Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
118° (2000), Vol. XXIV, pp. 229-238

MARCELLO PAGLIAI * - NADIA VIGNOZZI *

Il sistema dei pori quale indicatore delle qualità strutturali dei suoli **

Introduzione

Nella visione di un'agricoltura compatibile con la protezione delle risorse ambientali, fra cui in primo luogo il suolo, è necessario quantificare quei parametri che ne determinano la qualità e quindi anche il suo possibile deterioramento, proprio nell'ottica di una gestione territoriale capace di prevenire la degradazione ambientale. Tale prevenzione deve partire proprio da una corretta gestione del suolo visto che i principali processi degradativi riguardano proprio il suolo stesso. Per quanto concerne i processi di degradazione fisica non sono costituiti solo dall'erosione, ma anche dal compattamento, in seguito all'utilizzazione di macchine agricole sempre più pesanti, alla formazione della suola d'aratura, che sconvolge le proprietà idrologiche del suolo, alla formazione di croste superficiali in seguito alla diminuzione del contenuto di sostanza organica. Tutti questi aspetti sono comunque riconducibili a modificazione della struttura del suolo. Per valutare quindi la qualità del suolo e l'impatto delle attività agricole ed extragricole sul suolo è necessario quantificare le modificazione della struttura del terreno.

La struttura del suolo

Le caratteristiche fisiche del suolo sono in gran parte determinate dalle condizioni strutturali. La struttura del terreno, cioè la risultante della combinazione di

* Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Piazza M. D'Azeglio 30, 50121 Firenze.

** Relazione presentata al Convegno su "Indicatori per la qualità del suolo: prospettive ed applicabilità", Roma, 29 marzo 2000.

differenti tipi di pori con le particelle solide (aggregati), è una delle più importanti proprietà che determinano lo sviluppo delle colture proprio perché è la struttura stessa che influenza la profondità che le radici possono esplorare, il volume dell'acqua che può essere immagazzinata, i movimenti dell'acqua stessa, dell'aria, degli elementi nutritivi, dei fitofarmaci e della fauna terricola. La qualità dei suoli è strettamente correlata con le condizioni strutturali e molti dei dissesti ambientali in aree coltivate (erosione, desertificazione, ecc.) traggono origine proprio da fenomeni di degradazione della struttura del terreno.

Nonostante la sua importanza, la struttura del terreno rimane tuttora una delle meno studiate e più soggettive proprietà del terreno. Dalla definizione della struttura del terreno, sopra riportata, si evince che la porosità è l'indicatore principale delle qualità fisiche del suolo. Infatti sono proprio la morfologia, la dimensione, la continuità e l'arrangiamento dei pori nel terreno che determinano il contenuto e i movimenti dell'acqua e dell'aria, la crescita delle radici, ecc. La completa caratterizzazione del sistema dei pori nel suolo consente, quindi, la valutazione delle qualità fisiche del suolo stesso.

La quantificazione del sistema dei pori

L'avvento delle tecniche di analisi di immagine ha consentito la determinazione quantitativa del sistema dei pori su sezioni sottili preparate da campioni indisturbati di terreno attraverso le tecniche della micromorfologia del terreno.

La micromorfologia è basata sullo studio del terreno al microscopio ottico. A questo scopo è necessario preparare sezioni sottili di terreno seguendo una procedura che prevede il prelievo in campo del campione indisturbato, in modo tale da non alterarne la struttura all'interno. Successivamente, il campione viene indurito, impregnandolo sotto vuoto con una resina che ha la caratteristica di polimerizzare lentamente nel tempo, e che riempie gli spazi vani del terreno senza provocarne alcuna alterazione. Una volta indurito, il campione, può essere lavorato meccanicamente con apposite attrezzature quali, ad esempio, una troncatrice a disco diamantato ed una lapidatrice, sino ad ottenere sezioni sottili di circa 30 μm di spessore, trasparenti alla luce e quindi analizzabili al microscopio ottico. Le dimensioni di tali sezioni dipendono dalle attrezzature di cui si dispone; per le indagini sulla struttura occorrono sezioni sottili di almeno 6×6 cm^2. Per lo studio della porosità è necessario che il campione sia indurito nel suo stato naturale e non sia, ad esempio, essiccato all'aria. In questo caso si avrebbe una alterazione della porosità dovuta al crepacciamento del campione durante l'essiccamento. Per ovviare a questo inconveniente, prima dell'indurimento con la resina, viene seguita una procedura, già messa a punto e riportata nella letteratura internazionale, la quale prevede la sostituzione dell'acqua del campione con l'acetone (Murphy, 1986).

