

didadas pelos indicadores: a) facilidade na mensuração e monitoramento; b) baixo custo; c) ser de fácil compreensão; d) permitir a integração entre os atributos do sistema; e) ser sensível às mudanças e tendências; f) confiabilidade; g) permitir a participação dos envolvidos (Mäser et al., 1999; Deponti et al., 2002; Marques et al., 2003).

Nesse contexto, surgiram ferramentas que propõem a integração de informações sobre sustentabilidade, como a *Framework for Evaluation of Sustainable Land Management* (FESLM) (Smyth et al., 1993), a *Pressure-State-Response* (PSR) (OECD, 1993); o método *Reflective and Participative Mapping of Sustainability* (IUCN–IDRC, 1995) e o *Marco para Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad* (Mesmis) (Mäser et al., 1999).

A metodologia Mesmis, intitulada em português “Marco para Avaliação de Sistemas de Manejo de Recursos Naturais Incorporando Indicadores de Sustentabilidade”, por estar inserida no contexto de agricultura sustentável e por permitir a avaliação da sustentabilidade no tempo (avaliação longitudinal) e de forma comparativa entre sistemas de manejo (avaliação transversal), tem sido amplamente utilizada.

Além disso, para Matos Filho (2004) o método Mesmis se baseia nas seguintes premissas básicas para a sustentabilidade: 1) a sustentabilidade para agroecossistemas considera os atributos de: (a) produtividade; (b) resiliência, confiabilidade e estabilidade; (c) adaptabilidade; (d) equidade; (e) autogestão; 2) a avaliação de sustentabilidade é válida, apenas, para situações definidas em um determinado espaço geográfico, sistema de manejo, contexto social e político, escala espacial (parcela, unidade de produção, comunidade, bacia hidrográfica), e em uma escala temporal; 3) a avaliação é uma atividade participativa, com perspectiva e trabalho multidisciplinar.

Essas características do método Mesmis o tornam um grande aliado nos estudos sobre os processos de avaliação da sustentabilidade, despontando como uma ferramenta para a reflexão crítica quanto aos processos de intervenção nos agroecossistemas.

## Manejo conservacionista e qualidade do solo

Clenio Nailto Pillon; Mariana Rockenbach de Ávila

O manejo do solo representa a combinação de todas as operações de preparo do solo, práticas culturais, calagem, adubação e outros tratamentos conduzidos ou aplicados ao solo, visando à produção das culturas (Souza et al., 2019).

O solo é um sistema vivo, complexo e, termodinamicamente aberto, com fluxos de energia e matéria entre os compartimentos solo e água, atmosfera, flora e fauna. A energia solar e, especialmente, o processo de fotossíntese, alimentam a maioria dos processos determinantes para a funcionalidade de um agroecossistema.

O solo é um recurso natural constituído de materiais minerais e orgânicos, resultantes da interação dos fatores de formação (clima, organismos vivos, material de origem e relevo) ao longo do tempo. Desempenha funções básicas, como: sustentar o crescimento das plantas e dos animais, armazenar e reter água, utilizar resíduos e suportar as obras da engenharia humana, em adição a outros serviços ecossistêmicos importantes. Porém, se manejado inadequadamente, contribuirá para a degradação do ecossistema (Streck et al., 2008; Meurer, 2010).

O sistema solo é constituído pela fase líquida, representada pela água armazenada num determinado momento; pela fase gasosa, da qual fazem parte oxigênio, gás carbônico, metano e outros; pela fase mineral, constituída por minerais e/ou rochas em diferentes estágios de alteração e com diferentes granulometrias (tamanhos de partícula); por uma fração orgânica, representada pela matéria orgânica (MO); pelos integrantes da fauna do solo, que são organismos vivos como ácaros, colêmbolos, térmitas, minhocas, etc. Nesse contexto, sistemas de complexas reações químicas, físicas e biológicas interagem entre si.

