

CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS EM SOLOS COMPACTADOS

Lucas da Silveira^{1*}, Deonir Secco¹ e Maurício Antônio Pilatti¹

¹Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Campus Cascavel, Rua Universitária, 2069, CEP 85819-110, Bairro Jardim Universitário, Cascavel, PR. *E-mail: lucassbertolino@gmail.com

RESUMO: Os solos destinados à agricultura vêm sofrendo grandes perturbações ao longo de anos, sendo a compactação apontada como a principal causa destas mudanças. A compactação provoca aumento da densidade do solo e a redução e modificação geométrica dos poros, este efeito danoso é causado através do tráfego de tratores e máquinas agrícolas em condições inadequadas de umidade do solo. A presente revisão teve como objetivo discutir as causas e os efeitos da compactação sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas. A absorção dos nutrientes que estão no solo é um dos fatores cruciais para um bom crescimento e desenvolvimento da cultura, pode se dizer que qualquer obstáculo que restrinja o crescimento radicular reduz absorção de água e nutrientes produzirá decréscimo no seu desenvolvimento e consecutivamente na sua produção. A extensão e a intensidade da compactação do solo vão depender da pressão exercida pelas máquinas e equipamentos, cargas, e número de vezes que trafegam no terreno, da textura e do estado estrutural do solo. Com a adoção de algumas técnicas de manejo por parte dos agricultores poderão ser minimizados os efeitos da compactação do solo sobre suas propriedades físicas, melhorando assim o ambiente para desenvolvimento de raízes das culturas e proporcionando ganho de crescimento e de produção.

PALAVRAS-CHAVE: tráfego de máquinas, compactação, umidade do solo.

GROWTH AND PLANT DEVELOPMENT IN SOIL COMPACTED

SUMMARY: The land for agriculture have suffered major disruption to the logo of years, compaction identified as the main cause of these changes. The compression causes increased soil density and reduction and geometric modification of pores, this harmful effect is caused by the traffic of tractors and agricultural machinery in inadequate conditions of soil moisture. This review aimed to discuss the causes and effects of compression on growth and development of plants. The absorption of the nutrients are in the soil is one of the crucial factors for good growth and development of culture, it can be said that any obstacle that restricts root growth reduces absorption of water and nutrients produce decrease in its development and consecutively in their production. The extent and intensity of soil compaction will depend on the pressure exerted by machinery and equipment, loads, and number of times that travel on the ground, texture and soil structural state. With the adoption of certain management techniques by farmers can be minimized the effects of soil compaction on their physical properties, thereby improving the environment for root development of crops and providing a gain of growth and production.

KEYWORDS: machinery traffic, compaction, soil moisture.

INTRODUÇÃO

As plantas apresentam órgãos especializados (raízes e órgãos aéreos) para explorar as várias condições ambientais. Os órgãos aéreos utilizam a energia solar para realização da fotossíntese, enquanto as raízes sustentam as plantas no solo e absorvem água e nutrientes minerais da solução do solo que, juntamente com os metabólitos, serão utilizados para o desenvolvimento e o crescimento das plantas.

O crescimento é o aumento irreversível do volume da planta ou tamanho, acompanhado pelo ganho de matéria seca ao longo do tempo. Já por sua vez o desenvolvimento é o processo das fases (vegetativa e reprodutiva) das plantas (Floss, 2006).

O bom crescimento e desenvolvimento das plantas, os quais as levam a produzir grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, dependem da harmonia de uma série de fatores ambientais e um desses fatores é o manejo correto do solo. O solo deve conter condições ideais de aeração e umidade para que a planta venha expor seu máximo potencial produtivo, ao contrário disso uma compactação elevada vai ocasionar perdas qualitativas e quantitativas a cultura e isso faz com que a compactação seja um fator limitante ao crescimento e desenvolvimento da cultura (Passioura, 1991).

