

QUALIDADE DOS SOLOS E SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

José Miguel Reichert

Dalvan José Reinert

João Alfredo Braida

O solo pode ser considerado a base de sustentação dos sistemas agrícolas. Assim, perdas nas suas propriedades, que reduzam a capacidade de sustentar o crescimento vegetal ou que impliquem riscos ambientais, causam impacto negativo de grande significação para as comunidades rurais, com repercussões no meio urbano. Por outro lado, a melhoria do ambiente edáfico tem efeitos positivos sobre todo o ambiente, revestindo de grande importância o conhecimento da qualidade do solo e sua quantificação via indicadores físicos, químicos e biológicos. A agregação e a compactação são dois processos importantes que também ocorrem nos solos agrícolas e que têm grande relação com a qualidade. Sua avaliação, por meio de indicadores, associada a informações sobre crescimento vegetal e aspectos ambientais, especialmente aqueles relacionados à erosão dos solos, podem ser úteis para o estabelecimento de uma agricultura sustentável.

Conceitos e abrangência

Qualidade do solo é mais do que um recurso de retórica usado como “estratégia de propaganda” para alardear avanços tecnológicos ou, simplesmente, para “modernizar” nosso discurso. Ela se refere à integração de processos no solo e propicia a estimativa das alterações de sua condição, decorrente de diversos fatores, como uso da terra, padrões climáticos, seqüências culturais e sistemas de manejo¹ ou da capacidade que tem o solo de funcionar ou não adequadamente². As principais funções do solo podem ser assim resumidas: servir como meio para o crescimento de plantas; exercer a regulagem e partição do fluxo de massa e energia no ambiente; atuar como filtro ambiental.³ A qualidade, do ponto de vista físico, está associada àquele solo que: a) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; b) responde ao manejo e resiste à degradação; c) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e d) possibilita o crescimento das raízes.

Sustentabilidade refere-se àquilo que se pode sustentar; e sustentar, relaciona-se com o fato de conservar a mesma posição, impedir a ruína ou a queda de, amparar, entre outros significados. Assim, podemos definir sustentabilidade como a propriedade de algo que ou se auto-sustenta ou que deve ser sustentado. Portanto, sua discussão deve principiar pela resposta à pergunta “o que deve ser sustentado (ou sustentável)?”, como fizeram Gale & Cordray⁴. Seria a propriedade agrícola, a agricultura como atividade econômica ou o ambiente? Indo além, precisamos definir quem sustentará e quando isso deverá ser feito.

Em agricultura, o termo sustentabilidade tem recebido distintos significados⁵: “filosofia”, conjunto de estratégias, habilidade para alcançar um conjunto de metas e, finalmente, habilidade de manter-se. Segundo Hansen, a caracterização de sustentabilidade de sistemas agrícolas deve ser: *literal* – definindo sustentabilidade como uma habilidade de manter-se no tempo; *orientada a sistemas* – identificando sustentabilidade como uma propriedade objetiva do sistema agrícola, cujos componentes, contornos e contextos hierárquicos são claramente definidos; *quantitativa* – tratando sustentabilidade como uma quantidade contínua, permitindo comparações entre sistemas alternativos; *preditiva* – referindo-se a situações futuras e não do passado e presente; *estocástica* – subentendendo a variabilidade como uma determinante da sustentabilidade e componente da predição; e *diagnóstica* – utilizando uma medida integrada da sustentabilidade para identificar e priorizar limitações.

¹ DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. & STEWART, B. A. (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. p. 3-21. SSSA Spec. Publ. n.º. 35. Madison, WI: ASA, CCSA e SSSA, 1994.

² KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R. F. & SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:4-10, 1997.

³ LARSON, W. E. & PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In: *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. p. 175-203. Int. Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand, 1991.

⁴ GALE, R. P. & CORDRAY, S. M. Making sense of sustainability: Nine answers to “what should be sustained?”. *Rural Sociology*, 59:311-332, 1994.

⁵ HANSEN, J. W. Is agricultural sustainability a useful concept? *Agric. Systems*, 50: 117-143, 1996.

⁶ SHAXSON, T. F. Concepts and indicators for assessment of sustainable land use. *Adv. Geocology*, 31:11-19, 1998.

⁷ ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:161-168, 1995.

⁸ D'AGOSTINI, L. R. *Erosão: o problema mais que o processo*. Florianópolis: Editora UFSC, 1999. 131p.

⁹ ADDISCOTT, T. M. *Op. cit.*

¹⁰ Com contribuição de L. R. D'Agostini e S. L. Schlindwein da Universidade Federal de Santa Catarina.

Se incluirmos a dimensão socioeconômica, a sustentabilidade engloba a manutenção do agrossistema para a segurança alimentar e geração de divisas.⁶ Além disso, a própria percepção do que é sustentabilidade pode ser modificada, uma vez que os agricultores, em função de seus costumes e valores culturais, geralmente percebem a sustentabilidade de uma forma muito distinta daquela com que os cientistas o fazem.

Em termos termodinâmicos, o sistema solo-planta pode ser considerado um sistema aberto, que tende a alcançar um estado estável dinâmico. Esse estado pode ser descrito pelos princípios termodinâmicos do não-equilíbrio e é caracterizado por uma produção mínima de entropia. No sistema solo-planta, a partir do fluxo de energia estabelecido entre o sol e o espaço (figura 1), atuam processos produtores (dissipativos) e redutores de entropia (ordenativos), conforme quadro 1. Assim, a sustentabilidade de sistemas agrícolas dependeria da manutenção do balanço adequado entre processos dissipativos e ordenativos e, portanto, um critério de sustentabilidade poderia ser a mínima produção de entropia.⁷ Uma análise baseada em energia é encontrada em D'Agostini⁸.

