



ARTIGO TÉCNICO 2

Saúde do Solo: Entendendo os Conceitos, Relevância e suas Aplicações na Agricultura e Meio Ambiente

 Maurício Roberto Cherubin¹, Martha Lustosa Carvalho², Marcos Rodrigues³

1. O SOLO É UM RECURSO INSUBSTITUÍVEL E FINITO

Os solos são corpos naturais tridimensionais complexos que recobrem a maior parte dos continentes do planeta Terra. São dinâmicos e constituídos por sólidos, líquidos e gases, de natureza mineral ou orgânica. Todos os solos contêm, necessariamente, organismos vivos. Esses organismos ocupam o espaço poroso dos solos ou crescem sobre ele, como a vegetação. Os solos se estendem por ecossistemas naturais, normalmente vegetados, e também por ecossistemas modificados pela ação antrópica. Os solos têm um papel central na regulação de processos de escala planetária, que mantêm os ecossistemas da Terra em funcionamento e possibilitam a vida (Figura 1).

Os solos são formados por processos de intemperismo de rochas, os quais dão origem à porção mineral e liberam elementos essenciais para o crescimento da vegetação e da biota que habitam o solo e que farão parte de seu componente biológico. Esses organismos são responsáveis pela maior parte dos processos que ocorrem no solo e que interagem com os outros compartimentos, como, por exemplo, a ciclagem de elementos (nutrientes ou até compostos tóxicos) – que é necessária à perpetuação da vida e à manutenção da qualidade da água – e o equilíbrio de trocas gasosas com a atmosfera – que controla o clima do planeta. Isso ocorre porque o carbono e outros elementos vitais à vida e ao equilíbrio dos ecossistemas do planeta estão intimamente relacionados à vegetação e aos organismos do solo. Os solos são o segundo maior reservatório de

Abreviações: CA4SH = Coalizão de Ações para Saúde do Solo; FAO = Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura; Lisam = Solos Vivos das Américas; ONU = Organização das Nações Unidas.

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP, Piracicaba, SP; email: cherubin@usp.br

² Engenheira Agrônoma, Ms., Doutoranda do PPG em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

³ Engenheiro Agrônomo, Dr., Gerente de Pesquisa da Mosaic Fertilizantes, São Paulo, SP.

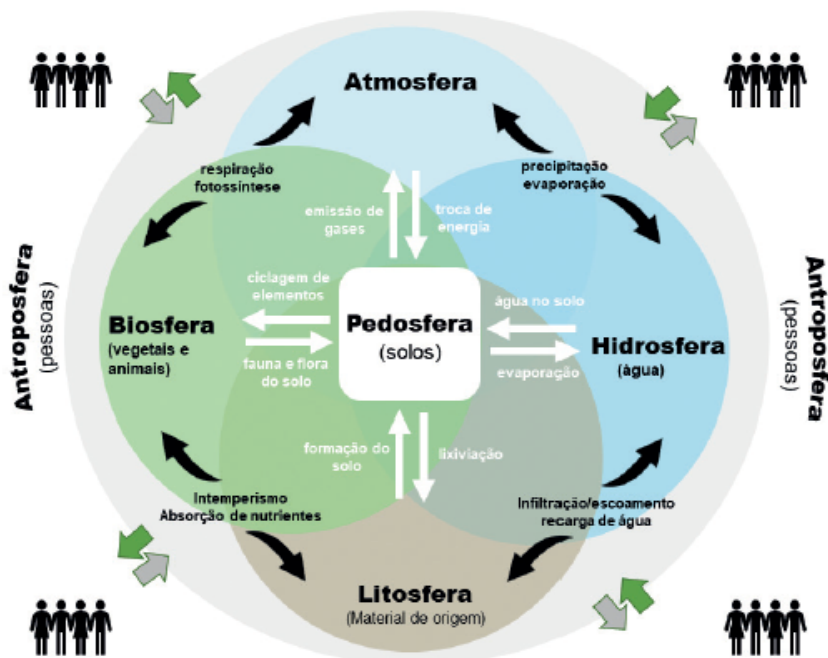


Figura 1. O solo é o mediador dos processos planetários interativos que sustentam o equilíbrio ecológico e possibilitam a manutenção da vida. Os seres humanos (antroposfera – círculo cinza) são modificadores e modificados nesses processos.