Em um solo compactado, o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial de água, e, em solo úmido, gera falta de oxigênio e, principalmente, elevadas concentrações de etileno na zona radicular, devido à menor aeração (Marschner, 1995). O resultado de todas essas alterações no solo compactado é que as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, por vezes específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem.

A compactação do solo reduz a infiltração de água no solo e aumenta o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional nas plantas, fazendo com que as raízes desenvolvam-se superficialmente e com isso percam a maior quantidade de nutrientes essenciais que estão nas camadas mais subterrâneas do solo (Rosolem et al., 1994).

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução de seu volume (Gupta; Allmaras, 1987), resultante da expulsão de ar dos poros do solo. A compactação excessiva resulta em decréscimo da produção, aumento da erosão hídrica e da energia necessária para o preparo do solo (Soane, 1990).

Este trabalho tem por objetivo discutir as causas e os efeitos da compactação sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas.

Compactação do Solo

A compactação do solo refere-se ao processo que descreve a diminuição do volume do solo não saturado quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (Lima, 2004).

Para a área da Pedologia, a compactação do solo significa uma alteração no arranjo das partículas constituintes do solo (Camargo; Alleoni, 1997).

Alakukku e Elomen (1994) afirmam que a compactação do solo tem um elevado destaque em nível mundial como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física dos solos agricultáveis, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade das culturas instaladas. Canillas e Salokhe (2002) apontam a compactação dos solos como sendo um dos principais fatores da degradação dos solos agrícolas.

No Brasil há uma tendência de se avaliar a susceptibilidade do solo à compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas conjuntamente com o momento ideal para executar as operações mecanizadas no campo, por considerar racional o uso de medidas preditivas e preventivas da compactação, o que minimizaria os problemas de degradação dos solos agrícolas (Kondo; Dias Junior, 1999; Silva; Reinert; Reichert, 2000).

O desenvolvimento das plantas em um solo compactado é inferior e isto tem sido atribuído ao impedimento mecânico ao crescimento radicular da cultura, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas (Vieira; Muzilli, 1984; Tormena; Silva; Libardi, 1998; Merotto; MundstocK, 1999; Guimarães; Stone; Moreira, 2002).

Smucker e Erickson (1989) relatam que a compactação do solo pode ter efeitos benéficos ou adversos. Os efeitos benéficos têm sido atribuídos ao contato maior solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (Camargo, 1983). Por outro lado, a compactação elevada pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão do solo (Bicki; Siemens, 1991).

Esse processo depende de fatores extrínsecos e intrínsecos (Lebert; Horn, 1991). Os fatores extrínsecos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga

aplicada (Horn, 1998), enquanto que os fatores intrínsecos são histórico da tensão (Reinert, 1990), umidade, textura (Gupta; Allmaras, 1987), estrutura (Dexter; Tanner, 1973), densidade inicial do solo e teor de carbono (Assouline; Tavares Filho; Tessier, 1997).

Causas da Compactação do Solo

A gota de chuva é considerada uma das fontes principais da compactação, pois quando cai sobre o solo este por sua vez descoberto, fara com que ocorra o desagregação das partículas do solo que estão unidas. Conforme Bortolozzo e Sans (2001), para saber qual a amplitude dos efeitos causados pela gota de chuva, deve-se primeiro conhecer algumas de suas características, tais como: intensidade, diâmetro médio e a velocidade final das gotas médias.

Laws (1940) e Wischmeier e Smith (1951) estudaram a relação entre estes parâmetros e constataram que gotas com diâmetros grandes apresentam uma velocidade final superior pelo seu maior peso, e quanto maior a intensidade da chuva, maior a porcentagem de gotas grandes.

Segundo Schaefer et al. (2002), com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, ocorre a quebra mecânica dos agregados (argila, silte e areia), resultando na formação de uma camada adensada na superfície do solo ocasionando o selamento superficial.