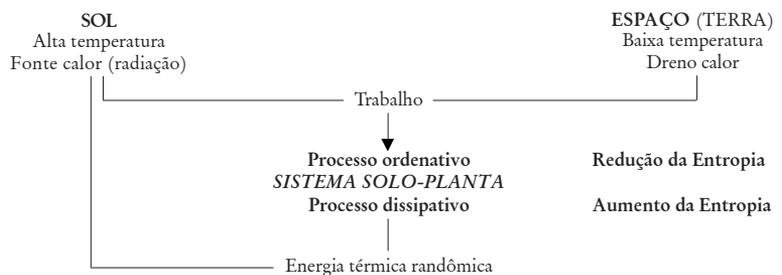


Figura 1: Realização de trabalho e produção de entropia pelos processos ordenativos e dissipativos que influenciam o sistema solo-planta⁹

Finalmente, faz-se necessário conceituar os termos qualidade, propriedade, atributo, condição (estado), característica e parâmetro¹⁰, muitas vezes usados como sinônimos entre os cientistas do solo. *Qualidades* são o conjunto de propriedades, atributos e condições usadas para descrever ou definir um elemento. *Propriedades* são aquelas manifestações comuns a todos os elementos que pertencem a uma mesma categoria de sistema, ou seja, no caso dos solos, que todos apresentam (exemplo: porosidade); *atributos* são qualidades que resultam da manifestação circunstancial daquelas propriedades, ou seja, são manifestações de propriedades que só emergem mediante a manifestação de qualidades de

outros sistemas (exemplo: permeabilidade, que só é percebida quando atua no solo um fluido); *característica* é uma manifestação particular de uma propriedade (exemplo: vermelho escuro é característica da propriedade cor do solo); *condições* (estados) são referências ao grau de manifestação de qualidades que um solo pode apresentar (exemplo: solo muito compactado, enterrado ou úmido); *parâmetro* é a quantificação da manifestação de uma propriedade, atributo ou condição, permitindo que se estabeleçam limites para a definição de uma característica (exemplo: índice de vazios).

Quadro 1: Processos ordenativos e dissipativos no sistema solo-planta, classificados como biológicos ou físicos. Os pares, em cada linha, são necessariamente opostos¹¹

¹¹ ADDISCOTT, T. M. *Op. cit.*

Processos ordenativos Redução de entropia	Processos dissipativos Aumento de entropia
Biológico	
Fotossíntese	Respiração
Crescimento	Senescência
Formação MOS	Decomposição MOS (gases)
Físico	
Água (formação de solo)	Água (erosão, lixiviação)
Floculação	Dispersão
Agregação do solo	Desagregação
Formação da estrutura	Degradação da estrutura
Unidades maiores	Unidades menores
Menos unidades	Mais unidades
Maior ordenação	Menor ordenação

Quando empregamos a expressão *qualidade do solo*, estamos nos referindo à *capacidade física do solo em sustentar o pleno desenvolvimento de plantas*. A qualidade do solo é percebida como “qualidade para alguma coisa” (e não em si mesma como o é a textura ou a porosidade). Para medir a qualidade do solo, com vistas ao crescimento de plantas, precisamos avaliar o comportamento da planta, assim como precisamos avaliar o comportamento da água no solo para medir sua permeabilidade. Enfim, a propriedade de crescer está na planta e a de fluir está na água. Entretanto, é possível estimar a qualidade de um solo para o crescimento de plantas a partir de propriedades, atributos ou condições do próprio solo e que interferem no desenvolvimento das plantas. Assim, a qualidade do solo pode ser classificada como sendo boa, ruim, alta, baixa ou média para um determinado fim. Para podermos caracterizar os solos, segundo essas classes de qualidade (ou outras a convencionar), precisamos definir critérios e limites, ou seja, os indicadores de qualidade do solo.

Qualidade do solo e indicadores

A qualidade do solo, historicamente, significa potencialidades e limitações para determinado uso¹², relacionando-se com propriedades inerentes do solo, resultantes dos fatores de formação. Esse procedimento é usado em levantamento de solos e avaliação de terras, mas, infelizmente, tem recebido atenção limitada. Um exemplo é o uso dessa metodologia para estabelecimento de tamanho e demarcação de lotes em projetos de reforma agrária no Rio Grande do Sul, executados pelo governo entre os anos de 1998 e 2002.¹³ Outra estratégia é apresentada por D'Agostini & Schlindwein¹⁴, para a avaliação do uso e do manejo das terras, com a formulação de um índice de qualidade das relações de uso do meio (IQRM) e da sustentabilidade das relações homem-meio.

A visão predominante de qualidade do solo, na atualidade, refere-se à natureza dinâmica dos solos, influenciada pelo uso e manejo pelo homem. Nesse sentido, o termo evoca desde valores éticos pelos pioneiros da conservação do solo, como Benett e Leopold, até relações com saúde feitas por agricultores.¹⁵

A qualidade não pode ser medida, mas deve ser inferida de medidas de propriedades do solo ou do agroecossistema, referidos como indicadores.¹⁶ Segundo Doran & Parkin¹⁷, indicadores devem seguir os seguintes critérios: (1) envolver processos ocorrentes no ecossistema, (2) integrar propriedades e processos físicos, químicos e biológicos, (3) ser acessível e aplicável no campo, (4) ser sensível a variações de manejo e de clima, e (5) ser componente de banco de dados de solos, sempre que possível.

A avaliação da qualidade do solo tem dimensão espacial e temporal. O intervalo entre medições para que o indicador avalie mudanças depende, portanto, do tempo necessário para que dado manejo do solo produza alterações quantificáveis, enquanto sua frequência no espaço deve considerar as variações espaciais provocadas pelo mesmo.

A matéria orgânica é um dos melhores indicadores de qualidade do solo, pois se relaciona com inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas. Neste artigo, contudo, a ênfase será em indicadores físicos do solo e produção de plantas.

Indicadores qualitativos são fundamentais, especialmente para que sejam compartilhados com os agricultores, permitindo que eles possam avaliar as limitações na produção em suas propriedades, integrando-os no trabalho de monitoramento dos progressos (ou regressos) conseguidos.

¹² SOIL SURVEY DIVISION STAFF. *Soil survey manual*. US Dept. Agric. Handbook, n.º 18. Washington, DC: U. S. Govet. Print. Office, 1993.

¹³ KLAMT, E.; SCHNEIDER, P.; DOS SANTOS, F. J. & GABINETE DA REFORMA AGRÁRIA, RIO GRANDE DO SUL. Uso das informações de levantamentos de solos nos projetos de assentamento: a experiência do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, XIV. Cuiabá, 2002. *Anais...* UFMT, Cuiabá. 2002.

¹⁴ D'AGOSTINI, L. R. & SCHLINDWEIN, S. L. *Dialética da avaliação do uso e manejo das terras*. Florianópolis: Editora UFSC, 1998. 121 p.

¹⁵ SEYBOLD, C. A.; MAUSBACH, M. J.; KARLEN, D. L. & ROGERS, H. H. Quantification of soil quality. In: THE SOIL QUALITY INSTITUTE (ed.) *The soil quality concept*. Washington, DC: USDA-NRCS, 1996. p. 53-68.

