in assenza di *CaSO₄*, tenori in allumina compresi fra 19% e 22% risultano comuni a tutti i campioni torbosi. Anche la distribuzione del componente nell'ambito dei singoli profili risulta singolarmente omogenea; al più si può rilevare, in alcuni di essi (2, 3, 9), una tendenza ad una lieve decrescita dagli orizzonti superficiali a quelli più profondi.

SiO₂: la silice è presente in tenori compresi fra ~54% e ~57% nella quasi totalità dei campioni superficiali (percentuali ricalcolate in assenza di *CaSO₄*). La sua distribuzione appare sostanzialmente omogenea in alcuni profili (5, 6, 7, 10), mostra una diminuzione piuttosto netta negli orizzonti più profondi in altri (prof. 2, 3, 4, 9, 11). Poiché tale diminuzione è strettamente correlata ad una diminuzione del quarzo quasi della stessa entità (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985; tab. 1), riteniamo probabile che essa sia in buona parte riferibile a disomogeneità nella distribuzione dei minerali detritici della frazione sabbio-limoso lungo tali profili; il quarzo (e, in maniera meno evidente, anche i feldspati) risultano più abbondanti nelle zone superiori o per effetto di un considerevole apporto di tipo eolico o in conseguenza di differenze nella selezione granulometrica degli apporti alluvionali.

Non è tuttavia da escludersi che questa decrescita della silice in profondità sia in parte dovuta anche all'attività degli acidi organici contenuti nella torba. I profili in cui si osserva questo andamento sono proprio quelli con più alti tenori in sostanza organica (> 40%) nei livelli profondi, mediamente più acidi (pH ≤ 6) e, in

generale, meno evoluti dal punto di vista pedologico (sulfohemist). Il ruolo di certe molecole organiche nell'accelerazione delle reazioni di alterazione è stato sottolineato da vari autori (SCHATZ et al., 1957; WRIGHT e SCHNITZER, 1963; EVANS, 1965) e dimostrato sperimentalmente in laboratorio con l'alterazione organo-chimica di vari silicati (HUANG e KELLER, 1970; HUANG e KIANG, 1972). Tali studi hanno rivelato che il meccanismo di alterazione organo-chimica è piuttosto complesso e può portare alla dissoluzione congruente di Si e Al o all'allontanamento preferenziale di Al rispetto ad Si o viceversa, in relazione al tipo di minerale e al tipo di agente complessante (acidi debolmente complessanti o acidi fortemente complessanti). Nel caso dei terreni di Massaciuccoli la composizione della sostanza organica e le condizioni di pH sono probabilmente più favorevoli ad un modesto, ma continuo, allontanamento dal sistema della silice rispetto all'allumina; quest'ultima è praticamente immobilizzata in complessi (o composti) poco o affatto solubili subito dopo l'alterazione delle fasi minerali più labili (ad es. fillosilicati a strati misti) (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985).

P_2O_5 : il fosforo riportato in tab. 3 rappresenta essenzialmente il fosforo inorganico. Infatti il procedimento della calcinazione a $850^\circ C$ del campione, preliminare all'analisi in fluorescenza X, porta all'allontanamento del P organico sotto forma di fasi volatili (DUCHAUFOR, 1979). Comunque tale fosforo inorganico appare, in generale, più abbondante nei profili e nei livelli dove più alto è il tenore in sostanza organica; anche questa frazione, attualmente mineralizzata, è dunque, in buona parte, di derivazione organica.

K_2O : il componente non mostra grandi variazioni nell'insieme dei campioni: le modeste differenze osservabili sono correlate a variazioni nel rapporto (minerali detritici non-fillosilicatici)/fillosilicati o nel rapporto illite/interstratificati.

CaO : il componente è piuttosto abbondante in tutti i campioni; esso mostra però un'altissima variabilità di contenuti: normalmente compresi fra il 2 e il 5%, salgono sino a valori del 19% circa nei campioni dove più abbondante è la sostanza organica e la SO_3 .