Fonte: Adaptada de Fortuna (2012).

carbono no planeta, atrás apenas dos oceanos. O principal mecanismo de regulação da concentração de carbono na atmosfera é o equilíbrio entre respiração e fotossíntese, mediado principalmente pelos vegetais terrestres, os quais dependem do solo como meio de apoio para o crescimento e fonte de nutrientes e água. A permanência do carbono no solo depende dos organismos que realizam a decomposição da matéria orgânica e a transformação desse material em formas mais estabilizadas, ligadas à fração mineral do solo. Uma vez nessa forma, o carbono desempenha um papel importante na manutenção da estabilidade estrutural do solo, que é fundamental para a conservação da qualidade da água no planeta. Esses processos são base para diversos outros, que, em última análise, sustentam a saúde de todos os seres vivos, e, em especial, a saúde das pessoas.

Devido ao papel central na regulação dos processos que sustentam a vida no planeta Terra, o solo é cada vez mais compreendido e considerado imprescindível nas agendas importantes, tanto no escopo técnico-científico quanto no político, para a resolução de grandes problemáticas globais, como segurança alimentar e energética, restauração de ecossistemas, combate à desertificação e mitigação das mudanças climáticas.

Embora o solo seja reconhecido como o grande alicerce da vida por culturas de todo o mundo, desde a Antiguidade são relatadas as consequências negativas da degradação do solo devido à exploração agrícola inadequada. Já se sabia, então, que a civilização depende de solos conservados, para que seja possível praticar a atividade que sustenta a espécie humana – a agricultura. A degradação sistemática desse recurso finito por más práticas agrícolas leva, em última instância, à fome e ao colapso civilizacional. Atualmente, cerca de um terço dos solos do planeta encontram-se em algum estágio de degradação, segundo estudo realizado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (MONTANARELLA et al., 2015). A agricultura moderna trouxe incrementos muito significativos de produtividade, que ajudam a alimentar o mundo. Isso é inquestionável! Porém, também é importante reconhecer as ameaças à saúde do solo causadas pelo avanço da agricultura, tais como:

- Compactação do solo, resultado do tráfego de máquinas agrícolas ou pisoteio de rebanho;
- Aumento da erosão e selamento, possivelmente devido à desagregação e pulverização do solo pelo repetido revolvimento;

- Aceleração da acidificação e salinização do solo, que ocorrem pela adição constante de altas doses de fertilizantes químicos, extração das bases e irrigação inadequada;

- Desbalanço de nutrientes, resultado de inadequado diagnóstico da fertilidade do solo e necessidades das culturas. Por exemplo, o solo pode ser degradado tanto pelo uso excessivo de fertilizantes quanto pela ausência ou insuficiência de adubação;

- Perda de carbono e de biodiversidade, devido à remoção da vegetação nativa e simplificação (menor quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos) dos sistemas produtivos, preparo convencional de solo, erosão e manejo inadequado (por exemplo, sobrepastejo);

- Poluição do solo, pela adição contínua e, por vezes, indiscriminada de defensivos, fertilizantes (minerais e orgânicos), descarte inadequado de resíduos agroindustriais, efluentes industriais e águas residuárias.

Neste contexto, para que os solos continuem a intermediar os processos que sustentam os ecossistemas do planeta, precisamos impedir o avanço da degradação, por meio da adoção de práticas de conservação do solo, mas também restaurar a saúde dos solos que já se encontram em algum estágio de degradação.

2. SAÚDE DO SOLO – CONCEITOS BÁSICOS E HISTÓRICO

O conceito de saúde do solo é bastante amplo, complexo e emergente, exigindo uma visão integrada do solo para compreendê-lo e aplicá-lo. Saúde do solo refere-se à capacidade contínua do solo, como um ecossistema vivo, de desempenhar suas múltiplas funções, tais como suporte à produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, ciclagem de nutrientes, estocagem de carbono, habitat para a biodiversidade, regulação do fluxo de água, matéria-prima para a indústria farmacêutica, cosmética e construção civil, além de ser um patrimônio e herança cultural. Tais funções são vitais para sustentar a produção de plantas e animais e a nossa própria vida na Terra. Solo saudável é o principal pilar da necessária transição para uma agricultura mais sustentável (e/ou regenerativa), permitindo, assim, o avanço na resolução de grandes problemas globais, como a insegurança alimentar e as mudanças climáticas.

Por se tratar de uma temática atual e de interesse global, a geração de conhecimento técnico-científico sobre os conceitos, métricas (indicadores) e aplicações e manejo da saúde do solo tem evoluído em ritmo muito acelerado, particularmente na última década. A saúde do solo foi

recentemente considerada como a área da fronteira do conhecimento da Ciência do Solo (SHEN; TENG, 2022). Este interesse na área de saúde do solo se reflete no aumento exponencial do número de artigos científicos publicados relacionando os termos “saúde do solo” e “qualidade do solo”. De acordo com a Scopus, a maior base de dados bibliográficos do mundo, já foram publicados 23.439 artigos científicos ou revisões de literatura mencionando estes termos entre 1947 e 2022, e deste total, 73% das publicações ocorreram na última década (2013-2022), e 49% nos últimos 5 anos (2018-2022) (Figura 2A). Estes números são bastante impressionantes e refletem o engajamento crescente de pesquisadores na área de saúde do solo.