MORFOLOGIA DEI PORI

Da un punto di vista morfologico i pori possono essere classificati in tre gruppi fondamentali e cioè pori regolari, irregolari e allungati, utilizzando l'analisi di immagine.

I pori regolari o rotondeggianti sono ovviamente quelli di forma regolare e possono essere essenzialmente di due tipi rispetto alla loro origine: i pori sferici formati da bolle d'aria rimasta intrappolata nel terreno durante i processi di essiccamento e i canalicoli e le camere formati da attività biologica (crescita delle radici e movimenti della fauna terricola). La loro distinzione sulle sezioni sottili è molto evidente perché i pori sferici (Vesicles, secondo Brewer, 1964) hanno le pareti regolari e completamente lisce, mentre i canalicoli, anche se tagliati in maniera esattamente trasversale in sezione sottile, presentano pareti più rugose sulle quali si possono notare depositi di escrementi di insetti o depositi di essudati radicali. La presenza di abbondanti pori sferici del primo tipo origina una struttura del terreno di tipo vescicolare, tipica di suoli con evidenti fenomeni di degradazione.

I pori irregolari sono le comuni cavità del terreno con pareti irregolari e possono essere isolati (spazi interaggregati o intergranulari) o interconnessi fra loro. La preponderante presenza di questi pori origina le tipiche strutture lacunari.

I pori allungati possono essere distinti in due tipi: le crepe e le fessure sottili. Le prime sono tipiche dei terreni argillosi impoveriti di sostanza organica e sono visibili alla superficie del terreno stesso quando questo è crepacciato. Le fessure sottili sono notevolmente più importanti da un punto di vista agronomico, infatti, sono i tipici pori di trasmissione (Tabella 1). Una adeguata quantità di questi pori (superiore al 10% della porosità totale) generalmente origina una struttura poliedrica subangolare stabile e di buona qualità. Naturalmente per questo è necessario che tali pori siano distribuiti uniformemente nella matrice del terreno. Infatti, per

Tabella 1. *Classificazione funzionale dei pori nel terreno in base alle loro dimensioni* (Modificato da Greenland, 1977).

Diametro equivalente μm (10^{-6}m)	Potenziale di Matrice (bar)	Nome
<0,005	>-600	Spazi di legame
0,005-0,5	-600/-6	Pori Residui
0,5-50	-6/-0,06	Pori di Riserva
50-500	-0,06/-0,006	Pori di Trasmissione
>500	<-0,006	Fessure (Spazi vani)

questo tipo di pori la caratterizzazione mediante l'analisi di immagine non deve fermarsi solo all'identificazione della forma e alla misura della dimensione (larghezza), ma deve essere misurata anche la loro lunghezza, la quale riflette la continuità di questi pori nel terreno (Pagliai *et al.*, 1984). Un altro parametro importante da considerare è l'orientazione dei pori allungati. È abbastanza intuitivo che le caratteristiche fisiche di un terreno (in modo particolare l'infiltrazione) cambiano radicalmente se una serie di pori allungati è disposta parallelamente (struttura lamellare) o perpendicolarmente (struttura prismatica) alla superficie. Infine è importante caratterizzare l'irregolarità e la tortuosità dei pori allungati (Pagliai *et al.*, 1984). Infatti, per lo sviluppo delle radici l'irregolarità dei pori è altrettanto importante come la loro lunghezza e la loro distribuzione dimensionale. Ai fini dei movimenti dell'acqua, ad esempio, svolgono un ruolo diverso i pori allungati regolari, cioè con pareti perfettamente sovrapponibili, e quelli con pareti irregolari e quindi non sovrapponibili: quando il terreno si inumidisce rigonfia e quindi i pori con pareti sovrapponibili si possono chiudere interrompendo il flusso idrico, mentre quelli con pareti non sovrapponibili possono assicurare un certo flusso idrico anche quando il terreno è rigonfiato.