Morin e Shainberg (1985) relatam que, a formação do selamento superficial deve-se a dois mecanismos: (1) fragmentação física dos agregados do solo e seu adensamento; (2) dispersão físico-química e migração das partículas de argila para a região de 0,1 a 0,5 mm de profundidade, onde se alojam, entupindo os poros. O primeiro mecanismo predomina e é determinado pela energia cinética das gotas. O segundo é controlado principalmente pela concentração e composição de cátions no solo e pela aplicação de água. Os dois mecanismos atuam simultaneamente e o primeiro incrementa o segundo. Embora o selamento superficial seja uma camada compactada de pequena espessura, ocasiona mudanças na taxa de infiltração de água no solo e, também funciona como impedimento a emergência das plantas.

Lal (1974) verificou redução de 40 e 73% na infiltração acumulada, respectivamente em uma área cultivada com milho por um ano, e em outra preparada e sem cobertura, mantida pelo mesmo período, comparadas com uma área sob floresta. Segundo o autor, as diferenças foram devidas às alterações na estrutura, sobretudo na superfície, pelo selamento ocasionado pela energia cinética das gotas de chuva.

Operações de preparo do solo

O preparo da área tem por objetivo melhorar as condições físicas do solo para favorecer a germinação das sementes e o crescimento e desenvolvimento das plantas, facilitar o movimento de água e ar, controlar plantas indesejáveis e, em alguns casos, através dos sistemas de plantio auxiliar no manejo dos resíduos culturais oriundos das culturas anteriores (Larson; Gill, 1973).

Por outro lado, também apresenta efeitos negativos, pois o preparo reduz a rugosidade da cobertura do solo (Bertol, 2000), pulveriza a superfície e forma camadas compactadas na subsuperfície ou na camada abaixo da agricultável, geralmente na camada abaixo de 30 cm, além de facilitar a erosão hídrica quando o sistema de plantio adotado é o convencional, onde não há uma proteção do solo (Hernani et al., 1997; Lindstrom et al., 1998), também limita o crescimento das raízes, o desenvolvimento e a produção das culturas (Silva; Reinert; Reichert, 2000).

No sistema de preparo convencional do solo, a grade aradora tem sido o equipamento mais utilizado. Normalmente a grade trabalha o solo a pouca profundidade 0-10 cm e apresenta alto rendimento de campo, porém o uso contínuo desse implemento pode levar à formação de camadas compactadas, chamadas “pé- de-grade”. Os arados, tanto de disco como de aiveca são equipamentos pouco utilizados, porque requerem maior tempo e energia para a sua operação (Kochhann; Denardim, 1997).

Segundo Hakansson, Voorhees e Riley (1988), o sistema de preparo convencional do solo ocasiona compactação subsuperficial em virtude da camada superficial mobilizada, ao mesmo tempo em que a carga aplicada apresenta efeito acumulativo em subsuperfície ao longo do tempo.

Tráfego de máquinas e implementos agrícolas

Esta sem duvida alguma é a principal causa da compactação dos solos, este fator foi intensificado pela modernização da agricultura, com o aumento do peso das máquinas e equipamentos e da intensidade de uso do solo. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo.

Silva et al. (2003), fazendo uma projeção dos objetivos e da forma como são realizados trabalhos que visam avaliar a influência do tráfego de máquinas nos solos brasileiros, percebe-se que a maioria deles é feita em uma condição estática e quase sempre voltada à obtenção de um resultado de comparação de sistemas , cujas variáveis

normalmente avaliadas são a densidade do solo e a porosidade e essas variáveis afetam de forma significativa a produção agrícola.

Neste quesito; tráfego, alguns pontos são deixados de lado, podemos citar três fortes pontos que deve-se levar em conta em relação a compactação do solo; as operações são realizadas de forma dinâmica, ou seja, muitas vezes não há uma manutenção ou preparação antes de uma entrada de uma máquina na área cultivada, a forma de cultivo, seja ele sistema de plantio direto ou convencional normalmente não são levadas em conta e por fim características como tipo de pneu, pressão de insuflação, pressão de contato, umidade do solo, profundidade de trabalho e especificações técnicas dos implementos utilizados.