¹⁶ SEYBOLD, C. A. *et. al. Op. cit.*

¹⁷ DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. *Op. cit.*

Metodologias semiquantitativas incluem o índice morfológico da superfície do solo (0 a 30 cm), no qual são avaliadas as propriedades profundidade, tipo de horizonte, textura ao tato, umidade, estrutura (incluindo crostas), consistência (resistência à ruptura) e tipo e tamanho de macroporos.¹⁸ Outro exemplo é o perfil cultural, que consiste na abertura de trincheiras e observação da organização e da morfologia das estruturas nas diferentes regiões do perfil.¹⁹

Para expressar matematicamente a qualidade do solo (Q), Larson & Pierce²⁰ apresentam Q como função de atributos mensuráveis do solo (qi), significando a variação temporal da qualidade como dQ/dt e propondo o estabelecimento de pedofunções para expressar a qualidade, com base em um conjunto mínimo de dados de propriedades do solo. Três situações podem ocorrer: $dQ/dt > 0$, com melhoria da qualidade do solo (agração); $dQ/dt < 0$, com redução da qualidade do solo (degradação); e $dQ/dt = 0$, situação sem alteração (manutenção) da qualidade do solo.²¹

Múltiplos indicadores podem ser integrados em um único e, com a análise geoestatística (krigeagem), podem ser usados para avaliar a qualidade do solo na paisagem.²² Embora não referissem explicitamente ao termo qualidade do solo, Albuquerque *et al.*²³ usaram análise geoestatística para relacionar profundidade do horizonte A, disponibilidade de água às plantas e produtividade de milho, havendo significativa correlação espacial entre essas variáveis. Mapas podem ser usados para planejamento e para avaliar alterações temporais na qualidade do solo, como no trabalho de Vezzani *et al.*²⁴.

Para o conjunto mínimo de dados, Doran & Parkin²⁵ propõem a inclusão das propriedades físicas do solo constantes no quadro 2, indicando a relação com a condição do solo, a função e a justificativa para a sua medição.

O monitoramento de tendências é muito útil, mas deve referir-se a uma escala normalizada.²⁶ Arnold *et al.*²⁷ agruparam flutuações e tendências em três grupos: variações não sistemáticas ou randômicas (exemplo: flutuações climáticas e intervenção humana); variações regulares periódicas (exemplo: flutuações climáticas estacionais e cultivos) ou cíclicas; e variações com tendência (exemplo: declínio ou acréscimo de matéria orgânica ou de nutrientes em período longo).

As propriedades e atributos físicos podem ser agrupados em escalas temporais desde meses até milhares de anos: $<10^{-1}$ ano para densidade do solo, porosidade total, umidade do solo, taxa de infiltração de água e permeabilidade;

¹⁸ SOIL SURVEY DIVISION STAFF. *Op. cit.*

¹⁹ TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C. & NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico do solo em condições tropicais. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:393-399, 1999.

²⁰ LARSON, W. E. & PIERCE, F. J. *Op. cit.*

²¹ SEYBOLD, C. A. *et. al. Op. cit.*

²² SMITH, J. L.; HALVORSON, J. J. & PAPENDICK, R. I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:743-749, 1993.

²³ ALBUQUERQUE, J.; REINERT, D. J. & FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. do Solo*, 20:151-157, 1996.

²⁴ VEZZANI, F. M.; AMADO, T. J. C.; SULZBACH, L.; CONCEIÇÃO, P. C. & GRAPEGGIA Jr., G. Relações da qualidade do solo com a produtividade das culturas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, XIV. Cuiabá, 2002. *Anais...* UFMT, Cuiabá. 2002.

²⁵ DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. *Op. cit.*

²⁶ SEYBOLD, C. A. *et. al. Op. cit.*

²⁷ ARNOLD, R. W.; ZABOLES, I. & TARGULIAN, V. C. *Global soil change*. Laxenburg, Áustria: Institute for Applied Systems Analysis, 1990.

²⁸ ARNOLD, R. W. *et. al. Op. cit.*

²⁹ DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. *Op. cit.*

10⁻¹-10⁰ ano para capacidade de campo e condutividade hidráulica; 10⁰-10¹ anos para ponto de murcha permanente; 10¹-10² anos para área superficial específica; e >10³ anos para distribuição de tamanho e densidade de partículas.²⁸

Quadro 2: Propriedades físicas propostas como indicadores básicos para avaliação da qualidade do solo²⁹

Propriedade física	Relação com a condição do solo e a função	Justificativa
Distribuição de tamanho de partículas (textura)	Retenção e transporte de água e substâncias químicas	Uso em modelagem, erosão do solo
Profundidade do solo, camada superficial e raízes	Estimativa do potencial produtivo e de erosão do solo	Normalização de variações topográficas e geográficas
Densidade do solo e infiltração de água	Potencial de lixiviação, produtividade, erodibilidade	Conversão base volumétrica para gravimétrica
Curva característica de água no solo	Relacionado com retenção e transporte de água	Água disponível, cálculo da densidade, textura e matéria orgânica do solo

Valores de referência devem ser definidos e consistem de valores máximos para dada propriedade e valores aceitáveis para qualidade do solo. Para propriedades físicas, assim como para as demais, diferentes situações podem apresentar-se: mais é melhor (exemplo: estabilidade de agregados – EA), menos é melhor ou limite superior (exemplo: resistência mecânica à penetração – RP), valor mínimo ou limite inferior (exemplo: aeração do solo – Ar), e valor ótimo (exemplo: umidade do solo – U).

Muito esforço tem sido feito para avaliar as propriedades constantes no quadro 2, além de outras complementares, mas tem sido pequeno o avanço na física do solo aplicada. Possivelmente, isso se deve, pelo menos em parte, à limitação em estabelecer-se clara e quantitativamente a relação daquelas propriedades com produtividade e contaminação ambiental, embora alguns valores limite de propriedades estejam bem estabelecidos na literatura, como para RP e EA. Assim, conforme Karlen *et al.*³⁰, a simples medição e apresentação de uma propriedade do solo como resposta de uma prática de manejo não é mais suficiente, pois o recurso solo deve ser analisado como um sistema dinâmico que emerge de interações entre componentes físicos, químicos e biológicos.

As duas primeiras perguntas que devem ser sempre respondidas, independentemente da escala, são: como o solo funciona e quais os indicadores apropriados para fazer

³⁰ KARLEN, D. L. *et. al. Op. cit.*

³¹ KARLEN, D. L. *et. al. Op. cit.*

³² LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-293, 1985.

sua avaliação?³¹ Quando a função a avaliar for a produtividade biológica, particularmente de cultivos, as três propriedades RP, Ar e U podem ser integradas usando o conceito de umidade do solo, menos limitante para as plantas, introduzido por Letey³² e denominado na literatura brasileira de índice hídrico ótimo (IHO). O IHO pode, portanto, ser usado como um índice físico integrador de qualidade física do solo. Esse índice tem maior significado físico-biológico do que indicadores que unem estatisticamente propriedades do solo em um modelo tipo “caixa-preta”.