Distribuzione dimensionale dei pori

Per una valutazione completa delle condizioni strutturali del terreno oltre al valore totale della porosità è necessario quindi conoscere prima di tutto la morfologia e la distribuzione dimensionale dei pori, proprio perché le funzioni agronomiche dei pori stessi dipendono dalla loro dimensione e dalla loro forma. Nella letteratura internazionale esistono innumerevoli sistemi di classificazione basati sulla dimensione dei pori; la più recente, più valida e più diffusa appare quella descritta da Greenland (1977) e riportata nella Tabella 1.

Secondo questa classificazione i pori più piccoli di 0,005 μm (diametro equivalente), detti "spazi di legame", svolgono un ruolo fondamentale nelle forze di legame fra le particelle primarie. I pori compresi fra 0,005 e 0,5 μm, detti "pori residui", sono importanti in quanto in essi avvengono le interazioni a livello molecolare. I pori compresi fra 0,5 e 50 μm, detti "pori di riserva", sono capaci di trattenere l'acqua abbastanza fortemente da non essere drenata facilmente per gravità, ma che viceversa sono capaci di cederla alle piante. Essi costituiscono quindi la riserva idrica e di ioni nutritivi per le piante ed i microrganismi. L'appassimento delle piante comincia normalmente quando tutti questi pori si sono svuotati d'acqua, mentre il contenuto idrico presente quando i pori di questa classe sono riempiti d'acqua corrisponde approssimativamente alla capacità idrica di campo. I pori compresi fra 50 e 500 μm, detti "pori di trasmissione", sono quelli che consentono i movimenti dell'acqua e dell'aria utili per le piante e lo sviluppo delle radici. Molti autori hanno dimostrato che la gran massa dell'apparato radicale necessita di pori di 100-200 μm di diametro per svilupparsi (Russel, 1978; Tippkötter, 1983; Pagliai

e De Nobili, 1993). La presenza di questi pori è inoltre essenziale per garantire e mantenere un ottimale stato di aggregazione (buone condizioni strutturali). I pori maggiori di 500 μm, detti comunemente fessure o spazi vani, sono utili per la penetrazione delle radici principali, per l'aereazione e per il drenaggio, soprattutto nei terreni a tessitura fine, ma un'alta percentuale di questi pori (oltre il 70-80% della porosità totale) è generalmente un indice di scarse condizioni strutturali; basti pensare che le crepe superficiali, le quali si sviluppano dopo una pioggia violenta, quando la stabilità degli aggregati è bassa, appartengono a questa classe dimensionale (Pagliai *et al.*, 1983).

Attraverso la quantificazione della porosità su sezioni sottili di terreno mediante l'analisi di immagine è possibile una prima valutazione qualitativa del suolo classificandolo come segue (Pagliai, 1988):

— Suolo molto compatto, quando la porosità totale è <5%;
— Suolo compatto, quando la porosità totale è 5-10%;
— Suolo moderatamente poroso, quando la porosità totale è 10-25%;
— Suolo poroso, quando la porosità totale è 25-40%;
— Suolo altamente poroso, quando la porosità totale è >40%.