Sulla base dei dati chimici già discussi (ad es. correlazione tra pH e rapporto (sostanza organica)/(CaO + MgO)) e dei dati mineralogici (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985; tab. 1) si può affermare che nei terreni torbosi di Massaciuccoli lo ione Ca è contenuto principalmente nelle seguenti forme: a) come ione scambiabile nell'argilla e nelle

sostanze umiche (insieme al Mg costituisce il principale ione scambiabile; b) come ione complessato nei composti di chelazione realizzati dalle sostanze umiche; c) come solfato nelle soluzioni del suolo e in fasi solide finemente disperse. In questa forma esso è stato posto in evidenza sia per via diffrattometrica (come gesso), nei campioni con più alto tenore in SO_3 , sia per via chimica nell'estratto acquoso. Nelle «ceneri» calcinate esso è ancora meglio evidenziabile (sotto forma di anidrite).

La sua distribuzione appare, in alcuni profili, piuttosto omogenea, mentre in altri mostra un deciso arricchimento in profondità, quest'ultimo strettamente correlato con un aumento in SO_3 e con un aumento in sostanza organica. Esso si spiega quindi con un dilavamento del calcio solfato e di composti (e complessi) solubili con la sostanza organica dagli orizzonti più superficiali verso quelli più profondi, permanentemente saturi d'acqua.

Quanto ai carbonati, se si escludono i terreni puramente minerali o quasi (campioni 8 e 2/700), essi sono completamente assenti o presenti solo in tracce nei terreni caratterizzati da un pH prossimo alla neutralità.

L'abbondante tenore in CaO, tipico delle «torbe eutrofiche», è spiegabile con una sua concentrazione ad opera della vegetazione dominante, costituita essenzialmente da cannuce e carici. Infatti le torbe derivate da questi vegetali possono contenere, secondo PRINCIPÌ (1964), quantità di CaO variabili da 1.40 a 7.47%.

L'origine prima del calcio può essere rintracciata: a) nella dissoluzione dei carbonati detritici di apporto alluvionale; b) nella composizione propria delle acque della falda freatica, che giungono al bacino di Massaciuccoli dopo aver percolato le formazioni calcaree o arenacee (con cemento calcareo) dei monti d'Oltre Serchio o che provengono dalle acque di sub-alveo del Serchio e del Camaioire; c) nell'opera dell'uomo, attraverso le pratiche agrarie di calcitazione intese a migliorare la reazione dei terreni.

TiO_2 ; i contenuti di questo componente sono piuttosto uniformi nell'insieme dei campioni, in accordo con la sua ben nota «immobilità» geochimica. Le modeste variazioni osservabili appaiono correlate a quelle dei sesquiossidi; ciò evidentemente indica che questi componenti seguono lo stesso comportamento geochimico.

Fanno eccezione i campioni con un valore particolarmente alto in SO_3 , nei quali il contenuto in TiO_2 è anormalmente basso rispetto a quello dei sesquiossidi. Per questi casi si deve ammettere una

certa mobilitazione del componente rispetto ai sesquiossidi (soprattutto rispetto all'allumina).

LOUGHNAN (1969) osserva che mentre il biossido di titanio è insolubile già a pH 2.5, l'idrossido $Ti(OH)_4$ non precipita fino a pH 5; quindi se l'elemento è liberato in questa forma (il che avviene nel caso dell'alterazione di silicati titaniferi quali i pirosseni e le miche o anche nell'alterazione della magnetite) e se il pH è fra 4 e 5 si può verificare una mobilitazione del titanio rispetto all'alluminio. È possibile che nel caso dei campioni ad alto tenore in SO_3 , tali valori di pH (e forse anche più bassi) possano essere stati effettivamente raggiunti, anche se attualmente l'acidità risulta parzialmente neutralizzata.