Diferente do Brasil, em outros países como nos Estados Unidos, pesquisas estão em estado avançado nesse ponto; tráfego agrícola. Estudos vão desde a quantificação e distribuição da tensão aplicada no solo até os deslocamentos, vertical e horizontal, medidos *in situ* a partir de transdutores (Olson, 1994), levando em consideração a relação tensão de deformação do solo, a qual tem se mostrado necessária para compreender o processo de compactação dos solos agrícolas (Koolen, 1994).

Umidade do solo

Numa mesma condição, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a umidade (Dias Junior, 1994). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa. Entretanto, sob condições de alta umidade ou de capacidade de campo, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (Swan; Moncrief; Voohees, 1987).

A água no solo tem um importante papel, ela atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento e facilitando uma melhor acomodação das mesmas. Desta forma, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento da umidade. Este processo continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, a cada incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida (Smith; Johnston; Lorents, 1997).

Efeito da compactação do solo no crescimento radicular das plantas

Quando uma raiz encontra um poro no solo cujo seu diâmetro é inferior ao seu, só prosseguirá se expandindo se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar o poro ou então, terá que diminuir seu diâmetro o suficiente para passar através dele. Parece que, na realidade, o diâmetro da raiz, quando ela encontra tais obstáculos, aumenta ao invés diminuir, por isso é normal encontrar nas raízes diâmetros mais volumosos e outros inferiores.

Wiersum (1957) desenvolveu um experimento muito interessante, e através dele foi possível observar uma clara evidência desse fator chamado força da raiz, ele cultivou plântulas de diversas espécies em tubos de diferentes diâmetros contendo areia compactada a uma determinada densidade do solo (Figura 1).

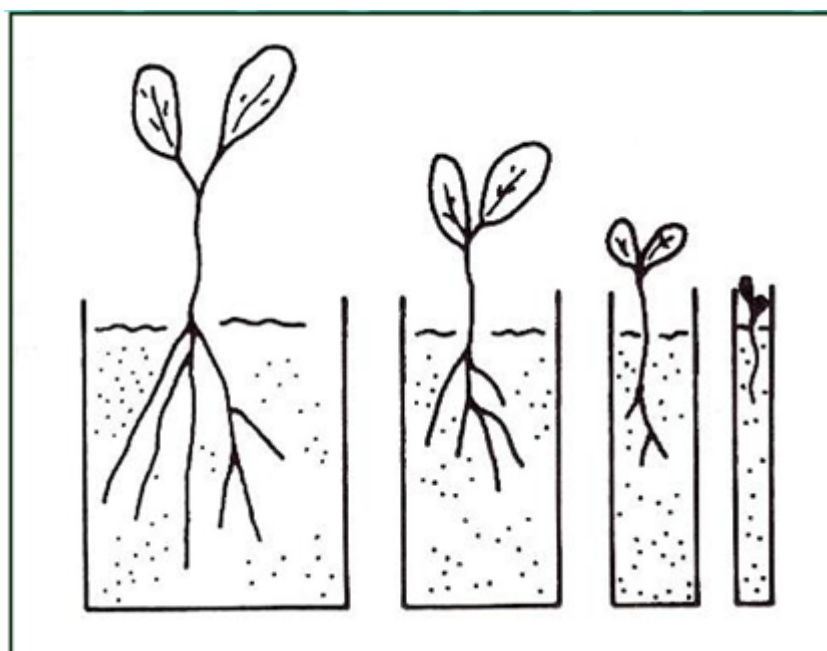


Figura 1. Desenvolvimento radicular de plântulas em vasos de diferentes diâmetros com área compactada à mesma densidade do solo.