Relazione fra porosità e proprietà chimiche e biochimiche del suolo

È noto che le qualità strutturali dei suoli dipendono strettamente dall'interazione con la sostanza organica: l'esame microscopico delle sezioni sottili ha più volte evidenziato che gli accumuli di sostanza organica assumo spesso la conformazione di una "patina" lungo le pareti dei pori allungati e continui, contribuendo a stabilizzare dette pareti contro l'azione disgregante dell'acqua, assicurando così la piena funzionalità dei pori stesi. Questa situazione favorevole, rispetto alla struttura del terreno, non è permanente, infatti man mano che la sostanza organica viene decomposta e mineralizzata, perde la sua capacità di agente stabilizzante, quindi la parete crolla e il poro si chiude; questo è il primo passo della degradazione strutturale del terreno; per evitarlo occorre assicurare il continuo ricambio di sostanza organica nel terreno stesso. Da ciò risulta evidente la possibilità di strette correlazioni fra porosità e alcune proprietà chimiche e biochimiche del suolo. Ad esempio, Sequi *et al.* (1985) e Pagliai e De Nobili (1993) hanno trovato una relazione lineare tra porosità formata da pori compresi tra 30 e 200 μm di diametro equivalente, e attività ureasica nel terreno. Tale relazione fra classi dimensionali di pori ed altre attività enzimatiche, è stata confermata anche da Giusquiani *et al.* (1995) in terreni trattati con compost.

RELAZIONE FRA POROSITÀ E MOVIMENTI DELL'ACQUA

La relazione fra dimensione dei pori e contenuto d'acqua è espressa dal modello della capillarità mentre la relazione fra distribuzione di certi tipi di pori e i flussi idrici a determinati gradienti di potenziale dell'acqua sono state sviluppate attraverso equazioni fisiche da Marshall (1958) e da Childs (1969). La limitazione di questi modelli è dovuta all'assunzione dei pori nel terreno di forma cilindrica e regolare. Le tecniche micromorfologiche e l'analisi di immagine hanno permesso a Bouma *et al.* (1977) di migliorare detti modelli attraverso la messa a punto di un metodo che prevede la preparazione di colonne di terreni argillosi indisturbati, saturati, quindi percolati con una soluzione acquosa contenente lo 0,1% di blu di metilene, il quale, durante la percolazione viene assorbito dalle particelle argillose sulle pareti dei pori. Da queste colonne vengono infine preparate sezioni sottili sia orizzontali che verticali. Tali sezioni vengono poi analizzate all'analizzatore di immagine al fine di caratterizzare la porosità. Oltre alla divisione dei pori secondo la loro forma e dimensione, in questo tipo di analisi viene misurata anche l'area, la lunghezza e la larghezza dei pori con le pareti colorate dal blu di metilene, cioè di quei pori in cui è avvenuto il movimento (flusso) dell'acqua. Particolare attenzione è richiesta nel misurare la larghezza dei pori allungati con pareti colorate, in quanto