O Brasil é o quarto país com maior número de publicações na área de saúde do solo, estando atrás apenas da China, Estados Unidos e Índia. No Brasil, a evolução da produção científica segue a mesma tendência global, onde foram publicados 1.541 artigos científicos ou revisões de literatura entre 1988 e 2022, e destes, 75% das publicações ocorreram na última década (2013-2022), e

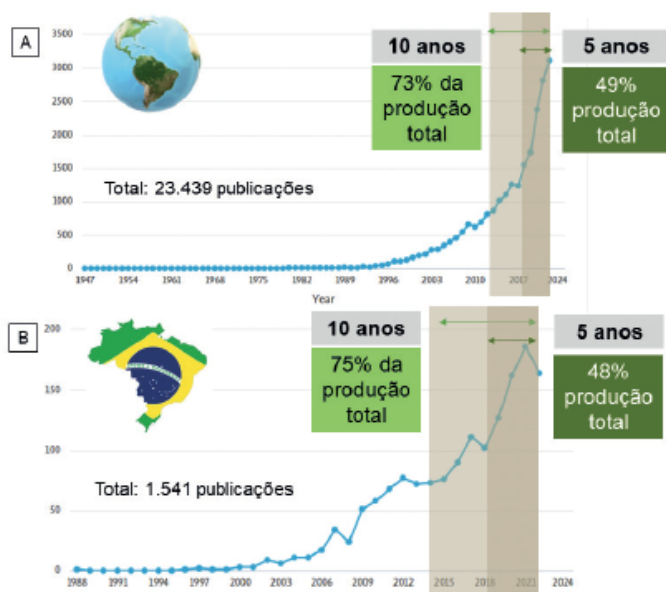


Figura 2. Evolução no número de publicações científicas relacionando os termos “saúde do solo” ou “qualidade do solo” no mundo (A) e no Brasil (B).

Fonte: Base de dados Scopus (busca realizada em 01/03/2023).

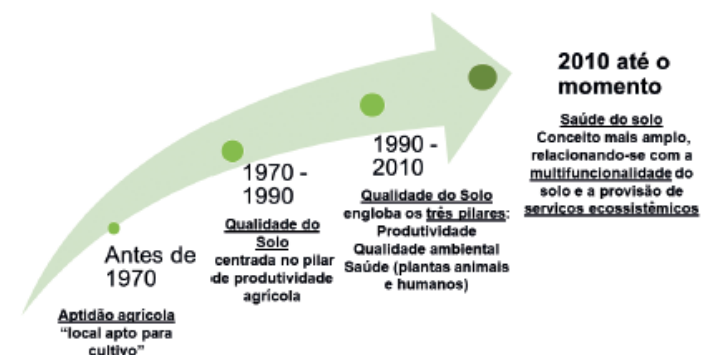


Figura 3. Evolução conceitual de solo saudável.

48% nos últimos 5 anos (2018-2022) (Figura 2B). Ou seja, o Brasil tem um papel importante no direcionamento dessa agenda científica de saúde do solo, e a geração de conhecimento científico no país tem acompanhado a taxa de crescimento global. Apesar disso, é importante mencionar que a maioria destas publicações menciona o termo saúde do solo em um contexto genérico, mas não exploram o conceito de saúde do solo de forma plena, como recentemente revelado em revisão de literatura conduzida por Simon et al. (2022).

Ao longo das últimas cinco décadas ocorreu uma evolução conceitual importante na Ciência do Solo, culminando no conceito de saúde do solo, o qual tem sido difundido de forma mais intensa na última década (Figura 3). Neste processo, houve uma transição gradativa do conceito de qualidade do solo para saúde do solo. No início dos anos 1970, o conceito de qualidade do solo estava atrelado basicamente ao conceito de aptidão agrícola, no qual, com base nas informações do meio físico (tipo de solo, relevo e condições climáticas) se estabelece a aptidão (potencial) da área para usos agrícolas. Nesta década, o termo "qualidade do solo" surge na literatura por Mausel (1971), que a definiu como a capacidade de um solo suportar altas produtividades de grãos sob condições de alto nível tecnológico de manejo. Assim, nas décadas seguintes, com o avanço da Revolução Verde e consequente uso de insumos sintéticos (fertilizantes e defensivos agrícolas), o foco da qualidade do solo ficou centrado exclusivamente no pilar de produtividade das culturas.