O crescimento radicular diminuiu com a redução do diâmetro do tubo; este fato pode ser interpretado como uma resposta ao aumento da resistência do meio. A resposta das raízes ao impedimento mecânico se resume, essencialmente, à pressão que a raiz precisa exercer para aumentar sua dimensão ou criar novos poros. Uma medida interessante seria o número de raízes que conseguem atravessar a camada compactada e o número de raízes que inicialmente penetraram nessa camada. A relação entre eles é

definida como razão de penetração de raízes (RPR), sendo maior o seu valor, quanto maior for a produção das culturas.

Já em um experimento realizado por Asady et al. (1985) com a cultura do feijoeiro, a produção foi igual a $1,6 \text{ t.ha}^{-1}$ quando a razão de penetração de raízes (RPR) foi nula, ou seja, quando as raízes não conseguiram romper a camada compactada (Figura 2). À medida que a RPR aumentou, a produção foi-se tornando cada vez maior. Foram também determinados os valores de porosidade total do solo: quando a porosidade era $0,15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, a RPR foi 0,2, e a produção igual a $2,5 \text{ t.ha}^{-1}$; quando a porosidade foi $0,3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, a RPR passou a 0,7, e a produção subiu para $3,3 \text{ t.ha}^{-1}$. Conclui-se que as melhores condições do espaço poroso do solo permitiram às raízes uma maior penetração na camada compactada e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes, proporcionando aumento significativo na produção.

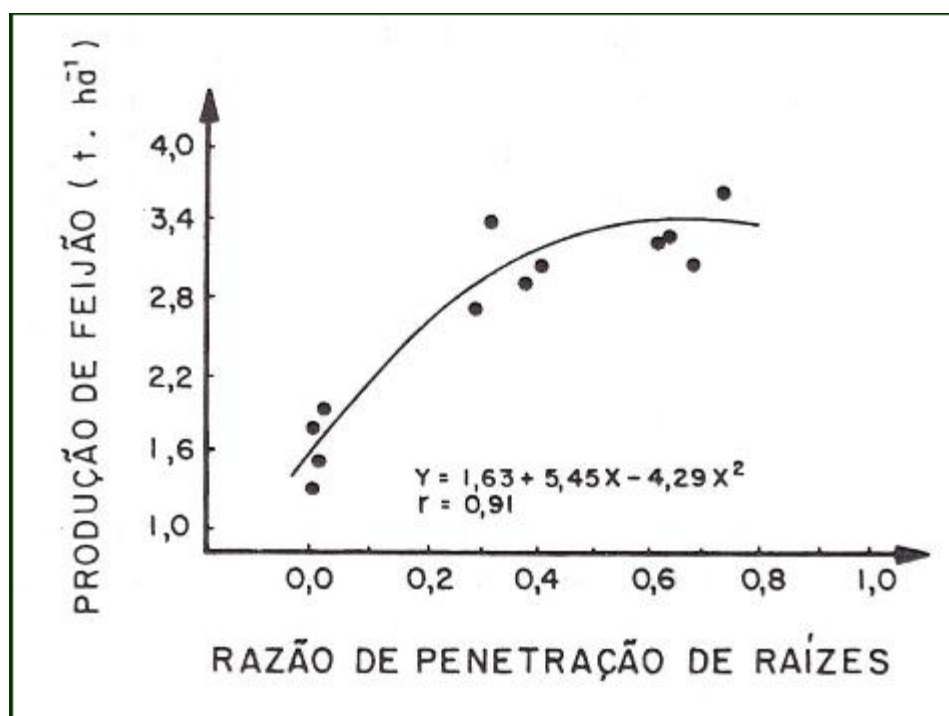


Figura 2. Relação entre a razão de penetração de raízes (número de raízes que conseguem atravessar uma camada compactada / número de raízes que penetraram na camada) e a produção do feijoeiro (Asady et al., 1985).

A compactação irá provocar a redução no tamanho dos poros, a ponto de impedir a passagem da raiz principal. Nestas condições a planta lança mão de mecanismo de defesa via expansão de raízes laterais com diâmetros adequados para passar pelos poros.