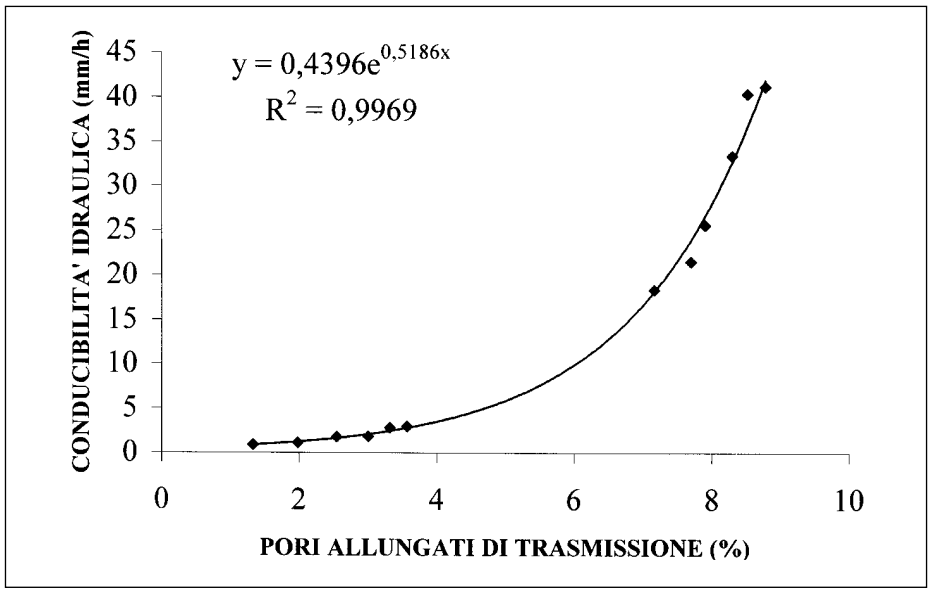

Fig. 1. Correlazione fra porosità, espressa come percentuale di area occupata dai pori allungati maggiori di 50 μm per sezione sottile, e conducibilità idraulica nello strato superficiale (0-10 cm) di un suolo argilloso coltivato a medica in cui è stato valutato l'impatto del traffico dovuto a macchine agricole.

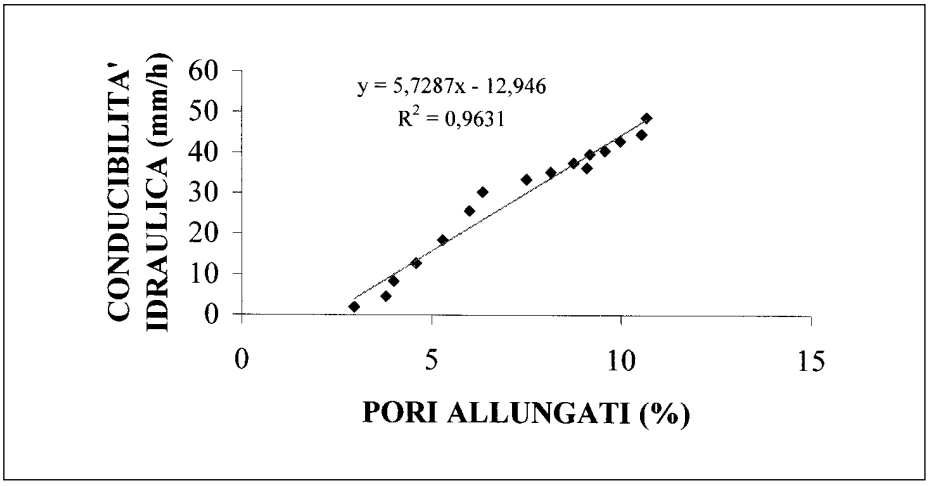

Fig. 2. Correlazione fra porosità, espressa come percentuale di area occupata dai pori allungati maggiori di 50 μm per sezione sottile, e conducibilità idraulica nello strato superficiale (0-10 cm) di un suolo atessitura franca coltivato a mais.

tale misura deve essere effettuata nel punto ove le due pareti sono più vicine (es., collo di bottiglia), perché sono proprio questi punti più stretti che regolano il flusso dell'acqua. I successivi studi di Bouma (1992) hanno evidenziato che le informazioni morfologiche relative al sistema dei pori nel terreno sono fondamentali per lo studio e la realizzazione di modelli di flusso.

L'evoluzione dei software per l'analisi di immagine, i quali permettono l'acquisizione di informazioni sempre più precise circa la forma le dimensioni, continuità e arrangiamento dei pori nel terreno, consente di semplificare questo approccio modellistico, come del resto dimostrano le relazioni illustrate nelle Figure 1 e 2 in cui si evidenzia un'ottima correlazione positiva fra porosità espressa dai pori allungati e continui e conducibilità idrica satura. Tale correlazione è tanto più significativa quanto più basso è il valore dei pori allungati.

Relazione fra porosità e resistenza alla penetrazione

Un altro esempio di relazioni fra porosità, misurata con l'analisi di immagine su sezioni sottili, ed altre proprietà del suolo, è rappresentato dalla correlazione tra porosità totale e resistenza alla penetrazione mediante penetrometro a punta conica (Fig. 3). Tale correlazione è stata evidenziata in esperimenti tendenti a valutare l'azione compattante di macchine agricole equipaggiate con differenti tipi di pneumatici in terreni sabbiosi, franco sabbiosi (Pagliai *et al.*, 1992) e in terreni franco-argillosi (Marsili *et al.*, 1998).