As práticas de manejo do solo afetam diretamente os processos biológicos e os fluxos entre os compartimentos. Dentre essas práticas, destacam-se: a) sistema de preparo do solo (preparo convencional, preparo reduzido ou cultivo mínimo e sistema plantio direto); b) sistema de culturas (pousio, queima de fitomassa, monocultivo de espécies de baixo aporte de fitomassa residual, rotação de culturas com diferentes níveis de aporte de fitomassa e até sistemas integrados de produção, como sistemas agroflorestais (SAFs) e sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

A associação de sistemas de preparo intensivo do solo com sistemas de cultura baseados em monocultura, queima ou baixo aporte de fitomassa residual geralmente caminham em direção à rápida degradação, enquanto que sistemas com baixo revolvimento do solo e elevado aporte de fitomassa anual tendem à sustentabilidade (Mielniczuk, 1999). Assim, sistemas conservacionistas de manejo do solo e da água determinam a melhoria de indicadores químicos, físicos e biológicos, com reflexos positivos sobre a qualidade do solo. Segundo Vezzani (2001), os indicadores da qualidade do solo tratam de propriedades emergentes que o solo somente passa a apresentar quando submetido a sistemas conservacionistas de manejo.

Além do mínimo revolvimento do solo, da constante adição de fitomassa ao solo, seja em superfície ou em profundidade via sistema radicular, a manutenção da fitomassa em superfície, a rotação de culturas e de “raízes”, o cultivo em nível e as práticas de contenção da enxurrada se constituem pilares importantes para os sistemas conservacionistas de manejo do solo e da água. A associação desse conjunto de boas práticas agropecuárias (BPAs) relacionadas ao manejo do solo contribui para o aumento da eficiência produtiva, bem como redução de custos, balanços ambientais favoráveis e sustentabilidade do agroecossistema.

A matéria orgânica (MO) do solo constitui-se em um dos principais indicadores da qualidade do solo e, por consequência, da qualidade dos sistemas de manejo, pois reflete diretamente os efeitos da ação antrópica sobre os agroecossistemas. A MO do solo refere-se ao material orgânico total, incluindo os resíduos identificáveis de plantas (recursos primários), os resíduos de animais e microrganismos (recursos secundários), a MO dissolvida, substâncias liberadas por raízes de plantas, como gomas e mucilagens, e substâncias húmicas (SHs) de estrutura mais complexa, como os ácidos húmicos e a humina.

A MO do solo apresenta um papel importante no ciclo do carbono do planeta e é o segundo maior reservatório de carbono (C) do mundo, desconsiderando-se as reservas de combustíveis fósseis. Enquanto os estoques de C na atmosfera atingem 750 Pg (1 Pg=1015 g) e o C armazenado na vegetação está ao redor de 550 Pg, a MO do solo armazena 1.500 Pg de C. A variação no estoque de C no solo ( $dC/dt$ ) depende da adição ( $K_1A$ ) e da perda ( $K_2C$ ) anual de carbono orgânico do solo, onde  $K_1$  é o coeficiente iso-húmico e representa a proporção do carbono adicionado ao solo pelas plantas que é incorporado na MO do solo no prazo de um ano; e  $K_2$  a taxa anual de decomposição da MO do solo (BAYER et al., 2019). Matematicamente e de forma simplificada, essa dinâmica pode ser expressa pela seguinte equação:

$$dC/dt = K_1A - K_2C$$

Sistemas de manejo com elevados aportes de fitomassa residual (A), associados a uma baixa taxa de decomposição ( $K_2$ ), permitem uma condição de estabilidade no conteúdo de carbono orgânico ao longo do tempo ( $K_1A = K_2C$ ) ou um balanço positivo de entradas em relação às perdas ( $K_1A > K_2C$ ). Assim, a adoção de sistemas intensivos em culturas com elevado aporte de fitomassa e de nitrogênio e de baixo revolvimento do solo (sistema plantio direto) favorecem o acúmulo de MO no solo ao longo do tempo, com benefícios ambientais importantes.

A dinâmica da MO do solo abrange fluxos de matéria e energia entre compartimentos da terra (atmosfera, vegetação, solo, água e organismos) e processos físico-químicos e biológicos, os quais reduzem e oxidam compostos orgânicos à medida que as reações se processam. Na atmosfera, o  $CO_2$  encontra-se na forma mais oxidada. Por meio do processo de fotossíntese, as plantas absorvem o  $CO_2$  da atmosfera e incorporam o

C em seus tecidos vegetais, os quais contêm, em média, 40% desse elemento na matéria seca. Parte desse C é incorporado ao solo durante o período de crescimento dos vegetais através da liberação de exsudatos radiculares. O C presente na fitomassa residual é depositado sobre o solo (parte aérea) ou no seu interior pelas raízes das plantas, quando da sua senescência ou morte (Pillon et al., 2004).