A década de 1990 foi marcada por avanços importantes no entendimento dos conceitos e métricas de qualidade do solo (NRC, 1993; DORAN et al., 1994; DORAN; JONES, 1996), incorporando também os pilares ambiental e de saúde humana ao conceito de qualidade do solo. Desta forma, qualidade do solo passa a ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade biológica (planta e animais), manter a qualidade

ambiental (ar e água) e promover a saúde humana e habitação (KARLEN et al., 1997). Este conceito tornou-se o mais difundido do mundo, e permanece útil e utilizado até os dias atuais.

Todavia, na última década, os avanços teóricos e tecnológicos (como as técnicas de biologia molecular) permitiram entender melhor o papel do componente biológico do solo. Atualmente, sabe-se que a grande maioria dos processos que ocorrem no solo é mediada de forma direta ou indireta pela biota do solo. Assim, ao compreender o solo como um ecossistema vivo, que abriga 25% da biodiversidade do planeta,

iniciou-se uma transição do termo qualidade para saúde do solo. Com isso, o solo, como uma entidade viva multifuncional que sustenta a vida, passa a ter direitos de ter sua saúde protegida e restaurada (LAL, 2019). Embora qualidade do solo e saúde do solo sejam termos muitas vezes utilizados como sinônimos, Lehmann et al. (2020) argumentam que o escopo da saúde do solo se estende além da saúde humana, para metas de sustentabilidade mais amplas, que incluem a saúde do planeta (por exemplo, perda de biodiversidade, contaminação de solo e água, mudanças climáticas, dentre outras), enquanto o escopo da qualidade do solo geralmente se concentra no ecossistema e em serviços referentes ao ser humano. Finalmente, saúde do solo é um conceito que facilita a comunicação e a conscientização da sociedade sobre a relevância dos solos saudáveis para a obtenção de plantas, animais, pessoas e ecossistemas mais saudáveis, gerando um planeta saudável.

Apesar de bastante útil e difundido, o conceito de saúde do solo ainda está em debate e, com isso, mantém-se em constante evolução (POWELSON, 2020; JANZEN et al., 2021; HARRIS et al., 2022).

3. SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

Em sistemas agrícolas, a saúde do solo pode ser definida como a "capacidade contínua de um solo de manter-se equilibrado sob o ponto de vista químico, físico e biológico, sustentando processos e funções que proporcionem um ambiente favorável para que as plantas expressem seu máximo potencial genético" (CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). Solos saudáveis apresentam maior teor de carbono e biodiversidade, favorecendo processos de retenção, ciclagem e mineralização de nutrientes, infiltração, condutividade hidráulica e retenção de água, aeração, agregação, supressão de pragas e doenças, os quais favorecem o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Portanto, plantas cultivadas em solos saudáveis tornam-se mais resistentes e resilientes a estresses bióticos e abióticos (ambientais), resultando em maior produtividade e estabilidade da produção ao longo do tempo (Figura 4). Desta forma, espera-se que haja um incremento de produtividade em solos saudáveis, comparados aos não saudáveis, tanto em anos que apresentam condições climáticas favoráveis quanto desfavoráveis (por exemplo, com ocorrência de estiagem). Todavia, as diferenças de produtividade são amplificadas nos anos com condições desfavoráveis, onde solos saudáveis sustentam condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, tais como: maior teor de matéria orgânica, maior retenção de água e nutrientes, maior atividade biológica e estrutura que permite maior crescimento radicular (Figura 4).

Essa teoria tem sido provada em diferentes culturas agrícolas e condições edafoclimáticas. Por exemplo, na safra de soja 2019/2020 ocorreram perdas importantes de produtividade no Rio Grande do Sul devido a uma estiagem prolongada. Para avaliar a resposta da soja à estiagem, Fiorin et al. (2020) avaliaram a diferença de produtividade da cultura em talhões com alta e baixa qualidade do sistema plantio direto em dezenas de propriedades rurais. Os autores concluíram que os talhões que apresentavam alta qualidade do plantio direto (adoção de rotação de culturas, plantas de cobertura, semeadura em contorno e correção do solo) e, consequentemente, solos mais saudáveis, produziram, em média, 13,7 sacas ha^{-1} a mais do que os talhões com baixa qualidade do sistema.

Cherubin et al. (2021) avaliaram 12 experimentos na Região Centro-Sul do Brasil, verificando que a remoção excessiva da palhada para a produção de bioenergia reduziu a saúde do solo e, por consequência, comprometeu a produtividade da cultura da cana. Em outro estudo realizado na China, Qiao et al. (2022) concluíram que solos de alta qualidade aumentaram a resistência das culturas (trigo, milho e arroz) à variabilidade climática, resultando em pro-

ductividade média mais alta ($10,3 \pm 6,7\%$) e maior estabilidade da produção (diminuindo a variabilidade em $15,6 \pm 14,4\%$). Portanto, fica evidente nos vários estudos que a saúde do solo é um pilar fundamental para sustentar as produtividades em anos adversos e proporcionar altas produtividades em anos favoráveis.