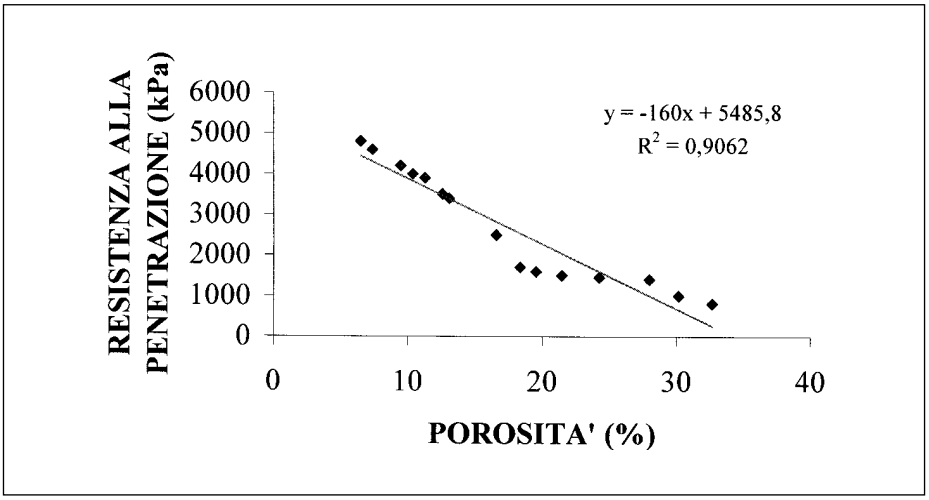

Fig. 3. Correlazione fra porosità, espressa come percentuale di area occupata dai pori maggiori di 50 μm per sezione sottile, e resistenza alla penetrazione nello strato superficiale (0-10 cm) di un suolo a tessitura franca coltivato a mais.

Conclusioni

La caratterizzazione del sistema dei pori nel terreno fornisce indicazioni fondamentali circa la qualità dei suoli e la loro sensibilità nei confronti di eventi degradativi, soprattutto di origine antropica. In particolare, tale caratterizzazione, oltre a permettere di studiare le relazioni fra proprietà fisiche, chimiche e biochimiche del terreno, fornisce basi finalmente realistiche per capire e valutare i movimenti dell'acqua, la capacità idrica di ritenuta e il drenaggio del terreno. Infatti, la valutazione in termini quantitativi dei movimenti dell'acqua e dei soluti lungo i macropori del terreno, apre nuovi orizzonti per capire e realizzare la modellizzazione di questi fenomeni. Ed è proprio questo uno degli aspetti innovativi nello studio del suolo dato che finora questi aspetti dei movimenti dell'acqua nei macropori non sono ancora adeguatamente considerati nei testi e nei Manuali di Fisica del suolo. Alcuni concetti classici della fisica del suolo necessitano delle revisioni o delle modificazioni: ad esempio, al concetto di acqua disponibile per le piante, andrebbe aggiunto l'aspetto dell'accessibilità dell'acqua per le piante stesse.

La caratterizzazione del sistema dei pori, attraverso l'analisi di immagine di sezioni sottili di terreno, può, quindi, fornire informazioni basilari nello studio del suolo. L'ostacolo maggiore allo sviluppo di questa tecnica, finora è stato rappresentato dalla difficoltà e dalla lunghezza della procedura per la preparazione delle sezioni sottili, procedura che richiede, fra l'altro, apposite attrezzature e una notevole specializzazione manuale, e dall'alto costo delle sofisticate apparecchiature di

analisi di immagine. Ma attualmente esistono già numerosi laboratori pubblici e privati, attrezzati per la preparazione di sezioni sottili a costi competitivi, e l'enorme sviluppo dei programmi software ha praticamente reso accessibile l'analisi di immagine ai laboratori di ricerca interessati.