Essas raízes laterais parecem responder à imposição de obstáculos mecânicos de maneira muito semelhante à principal. Assim, se o obstáculo é imposto a ambas, todo o sistema se tornará definhado e, nessas condições, ficará inteiramente coberto por pêlos radiculares. Se houver obstáculo apenas à raiz principal, proliferam-se as laterais, formando uma configuração de sistema radicular muito denso e raso que, em condições de campo, dificilmente sobrevive a um período de seca (Figura 3).

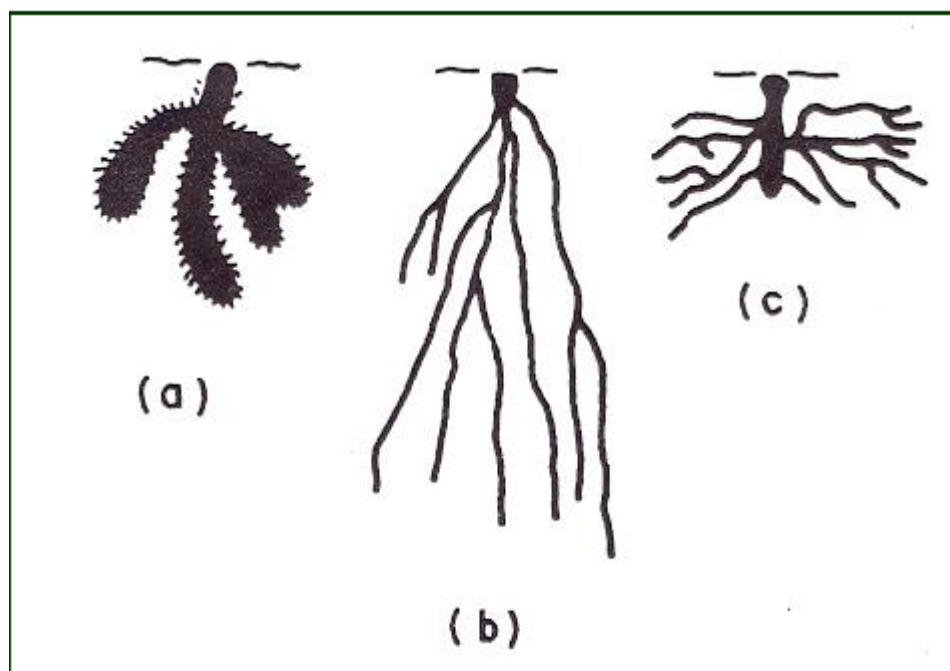


Figura 3. Efeito da pressão na ramificação das raízes: (a) com obstáculo à raiz principal e as raízes laterais; (b) sem obstáculos; (c) com obstáculo à raiz principal (Asady et al., 1985).

Em condições de laboratório, a planta pode sobreviver, absorver nutrientes, crescer e produzir como a que vive sem problemas de obstáculos físicos. Pode-se concluir que uma planta vivendo em solo com alta resistência sofrerá séria restrição ao crescimento quando o suprimento de água e nutrientes for escasso.

Se os solos não possuem uma quantidade de poros contínuos maiores que o diâmetro da raiz, a planta se desenvolverá dependendo da resistência que lhe for imposta. Em estudo com o amendoim, foi mostrado que a taxa de alongação radicular diminuiu com a resistência do solo em torno da raiz, medida com a resistência ao penetrômetro de impacto. A alongação, quando não havia resistência, foi de $2,7 \text{ mm.dia}^{-1}$ e com resistência, de $2,0 \text{ MPa}$, a alongação caiu a $1,29 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Taylor & Ratliff, 1969).

A presença dos macroporos permite às raízes atravessarem camadas de solos que seriam normalmente impenetráveis e terem acesso a um reservatório maior de água e nutrientes. Os macroporos não são apenas fisicamente diferentes dos demais poros, pois podem ser ricos em microrganismos, sendo as raízes que neles crescem beneficiadas de várias maneiras, através de simbioses com liberação de nutrientes (Passioura, 1991).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compactação do solo é um dos fatores que mais influencia a sustentabilidade dos solos agrícolas, em virtude das modificações ocasionadas em algumas propriedades físicas do solo.