A saúde do solo é dinâmica, sendo influenciada pelo uso da terra e pelos sistemas agrícolas, principalmente pelo manejo. Em um ecossistema natural, tende a manter-se estável, alterando-se raramente, apenas como resultado de eventos extremos (como queimadas e deslizamentos). Com a remoção da vegetação natural para fins agrícolas, o equilíbrio do ecossistema é severamente alterado, e a saúde do solo flutuará conforme o novo uso for alterando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Por isso, a saúde do solo em sistemas agrícolas está relacionada com uma avaliação integrada de atributos (indicadores) químicos, físicos e biológicos, que sejam dinâmicos e sensíveis às alterações de manejo na camada superficial do solo (aproximadamente 0–30 cm).

A saúde do solo difere de outros conceitos, como o antigo conceito de qualidade do solo, relacionado apenas à produtividade das culturas, ou ainda ao conceito de ambiente de produção. A saúde do solo é relativa e relaciona-se aos atributos de cada solo individualmente. Propriedades intrínsecas ligadas aos cinco fatores de formação do solo (clima, organismos, relevo, material de origem e tempo) regem as tendências nos valores dos indicadores utilizados (KARLEN et al., 2001). Portanto, solos com características intrínsecas muito distintas apresentam tendências numéricas divergentes que não refletem uma comparação do estado de saúde atual do solo, mas sim da qualidade permanente do solo (Figura 5).

Cherubin et al. (2021) encontraram índices de saúde do solo consistentemente mais baixos em solos arenosos, comparados aos solos argilosos (Figura 6). Todavia, a diferença na comparação entre os tipos de solo não refletiu a mudança de manejo, mas os fatores intrínsecos dos solos. Para os indicadores selecionados nos estudos, solos arenosos tendem a ter valores que serão transformados em notas mais baixas. Por exemplo, solos arenosos têm densidade maior que a de solos argilosos, devido à menor porosidade intrapartículas e, consequentemente, maior densidade de partículas. Por esse motivo, a densidade dos solos argilosos varia de $0,9$ a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ e a de solos arenosos de $1,3$ a $1,8 \text{ g cm}^{-3}$.

No cálculo do índice geral, os valores de densidade serão transformados utilizando-se uma curva de interpretação conhecida como “menos é melhor”, que atribui notas mais altas aos menores valores

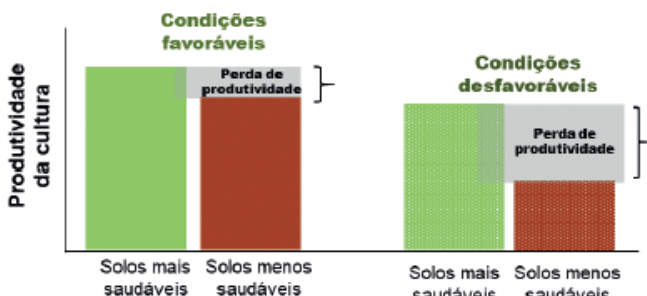


Figura 4. Representação esquemática do impacto da saúde do solo na produtividade das culturas.

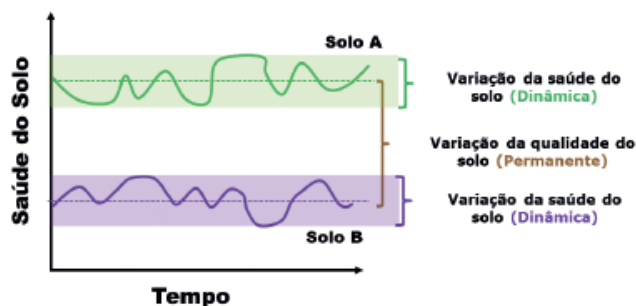


Figura 5. A variação na qualidade permanente dos solos é estática, resultante dos fatores de formação, enquanto a saúde do solo é dinâmica e resultante do uso e manejo.

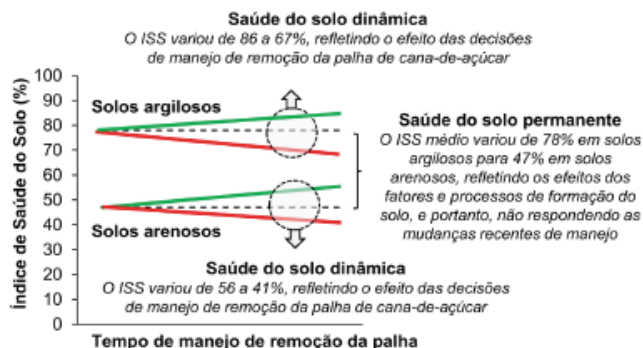


Figura 6. Variações de saúde do solo devido à remoção da palha da cana-de-açúcar, para solos argilosos e arenosos.