Quando a fitomassa residual é depositada no solo, esse sofre inicialmente a ação da fauna e, posteriormente, dos microrganismos decompositores que utilizam os compostos orgânicos presentes nos resíduos como fonte de C e energia para seu metabolismo. A oxidação desses substratos na cadeia respiratória dos microrganismos resulta em perda de grande parte do C na forma de  $\text{CO}_2$ , que dessa forma retorna à atmosfera, sendo que, em média apenas cerca de 20% permanece na MO do solo (Pillon, 2006).

Ao mesmo tempo, especialmente quando a adição de fitomassa residual ao solo é pequena, como nos sistemas que apresentam pousio de inverno e/ou de verão, os microrganismos do solo, para sua sobrevivência, utilizam parte do C armazenado na MO como fonte de C e de energia. Nesse processo, uma porcentagem do C é oxidada, liberando  $\text{CO}_2$  e água, constituindo a taxa básica de mineralização anual da MO do solo. Essa taxa é maior em solos arenosos (média de 5% ao ano) do que em argilosos (média de 2% a 3% ao ano) (dados de regiões subtropicais), e maior em regiões de clima quente e úmido do que em regiões de clima frio e/ou seco.

Como resultado da ação microbiana sobre o C adicionado ou já existente no solo, ocorrem fluxos de C dos compartimentos mais lábeis (resíduos culturais em decomposição) para os compartimentos mais estáveis da MO do solo (MO associada à fração mineral ou frações de maior grau de humificação) (Pillon et al., 2004; Mielniczuk, 2008).

A quantidade de C adicionada ao solo em um agroecossistema depende das condições climáticas e da produtividade biológica das plantas utilizadas em cada sistema de cultura. A fertilidade do solo e, especialmente, a disponibilidade de nitrogênio (N) afetam diretamente a taxa de adição de fitomassa e, conseqüentemente, a magnitude do balanço entre entradas e perdas de C e N no sistema. Enquanto as adições de C são diretamente dependentes da taxa de adição de fitomassa residual ao solo, as perdas ocorrem principalmente pela oxidação microbiana dessa fitomassa e da MO do solo, pela lixiviação de compostos orgânicos solúveis, quando esses são transportados pela água da chuva para camadas mais profundas do solo e pela erosão.

A quantidade e a qualidade de adições e perdas de C no solo determinam a direção rumo à sua sustentabilidade ou à sua degradação. Ambas adição e perda de C do solo dependem direta ou indiretamente do seu manejo. Quando as taxas de adição e perda se equivalem, o sistema atinge um estado estável. Geralmente, o revolvimento do solo potencializa as perdas por erosão e oxidação biológica da sua MO, especialmente em ambiente tropical e subtropical. Sob altas temperaturas e umidade, o mínimo revolvimento do solo é determinante para o acúmulo de C e N.

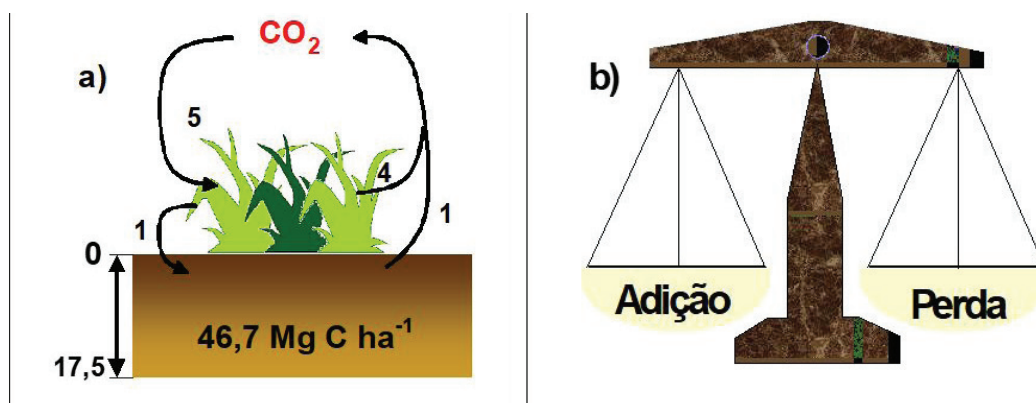
Dependendo do manejo adotado, o solo pode funcionar como um reservatório de C (nesse caso, ocorre aumento da MO e da sua qualidade) ou como fonte de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Nas últimas décadas, a concentração de C atmosférico tem aumentado, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e pela oxidação da MO. A atividade agrícola tem contribuído com 1/3 da liberação total de  $\text{CO}_2$ , o qual representa aproximadamente 50% dos gases que compõem o efeito estufa.