Una volta superato l'ostacolo dell'acquisizione delle sezioni sottili, si può beneficiare a pieno dell'enorme potenzialità di questa tecnica, prima di tutto nel quantificare le modificazioni della struttura del terreno in conseguenza degli interventi antropici. Quindi, sulla base delle esperienze fin qui acquisite, si possono approfondire le analisi sulle sezioni sottili in relazione agli aspetti connessi, ad esempio, con i movimenti dell'acqua. L'accurata quantificazione della dimensione, continuità, orientazione dei macropori allungati consente la modellizzazione dei movimenti dell'acqua e dei soluti, o quanto meno permette di prevedere l'entità delle sue variazioni in conseguenza delle modificazioni strutturali, o dell'insorgere di fenomeni di degradazione strutturale quali il compattamento, la formazione di croste superficiali, ecc. La quantificazione del danno prodotto da questi fenomeni degradativi consente inoltre la previsione, in termini quantitativi, dei rischi di erosione del suolo.

BIBLIOGRAFIA

Brewer R. (1964): *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. John Wiley, New York, 470 pp.

Bouma J. (1992): "Influence of soil macroporosity on environmental quality". *Advances in Agronomy*, *46*, 1-37.

Bouma J., Jongerius A., Boersma O.H., Jager A., Schoonderbeek D. (1977): "The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons". *Soil Science Society of America Journal*, *41*, 945-950.

Childs E.C. (1969): *An introduction to the physical basis of soil water phenomena*. London, Wiley-Interscience.

Giusquiani P.L., Pagliai M., Gigliotti G., Businelli D., Benetti A. (1995): "Urban waste compost: effects on physical, chemical and biochemical soil properties". *Journal of Environmental Quality*, *24*, 175-182.

Greenland D.J. (1977): "Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent?", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, *281*, 193-208.

Marshall T.J. (1958): "A relation between permeability and size distribution of pores". *Journal of Soil Science*, *9*, 1-8.

Marsili A., Servadio P., Pagliai M., Vignozzi N. (1998): "Changes of some physical properties of a clay soil following the passage of rubber and metal tracked tractors". *Soil and Tillage Research*, *49*, 185-199.

Murphy C.P. (1986): *Thin section preparation of soils and sediments*. A B Academic Publishers, Herts. pp. 149.

Pagliai M. (1988): "Soil porosity aspects". *International Agrophysics*, *4*, 215-232.

Pagliai M., De Nobili M. (1993): "Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity in cultivated soils". *Geoderma*, *56*, 243-256.

Pagliai M., Febo P., La Marca M., Lucamante G. (1992): "Effetti del compattamento provocato da differenti tipi di pneumatici su porosità e struttura del terreno". *Rivista di Ingegneria Agraria*, *3*, 168-176.

Pagliai M., La Marca M., Lucamante G. (1983): "Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage". *Journal of Soil Science*, *34*, 391-403.

Pagliai M., La Marca M., Lucamante G., Genovese L. (1984): "Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam soil under viticulture". *Soil Tillage Res.*, *4*, 433-444.

Pagliai M., Torri D., Patruno A. (1997): "Stabilità e distribuzione dimensionale degli aggregati". In: *Metodi di analisi fisica del suolo* (M. Pagliai coordinatore). Franco Angeli, Roma.

Ringrose-Voase A.J., Bullock P. (1984): "The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs". *Journal of Soil Science*, *35*, 673-684.

Russell, E.W. (1978): "Arable agriculture and soil deterioration". In: *Transactions of the 11th International Congress of Soil Science*, 19-27 June 1978 at University of Alberta, Edmonton. Canadian Society of Soil Science, Alberta, Vol. 3, 216-227.

Sequi P., Cercignani G., De Nobili M., Pagliai M. (1985): "A positive trend among two soil enzyme activities and a range of soil porosity under zero and conventional tillage". *Soil Biology Biochemistry*, *17*, 255-256.

Tippkötter, R. (1983): "Morphology, spatial arrangement and origin of macropores in some hapludalfs, West Germany". *Geoderma*, *29*, 355-371.