MnO: è assai scarso in tutti i campioni. Nella metà dei profili (1, 2, 3, 5, 6) è presente con contenuti significativamente più bassi di quelli che caratterizzano l'altro gruppo di profili (4, 7, 9, 10, 11). Poiché i due gruppi sono ben distinti geograficamente, la differenza nel tenore in *MnO* fra di essi potrebbe essere spiegata con una differenza di concentrazione dell'elemento nei sedimenti che contribuiscono alla formazione dei suoli; il primo gruppo di campioni rappresenta, infatti, esclusivamente terreni della zona a sud del lago, mentre il secondo gruppo comprende campioni della zona a nord e a ovest di esso.

Fe₂O₃: l'analisi in fluorescenza X, in quanto analisi elementare, fornisce solo il tenore in ferro totale di ciascun campione, che viene poi comunemente espresso come *Fe₂O₃*. È ovvio però che, nel nostro caso, tenuto conto del carattere prevalentemente riducente dell'ambiente, buona parte del ferro totale è probabilmente presente allo stato ferroso. Nonostante in tale stato di ossidazione l'elemento sia considerato piuttosto mobile, esso non mostra variazioni di contenuto notevoli da un profilo all'altro, mantenendosi sempre nell'intervallo di tenori 8-11% (valori ricalcolati in assenza di $CaSO_4$). Fanno ovviamente eccezione i campioni del profilo 8 che, rappresentando un terreno praticamente privo di sostanza organica e derivante dal detrito di una roccia arenacea, contengono molto meno ferro di tutti gli altri (~4%).

La distribuzione del componente è generalmente uniforme anche nell'ambito dei singoli profili; tutt'al più si può osservare, in alcuni di essi, un lieve aumento con la profondità. Questo fatto è probabilmente in relazione con una ridotta solubilizzazione e migra-

zione dell'elemento dagli orizzonti superficiali verso quelli profondi; l'andamento appare comunque scarsamente significativo e non contraddice un quadro di generale immobilità del ferro nell'ambito dei livelli torbosi.

Il ferro è presente principalmente nelle seguenti forme: a) ossidi e idrossidi di ferro scarsamente cristallini (fanno eccezione i campioni 4/25 e 4/28, che contengono maghemite ben cristallizzata); b) ferro complessato dalla sostanza organica; c) solfuri di ferro (la loro presenza è ben evidenziabile nei diffrattogrammi di numerosi campioni globali); d) cloriti più o meno alterate. Questi silicati femici, componenti importanti della frazione fillosilicatica (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985), rappresentano probabilmente la principale delle fonti prime di buona parte del ferro delle torbe di Massaciuccoli. I dati mineralogici mostrano che esse risultano fra i minerali più instabili nel particolare ambiente pedologico, subendo un attacco da parte di agenti complessanti che ne provocano la degradazione verso «intergrades» cloritici più o meno resistenti o anche la dissoluzione completa. Tali sostanze estraggono dalle cloriti il Fe (insieme ad Al e Mg), che viene da esse legato in composti di complessazione o che può anche combinarsi con lo zolfo, nelle zone di riduzione, per dare solfuri.

SO₃: in tutti i campioni lo zolfo è stato determinato sulle «ceneri» calcinate ed espresso come SO₃. I valori riportati in tab. 3 esprimono pertanto essenzialmente lo zolfo minerale e, più precisamente, in prevalenza quello solfatico. È noto infatti che il riscaldamento a 850°C non porta alla decomposizione dei solfati di calcio, ma semplicemente alla trasformazione gesso → anidrite, e che anche il principale solfuro, la pirite, è solo parzialmente decomposto, con trasformazione pirite → pirrotina + zolfo (CRAIG e SCOTT, 1974).