Fonte: Adaptada de Cherubin et al. (2021).

medidos. Nesse caso, os solos arenosos receberão notas mais baixas, porque os valores de densidade mais altos serão considerados “piores” que os dos solos argilosos, mais baixos. Somados aos outros indicadores utilizados (pH, P, K e carbono orgânico do solo), para três dos quais os solos arenosos também tendem a apresentar notas menores, as notas de densidade contribuirão para diminuir o valor do índice. Essa comparação é útil para demonstrar que solos arenosos são, no geral, mais vulneráveis, e devem ser manejados de forma apropriada, levando-se em conta suas propriedades intrínsecas. Todavia, quando se deseja avaliar isoladamente o efeito do manejo sobre a saúde do solo, a comparação mais adequada é entre solos com características semelhantes quanto a granulometria, espessura, clima e relevo. Dessa forma, é possível detectar a mudança na saúde, que é dinâmica, em vez dos efeitos dos fatores de formação, que são permanentes (CHERUBIN et al., 2021).

4. COMPONENTES DA SAÚDE DO SOLO – DO LOCAL AO GLOBAL

As variações de saúde do solo causadas por alterações do uso da terra e pelo manejo ocorrem devido a alterações simultâneas sobre os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos (KARLEN et al., 2001; CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). A definição de saúde do solo leva em conta que as propriedades do solo são, em sua maioria, inter-relacionadas. A porosidade do solo, por exemplo, é um aspecto físico que regula o comportamento hídrico do solo, mas também é habitat para os organismos responsáveis pela ciclagem de matéria orgânica e nutrientes (KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Os bioporos formados por membros da macrofauna, como as minhocas, são importantes para a percolação de água no solo e para o crescimento de raízes em camadas mais profundas, aumentando a quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas (TOMLIN et al., 1995; ATHMANN et al., 2013). O processo de formação de agregados envolve a aproximação física das partículas minerais do solo e depende da presença de elementos floculantes, como o cálcio, mas também de minerais, como os óxidos de ferro e alumínio, e do componente biológico do solo – matéria orgânica, microrganismos e raízes das plantas – para cimentação e manutenção de agregados estáveis (WUDDIVIRA; CAMPS-ROACH, 2007). Da mesma forma, as funções do solo são compostas por processos integrados que dependem simultaneamente das interações das propriedades físicas, químicas

e biológicas do solo (Figura 7). Portanto, o equilíbrio das propriedades físicas, químicas e biológicas sustenta a multifuncionalidade do solo.

As múltiplas funções do solo refletem seu status de ecossistema vivo, e, em um solo saudável, suas diferentes funções, embora estejam ocorrendo dinamicamente, devem refletir simultaneamente seu status relativo à saúde do solo. Um solo equilibrado é capaz de prover múltiplos serviços ecossistêmicos, definidos como benefícios que os ecossistemas fornecem aos seres humanos, de forma direta ou indireta (FISHER et al., 2009). De forma geral, os serviços ecossistêmicos são classificados como serviços de suporte, regulação, provisão e culturais (PEREIRA et al., 2018). Os solos são provedores de alimento, fibras, energia e matéria-prima para todos os ramos da atividade humana, desde a siderurgia até a medicina. Também dão suporte à maioria das atividades culturais humanas, além de preservarem

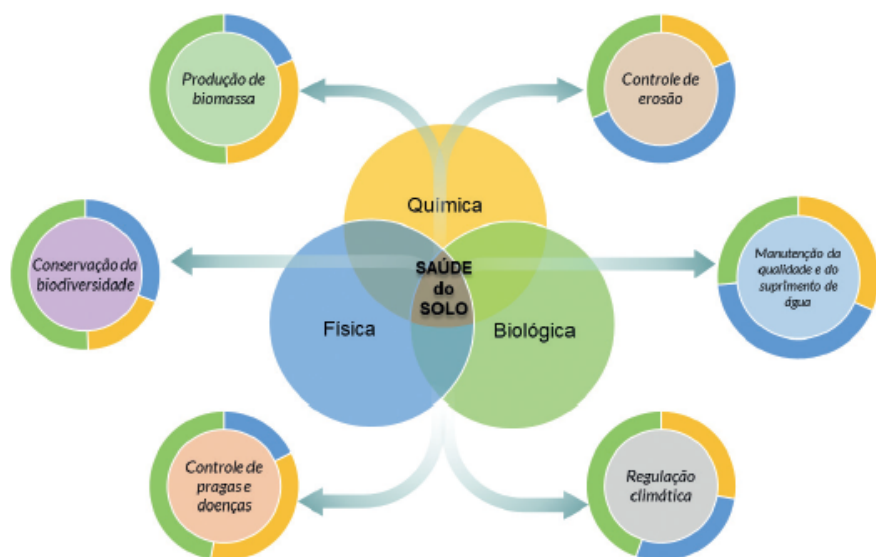


Figura 7. A saúde do solo reflete a capacidade do solo de exercer continuamente suas funções, e depende do equilíbrio entre suas propriedades físicas e químicas e da diversidade e abundância de organismos vivos.

o patrimônio geológico e arqueológico, conservando o passado do planeta e da humanidade (ADHIKARI; HARTMINK, 2016). E, por fim, os solos são essenciais para a regulação de processos que sustentam a vida das pessoas, e de todos os seres vivos, desde a escala microscópica até a planetária (BANWART et al., 2019). Como reservatório de biodiversidade e de carbono, os solos da Terra são responsáveis pela regulação de ciclos biológicos com atribuições tão distintas como controle da população de patógenos e regulação climática.

Sobre as múltiplas funções do solo saudável está apoiada a sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos que, por sua vez, são vitais para a sobrevivência e prosperidade da humanidade. Devido ao status do solo como ecossistema fundamental para a existência da humanidade, cresce sua importância nas agendas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS das Nações Unidas (2015-2030) (Figura 8). Além disso, a manutenção de solos saudáveis e a restauração de solos degradados são reconhecidos como objetivos fundamentais para grandes iniciativas, como Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas (2021-2030), Solos Vivos das Américas, Coalizão de Ação para a Saúde dos Solos (CA4SH), entre outras. Assim, os agricultores, como zeladores e guardiões de centenas de milhões de hectares de solo, devem ocupar um papel de protagonistas nesse desafio de resgate e preservação da saúde dos solos produtivos do planeta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Saúde do solo é a capacidade do solo de desempenhar suas funções, as quais são vitais para nossa sobrevivência na Terra. Desta forma, definir e implementar estratégias de preservação e restauração da saúde do solo é uma das agendas prioritárias para o século XXI. Saúde do solo é o principal pilar para produzirmos mais e de forma mais estável e sustentável ao longo dos anos. Portanto, o conceito de saúde do solo está diretamente relacionado aos novos modelos de agricultura, denominados de agricultura sustentável, agricultura de baixo carbono e/ou agricultura regenerativa. Desta forma, solos saudáveis são a peça-chave para o combate de grandes problemas globais, como insegurança alimentar e mudanças climáticas.

Na última década, a saúde do solo tem sido uma das áreas mais pesquisadas e discutidas dentro da Ciência do Solo. No Brasil, tem-se gerado avanços importantes nesta área, apesar do número ainda reduzido de grupos de pesquisas dedicados à temática. Portanto, trata-se de uma área muito promissora, tanto do ponto de vista de pesquisa, desenvolvimento e inovação, quanto da aplicação prática/comercial pelos produtores, consultores e empresas do agronegócio. Ainda há uma série de desafios a serem superados, como, por exemplo, o estabelecimento de protocolos de quantificação e monitoramento da saúde do solo no campo, incluindo amostragem de solo, indicadores e análises laboratoriais e ferramentas para interpretação dos resultados.

Funções do solo



Serviços ecossistêmicos ligados ao solo

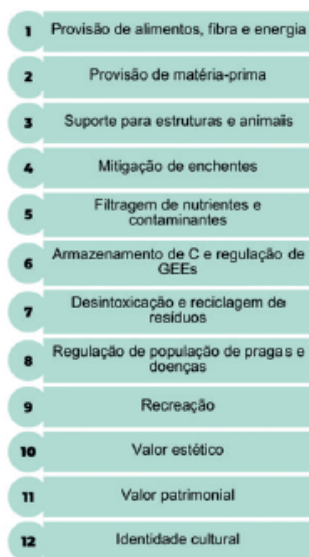


Figura 8. Saúde do solo e as interconexões entre funções do solo, provisão de serviços ecossistêmicos e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

Fonte: Adaptada de Smith et al. (2021).