Manejo e qualidade física do solo

Técnicos e mesmo pesquisadores têm, muitas vezes, dificuldades em avaliar respostas das plantas a condições limitantes, particularmente condições abaixo da superfície do solo, que não podem ser prontamente visualizadas. O sistema radicular certamente percebe e integra todas as condições, no espaço e tempo, de modo semelhante à parte aérea das plantas, que está exposta a trocas constantes de ambiente, indicando claramente que estresses na parte aérea e sistema radicular são igualmente importantes.

Operações agrícolas que envolvam mobilização e ou tráfego de máquinas alteram substancialmente a estrutura dos solos, modificando as condições que determinam o ambiente de crescimento radicular. Na maioria das vezes, há degradação da qualidade do solo, cujos principais atributos indicadores parecem ser a agregação e a compactação. A compactação ocorre com maior intensidade em solos argilosos; entretanto, esses solos são mais resistentes à desagregação, enquanto os solos arenosos apresentam menores problemas de compactação, porém revelam alta susceptibilidade à desagregação.

A introdução da semeadura direta (SD) produz modificações em ambas as condições do solo, em taxas e direção diferentes das observadas em sistemas de manejo do solo que incluem sua mobilização. No entanto, o grau com que a SD altera as propriedades físicas é pouco conhecido e muito variável, principalmente devido às grandes variações de solos e clima onde é usada e às grandes variações de operações, tamanho de equipamentos e tipos de culturas empregados no sistema, nas mais diversas regiões e propriedades agrícolas.

O crescimento de plantas nos diferentes estágios de desenvolvimento, da emergência das plântulas à penetração das raízes, é afetado diretamente pela água, oxigênio, temperatura e impedância mecânica.³³ Esses fatores relacionam-se

³³ FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. *Fitotecnia Latino Americana*, 4:165-176, 1967.

com propriedades do solo que afetam indiretamente as plantas. Plantas não crescem sem água e oxigênio; todavia, como saturação em água e aeração são inversamente proporcionais, excesso de água pode resultar em taxa de difusão e conteúdo de oxigênio reduzidos. Tem-se observado que, para algumas condições, a alongação de raízes é mais associada à aeração para solo com baixa impedância mecânica. Há evidências claras na literatura de que o impedimento radicular é reduzido ou eliminado quando o solo apresenta resistência à penetração igual ou maior do que 2 MPa, apesar de ser relacionado à condição estrutural.

O teor de água do solo controla a aeração, a temperatura e a impedância mecânica, os quais são afetados pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros. Aumento no teor de água reduz a aeração e a resistência do solo à penetração. O primeiro efeito é indesejável, ao passo que o segundo é desejável. A umidade também diminui a temperatura do solo, pois aumenta a condutividade térmica e o calor latente. Esses fatores físicos interagem e regulam o crescimento e funcionalidade das raízes, baseados em limites críticos associados ao ar, à água e à resistência do solo, com reflexos no crescimento e produtividade dos cultivos.

Agregação do solo

O manejo de solos e de culturas, que inclua espécies com diferentes tipos de sistemas radiculares, influencia fortemente a estabilidade da estrutura do solo e, em particular, a proporção de agregados estáveis em água. Os efeitos das plantas sobre a estabilidade dos agregados podem ser diretos ou indiretos, principalmente pela ação de proteção dos agregados superficiais, aporte de matéria orgânica na superfície ou internamente ao solo, e ação do sistema radicular. A SD, com rotação de culturas e com inclusão de plantas de cobertura de solo, além de reduzir drasticamente a erosão hídrica, afeta indiretamente a estabilidade estrutural através do incremento da matéria orgânica e atividade biológica do solo.

A presença da matéria orgânica do solo, nos diferentes estágios de decomposição, a atividade e natureza de microrganismos, associados à ação de sistema radicular de plantas, são altamente variáveis, considerando o enorme número possível de fontes de matéria orgânica, variação de microrganismos e tipos de sistemas radiculares existentes nos sistemas de produção agrícola. Tal fato impõe à estrutura do solo grande dinamicidade para os vários ambientes agrícolas e, para um mesmo ambiente, uma grande dinamicidade no tempo.³⁴

³⁴ REINERT, D. J. *Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf*. East Lansing, Michigan State University, 1990. 129 p. (Tese de Doutorado).

ANGERS, D. A. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1244-1249, 1992.

Há indicação clara de que o incremento de matéria orgânica, verificado após alguns anos do sistema de SD, é acompanhado, independentemente do tipo de solo, pelo incremento da agregação expressa pela estabilidade dos agregados. As taxas de aumento de agregação, no entanto, estão relacionadas à textura do solo, ao manejo e aos sistemas de cultura adotados. A degradação e o processo inverso, que é a recuperação da estabilidade estrutural, são pelo menos duas vezes mais rápidos em solos arenosos do que em solos argilosos. A condição inicial do solo, quando da adoção da SD, tem influência decisiva na condição estrutural resultante.

Quando se inicia a SD em um solo nunca cultivado, há evidências de que as perdas da qualidade são muito menores do que quando se empregam sistemas com mobilização do solo. O modelo de agregação em solo com gramíneas parece estar bem estabelecido. No entanto, o efeito das leguminosas ainda carece de informações. Nesse sentido, alguns dados experimentais suportam a hipótese de que há maior taxa de recuperação da agregação quando leguminosas são usadas na SD, indicando taxas mais lentas de recuperação da agregação ligadas às gramíneas de inverno, quando comparadas às leguminosas.

Os resultados disponíveis induzem a considerar que a SD age no sentido de melhorar as condições da estabilidade estrutural e seu efeito pode ter taxas baixas ou altas de melhoramento, dependendo do manejo global do solo e do sistema de cultura adotado. A bibliografia brasileira possui muita informação sobre condição da qualidade do solo; no entanto, em sua maioria, aponta diferenças entre manejo de solo e plantas em uma ou poucas épocas, sem o monitoramento temporal. Outrossim, para condições tropicais e subtropicais, o processo de degradação e recuperação deve apresentar taxas bem mais altas do que as observadas em climas temperados.

Alteração de propriedades do solo com a compactação

A compactação é um processo resultante do histórico de tensões recebidas em uma área, através da mecanização ou pelo pisoteio animal. A principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo, semeadura, tratos culturais e colheita. A compactação superficial é causada basicamente pela pressão de inflação de ar dos pneus e a compactação subsuperficial pelo peso por eixo.³⁵ A utilização do sistema de plantio direto pode, em algumas situações, agravar esse problema.

³⁵ HÅKANSSON, I. & VOORHEES, W. B. Chapter on soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W. H. VALENTIN, C. & STEWART, B. A. (eds.) *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 576 p.

Há controvérsia sobre que atributos utilizar para considerar se um solo está compactado, porém, o nível de compactação atual tem sido referenciado como “estado de compactação”, fator que limita o crescimento e o desenvolvimento das culturas.