A capacidade de armazenamento de C pelo solo depende do clima, do tipo de solo (mineralogia, textura), do tipo de vegetação e do manejo do solo. O balanço entre as adições e a taxa de perda de C do sistema (Figura 1) determina se o solo tenderá para o aumento, para a manutenção ou para o declínio do conteúdo de MO.

A avaliação ou o monitoramento da MO do solo no tempo ou a comparação do conteúdo de MO de um sistema a uma determinada condição de referência (por exemplo, uma área de mata nativa ou de campo nativo) é um indicador da qualidade do solo, já que a MO é extremamente sensível ao seu manejo e às ações antrópicas.

Especialmente em áreas degradadas e quando o sistema de culturas não inclui a utilização de plantas leguminosas, a disponibilidade de N é determinante para potencializar a produção de biomassa vegetal e, conse-

quentemente, para definir se determinado manejo do solo poderá conduzir o sistema à sustentabilidade ou à degradação. Lovato et al. (2000) avaliaram o efeito de sistemas de cultura, métodos de preparo do solo e adição de N mineral ao milho sobre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) de um Argissolo Vermelho após 13 anos de cultivo. Comparado ao conteúdo de COT original do solo da área experimental ( $32,55 \text{ Mg ha}^{-1}$  na camada 0-17,5 cm), o sistema aveia/milho sob plantio direto e sem adição de N mineral manteve o COT em estado estável ( $32,60 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), após 13 anos. No entanto, a adição anual de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N ao milho propiciou acúmulo adicional de  $2,25 \text{ Mg ha}^{-1}$  de COT no mesmo período, o que determinou um sequestro adicional de  $8,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  atmosférico.



**Figura 1.** (a) Fluxos de C ( $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e conteúdo de carbono orgânico total para a camada de 0,0-17,5 cm de um Argissolo Vermelho sob campo nativo com  $220 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (sistema natural), e (b) representação esquemática do “estado estável” do conteúdo de carbono orgânico total do solo no sistema natural ao longo do tempo. Adaptado de Pillon (2006).

A sustentabilidade de um determinado agroecossistema depende da ação de fatores externos, como a ocorrência de fenômenos naturais, relacionados principalmente ao clima, e do manejo de fatores inerentes ao sistema, os quais podem sofrer alterações por conta da modificação no manejo do solo, da água, da vegetação e da biodiversidade. Dentre as práticas de manejo do solo, o grau de revolvimento, o manejo da vegetação e da fertilidade são os fatores mais determinantes da sua qualidade, sendo condição indispensável para a busca da sustentabilidade.

O conceito de qualidade do solo é centrado na sua capacidade de atender a funções específicas. Para Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, sustentando a produtividade de plantas e de animais, mantendo ou aumentando a qualidade do ar e da água, promovendo a saúde das plantas, dos animais e dos homens. Adicionalmente, segundo Carter (2002), a qualidade do solo tem duas partes: uma intrínseca, a qual se refere à capacidade inerente do solo para sustentar o crescimento das culturas, e outra dinâmica, que pode ser influenciada pela ação do homem.

Atributos inerentes à qualidade do solo, como mineralogia e distribuição do tamanho de partículas, são vistos como praticamente estáticos e mostram poucas mudanças no tempo. Entretanto, atributos dinâmicos da qualidade do solo englobam aquelas propriedades que podem sofrer alterações em períodos de tempo relativamente curtos, como o conteúdo de MO, frações lábeis da MO, agregação e macroporosidade, em resposta ao manejo e uso antrópico, e fortemente influenciadas por práticas agronômicas (Carter, 2002).

Estudos realizados em solos sob condição de sequeiro têm considerado a MO como um atributo chave de suas qualidades (Doran; Parkin, 1994; Mielniczuk, 2008). A estreita relação entre as alterações no conteúdo de MO do solo de regiões tropicais e subtropicais com outros atributos, também indicadores de melhoria de qualidade, confirma que a dinâmica da MO no ambiente é relacionada com diversas propriedades químicas, físicas e biológicas, fundamentais para que um solo de qualidade exerça suas funções básicas.