Todavia, o conhecimento científico deve continuar pavimentando o caminho da inovação para que tenhamos soluções no mercado que contribuam efetivamente para melhoria da saúde do solo e, com isso, uma agricultura mais produtiva, resiliente e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services—A global review. *Geoderma*, v. 262, p. 101–111, 2016.
- ATHMANN, M.; KAUTZ, T.; PUDE, R.; KÖPKE, U. Root growth in biopores – evaluation with in situ endoscopy. *Plant and Soil*, v. 371, p. 179–190, 2013.
- BANWART, S. A.; NIKOLAIDIS, N. P.; ZHU, Y. G.; PEACOCK, C. L.; SPARKS, D. L. Soil functions: connecting earth's critical zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 47, p. 333–359, 2019.
- CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. Saúde do solo: Múltiplas perspectivas e percepções. 1. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. v. 1. 126 p.
- CHERUBIN, M. R. et al. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 163, e113315, 2021.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, 1994. 77 p.

- DORAN, J. W.; JONES, A. J. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 410 p.
- FIORIN, J.; WYZYKOWSKI, T.; FERNANDES, A.; CORASSA, G. Construindo Sistema Resilientes: a chave para o enfrentamento da estiagem. *ECR Soja RS 2019/2020. Ensaio de Cultivares em Rede*, n. 2, p. 48–50, 2020.

- FISHER, B.; TURNER, K. R.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, v. 68, n. 3, p. 643–653, 2009.

- FORTUNA, A. The soil biota. *Nature Education Knowledge*, v. 3, n. 10, p. 1, 2012.

- HARRIS, J.; EVANS, D. L.; MOONEY, S. J. A new theory for soil health. *European Journal of Soil Science*, v. 73, n. 4, e13292, 2022.

- JANZEN, H. H.; JANZEN, D. W.; GREGORICH, E. G. The 'soil health' metaphor: Illuminating or illusory? *Soil Biology and Biochemistry*, v. 159, e108167, 2021.

- KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; DORAN, J. W. Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, v. 74, p. 1–40, 2001.

- 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 (A guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 4–10, 1997.

KRAVCHENKO, A. N.; GUBER, A. K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes. *Geoderma*, v. 287, p. 31–39, 2017.

LAL, R. Rights-of-soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 74, n. 4, p. 81A-86A, 2019. doi:10.2489/jswc.74.4.81A

LEHMANN, J.; BOSSIO, D. A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RILLIG, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 10, p. 544–553, 2020.

MAUSEL, P. W. Soil quality in Illinois — an example of a soils geography resource analysis. *The Professional Geographer*, v. 23, n. 2, p. 127–136, 1971.

MONTANARELLA, L. et al. *Status of the world's soil resources* — Main Report. Rome: FAO, 2015. 607 p.

NRC. National Research Council. *Soil and water quality: An agenda for agriculture*. Washington, DC: National Academies Press; 1993. 542 p.

PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M.; BREVIK, E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 5, p. 7–13, 2018.

POWLSON, D. S. Soil health — Useful terminology for communication or meaningless concept? Or both? *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, v. 7, n. 3, p. 246–250, 2020.

QIAO, L. et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, v. 12, n. 6, p. 574–580, 2022.

SHEN, R. F.; TENG, Y. The frontier of soil science: Soil health. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 6–7, 2023.

SIMON, C. D. P. et al. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0210103, 2022.

SMITH, P. et al. Soil derived Nature's Contributions to People and their contribution to the UN Sustainable Development Goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 376, e20200185, 2021.

TOMLIN, A. D.; SHIPITALO, M. J.; EDWARDS, W. M.; PROTZ, R. Earthworms and their influence on soil structure and infiltration. *Earthworm Ecology and Biogeography in North America*, v. 33, p. 159–183, 1995.

WUDDIVIRA, M. N.; CAMPS-ROACH, G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, v. 58, n. 3, p. 722–727, 2007.

BALANÇO DE NUTRIENTES

(Cortesia temporária da NPCT)

O balanço de nutrientes nas culturas (BNC) é uma das ferramentas para avaliação do uso de fertilizantes na agricultura e representa a diferença entre a saída de nutrientes pela colheita (exportação) e sua entrada no sistema (adubação). Saldos negativos, nos quais a exportação excede a adubação, levam à diminuição da fertilidade do solo e, eventualmente, à redução da produtividade, uma vez que a disponibilidade de nutrientes cai abaixo dos níveis críticos. Saldos positivos geralmente estão associados ao aumento da fertilidade do solo e podem, eventualmente, representar um elevado risco de perda de nutrientes para o ambiente.

A NPCT, acreditando que a principal função do manejo nutricional é facilitar o equilíbrio entre exportações e adições de nutrientes em níveis que suportem o crescimento ideal das culturas e a mínima perda de nutrientes, desenvolveu esta ferramenta visando facilitar o acesso de agrônomos, consultores, produtores e técnicos às informações de exportação e balanço de nutrientes em 18 culturas cultivadas no Brasil.