Com a compactação há um aumento da densidade e da resistência do solo, redução da porosidade, principalmente macroporosidade ou porosidade de aeração (poros maiores que 50 mm), além de afetar diversos de seus atributos como a condutividade hidráulica, permeabilidade, infiltração de água e outras características ligadas à porosidade do solo. Essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais.³⁶

³⁶ STEPNIEWSKI, W.; HORN, R. & MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 88:175-181, 2002.

Há concordância no sentido de que a infiltração de água, macroporosidade, resistência à penetração de raízes, densidade, porosidade total e microporosidade indicam o estado em que a estrutura do solo se encontra e servem como indicadores do seu estado de compactação. A infiltração da água é a mais importante, pois integra vários fatores: distribuição do tamanho e continuidade de poros, poros biológicos e cobertura de solo. Poros biológicos são aqueles de seção aproximadamente circular, com diâmetro maior do que 2 a 3 mm, formados principalmente pela atividade da mesofauna e pela decomposição das raízes. Esses poros, embora em pequeno volume total, exercem grande efeito na infiltração da água no solo.

A densidade e porosidades, apesar de não serem as propriedades que recebem maior impacto com a modificação da estrutura do solo, têm sido mais largamente usadas pela facilidade de determinação e por receberem pequena influência do teor de água no momento da coleta de amostra de solo. O aumento da densidade do solo em lavouras sob SD foi verificado por vários autores, podendo ser considerado como uma consequência normal da técnica utilizada. No entanto, a produtividade muitas vezes não é prejudicada, devido a maior continuidade dos poros, que é uma importante característica que afeta a aeração do solo, a infiltração de água e a penetração de raízes. Dados publicados e observações visuais indicam que o maior estado de compactação de solos sob SD, indicado pela densidade, ocorre de 8 cm até aproximadamente 15 cm de profundidade, compactação provocada pelo confinamento das pressões que ocorrem próximo a essa profundidade. Para alguns

tipos de solos e de plantas, esse aumento da densidade não é prejudicial ao desenvolvimento da planta, mas, em algumas ocasiões, esse aspecto tem sido fator limitante à adoção do sistema de plantio direto. Num sistema de preparo reduzido, os efeitos da compactação tendem a ser mais persistentes do que em sistemas com preparo do solo, pois o revolvimento ocasionado pelo preparo convencional reduz, anualmente, os efeitos da compactação na camada arável.

Na superfície, a atividade biológica pode aliviar os efeitos negativos da compactação, mas não em maiores profundidades. A melhor maneira de aliviar os efeitos da compactação do solo na agricultura é criar uma rede estável de macroporos contínuos, pois esses favorecem o crescimento radicular, a aeração e a permeabilidade da água.

Outra propriedade físico-mecânica, alterada pelo sistema de manejo do solo, é a resistência mecânica à penetração de raízes, medida por penetrômetros. Tal resistência está estreitamente associada à densidade do solo e, para o mesmo teor de água, é tanto maior quanto maior a densidade, mostrando ser um bom indicador da compactação. Alguns pesquisadores sugerem que a densidade não é o mais importante fator que limita o crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, que pode ser estimada por um penetrômetro.

Em sistemas integrados de produção de grãos e carne, também há a preocupação com a compactação. Solo de textura franca, que recebeu pisoteio contínuo no inverno com carga animal variando de 1.000 a 1.500 kg ha⁻¹, não apresentou valores de macroporosidade e densidade que indicassem restrição ao crescimento vegetal. Entretanto, quando foi utilizada alta carga animal, observou-se aumento da densidade e redução da aeração e infiltração da água no solo. Um estudo em bacias leiteiras de agricultores assistidos pela Cotrijuí foi realizado em solo argiloso. Adotou-se o sistema rotativo de pastoreio, no qual os animais permanecem por pouco tempo pastoreando (menos de duas horas); as forrageiras usadas foram trevo e tifton e a pastagem recebeu manejo sem mobilização de solo. De maneira geral, a compactação máxima situa-se em torno de 5 cm de profundidade, com valores de densidade do solo de cerca de 1,5 Mg m⁻³ e macroporosidade variando entre 5 e 8%. A resistência à penetração das raízes (RP) também indica que a máxima compactação é superficial, situando-se pouco abaixo dos 5 cm de profundidade. Se excluídas as leituras até 2 cm, a RP é alta na porção mais superficial do solo e diminui com a profundidade.

Para aliviar a compactação, deve-se considerar a relação solo-máquina/animal-planta. Modificações nas máquinas agrícolas resumem-se em diminuir a pressão de ar dos pneus, aumentar a largura dos mesmos, utilizar pneus de carcaça mais flexíveis (radiais), limitar o peso por eixo e evitar o patinamento excessivo.³⁷ Em relação ao solo, deve-se considerar a umidade do mesmo para realizar as operações de preparo, tratos culturais, colheita e transporte. No manejo, devem integrar a rotação de culturas espécies vegetais que produzam grande massa radicular e cujas raízes possuam a habilidade de penetrar em camadas compactadas. A decomposição dessas raízes deixa poros contínuos e de maior estabilidade, que aumentam a infiltração de água e as trocas gasosas, agindo como subsoladores naturais.

Limites físicos ao crescimento de plantas

Na tentativa de responder à necessidade de parâmetros do solo, que possam orientar no diagnóstico de condições físicas limitantes ao crescimento de plantas e, ainda, auxiliar na tomada de decisão sobre quando intervir para recuperar essas condições, alguns valores têm sido indicados na literatura, embora sejam estritamente empíricos. No quadro 3, apresentamos alguns desses valores e as fontes bibliográficas onde podem ser encontrados.

Quadro 3: Valores críticos para alguns parâmetros físicos do solo, segundo várias fontes da literatura. Adaptado de Reynolds *et al*³⁸

Parâmetro	Valores críticos	Fonte
Densidade do solo crítica - D _s (impedimento severo)	1,4 - 1,8 (função do teor de argila)	Jones (1983)
	1,4 - 1,6 (solo argiloso)	Veihmeier & Hendrickson (1948)
	1,6 - 1,8 (solo franco e arenoso)	
Resistência à penetração - RP	2 MPa	
Porosidade de aeração - EA	EA = 0,10 - 0,15 m ³ m ⁻³	Cockrooft & Olsson (1997)
Água disponível às plantas - AD	AD = 0,15 - 0,25 m ³ m ⁻³	Cockrooft & Olsson (1997)
Aeração/Porosidade	CC/Pt = 2/3 (0,66) ou EA/Pt = 1/3 (0,34)	Olness <i>et al.</i> (1988)

A dificuldade para a definição e, conseqüentemente, adoção de um valor crítico para propriedades e atributos de solo, reside no fato de que esses não são determinantes diretos do crescimento das plantas, como demonstrado por Letey³⁹ em seu conceito de faixa de umidade não limitante. Além disso, as propriedades e atributos do solo atuam de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento e, assim, a definição de um valor específico para uma

³⁷ HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.

³⁸ REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S. & LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110:131-146, 2002.

³⁹ LETEY, J. *Op. cit.*

propriedade pode não ter significado nenhum quando analisado isoladamente. Em caráter experimental, tem-se observado que as plantas continuam produzindo adequadamente, mesmo em solos que muitas vezes apresentam, para algumas propriedades, condições inadequadas em termos teóricos.

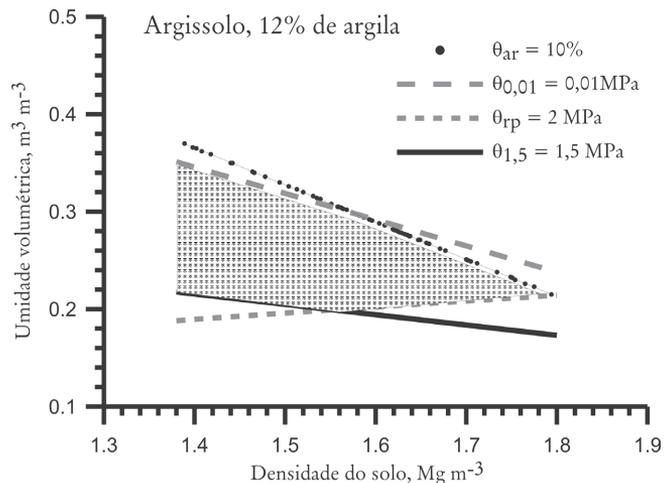
Intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade do solo

O conceito de faixa de umidade não limitante foi introduzido por Letey⁴⁰, considerando limitações ao crescimento vegetal relacionadas à aeração, à resistência à penetração e à água disponível com a variação de umidade do solo. Da Silva *et al.*⁴¹ modificaram esse conceito e definiram como intervalo hídrico ótimo (IHO) a faixa de umidade de um solo no qual o crescimento é pouco limitado. Como os fatores acima citados mudam com modificações da estrutura, há variação do IHO para cada solo em função de seu manejo e do manejo de plantas.

O IHO fica mais estreito à medida que o estado de compactação aumenta (aumento da densidade do solo) e que ocorre degradação da estrutura (figura 2). Por exemplo, a aeração do solo pode restringir a difusão de oxigênio e, por conseqüência, o crescimento radicular à umidade mais baixa que a capacidade de campo, assim como a resistência do solo à penetração pode restringir crescimento à umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha permanente. Culturas produzidas em solos com pequeno IHO são mais vulneráveis à queda de produtividade por falta ou excesso de água do que solo com grande valor de IHO.

⁴⁰ LETEY, J. *Op. cit.*

⁴¹ DA SILVA, A. P.; KAY, B. D. & PERFECT, E. Characterization of least limiting water ranges of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.



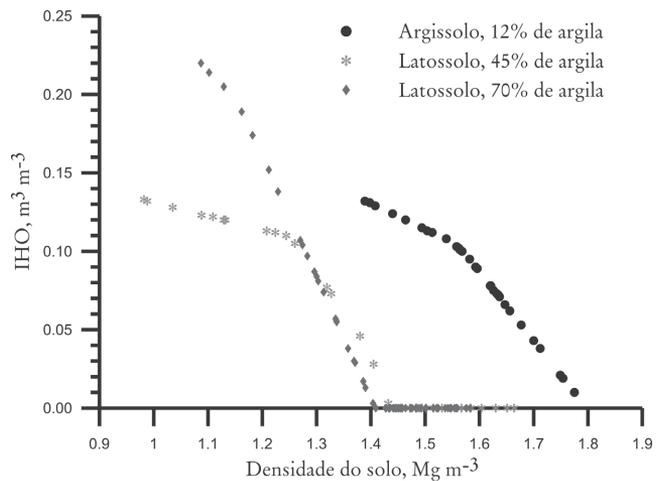
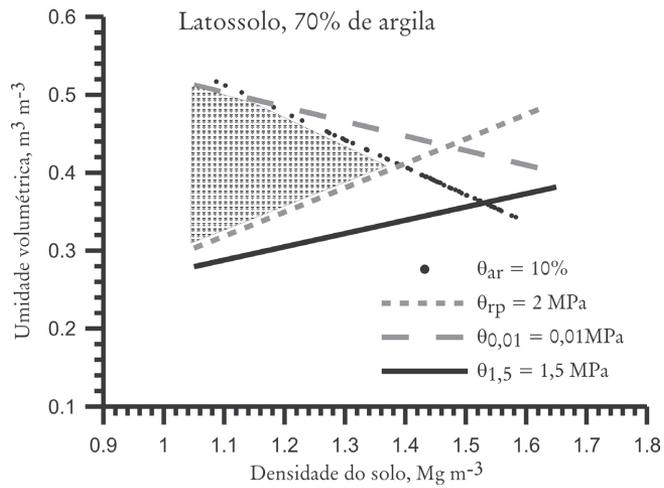
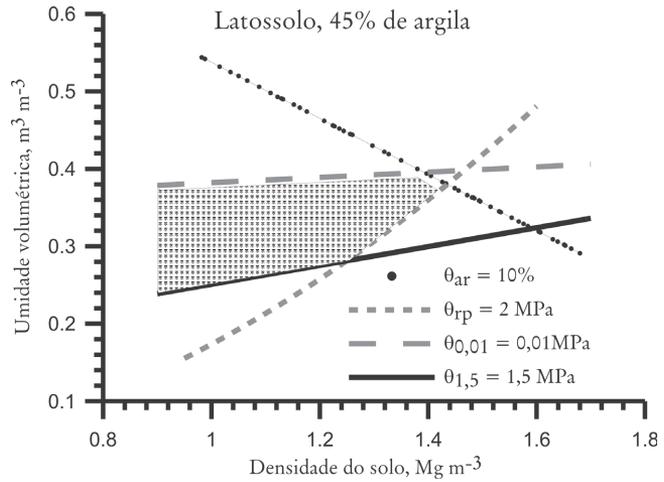


Figura 2: Efeito da estrutura do solo no intervalo hídrico ótimo (IHO), tomando por base os níveis críticos da porosidade de aeração (α_{ar}), capacidade de campo ($\alpha_{0,01}$), resistência mecânica à penetração (α_{rp}), ponto de murcha permanente ($\alpha_{1,5}$) para três solos sob semeadura direta (SD).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um índice de qualidade estrutural do solo, pois integra num só índice os fatores físicos que estão diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas. Tais fatores são: porosidade de aeração (Ar) superior a 10%, água no solo a tensões entre a capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) e teor de água quando a resistência mecânica (RP) do solo é inferior a 2 MPa. O IHO integra quatro fatores relacionados diretamente com o crescimento das plantas, que são determinados pelas propriedades intrínsecas e pela estrutura do solo.

Na densidade do solo quando o IHO é zero ($ds_{\text{IHO}=0}$), a probabilidade da umidade estar fora do ótimo é 100% e, portanto, o risco às culturas é alto. No entanto, é possível que esse valor ainda não seja o crítico, pois valores maiores podem ser os impeditivos. Uma dificuldade inerente à definição de valor crítico é estabelecer se um dado processo (exemplo: crescimento de raízes) ou resultado (exemplo: produção de grãos) é afetado em determinado grau estabelecido (restritivo) ou totalmente paralisado (impeditivo).

Um aspecto fundamental e pouco comentado em relação ao IHO é que o estimador desse intervalo é a densidade do solo (ds). Assim, apesar de existirem inúmeros trabalhos sobre RP e relações com a ds e umidade do solo e muitos deles afirmarem que a ds não indica nada, ela é a estimadora. Portanto, em pesquisa, por reconhecer que o IHO é um índice mais completo, definir-se-iam faixas, classes e limites e, na prática (no campo ou em larga escala de identificação da qualidade física), usar-se-ia a ds .

Na tentativa de verificar, preliminarmente, se os limites críticos de densidade do solo (ds_c) estabelecidos por Reinert & Reichert⁴² são adequados, a proposição é contrastada com resultados de pesquisa de IHO, para distintos solos, representados no triângulo textural (figura 3). Os valores propostos de ds_c foram de 1,45 Mg m⁻³ para solos com textura argilosa (> 55% de argila), 1,55 Mg m⁻³ para textura média (20 a 55% de argila) e 1,65 Mg m⁻³ para textura arenosa (< 20% de argila). Percebe-se que os valores de ds_c inicialmente propostos parecem ser consistentes para solos argilosos, mas estão subestimados para solos não argilosos (textura média e arenosa).

Qualidade estrutural do solo, sistema radicular e produtividade de plantas

A análise da distribuição radicular no perfil é uma metodologia qualitativa, possuindo grande utilidade na avaliação e identificação de camadas de impedimento mecânico ao

⁴² REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. In: *Siembra directa: una herramienta para la agricultura conservacionista*. Florianópolis-SC. CD-ROM. 1999.

crescimento radicular. Na comparação de três sistemas de manejo para a cultura do feijão em solo franco arenoso, verificou-se o seguinte: no plantio direto as raízes concentraram-se na camada de 5 a 15 cm, porém algumas ultrapassaram a camada compactada e desenvolveram-se em profundidades maiores que 30 cm; no preparo convencional, não ocorreram restrições ao crescimento radicular, pois as raízes distribuíram-se uniformemente nos lados da planta, ocupando todo o volume de solo; no preparo reduzido, as raízes concentraram-se até a profundidade de 25 cm. Em relação ao plantio direto e ao preparo convencional, o feijoeiro cultivado sob preparo reduzido permaneceu 3 dias a mais em solo com a umidade entre o limite superior e o limite inferior do IHO do que no plantio direto, e 4 dias a mais do que no preparo convencional. Contudo, não houve diferenças entre a produtividade do feijoeiro nos diferentes sistemas de manejo do solo, indicando que o período de dias em que o solo permaneceu fora das condições ideais não foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade da cultura. Portanto, mais estudos são necessários para relacionar o IHO como indicador físico de qualidade do solo para a produção de plantas.

⁴³ DA SILVA, A. P. *et. al.* *Op. cit.*

⁴⁴ DA SILVA, A. P. da & KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.

⁴⁵ KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo.* Piracicaba - SP. ESALQ, Universidade de São Paulo, 1998. 130 p. (Tese de Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas).

⁴⁶ TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da & LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581. 1998.

⁴⁷ TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da & LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52: 223-232, 1999.

⁴⁸ IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. de S. & TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. do Solo*, 25: 11-18, 2001.

⁴⁹ SILVA, V. R. da. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.* Santa Maria-RS. UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. 171 p. (Tese de Doutorado em Agronomia).

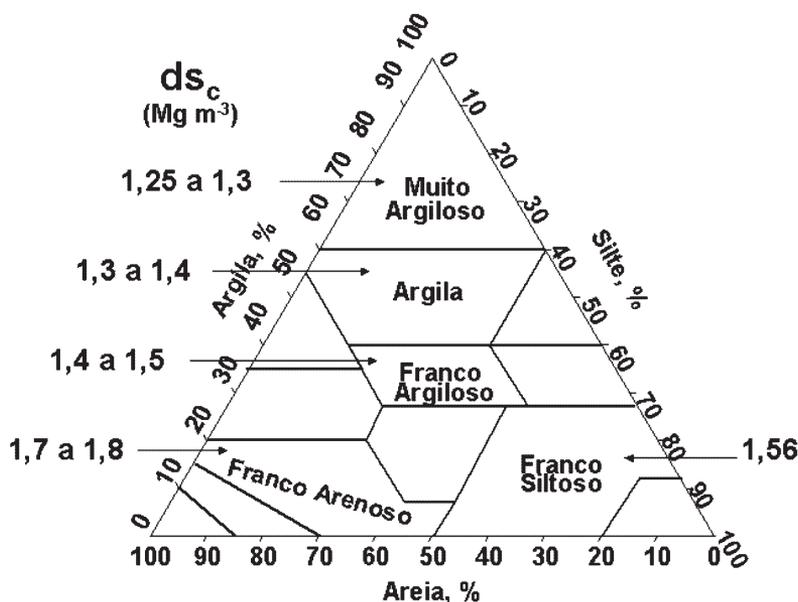


Figura 3: Variação de valores de densidade do solo quando o IHO é zero (ds_c em $Mg\ m^{-3}$), para distintas classes texturais. Resultados apresentados em Da Silva *et al.* (1994)⁴³, Da Silva & Kay (1997)⁴⁴, Klein (1998)⁴⁵, Tormena *et al.* (1998)⁴⁶, Tormena *et al.* (1999)⁴⁷, Imhoff *et al.* (2001)⁴⁸ e Silva (2003)⁴⁹

⁵⁰ STRECK, C. A. *Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja*. Santa Maria-RS. UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. 83p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia).

Em outro estudo, também em solo franco arenoso, com compactação adicional imposta por tráfego de máquinas,⁵⁰ os diferentes estados de compactação do solo refletiram-se na distribuição e morfologia do sistema radicular da soja e do feijão, o que afetou significativamente a produtividade das culturas. Ao longo do ciclo das culturas, todos os tratamentos atingiram valores de resistência do solo à penetração radicular restritivos ao crescimento das plantas, mas com menor frequência e num menor intervalo de profundidade para o tratamento sem compactação adicional. Comparado ao tratamento sem compactação adicional, o estado de compactação imposto por duas passadas de máquina reduziu a produtividade da soja em 20% e 40% para o feijão, e para o estado de compactação mais elevado, imposto por quatro passadas de máquina, a redução na produtividade foi de 38% para a soja e 62% para o feijão.

⁵¹ SILVA, V. R. da. *Op. cit.*

Em Latossolos com distintos estados de compactação,⁵¹ a resistência à penetração radicular foi mais eficiente que a densidade do solo para identificar os estados de compactação e camadas compactadas. A estrutura da camada compactada possui aspecto maciço e laminar, indicativo do efeito do tráfego de máquinas. A cultura do trigo foi a mais sensível à compactação do solo, sendo reduzida em 18% no Latossolo Vermelho distrófico e em 34% no Latossolo Vermelho distroférico, típico no maior estado de compactação em relação ao menor, possivelmente devido à aeração deficiente. A produtividade de milho também foi sensível aos diferentes estados de compactação, enquanto a soja não o foi.

Esses estudos demonstram que, se o objetivo for produção de plantas, os indicadores físicos de estrutura do solo devem estar associados à produtividade e ser desenvolvidos, preferencialmente, no campo.

Avaliação da qualidade do solo pelo agricultor: raízes como fator-chave

O solo funciona como parte do agroecossistema, o que torna mais difícil medir sua qualidade. Múltiplas observações para diferentes lugares e tempo devem ser feitas e uma boa estratégia reside em observar respostas integradas de um determinado solo, como: desenvolvimento da cultura, doenças, empoçamento de água e produtividade. Nesse sentido, a maioria dos produtores rurais preocupa-se, sente o efeito dos sistemas de produção sobre o solo e percebe se a qualidade do mesmo está melhorando ou piorando.

Além dos indicadores de qualidade do solo considerados quantitativos e científicos, indicadores qualitativos que possam ser observados diretamente na propriedade (quadro 4), são de alta importância e devem servir de guia para o manejo dos solos agrícolas e estar bem consolidados na memória dos produtores.

Quadro 4: Indicadores físicos e biológicos relacionados às plantas usados para avaliar a qualidade dos solos (extraído de Reichert *et al.*⁵²)

⁵² REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & SILVA, V. R. da. Compactação do solo em sistema de plantio direto: limites críticos e mitigação. In: COUTO, E. G. & J. F. FRANCO (eds.) *Os caminhos do uso da água na agricultura brasileira*. Cuiabá-MT: UFMT. 2003. No prelo.

Indicador	Época de Avaliação	Qualidade estrutural		
		Pobre	Média	Boa
Indicadores físicos				
1. Compactação subsuperficial	Boa umidade do solo	Solo resistente; aparência laminar; difícil de penetrar objeto pontiagudo	Alguma resistência a objetos pontiagudos	Solo friável
2. Boa estrutura	Boa umidade do solo	Aspecto maciço	Superfícies de fraqueza clara	Granular
3. Aeração	Crescimento de plantas	Poucos poros visíveis e drenagem limitada	Alguns bioporos	Solo aberto e bioporos comuns
4. Profundidade efetiva	Qualquer	Subsolo exposto	Evidências de perda horizonte A	Horizonte A profundo
5. Infiltração	Após chuva	Água escoou ou permanece na superfície	Água penetra	Sem escoamento ou empoçamento
6. Drenagem	Após chuva	Solo úmido por longo tempo	Algum empoçamento	Água se move rapidamente
7. Retenção de água	Crescimento de plantas	Estresse após poucos dias	Plantas "sentem" seca	Estresse somente em seca extrema
8. Cobertura superficial	Qualquer	Exposto	Alguma cobertura, <30%	100% cobertura
Indicadores biológicos (planta)				
1. Bioporos/minhocas	Úmido na superfície	Sem sinal	Alguns bioporos: de 2 a 10/m ²	Bioporos: > 10/m ²
2. Raízes	75% floração	Concentrada na superfície	Algumas se aprofundam	Raízes profundas sem sinal de restrição
3. Resistência à seca	Seca	Plantas não se recuperam	Sofrem	Suportam
4. Aparência da cultura	Ciclo	Folhas curtas e descoloridas	Crescimento médio e manchado	Densa, verde e alta
5. Produção	Colheita	Abaixo da média	Média local	Acima da média

A análise de indicadores quali-quantitativos deve ser feita em períodos estratégicos. Alguns indicadores devem ser observados ao longo do tempo. Um bom exemplo refere-se ao escoamento superficial após chuvas, mas outros, como acúmulo de água com drenagem lenta, aparência das plantas, presença de organismos, entre outros, podem fornecer

⁵³ REICHERT, J. M. *et. al.* *Op. cit.*

José Miguel Reichert é engenheiro agrônomo, PhD em Solos e professor titular do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

reichert@ccr.ufsm.br

Dalvan José Reinert é engenheiro agrônomo, PhD em Solos e Culturas e professor titular do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

dalvan@ccr.ufsm.br

João Alfredo Braidá é engenheiro agrônomo, doutorando em Ciência do Solo e professor assistente do Curso de Agronomia do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Unidade Pato Branco.

braidaja@pb.cefetpr.br

boa indicação do estado da qualidade do solo. O indicador de qualidade de maior sucesso é a observação de como as raízes “vêm” o ambiente do solo abaixo da superfície.⁵³ Para tanto, abre-se uma trincheira, com uma planta no estágio de maior desenvolvimento radicular (75% do florescimento) no centro de uma das paredes, e com auxílio de um objeto pontiagudo expõe-se parte do sistema radicular. As raízes expostas são analisadas visualmente, tentando-se perceber se há sinais de limitações físicas. Características como direção, espessura e aprofundamento das raízes são indicadores freqüentemente empregados na identificação de restrições.

Considerações finais

Existe uma confusão na literatura sobre manejo do recurso natural solo e sustentabilidade de sistemas agroecológicos. O que se busca não é um manejo sustentável, mas manejos e tecnologias que contribuam para a sustentabilidade dos agroecossistemas. Essa contribuição pode e deve ser monitorada através de indicadores de qualidade do solo, os quais precisam ser integradores de processos e relacionar-se claramente com funções do solo. Nesse sentido, entre outras possibilidades, a integração de três propriedades do solo para formar o intervalo hídrico ótimo e, a partir dele, estabelecer a densidade crítica do solo para o desenvolvimento de plantas, é um grande avanço na área de biofísica do solo.