Un controllo è stato comunque eseguito su tre campioni, nei quali sono stati determinati i contenuti in solfati (su estratti acquosi) per via gravimetrica; per tali campioni è stato osservato un accordo quasi completo fra zolfo solfatico e zolfo determinato per fluorescenza X sulle «ceneri» calcinate. È ovvio che tale zolfo minerale rappresenta solo una frazione dello zolfo totale e che, in modo particolare nei campioni più ricchi in sostanza organica, questa frazione risulti spesso relativamente modesta rispetto al totale. La determinazione dello zolfo totale per via chimica sul campione 9/50, con il metodo di TABATAI e BREMNER (1972), ha permesso di evidenziare che la frazione determinata per fluorescenza X sulle «ceneri» di questo campione

rappresenta solo il 23% del suo zolfo totale; pertanto si può affermare che la massima parte (70-80%) dello zolfo contenuto effettivamente nei campioni più torbosi di Massaciuccoli è rappresentato da zolfo organico (che viene allontanato sotto forma di fasi volatili nel corso della calcinazione). Questa proporzione è in buon accordo con quella riscontrata nelle torbe di alcune paludi americane da CASA-GRANDE et al. (1977), i quali sottolineano che nelle torbe d'acqua dolce circa il 70% dello zolfo totale è zolfo in combinazione con il carbonio, mentre nelle torbe d'acqua salata e salmastra la percentuale di tale frazione scende al 50%.

È noto che il ciclo dello zolfo nei terreni e sedimenti con abbondanza di sostanza organica è piuttosto complesso. Lo zolfo organico, per processi di riduzione in ambiente anaerobico, passa ad idrogeno solforato; lo stesso accade agli eventuali solfati, apportati dalle acque circolanti, per azione di batteri solfato-riduttori. L'acido solfidrico, per reazione con composti di ferro, dà luogo alla formazione di solfuri, quali il monosolfuro FeS allo stato amorfo, che poi subisce una trasformazione diagenetica a pirite o a marcasite, con la possibile mediazione di altre fasi cristalline quali la mackinawite e la greigite. Quando i sedimenti contenenti solfuri vengono drenati ed aerati, i solfuri divengono instabili e subentra una fase di ossidazione. Per ossidazione chimica o per l'azione di microrganismi aerobi i solfuri (ed eventualmente anche zolfo libero e H_2S) vengono trasformati in solfati, quali solfato ferroso che poi passa a solfato ferrico; quest'ultimo è facilmente idrolizzabile a idrato ferrico e acido solforico. Se sufficienti quantità di cationi quali Ca^{++} , Mg^{++} ecc. non sono presenti nell'ambiente a neutralizzare tale acido, il pH scende a valori molto bassi (pH 3-3.5) e si sviluppano i cosiddetti «suoli solfatici acidi» (o «cat clays») (DONER e LYNN, 1977).

Dal punto di vista dello stadio di evoluzione dello zolfo minerale i terreni di bonifica di Massaciuccoli analizzati si inquadrano quasi tutti in due gruppi distinti: a) il primo gruppo (profili 1, 5, 6, 7) è caratterizzato dall'eliminazione pressoché completa (per ossidazione) dei solfuri nei primi 40 cm di profilo da noi considerati; anche i solfati, derivanti dalla neutralizzazione dell' H_2SO_4 , sono stati in buona parte allontanati per dilavamento.

Si tratta di terreni di più antica bonifica, meglio drenati, più distanti dal lago (o in posizione topografica più elevata, ad es. profilo 7); b) il secondo gruppo (prof. 3, 4, 9, 11) ha scarsi solfuri, ma una considerevole quantità di solfati alla profondità di circa 40 cm,

cioè nella zona permanentemente permeata d'acqua o al limite fra di essa ed il «franco»; la parte superiore del profilo ha invece piccole quantità di zolfo minerale. Evidentemente si tratta di profili di terreni meno evoluti, nei quali l'ossidazione dei solfuri è molto avanzata, ma non ancora completa nelle zone più profonde, e nei quali i prodotti di neutralizzazione dell'acido solforico sono già presenti alla profondità di 40 cm, a causa di un drenaggio molto scarso. Tali terreni sono quelli di più recente bonifica, ubicati in zone topograficamente più basse, con una falda freatica più prossima alla superficie.

In tutti i casi comunque l'apporto di ioni alcalino-terrosi da parte della falda freatica è stato ed è tuttora sufficiente a neutralizzare buona parte dell'acidità da H_2SO_4 (oltre a quella dovuta alla sostanza organica) e ad impedire l'instaurarsi dei caratteri fortemente tossici per la vita vegetale dei «terreni solfatici acidi» (o «cat clays»).

Classificazione

Dal punto di vista classificativo, se si considera la prima suddivisione in «terreni minerali», «terreni torbosi» e «torbe» proposta da PRINCIPI (1953) per i terreni organici, i terreni di Massaciuccoli rientrano quasi tutti nella categoria dei «terreni torbosi», cioè in quelli caratterizzati da un contenuto di sostanza organica compreso fra il 20 ed il 50%. Fa eccezione il terreno del profilo 8, che è esclusivamente minerale, e quello del profilo 7, che ha un contenuto in sostanza organica di poco più basso del limite inferiore dei terreni torbosi. Solo a tre campioni, rappresentanti i livelli più profondi dei profili 3, 4 e 11, spetterebbe la definizione di «torbe» vere e proprie, poiché posseggono più del 50% di sostanza organica; tuttavia questi casi particolari e circoscritti non inficiano la generalità dell'attribuzione di tutti i terreni analizzati (escluso 8) alla categoria dei «terreni torbosi».

Entrando più in dettaglio ed utilizzando invece lo schema classificativo proposto da DUCHAUFOR (1977) si può affermare che essi hanno tutti i caratteri dei «suoli idromorfi organici» e, più in particolare, delle «torbe eutrofiche»; localizzazione topografica e geografica, origine delle falde acquifere, alto contenuto in ceneri, abbondanza di cationi alcalino-terrosi e quindi tasso di saturazione elevato, pH non inferiore a 4, proprietà biochimiche e conseguente stato

di decomposizione della sostanza organica ($C/N < 20$), composizione della vegetazione, sono tutti tipici delle «torbe eutrofiche».

Nella classificazione proposta dal Soil Survey Staff degli U.S.A. (U.S.D.A., 1975) i terreni torbosi di Massaciuccoli si collocano nell'ordine degli «Histosuoli», che raggruppano appunto i suoli prevalentemente organici. Il sottordine cui appartengono alcuni di essi è quello degli «Hemist», mentre altri rientrano in quello dei «Saprist». Tutti infatti avrebbero il grado di decomposizione dei materiali organici tipici dei «Saprist», decomposizione spinta al punto che l'origine botanica per la maggior parte dei materiali non può essere osservata direttamente; tuttavia la presenza in alcuni di essi (prof. 3, 4, 9, 10 e 11) di un orizzonte solforico entro 50 cm dalla superficie li fa collocare nel sottordine degli «Hemist» e, nell'ambito di questo, nel grande gruppo dei «Sulfohemist», indipendentemente dal grado di decomposizione delle fibre vegetali; per gli altri (prof. 1, 5 e 7) si può fare una diagnosi di «Saprist» e più precisamente di «Medisaprist», sulla base del loro regime termico e della successione di strati che li compongono.

Altri due profili (2 e 6), pur avendo sensibili quantità di materiali solforici entro i primi 50 cm dalla superficie, ne hanno però contenuti decisamente più bassi di quelli presenti nei profili considerati veri «Sulfohemist», e pertanto possono essere considerati di transizione appunto fra i «Medisaprist» e i «Sulfohemist».

CONCLUSIONI

I dati relativi alle principali caratteristiche fisico-chimiche e ai principali elementi di fertilità dei terreni di Massaciuccoli (tab. 2) mostrano che essi presentano, nell'insieme, caratteristiche sostanzialmente positive dal punto di vista agronomico, anche se non ottimali; l'ostacolo principale che si frappone ad una loro generalizzata utilizzazione è rappresentato dal basso pH. Tuttavia la scelta di colture adatte a tale ambiente, quali colture erbacee di essenze acidofile, come mais, segale, avena, orzo, trifoglio incarnato, limita notevolmente tale inconveniente; inoltre la correzione del basso pH tramite calcitazione, pur se realizzabile praticamente solo su aree ristrette, può consentire lo sviluppo di colture orticole e floricole ad alta specializzazione e con buoni redditi.

Questa diagnosi è valida soprattutto per i terreni meglio drena-

ti, cioè quelli più distanti dal lago e dalle paludi circostanti e topograficamente più elevati. Per gli altri, ed in modo particolare per quelli ubicati a nord e a nord-ovest del lago, i quantitativi di calce richiesti per la correzione dell'acidità risulterebbero esorbitanti, a causa dell'elevato potere tampone del terreno e per la continua formazione di acido solforico conseguente all'ossidazione dei solfuri e dei composti organici contenenti zolfo. Per di più tale correzione avrebbe comunque effetti piuttosto limitati nel tempo.

La carenza in fosforo assimilabile, comune a tutti i terreni di Massaciuccoli, richiede inoltre abbondanti concimazioni fosfatiche.

Dal punto di vista geochimico l'ambiente dei terreni torbosi di Massaciuccoli è caratterizzato da una generale immobilità di quasi tutti gli elementi chimici maggiori; solo il calcio, presente in forme piuttosto solubili, mostra una notevole mobilità lungo i profili, pur se limitata alla sola zona di oscillazione della falda freatica.

I dati chimici relativi alla silice, confrontati con quelli mineralogici (SARTORI e LEVI-MINZI, 1985), non consentono un'interpretazione univoca; è tuttavia interessante rilevare come essi indichino la possibilità di una modesta mobilitazione preferenziale del silicio rispetto all'alluminio (soprattutto negli orizzonti più profondi) favorita dagli acidi organici debolmente complessanti prodotti da una decomposizione media della sostanza organica. Tale comportamento geochimico sarebbe esattamente opposto a quello che si realizza nei podzols, dove gli acidi organici fortemente complessanti mobilitano preferenzialmente l'alluminio (e il ferro) rispetto al silicio (HUANG e KELLER, 1972).

Notevole è l'accumulo di ferro nella torba di Massaciuccoli; i tenori riscontrati (8-11%) sono all'incirca doppi rispetto a quelli di almeno una delle fonti primarie dell'elemento, cioè i suoli della fascia pedemontana del bacino (campioni 8: percentuale media di $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4.63\%$). Rispetto a questo elemento la torba sembrerebbe dunque aver funzionato come barriera geochimica e agente concentratore.

Se si analizza ora la distribuzione topografica dei vari profili nell'ambito del bacino di Massaciuccoli e la loro collocazione nell'ordine degli Histosuoli, è possibile tracciarne la probabile storia evolutiva. Si osserva infatti che tutti i «sapríst» risultano ubicati nella zona a sud (1 e 5) e a ovest (7) del lago, mentre gli «hemíst» sono localizzati nella zona a nord (4, 9, 10 e 11) con la sola eccezione del profilo 3, che si trova a sud, ma molto prossimo al lago. La

zona a sud è quella meglio drenata, protetta da argini dalle acque di esondazione del lago e rappresenta l'area di più antico colmamento; inoltre, nell'ambito di tale zona, i profili 1 e 5 si trovano piuttosto lontani dal lago. Il profilo 7, situato ad ovest del lago, ma piuttosto vicino ad esso, è però molto prossimo anche ai terreni dunali, prevalentemente sabbiosi, topograficamente più alti, dotati di un buon drenaggio; risulta infatti il meno torboso fra tutti i terreni organici.

La zona a nord del lago è invece quella nella quale la falda freatica è più prossima alla superficie, più facilmente inondata dalle acque del lago, cioè peggio drenata, con caratteri più decisamente palustri. Quanto ai profili 2 e 6, essi si trovano nella zona a sud del lago, ma molto più vicino a questo rispetto ai profili 1 e 5; è quindi logico che, avendo condizioni di drenaggio intermedie fra i due gruppi principali di terreni, abbiano caratteri intermedi tra i «medisaprist» e i «sulfohemist».

Questi dati consentono di tracciare il seguente quadro evolutivo: originariamente tutti gli Histosuoli di Massaciuccoli erano probabilmente inquadrabili nel sottordine degli «hemist», terreni azonali «che si rinvergono dall'Equatore fino alle regioni della tundra, in strette depressioni ed in aree piane, ampie, molto scarsamente drenate, come possono essere le pianure costiere» (U.S.D.A., 1975); quelli meglio drenati hanno subito una decomposizione relativamente avanzata della sostanza organica ed un allontanamento dei solfati dai primi 50 cm di spessore e si sono trasformati in «saprist», gli altri sono ancora degli «hemist». La classificazione americana (U.S.D.A., 1975) afferma esplicitamente la possibilità di questa evoluzione: «I materiali fibrici ed hemici, quando vengono drenati, si decompongono per formare materiali saprici e, se sono profondamente drenati, artificialmente o naturalmente, i fibrist e gli hemist si trasformano dopo alcuni decenni in saprist».

Quanto alle caratteristiche dei terreni che sono tuttora dei «sulfohemist» è opportuno mettere in rilievo che essi non presentano quelle proprietà negative, descritte per molti «terreni solfatici acidi» (o «cat clays»), di estrema acidità e tossicità per le piante; essi hanno infatti una reazione che generalmente varia da sub-acida ad acida, ma può anche essere addirittura neutra (prof. 10). Ciò si spiega con il fatto che le acque che alimentano il bacino di Massaciuccoli sono tutte estremamente ricche in carbonati alcalino-terrosi e quindi in grado di compensare quasi completamente l'acidità generata

dall'ossidazione dei solfuri. Non vi è quindi in essi presenza evidenti di jarosite, solfato di ferro e potassio tipico delle vere e proprie «cat clays». Queste ultime «si trovano principalmente nelle paludi costiere drenate o nei delta vicino alle foci di fiumi che portano sedimenti privi di carbonati o con basso contenuto in carbonati» (U.S.D.A., 1975).

BIBLIOGRAFIA

- BLANC A.C., SETTEPASSI F., TONGIORGI E. (1953) - Excursion au Lac de Massaciuccoli (Plaine côtière de la Basse Versilia). 4° Congr. Inter. I.N.Q.U.A., Roma.
- BRENNER S., IKAN R., AGRON A., NISSENBAUM A. (1978) - Hula valley peat: review of chemical and geochemical aspects. *Soil Sci.*, **125**, 226-232.
- CASAGRANDE D.J., ERCHULL L.D. (1976) - Metals in Okefenokee peat-forming environments: relations to constituents found in coal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 387-393.
- CASAGRANDE D.J., SIEFERT K., BERSCHINSKI C., SUTTON N. (1977) - Sulfur in peat-forming systems of the Okefenokee Swamp and Florida Everglades: origins of sulfur in coal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 161-167.
- CECCONI S., POLESSELLO A. (1956) - Metodi rapidi per la determinazione della capacità di scambio cationico del terreno. *Ann. Sper. Agr.*, **10**, 127-132.
- COTTENIE A., VELGHE G., VERLOO M., KIEKENS R. (1979) - Analytical methods for plants and soils. *Labor. Anal. Agrochim. State Univ.*, Ghent-Belgium.
- CRAIG J.R., SCOTT S.D. (1974) - Sulfide phase equilibria. In: RIBBE P.H. (ed.) - Sulfide mineralogy. M.S.A. Short Course Notes. Vol. 1.
- CRESCINI F. (1969) - Agronomia generale. R.E.D.A., Roma.
- DAVIDESCU D., DAVIDESCU V. (1982) - Evaluation of fertility by plant and soil analysis. Editura Academiei, Bucharest - Abacus Press, Turnbridge Wells.
- DONER H.E., LYNN W.C. (1977) - Carbonate, halide, sulfate and sulfide minerals. In: DIXON J.B. et al. (ed.) - Minerals in soil environments. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison-Wisconsin.
- DUCHAUFOR P. (1977) - Pédologie. Vol. I, Masson, Paris.
- DUCHAUFOR P. (1979) - Pédologie. Vol. II, Masson, Paris.
- EVANS W.P. (1965) - Facets of organic geochemistry. In: HALLSWORTH E.G. and CRAWFORD D.V. (ed.) - Experimental pedology. Butterworths, London.
- FITZPATRIK E.A. (1971) - Pedology. Oliver and Boyd, Edimburgh.
- FRANZINI M., LEONI L. (1973) - A full matrix correction in X-ray fluorescence analysis. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Ser. A*, **79**, 7-22.
- HUANG W.H., KELLER W.D. (1970) - Dissolution of rock-forming minerals in organic acids. *Am. Mineral.*, **55**, 2076-2094.
- HUANG W.H., KELLER W.D. (1972) - Organic acids as agents of chemical weathering of silicate minerals. *Nature (Phys. Sci.)*, **239**, 149-151.

- HUANG W.H., KIANG W.C. (1972) - Laboratory dissolution of plagioclase feldspars in water and organic acids at room temperature. *Am. Mineral.*, **57**, 1849-1859.
- JOHN M.K. (1970) - Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Sci.*, **109**, 214-220.
- LOTTI G. (1956) - La determinazione della sostanza organica nel terreno agrario. *Ann. Fac. Agr. Univ. Pisa*, **17**, 113-128.
- LOTTI G., GALOPPINI C. (1980) - Guida alle analisi chimiche agrarie. Edagricole, Bologna.
- LOUGHNAN F.C. (1969) - Chemical weathering of silicate minerals. Elsevier, New York - Amsterdam.
- MANSKAYA S.M., DROZDOVA T.V. (1968) - Geochemistry of organic substances. Pergamon Press, Oxford.
- MUNSELL (ed.) (1974) - Munsell soil color charts. Munsell, Baltimora.
- NIKONOV M.N. (1948) - Concerning the role of an understanding of contemporary peat bodies toward clarifications of the genesis of mineralized coal. *Byoll. M.O.I.P. see geol.*, **23** (6), 93-145.
- PEDRESCHI L. (1956) - Il Lago di Massaciuccoli e il suo territorio. *Mem. Soc. Geogr. It.*, **23**, Roma.
- PRINCIPI P. (1953) - Geopedologia. R.E.D.A., Roma.
- PRINCIPI P. (1964) - Geopedologia. R.E.D.A., Roma.
- RAVIKOVITCH S. (1948) - Peat soils and soils rich in organic matter in the Huleh Valley. *Bull.*, **47**, Agric. Res. Station, Rehovot.
- ROTINI O.T., CARLONI L. (1970) - Relazione sul rilevamento agro-pedologico della provincia di Pisa. In: Carta agro-pedologica della provincia di Pisa. Ammin. Provinc. di Pisa.
- SARTORI F., LEVI-MINZI R. (1985) - I terreni torbosi del bacino del lago di Massaciuccoli: II. Aspetti mineralogici. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Ser. A*, **92**, 297-320.
- SCHATZ A., SCHATZ V., MARTIN J.J. (1957) - Chelation as a biochemical weathering agent. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **68**, 1792-1793.
- TABATAI M.A., BREMNER J.M. (1972) - Forms of sulphur, carbon, nitrogen and sulphur relationships in Iowa soils. *Soil Sci.*, **114**, 380-386.
- U.S.D.A. (1975) - Soil Taxonomy. Agriculture Handbook n. 436, Baltimora.
- WRIGHT J.R., SCHNITZER M. (1963) - Metallo-organic interactions associated with podsolisation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27**, 171-176.

(ms. pres. il 1 giugno 1985; ult. bozze il 15 gennaio 1986)