A compactação do solo determina as relações entre ar, água e temperatura e estas influenciam a germinação, a emergência das plantas, o crescimento radicular e praticamente todas as fases de seu desenvolvimento.

Com o crescimento radicular prejudicado, acarretará em perdas qualitativas e quantitativas seja na produção agrícola e no meio físico do solo.

REFERÊNCIAS

ASADY, G.H.; SMUCKER, A.J.M.; ADAMS, M.W. Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. **Crop Sci.**, Madison, v.25, p.802-806, 1985.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36, p.141-152, 1994.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.390-398, 1997.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILY, L. Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v.30, p.91-95, 2000.

BICKI, T. J.; SIEMENS, J. C. Crop response to wheel trapnc soil compaction. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**. St. Joseph, v. 34, n. 3, p.909-913,1991.

BORTOLOZZO, A.R.; SANS, L.M.A. Selamento superficial e seus efeitos na taxa de infiltração: uma revisão. **Revista FactuCiência**, Unaí, ano 1, n.1, p.32-42, 2001.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.2, p. 221-230, 2002.

CAMARGO, O.A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas, SP: **Fundação Cargill**, 1983. 44p

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, SP: **ESALQ**, 1997. 132p

DEXTER, A.R.; TANNER, D.W. Time dependence of compressibility for remolded and undisturbed soils. **Journal of Soil Science**, London, v.25, p.153-164, 1973.

DIAS JUNIOR, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. **Thesis** (Ph.D. in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing, EUA.

FLOSS, E. L. Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo do que está por trás do que se vê. 3. ed. Passo Fundo: **Ed. Universidade de Passo Fundo**, 2006. 751 p

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.213-218, 2002.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to Access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advance in Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p.65-100, 1987.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p. 239-282, 1988.

HERNANI, L.C.; SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C.; DEDECEK, R.; ALVES JR., M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.667-676, 1997.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. Comportamento das culturas de trigo, soja e milho à adubação fosfatada no sistema de plantio direto e preparo convencional. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1997. p.243-246.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p.45-69, 1994.

LAL, R. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. Ibadan: **International Institute of Tropical Agriculture**, 1974. 37p

LARSON, W.E.; GILL, W.R. Soil physical parameters for designing new tillage systems. In: NATIONAL CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE. Ankeny. Proceedings... Ankeny: **Soil Conservation Society of America**, p.13-22, 1973.

LAWS, J.O. Recent studies in raindrops and erosion. **Agricola Engineering**, v. 21, p.431-433. 1940.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.

LINDSTROM, W.J.; SCHUMACHER, T.E.; COGO, N.P.; BLECHA, M.L. Tillage effects on water runoff and soil erosion after sod. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny, v.53, p.59-63, 1998.

LIMA, C.L.R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London, **Academic Press**, 1995. p.508-536.

MEROTTO, A.J.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.23, p.197-202, 1999.

OLSON, H.J. Calculation of subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.29, p.105-111, 1994.

PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. **Aust. J. Soil Res.**, v. 29, p.717-728, 1991.

ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.491- 497, 1994.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SILVA, V. R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2000.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p.179-201, 1990.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content

and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.41, n.1/2, p.53-73, 1997.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. Mechanics related process in structured agricultural soils. **The Netherlands: Kluwer Academic Publishers**, p.205-221, 1989.

SWAN, J.B.; MONCRIEF, J.F.; VOORHEES, W.B. Soil compaction causes, effects, and control. St. Paul: University of Minnesota, 1987. **Agriculture Bulletin**, 3115.

TAYLOR, H.M. & RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sei.*, Baltimore, v. 108, p.113-119, 1969.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.573-581, 1998.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, p.873-882, 1984.

WIERSUM, L.K. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. **Plant Soil**, The Hague, v. 9, p.75-85, 1957.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, p.285-291. 1951.