Vários estudos têm tentado identificar o conjunto de atributos ou propriedades do solo que possam servir como indicadores de sua qualidade. Dentre os indicadores químicos, a alteração no conteúdo da MO, promo-

vida por sistemas de manejo, tem sido frequentemente citada como um indicador de qualidade do solo e dos sistemas de manejo utilizados. Alterações no conteúdo de MO se processam em médio e longo prazos, fato que requer monitoramento dos parâmetros indicadores ao longo do tempo.

Sistemas conservacionistas de manejo do solo e da água são baseados em um conjunto de boas práticas agrícolas, mas fundamentalmente em dois princípios básicos: o mínimo revolvimento do solo e alto aporte de fitomassa residual ao solo. Com base nesses princípios, há melhoria em diversos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo e intensificação de processos biológicos, cujos reflexos se manifestam no aumento da eficiência produtiva do agroecossistema.

A utilização de sistemas de manejo que contemplem sistemas de culturas com alta adição de fitomassa residual ao solo (uso de plantas de cobertura de inverno e de verão, incluindo plantas leguminosas ou uso de dejetos animais) e o revolvimento mínimo do solo (uso do sistema plantio direto ou cultivo mínimo) propiciam a manutenção ou incremento do seu conteúdo de MO do solo ao longo do tempo, o aumento da estabilidade e percentual de agregados de maior tamanho, aumento da aeração e porosidade do solo, taxa de infiltração de água, capacidade de troca de cátions, dentre outros.

Para manter ou até mesmo aumentar a MO do solo, é fundamental adotar as seguintes recomendações:

- 1) jamais queimar a fitomassa residual mantida na superfície do solo;
- 2) realizar periodicamente a análise da fertilidade do solo e planejar o manejo da propriedade com o auxílio de um técnico, adotando programas de adubação compatíveis com os princípios da manutenção e da melhoria gradativa de sua fertilidade;
- 3) reduzir, ao máximo, a ocorrência de erosão hídrica/eólica do solo, executando, entre outros procedimentos, programas de terraceamento e de manejo de entreterraços com culturas de cobertura e realizando descompactação mecânica e/ou biológica do solo.

Práticas como a ensilagem total determinam a retirada de toda fitomassa da parte aérea, reduzindo drasticamente a quantidade de C aportada ao solo. Nesse caso, é importante que, entre outras práticas, sejam adotadas as seguintes estratégias: a) somente efetuar a ensilagem numa mesma área, uma única vez ao ano; b) caso ensilar uma cultura de verão, incluir uma cultura para produção de fitomassa como cobertura do solo no período invernal, que contenha, de preferência, plantas leguminosas; c) em caso de confinamento, que os dejetos animais, devidamente estabilizados, retornem à área ensilada, visando a reciclagem de nutrientes.

## Água para a vida de qualidade

Lilian Winckler

A água sempre foi sinônimo de vida e prosperidade. Todas as grandes civilizações surgiram ao longo de rios, onde podiam desenvolver sua agricultura além de utilizá-los como meio de transporte. A qualidade de água disponível está tão ligada ao desenvolvimento de uma região ou país que a ONU declarou a década de 2018 a 2028 como a “Década Internacional para Ação: Água para o Desenvolvimento Sustentável”, que começou no Dia Mundial da Água, em 22 de março de 2018, e finaliza no Dia Mundial da Água em 22 de março de 2028.

Os seres vivos têm na água um dos componentes indispensáveis. Para um humano recém-nascido, a composição corporal tem cerca de 80% de água, enquanto em um adulto essa composição é menor, mas ainda se mantém em cerca de 60%. Ela está presente nas células, faz parte do sangue e é fundamental para o transporte de nutrientes. Isso faz com que a água seja fundamental para a manutenção da vida bem como das funções fisiológicas. Todos os organismos vivos necessitam de água para manter as suas funções vitais.

A disponibilidade de água na terra é de 1.386 milhões de km<sup>3</sup>, sendo apenas 2,5% de água doce. Dessa, grande parte (1,8%) está retida nas geleiras, não estando disponível para uso humano. Sendo assim, 0,7% dessa água doce estaria disponível, mas ainda assim, dispersa em diversos compartimentos. Do total de água doce teoricamente disponível, resulta que: