

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura e Pecuária***

SAÚDE DO SOLO

**EM AGROECOSSISTEMAS DA ZONA DE
TRANSIÇÃO CERRADO-CAATINGA**

***Luiz Fernando Carvalho Leite
Henrique Antunes de Souza***

Editores técnicos

***Embrapa
Brasília, DF
2026***

Embrapa
Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo e editoração
Embrapa Meio-Norte
Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01, 64008-780 Teresina, PI
www.embrapa.br/meio-norte

Comitê Local de Publicações
Presidente: *José Almeida Pereira*
Secretária-executiva: *Edna Maria Sousa Lima*
Membros: *Orlane da Silva Maia, Maria Eugênia Ribeiro, Kaesel Jackson Damasceno e Silva, Lígia Maria Rolim Bandeira, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta Barreto, Carlos Antônio Ferreira de Sousa, Carlos César Pereira Nogueira, Francisco de Brito Melo, Ricardo Montalvan Del Aguila, Robério dos Santos Sobreira, Sérgio Luiz de Oliveira Vilela e Valdemir Queiroz de Oliveira*

Edição executiva: *Lígia Maria Rolim Bandeira*
Revisão de texto: *Francisco de Assis David da Silva*
Foto da capa: *Luiz Fernando Carvalho Leite*
Diagramação: *Jorimá Marques Ferreira*

1ª edição
Publicação digital (2026): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).
Embrapa Meio-Norte

Saúde do solo em agroecossistemas da zona de transição Cerrado-Caatinga / Luiz Fernando Carvalho Leite, Henrique Antunes de Souza, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2026.
PDF (365 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-171-2

1. Agricultura Sustentável. 2. Tratamento do Solo 3. Manejo do Solo 4. Agroecossistema. 5. Cerrado. 6. Caatinga. I. Leite, Luiz Fernando Carvalho. II. Souza, Henrique Antunes de. III. Embrapa Meio-Norte.

Orlane da Silva Maia (CRB-3/915)

CDD (21. ed.) 631.45
© 2026 Embrapa



Capítulo 9

Princípios de saúde do solo aplicados aos sistemas agrícolas do Meio-Norte

*Luiz Fernando Carvalho Leite
Maria Laiane do Nascimento Silva
Bruna de Freitas Iwata
Francisco das Chagas Oliveira
Ivana Machado Fonseca*

Introdução

Solos saudáveis desempenham papel fundamental na produção de alimentos e regulação ambiental, como infiltração e disponibilização de água para os seres vivos, na ciclagem de nutrientes e na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, com a intensificação da agricultura, principalmente a partir da década de 1970, processos de degradação como a erosão passaram a comprometer a sustentabilidade da produção agrícola, com reflexos negativos sobre a oferta dos serviços ambientais. Esse cenário fortaleceu a necessidade de se considerar o solo sob perspectiva multifuncional e visão sistêmica, considerando-se suas funções, processos e propriedades.

Sob essa nova abordagem, cada vez mais, tem-se buscado estabelecer modelos de produção voltados para a intensificação sustentável da agricultura, tendo como base a melhoria ou a manutenção da saúde do solo, garantindo a produção de alimentos, de fibras, de energia e a provisão de serviços ambientais. Diante dessa necessidade, a agricultura conservacionista e mais recentemente a agricultura rege-

nerativa, concebidas sob princípios das soluções baseadas na natureza, têm-se tornado importantes estratégias para garantir a produção agrícola, evitar a degradação do solo e permitir a manutenção dos ciclos ecológicos em que o solo está envolvido.

A região Meio-Norte do Brasil apresenta imenso potencial de produção de alimentos em seus agroecossistemas únicos. No entanto, a fragilidade de algumas classes de solos, principalmente em relação à estrutura (caso do Latossolo Amarelo do leste maranhense) integrada à adoção de sistemas convencionais, com preparo excessivo do solo e baixo aporte de resíduos culturais, causando compactação e perda de matéria orgânica, tem diminuído a produtividade e gerado complexos problemas ambientais. Assim, este capítulo tem por objetivo apresentar uma abordagem conceitual sobre a saúde do solo e seus indicadores, a conexão entre solos saudáveis e a agricultura sustentável e os principais sistemas agrícolas que promovem a saúde do solo no Meio-Norte do Brasil.

Histórico e conceitos de saúde do solo

Com a Revolução Verde, a partir da segunda metade do século XX, a produção agrícola mundial praticamente quadruplicou, consolidando um modelo produtivo intensivo no uso de tecnologias e dos recursos naturais (Toor et al., 2021). Por conta da alta intensidade de cultivo e, principalmente, pela não adoção de práticas conservacionistas, vários impactos negativos sobre o solo passaram a ser observados, como a elevação das taxas de perda de solo por erosão hídrica, especialmente em áreas onde o solo era excessivamente revolvido por implementos agrícolas, e a diminuição dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) e da biodiversidade (Silva et al., 2023).

Assim, com objetivo de interromper o avanço significativo do processo de degradação das terras agrícolas, tecnologias consideradas conservacionistas, caracterizadas pelo não revolvimento das camadas do solo e manutenção da cobertura vegetal, passaram a ser recomendadas em todo o mundo. No Brasil, a implementação do sistema plantio direto na palha, na década de 1970, representou a mais importante estratégia para contenção da erosão dos solos e aumen-

to dos teores de matéria orgânica. A partir disso, a premissa de que era necessário conservar para produzir começou a ser difundida e passou-se a dar mais importância para a conservação dos recursos naturais e para a funcionalidade do agroecossistema como um todo (Jayaraman; Dalal, 2022).

Embora os princípios conservacionistas tenham-se ampliado no Brasil e no mundo, apenas a partir da década de 1990, os termos “qualidade do solo” e “saúde do solo” passaram a ser mais difundidos, referenciando uma visão holística do solo, em que os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo estão interligados às funções, processos e propriedades, promovendo a oferta dos serviços ambientais (Hou, 2023).

Entende-se por qualidade do solo a capacidade do solo de realizar funções específicas, como produção agropecuária, refletida pela combinação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Algumas dessas propriedades são inerentes ao solo, como a textura e a composição mineral; outras podem ser alteradas pelo manejo, como a estrutura e o teor de matéria orgânica. O conceito de saúde do solo passa a levar em consideração os atributos ecológicos do solo que têm implicações para além da sua qualidade ou capacidade para uma atividade específica. Esses atributos são, principalmente, aqueles associados à biodiversidade e à estrutura base para a cadeia alimentar que se estabelece nesse ambiente (Lehmann et al., 2020). De fato, nas últimas duas décadas, o foco mudou da produtividade, exclusivamente, para uma definição que abrange o papel mais amplo do solo na dinâmica dos agroecossistemas.

A saúde do solo está diretamente relacionada à saúde humana e à segurança nutricional. Um exemplo importante dessa conexão é o papel do solo na oferta de nutrientes essenciais para a nossa alimentação. Atualmente, aproximadamente 50% dos principais solos agrícolas do mundo apresentam níveis insuficientes de zinco (Zn). Essa deficiência contribui para que cerca de 1,1 bilhão de pessoas sofram de deficiência alimentar desse elemento. A maioria das regiões no mundo onde a deficiência de Zn em humanos é de maior preocupação (incluindo o sul da Ásia e África) apresenta também baixas concentrações de Zn disponível para plantas no solo. Dezesete micro-

nutrientes (Fe, Zn, Cu, Mo, I, F, B, Se, Mu, Ni, Cr, Si, As, Li, Sn, V e Co) e oito macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na, S e Cl) podem ser considerados essenciais à saúde humana e todos eles são fornecidos pelo solo (Kopittke et al., 2024). Isso fortalece a premissa de que a saúde do solo, das plantas, dos animais e das pessoas, em última análise, compõe a saúde única (one health), um conceito estabelecido pela ONU sob uma perspectiva colaborativa, multissetorial e transdisciplinar (FAO, 2022a).

Um solo saudável contribui para a estabilidade e sustentabilidade dos ecossistemas terrestres, bem como para sua resiliência diante de desafios ambientais, como aqueles decorrentes das mudanças climáticas (FAO, 2015). A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente imperativo para a saúde do solo, pois aumenta a capacidade de armazenamento de água, melhora a estrutura do solo e promove a atividade de microrganismos benéficos que auxiliam na ciclagem de nutrientes e no controle de pragas e doenças (Gliessman, 2015). Assim, para ter solos saudáveis, é essencial adotar práticas ou processos que estejam baseados no incremento dos teores de MOS, como o emprego de compostos orgânicos, a permanência dos resíduos culturais, a redução do preparo mecânico do solo e o aumento da diversidade de plantas no tempo e no espaço (Congreves et al., 2015; Khangura et al., 2023). Além disso, o gerenciamento das propriedades físico-químicas do solo para a produção vegetal deve considerar as interações entre as plantas e as comunidades microbianas do solo em torno das raízes para alcançar um equilíbrio entre os fatores bióticos e abióticos do solo (Chaparro et al., 2012).

A qualidade e a saúde do solo se tornaram temas centrais para pesquisadores e para definição de políticas públicas, principalmente a partir de 2010, devido ao aumento das pressões associadas às mudanças climáticas e à necessidade de se desenvolverem modelos de agricultura sustentável (Hou, 2023). Nos últimos anos, a saúde do solo se tornou protagonista em fóruns globais como a *Agenda 2030*, em especial, por meio da interface com os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) (Hou, 2023).

Em 2012, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) liderou a criação da Aliança Global pelo Solo (Global Soil Partnership - GSP). O GSP é um mecanismo reconhecido mundialmente, estabelecido com a missão de posicionar os solos na Agenda Global e estabelecer a saúde do solo como componente chave para a segurança alimentar, adaptação e mitigação das alterações climáticas para o desenvolvimento sustentável de modo geral. Em 2019, novo quadro de ação do GSP foi estabelecido para 2022–2030, centrado no seguinte tema: “Solos saudáveis para uma vida saudável: da promoção à consolidação do manejo sustentável do solo” (FAO, 2022b).

Outra ação internacional, liderada pela França, para promover a conservação e a saúde do solo é a Iniciativa “4 por 1.000”, que consiste em uma aliança de atores voluntários no âmbito do Plano de Ação Lima-Paris (LPAA), baseada no fato de que uma taxa de crescimento anual do estoque de carbono nos solos de 4 por 1.000 permitiria frear o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Essa taxa de crescimento não é uma meta normativa para cada país, no entanto, pretende ilustrar que um aumento, mesmo discreto, do estoque de carbono dos solos agrícolas com pastagens e florestas é uma estratégia indispensável para melhorar a fertilidade dos solos e a produção agrícola e limitar o aumento da temperatura global. Na América, o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA) também lançou o programa “Solos Vivos das Américas” em 2021, com o objetivo de contribuir para a saúde dos solos, promover boas práticas de manejo da terra e incentivos para transformar os sistemas agrícolas em ecossistemas que acumulem mais carbono nos solos.

No Brasil, a saúde do solo está em uma interface com o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020-2030), ou em sua forma curta, Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - ABC+. É uma agenda estratégica nacional do governo brasileiro que dá continuidade à política setorial para enfrentamento à mudança do clima no setor agropecuário, com claros reflexos sobre a saúde dos solos. O ABC+ será executado de 2020 a 2030, com o intuito de consolidar a agropecuária nacional alicerçada sobre sistemas sustentáveis, resilientes e produtivos, como soluções de adaptação e mitigação embasadas em ciência (Brasil, 2023).

Indicadores de saúde do solo

A seleção de indicadores é o primeiro passo para a avaliação da saúde do solo. Os indicadores devem ser essenciais ao funcionamento do solo, sensíveis ao manejo e com baixo custo de medição. Se os indicadores responderem às mudanças muito lentamente, têm alta variabilidade espacial ou temporal ou, de outra forma, não respondem ao manejo, então não podem fornecer informações sobre se as práticas adotadas estão influenciando a saúde do solo. Existe vasta literatura que descreve a sensibilidade dos indicadores de saúde do solo ao manejo na camada superficial (<30 cm), especialmente C orgânico do solo. No entanto, há que se considerarem variações na profundidade da amostragem, na sazonalidade e nos métodos laboratoriais utilizados (Liptzin, 2022).

Em alguns estudos, tem-se reportado que o processo de seleção de indicadores de saúde do solo deve considerar quatro características, construídas de forma integrada: relevância, sensibilidade, validade, viabilidade e interpretabilidade (Figura 1) (Silva et al., 2023).

Em termos operacionais, os indicadores de saúde do solo podem ser classificados como físico-químicos, mais proximamente relacionados ao rendimento das culturas, e biológicos, predominantemente associados à biodiversidade do solo, com todos eles, direta ou indiretamente, ligados à matéria orgânica do solo (Lehmann et al., 2020; Baveye, 2021). Indicadores químicos de saúde do solo estão correlacionados com a capacidade do solo de fornecer nutrientes para o crescimento das plantas e de reter elementos químicos ou compostos prejudiciais ao meio ambiente. O pH do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), a matéria orgânica e os teores de nutrientes são os principais atributos químicos utilizados para avaliar a saúde do solo, especialmente quando se considera a capacidade do solo para suportar o crescimento das culturas agrícolas. Os indicadores químicos podem ser correlacionados com o rendimento das culturas e melhorados por meio de práticas como calagem e/ou adubação. Além disso, também podem ser úteis ao considerar a capacidade do solo para sustentar florestas, mantendo a ciclagem de nutrientes, a biomassa vegetal e a matéria orgânica (Cardoso et al., 2013).

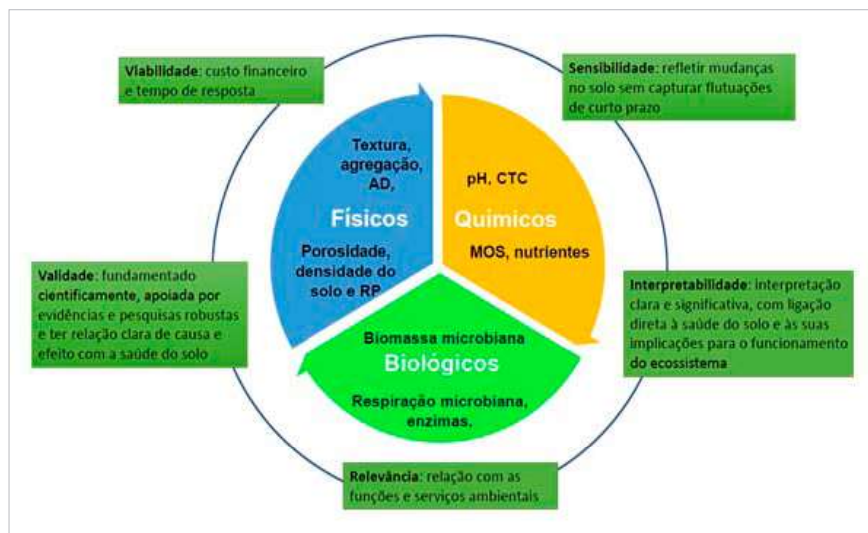


Figura 1. Critérios e exemplos de indicadores físicos, químicos e biológicos do solo utilizados para avaliar a saúde do solo em agroecossistemas.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2023).

Entre os diversos atributos químicos, o pH do solo é um indicador chave da saúde do solo porque se correlaciona diretamente com a disponibilidade/solubilidade dos nutrientes e também afeta a atividade microbiana. Assim, a avaliação do pH permite prever o potencial de disponibilidade de nutrientes num determinado sistema de produção (Sousa et al., 2007). Contudo, na vegetação nativa, especialmente em regiões tropicais, o pH varia em uma faixa muito ácida (até <3,5) e os nutrientes, especialmente o fósforo, são escassos. No entanto, o ecossistema funciona adequadamente, desempenhando seu papel ambiental. O carbono orgânico do solo também é um componente essencial da fertilidade do solo e deve ser considerado nas avaliações da saúde do solo, especialmente em condições tropicais, pois interage com as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e afeta importantes processos funcionais do solo, como o armazenamento de nutrientes, principalmente nitrogênio, a capacidade de retenção de água, a estabilidade dos agregados, e afeta a atividade microbiana (Cardoso et al., 2013).

Os indicadores físicos estão relacionados com a organização estrutural do solo, definindo diversos processos importantes, como infiltração, movimentação, retenção e percolação da água no solo, e os fluxos de gases e calor (Figura 2), essenciais ao funcionamento do ecossistema, assim como para o adequado crescimento das plantas cultivadas.

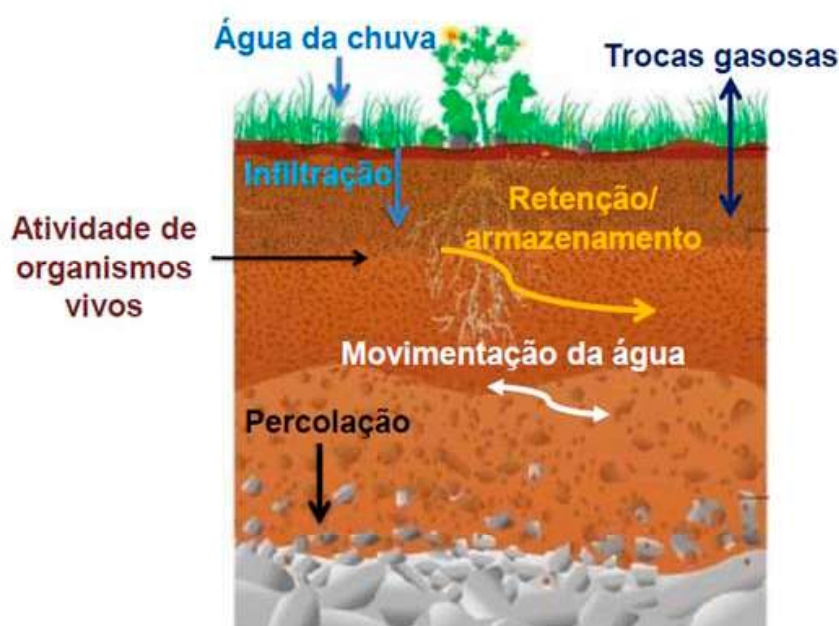


Figura 2. Processos físicos que acontecem no solo importantes para a regulação do ecossistema de modo geral.

Destacam-se, como principais indicadores físicos da saúde do solo, a textura, a agregação, o conteúdo de água, a porosidade, a densidade e a resistência do solo à penetração das raízes. Em geral, um solo é considerado fisicamente pobre, quando apresenta baixas taxas de infiltração de água, elevado escoamento superficial, baixa coesão, baixa aeração e densidade radicular e dificuldade de mecanização (Dexter, 2004). Por mais que a textura do solo não seja facilmente modificada com o manejo do solo, é um fator importante que afeta a organização estrutural e as propriedades químicas do solo, uma vez que a predominância de determinada fração mineral pode influenciar o balanço das cargas elétricas e a distribuição

do tamanho dos poros e, por sua vez, a dinâmica da água, de gases e de calor no solo. Por outro lado, a densidade do solo, que é a relação entre a massa de solo e o volume ocupado por ele, é facilmente alterada pelo manejo das áreas, indicando se o solo está compactado ou não. Nesse caso, os maiores teores de MOS contribuem para reduzir a densidade do solo devido a sua baixa densidade específica, além de melhorar a agregação das partículas do solo. Como resultado, há aumento da macroporosidade e melhoria da permeabilidade do solo à água, ao ar e às raízes. Os agregados do solo, resultantes da interação entre as partículas do solo, matéria orgânica e organismos vivos, afetam a aeração, a permeabilidade, a ciclagem de nutrientes e servem como refúgio para microrganismos e fauna do solo. A matéria orgânica ajuda a dar estabilidade à estrutura física do solo e conseqüentemente aos processos hidrológicos (erosão, drenagem, escoamento superficial e infiltração). Além disso, é fundamental para a retenção de água e fornecimento de nutrientes ao solo.

Considerando-se que os microrganismos podem atuar direta ou indiretamente na decomposição da matéria orgânica e na promoção e manutenção de diversas propriedades do solo, algumas características das comunidades microbianas do solo têm sido usadas como referências para distúrbios ecossistêmicos e, por isso, como importantes indicadores biológicos de saúde do solo. Por exemplo, a biomassa microbiana é considerada um dos mais eficientes e sensíveis indicadores, principalmente porque é diretamente influenciada por fatores bióticos e abióticos. A biomassa microbiana do solo se refere à massa dos microrganismos no solo e é expressa em mg de carbono, nitrogênio e/ou fósforo nos microrganismos por quilograma de solo. A biomassa é a parte viva e mais ativa da MOS, constituída principalmente por fungos, bactérias e actinomicetos. Apesar da sua importância em relação ao teor total de MOS, o tamanho dos componentes vivos é relativamente pequeno, variando de 1 a 5%. No solo, as enzimas participam como catalizadoras das reações metabólicas intracelulares, que ocorrem nos seres vivos. Além disso, as enzimas extracelulares atuam em várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos (ligninases, celulasas, proteases, glucosidases e galactosidases), na ciclagem de nutrientes (fosfatases, amidases, urease, e sulfatase) e na formação da MOS e da estrutura do solo.

No Brasil, a percepção da necessidade da inclusão dos bioindicadores nas avaliações de rotina do solo está relacionada com a implementa-

ção de sistemas conservacionistas do solo, como o sistema de plantio direto (SPD), a integração lavoura-pecuária (ILP) e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Nesses casos, as alterações nas propriedades químicas, em particular os teores de MOS, nem sempre são capazes de identificar as modificações ocorridas no solo em função da adoção dos sistemas de manejo. Os bioindicadores são mais sensíveis às ações antrópicas do que os indicadores químicos e físicos, detectando com maior antecedência alterações que ocorrem no solo. Assim, mais recentemente, a inclusão de alguns indicadores ligados ao funcionamento biológico foi contemplada na análise de rotina para avaliação da saúde do solo, especialmente por meio da determinação das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase (Mendes et al., 2021).

Apesar de aparentemente menos sensível do que os bioindicadores, a MOS é um indicador chave da saúde do solo, pois desempenha múltiplas funções, tornando-se a base da sustentabilidade produtiva dos solos e para o equilíbrio do ecossistema (Bieluczyk et al., 2023). Por mais que seja classificada como um indicador da saúde química do solo, é fundamental também para a saúde física e biológica (Figura 3) (Gurmu, 2020). Em função disso, a MOS tem sido colocada no centro de estratégias de intensificação sustentável, com práticas de manejo centradas em restaurar os teores de carbono dentro da zona radicular, aumentando a produtividade dos solos e dos recursos hídricos já utilizados na agricultura e gerando o efeito poupa terra, sem necessidade de abertura de novas áreas, com otimização de uso de água, de energia e de fertilizantes, melhorando simultaneamente a saúde do solo e do ambiente como um todo (Lal, 2018).

Historicamente, a estimativa do teor ou mesmo do estoque de C do solo tem sido baseada na quantificação do C em compartimentos de C orgânico do solo (COS), definidos operacionalmente, e nas taxas de transformação de C nesses compartimentos. Mais recentemente, processos microbianos foram incluídos nos mecanismos de ciclagem de C. No entanto, essas abordagens geralmente produzem conflito entre dois objetivos da saúde do solo: armazenamento de C e mineralização de C. É difícil conciliar altos níveis de atividade biológica, com maior mineralização, com o aumento dos estoques de COS (Liptzin et al., 2022)



Figura 3. Integração da matéria orgânica do solo (MOS) aos indicadores químicos, físicos e biológicos de saúde do solo.

Fonte: Adaptado de Gurmu (2020).

Um fornecimento adequado de COS e de nutrientes é essencial para manter o rendimento das culturas e os valores nutricionais de um sistema agroalimentar. Um sistema agroalimentar global precisa satisfazer as necessidades da população e tornar-se mais produtivo, mais inclusivo para as populações pobres e marginalizadas, mantendo-se, ao mesmo tempo, sustentável e resiliente do ponto de vista ambiental. Solos saudáveis e produtivos são a chave para proporcionar dietas saudáveis e nutritivas a todos os seres humanos e evitar o comprometimento da segurança alimentar e nutricional das gerações futuras. Nesse sentido, uma compreensão integrada do ciclo do carbono no continuum solo-planta-atmosfera é crucial para a adaptação às mudanças e desafios atuais e futuros, incluindo a produção sustentável de alimentos, de fibras e de energia em um cenário de

alterações climáticas. Por isso, o manejo sustentável do solo, centrado no aumento dos estoques de COS, não apenas melhorará a saúde do solo, mas também aumentará a segurança alimentar e a mitigação das alterações climáticas (Ginzky et al., 2022).

O aumento do interesse global pela saúde do solo tem incentivado cientistas a desenvolver protocolos de monitoramento e avaliação, como o Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) (Moebius-clune et al., 2016) e o Soil Management Assessment Framework (SMAF) (Andrews et al., 2004). O CASH fornece um teste padronizado de indicadores de saúde do solo relacionados com a produtividade da terra com o impacto ambiental em um agroecossistema. O método pode ser usado como ferramenta para agricultores e consultores agrícolas identificarem uma estratégia de manejo para melhorar e sustentar a saúde do solo (Moebius-clune et al., 2016). Por outro lado, o SMAF é um sistema analítico de avaliação da saúde do solo e requer dados medidos que são interpretados posteriormente, usando-se curvas de pontuação capazes de refletir o desempenho das funções mais críticas do solo, como a sustentação da atividade biológica, a regulação e disponibilidade da água do solo, a ciclagem de nutrientes, e fornecer habitat adequado para organismos do solo, entre outras (Cherubin et al., 2016).

Algumas críticas têm sido direcionadas tanto ao SMAF como ao CASH pela utilização de um conjunto de dados relativamente pequeno e suas curvas de interpretação e por não terem validade em escala nacional (nos Estados Unidos, onde foi concebido). Assim, outras avaliações têm surgido, como o Protocolo e Avaliação da Saúde do Solo (SHAPE) (Nunes et al., 2021). O SHAPE foi desenvolvido usando-se 14.680 observações de C orgânico do solo dos Estados Unidos e considera fatores edáficos e climáticos em escala continental.

Mais recentemente, nos Estados Unidos, foi divulgado um quadro nacional de pontuação da saúde do solo para sistemas agrícolas, o SEMWISE, que incorpora sete indicadores de saúde da solo (estabilidade de agregados, água disponível, matéria orgânica do solo, carbono ativo, proteína extraível com citrato autoclavado, respiração e PCR quantitativo) em classificações individuais e coletivas que se ajustam às diferenças regionais no conteúdo de argila do solo e no

clima, permitindo um quadro amplamente aplicável que possa detectar respostas de gestão às escalas local e nacional. Em paralelo, foi desenvolvido o primeiro índice de manejo da saúde do solo (SHMI), que avalia o sistema agrícola usando-se os princípios de saúde do solo para minimizar a perturbação do solo, aumentar a diversidade das plantas e fornecer cobertura ao solo e diversidade de raízes (Deel et al., 2024).

Agricultura conservacionista e regenerativa para melhoria da saúde do solo

Historicamente, os sistemas de cultivo foram concebidos para maximizar o rendimento dos agrossistemas. No entanto, diante de desafios globais, como as mudanças climáticas, a degradação das terras agrícolas e a necessidade contínua de produzir alimentos, a agricultura moderna precisa cada vez mais alinhar sustentabilidade ambiental e produção (Jayamaran; Dalal, 2022). Dois cenários principais oferecem soluções: o primeiro visa intensificar ainda mais a produção agrícola baseada no uso de tecnologias; e o segundo opta por soluções baseadas na natureza para garantir a produção agrícola e conservação dos recursos naturais (Gremmen et al., 2022; Sumberg, 2022). As duas alternativas podem e devem ser utilizadas de modo integrado para a promoção de sistemas agrícolas sustentáveis.

A agricultura conservacionista é uma abordagem de manejo de agroecossistemas que surgiu na década de 1930 nos EUA para combater a degradação do solo devido às erosões hídrica e eólica e pode ser considerada como uma das principais formas de alcançar a sustentabilidade da agricultura (Shrestha et al., 2020; Rodriguez et al., 2022). É caracterizada pela aplicação de princípios que atuam em conjunto, como o revolvimento mínimo do solo, a manutenção da cobertura com resíduos de culturas e a diversificação de espécies por meio de variadas rotações e associações de culturas (Rodriguez et al., 2022). Essas práticas aumentam o carbono orgânico e a biodiversidade do solo e melhoram a agregação e a retenção de água, reduzindo a erosão e proporcionando maior resistência à seca, contribuindo para melhoria da saúde do solo e mitigação das alterações climáticas (Silva et al., 2023).

O manejo das áreas agrícolas, numa abordagem conservacionista, passa também pelas soluções baseadas na natureza, uma eficiente estratégia para aliar produção e conservação do solo. A premissa é de que a natureza proporciona ferramentas, ideias, modelos e lições esquecidas ou ainda por descobrir que podem e, de fato, devem ser a base de uma agricultura mais sustentável. A ideia central é que a agricultura deve mudar para trabalhar “com” e não “contra” a natureza, e a ciência agrícola deve estar mais aberta à aprendizagem com a natureza (Sumberg, 2022). São exemplos de sistemas agrícolas baseados na natureza: a agroecologia, a agricultura biológica, a permacultura, a agricultura de sistemas naturais, a agrossilvicultura e a agricultura ecológica.

Nos últimos anos, a literatura refere-se cada vez mais aos diferentes sistemas agrícolas baseados na natureza como agricultura regenerativa (Sumberg, 2022). Seu foco está na saúde do solo e não apenas na produtividade das culturas. Os seus principais princípios, pautados no cultivo mínimo, não utilização de produtos químicos e cultivo consorciado, tornaram-se o ponto central do cenário das soluções baseadas na natureza. O termo “agricultura regenerativa” tem sido utilizado para se referir a um sistema agrícola sustentável que tem como objetivo aproveitar os processos ecológicos na natureza para melhorar a saúde de um solo. A agricultura regenerativa utiliza processos naturais para melhorar a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes, restaurando assim a função da paisagem e a produção de alimentos e fibras e com isso preservar ou aumentar a rentabilidade da exploração agrícola (Khangura et al., 2023). A estratégia baseia-se num conjunto de princípios orientadores e os profissionais utilizam uma variedade de táticas que integram processos biológicos e ecológicos, com o objetivo de aumentar a produção e restaurar a funcionalidade da paisagem. Entre eles, podem-se destacar: 1) não revolvimento do solo; 2) manutenção do solo coberto durante todo o ano; 3) aumento da biodiversidade do sistema; e 4) integração com animais.

Os benefícios da agricultura regenerativa para os agroecossistemas (Figura 4) tornam-se cada vez mais claros, à medida que as evidências demonstram que ambientes mais complexos e diversos promovem maior biodiversidade e aumentam os teores de carbono orgânico do solo (Rhodes, 2017; Rehberger et al., 2023) e contribuem para um solo

mais saudável (Miller-Klugesherz; Sanderson, 2023). Sistemas agrícolas que mantêm permanentemente a cobertura do solo e a diversidade de raízes, promovem melhorias na organização estrutural do solo com a formação de poros de origem biológica, evoluindo assim para a criação de um sistema de poros secundários devido à ação dos organismos do solo, menos suscetível a alterações em razão do aporte contínuo de matéria orgânica e do não revolvimento do solo (Bodner et al., 2023).

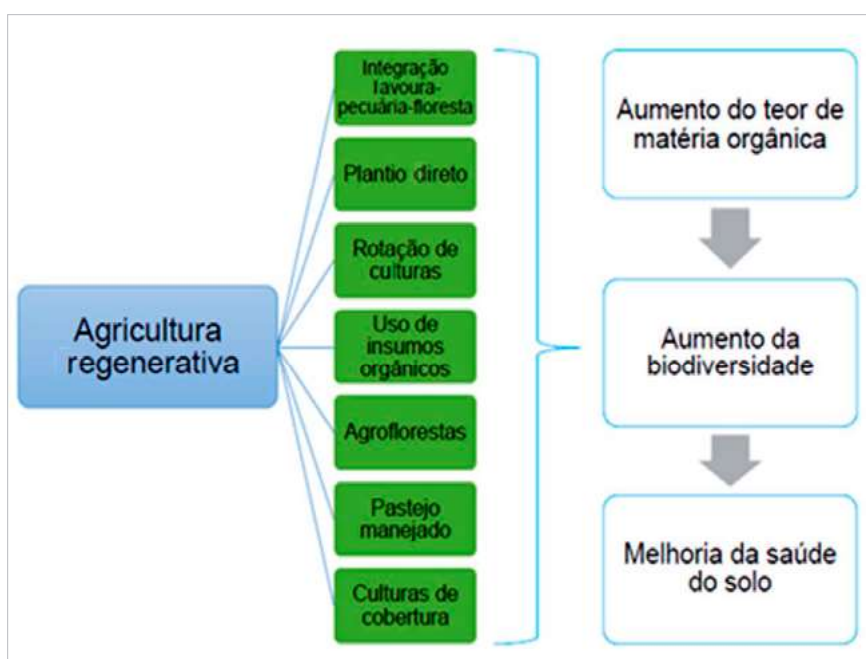


Figura 4. Práticas da agricultura regenerativa e sua relação com a saúde do solo. Fonte: Adaptado de Rehberger et al. (2023).

O plantio direto, os sistemas integrados e a saúde do solo, com ênfase no Meio-Norte do Brasil

No Brasil, a partir dos anos 1990, o sistema plantio direto (SPD) tornou-se uma ferramenta da agricultura conservacionista de elevada eficiência. Essa forma de manejo passou a promover equilíbrio e estabilidade dos sistemas agrícolas e contribuir para a con-

servação do solo, da água, do ar e da biologia do solo nas lavouras, prevenindo a poluição e a degradação ambiental. Especialmente no Cerrado, onde a agricultura foi desenvolvida em solos ácidos e pobres em nutrientes, o SPD foi essencial ao estabelecimento de uma agricultura sustentável.

Nos últimos anos, os sistemas de produção que integram diferentes atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área têm ganhado cada vez mais destaque no Brasil. Essa abordagem, conhecida como sistemas de produção integrados, busca otimizar o uso do solo, recursos e conhecimentos, elevando os patamares de produtividade e promovendo uma agricultura mais sustentável e eficiente.

Esses sistemas podem ser implementados de diversas formas, como o cultivo consorciado, onde duas ou mais culturas são cultivadas simultaneamente na mesma área; a sucessão, que consiste na alternância de culturas ao longo do tempo; ou a rotação, que envolve a troca de culturas em diferentes épocas, promovendo a recuperação do solo e o controle de pragas e doenças.

A integração dessas atividades traz diversos benefícios, como a diversificação da produção, aumento da produtividade, redução do uso de insumos químicos, aumento do aporte de carbono, melhora na fertilidade do solo e maior resiliência diante de condições climáticas adversas. Além disso, a combinação de atividades pode gerar renda mais estável para os produtores, além de contribuir para a preservação ambiental, ao promover a conservação do solo, a biodiversidade e o uso racional dos recursos naturais.

No contexto brasileiro, onde a agricultura é fundamental para a economia e a segurança alimentar, a adoção de sistemas integrados representa uma estratégia promissora para promover o desenvolvimento sustentável do setor agrícola. Essa abordagem também incentiva a inovação e o uso de tecnologias mais sustentáveis, alinhando-se às demandas por uma produção mais responsável e consciente do impacto ambiental.

No Meio-Norte do Brasil, uma região que engloba os estados do Maranhão e do Piauí, dentro da área de expansão do agronegócio conhecida como MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia),

a adoção do sistema de plantio direto e dos sistemas integrados de produção (ILP e ILPF) tem-se mostrado com grande potencial, pois contribui para a manutenção dos resíduos culturais, para o não revolvimento das camadas do solo e proporciona a decomposição gradual do material orgânico que, associado à fração mineral, favorece o aumento do carbono orgânico no solo (Santos et al., 2021; Barbosa et al., 2022; Gualberto et al., 2023; Vogado et al., 2024). Nessa região, a implantação dos sistemas SPD e ILPF tem-se tornado essencial à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e ao aumento da produtividade das culturas (Leite et al., 2010, 2014; Lima et al., 2011; Vogado et al., 2024).

Com o objetivo de utilizar dados da região Meio-Norte num exercício de avaliação da saúde do solo, baseando-se no índice de saúde do solo relativo (ISSR), proposto por Williams et al. (2020), obteve-se um índice de saúde do solo relativo modificado ($ISSR_{mod}$). No primeiro caso, os autores utilizaram os indicadores estabilidade de agregados (EA), proteínas do solo extraível com citrato autoclavado (Prot), conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), carbono ativo (C ativ) e respiração heterotrófica do solo (Resp) para calcular o ISSR, equação 1:

$$ISSR = \left(\frac{EA_i}{EA_{MN}} + \frac{Prot_i}{Prot_{MN}} + \frac{MOS_i}{MOS_{MN}} + \frac{C\text{ ativ}_i}{C\text{ ativ}_{MN}} + \frac{Resp_i}{Resp_{MN}} \right) \quad (1)$$

em que

i = valor do indicador medido na área manejada ou de interesse.

MN = valor do indicador medido numa área padrão, como uma mata nativa.

Os valores do ISSR podem variar de 0 a 5; quanto mais próximo de 5, melhor será a saúde do solo estudado.

Para fazer a aplicação do ISSR aos dados medidos na região Meio-Norte, fez-se a substituição dos indicadores utilizados na equação 1 por indicadores físicos, biológicos e químicos determinados em estudos desenvolvidos nessa região, como densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (Cmicr), respiração (Resp) e soma de bases (SB). Além disso, na equação 1, os valores relativos de cada indicador foram obtidos tendo-se os da-

dos da vegetação nativa como padrão de comparação (valores medidos em áreas manejadas/valores da vegetação nativa). No entanto, ao modificar a equação, tendo em vista que os solos do Cerrado e da Caatinga são naturalmente pobres quimicamente e que o manejo do solo tradicional (correção do pH, aplicação de fertilizantes e manejos que incrementam o conteúdo de matéria orgânica no solo) melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas, fez-se a comparação com os valores máximos determinados em cada área de estudo e não com os de floresta nativa (Cerrado e Caatinga). Dessa forma, obteve-se o índice de saúde do solo relativo modificado ($ISSR_{mod}$), equação 2:

$$ISSR_{mod} = \left(\frac{Ds_i}{Ds_{max}} + \frac{COT_i}{COT_{max}} + \frac{Cmic_i}{Cmic_{max}} + \frac{Resp_i}{Resp_{max}} + \frac{SB_i}{SB_{max}} \right) \quad (2)$$

em que

i = valor do indicador medido na área manejada ou de interesse.

max = valor máximo medido.

Nesse caso, como o valor do $ISSR_{mod}$ está sendo calculado pela junção de cinco razões dos indicadores, o $ISSR_{mod}$ pode variar de 0 a 5; quanto mais próximo de 5, melhor será a saúde do solo estudado.

A equação 2 foi aplicada para quantificar o $ISSR_{mod}$ de áreas de cultivo localizadas no bioma Cerrado nos estados do Maranhão e do Piauí (Leite et al., 2009, 2014; Barbosa et al., 2022) e de áreas de Caatinga (Lima et al., 2011) para variados tipos de manejo do solo e das culturas agrícolas. Os resultados de $ISSR_{mod}$ estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Pela análise dos $ISSR_{mod}$, verifica-se que sistemas agrícolas como o plantio direto, os sistemas integrados de produção e os sistemas agroflorestais apresentaram índices mais elevados de saúde do solo, pois contribuem para a manutenção da cobertura do solo, aporte constante de material orgânico e diversidade biológica tanto no Cerrado como na Caatinga, fortalecendo a premissa de que, para a região Meio-Norte, sistemas de produção mais diversos possibilitam uma agricultura mais sustentável e, por consequência, mais produtiva.

Tabela 1. Indicadores da saúde do solo e índice de saúde do solo relativo modificado em sistemas de manejo do Cerrado da região Meio-Norte do Brasil.

Área de estudo	Indicador da saúde do solo					ISSR _{mod}
	Ds	COT	C mic	Resp	SB	
	<i>g cm⁻³</i>	<i>g kg⁻¹</i>	<i>mg kg⁻¹</i>	<i>mg C-CO₂ g⁻¹ dia⁻¹</i>	%	
FN	1,50	13,40	50,60	16,20	18,20	3,04
PC	1,04	17,40	81,60	16,20	61,30	3,90
ACQ	1,55	6,14	75,60	14,80	31,05	3,01
PD	1,68	14,20	107,90	24,30	69,10	4,78
ILPF	1,60	16,00	112,50	17,60	58,20	4,44

Ds – densidade do solo; COT – carbono orgânico total; C mic – carbono da biomassa microbiana; Resp – respiração heterotrófica do solo; SB – soma de bases; FN – floresta nativa (Cerrado); PC – plantio convencional; ACQ – agricultura de corte e queima; PD – plantio direto; ILPF – integração lavoura-pecuária-floresta.

Tabela 2. Indicadores da saúde do solo e índice de saúde do solo relativo modificado em sistemas de manejo da Caatinga da região Meio-Norte do Brasil.

Área de estudo	Indicador da saúde do solo selecionado					ISSR _{mod}
	Ds	COT	C mic	Resp	SB	
	<i>g cm⁻³</i>	<i>g kg⁻¹</i>	<i>mg kg⁻¹</i>	<i>mg C-CO₂ g⁻¹ dia⁻¹</i>	%	
SE	1,00	2,27	0,28	17,76	4,41	3,42
SAF 6	1,15	3,77	0,27	24,30	5,85	4,28
SAF 10	1,21	4,01	0,29	15,90	11,10	4,59
ACQ	1,29	1,74	0,16	13,20	4,20	2,89
FN	1,13	3,02	0,25	14,50	2,38	3,29

Ds – densidade do solo; COT – carbono orgânico total; C mic – carbono da biomassa microbiana; Resp – respiração heterotrófica do solo; SB – soma de bases; FN – floresta nativa (Caatinga); SAF 6 – sistema agroflorestal com 6 anos de adoção; SAF 10 – sistema agroflorestal com 10 anos de adoção; ACQ – agricultura de corte e queima; FN – floresta nativa (Caatinga).

Considerações finais e perspectivas

O solo é um dos recursos naturais que sustentam a civilização humana. Sem solos saudáveis, a produção de alimentos necessária para atender a população global está altamente comprometida. Por isso, os atuais desafios da segurança alimentar, integrados às mudanças climáticas, passam obrigatoriamente pela promoção da saúde do solo, alcançada por meio da adoção de um modelo de agricultura sustentável. Os sistemas considerados conservacionistas, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta, têm-se tornado importante alternativa para o agro brasileiro conciliar aumento de produtividade com conservação ambiental.

No contexto da região Meio-Norte do Brasil, ao explorar a relação intrínseca entre a saúde do solo e a produção agrícola, deve-se levar em consideração a diversidade de ecossistemas, clima e condições edáficas específicas para impulsionar um movimento contínuo em direção a sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes. Nessa região, em especial no bioma Cerrado, os sistemas de produção integrados ILP e ILPF têm-se firmado como importante estratégia produtiva.

Além disso, o fortalecimento da agenda de pesquisa e inovação é fundamental para ampliar o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos no sistema solo-planta, com foco na saúde do solo, para configurar, a partir disso, novos sistemas de manejo adaptáveis às condições da região. Ao fornecer suporte tecnológico aos agricultores, mostrando-lhes os benefícios tangíveis das práticas de manejo da saúde do solo, pode-se aumentar a conscientização e a compreensão da importância dessas estratégias. Essa mudança de mentalidade pode estimular a adoção em larga escala dessas práticas e impulsionar ações coordenadas para formulação de políticas públicas e ações práticas no campo.

Referências

- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.
- BARBOSA, L. R.; SOUZA, H. A. de; TEIXEIRA NETO, M. L. T.; LEITE, L. F. C. Organic matter compartments in an ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the cerrado. **Ciência Rural**, v. 52, n. 10, e20200845, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200845>.
- BAVEYE, P. C. Bypass and hyperbole in soil research: worrisome practices critically reviewed through examples. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 1, p. 1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12941>.
- BIELUCZYK, W.; ASSELT, F. O.; NAVROSKI, D.; GONTIJO, J. B.; VENTURINI, A. M.; MENDES, L. W.; SIMON, C. P.; CAMARGO, P. B. de; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; BENDASSOLLI, J. A.; RODRIGUES, R. R.; PUTTEN, W. H. van der; TSAI, S. M. Linking above and belowground carbon sequestration, soil organic matter properties, and soil health in Brazilian Atlantic Forest restoration. **Journal of Environmental Management**, v. 344, 118573, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118573>.
- BODNER, G.; ZEISER, A.; KEIBLINGER, K.; ROSINGER, C.; WINKLER, S. K.; STUMPP, C.; WENINGER, T. Managing the pore system: regenerating the functional pore spaces of natural soils by soil-health oriented farming systems. **Soil and Tillage Research**, v. 234, 105862, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105862>.
- BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L.; LEITE, L. F. C.; LUCHIARI JUNIOR, A. Novas abordagens, tendências e oportunidades no uso de modelos de simulação para a avaliação de sistemas agrícolas em regiões tropicais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 874 - 883, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.15756>.
- CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A. dos; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M. de; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. de M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Sci. Agric.** v. 70, n. 4, p. 274-289, 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/970661/1/Soilhealthlookingforsuitableindicators.Whatshouldbeconsideredtoassesstheeffectsofuseandmanagementonsoilhealth.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2026.
- CHAPARRO, J. M.; SHEFLIN, A. M.; MANTER, D. K.; VIVANCO, J. M. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. **Biology and Fertility Soils**, v. 48, p. 489-499, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0691-4>.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A soil management assessment framework (SMAF) evaluation of brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215-226, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.

CONGREVES, K. A.; HAYES, A.; VERHALLEN, E. A.; VAN EERD, L. L. Long- term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 17-28, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>.

DEEL, D. H.; MOORE, J. M.; MANTER, D. K. Semwise: a national soil health scoring framework for agricultural systems. **Applied Soil Ecology**, v. 195, 105273, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105273>.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.

FAO. **Global soil partnership-world soil charter**. Rome, 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-mn442e.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2026.

FAO. **Global soil partnership action framework 2022-2030**. Healthy soils for a healthy life and environment: from promotion to consolidation of sustainable soil management. Rome, 2022b. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8428f509-cadf-48c8-845a-58fac410e11e/content>. Acesso em: 3 mar. 2026.

FAO. **One health joint plan of action, 2022-2026**. Working together for the health of humans, animals, plants and the environment. Rome, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc2289en>.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology: the ecology of sustainable food systems**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GREMMEN, B. Regenerative agriculture as a biomimetic technology. **Outlook on Agriculture**, v. 51, n. 1, p. 39-45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/00307270211070317>.

GUALBERTO, A. V. S.; SOUZA, H. A. de; SAGRILO, E.; ARAUJO, A. S. F.; MENDES, L. W.; MEDEIROS, E. V. de; PEREIRA, A. P. de A.; COSTA, D. P. da; VOGADO, R. F.; CUNHA, J. R. da; TEIXEIRA NETO, M. L.; LEITE, L. F. C. Organic C fractions in topsoil under different management systems in Northeastern Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010011>.

GURMU, G. Soil organic matter and its role in soil health and crop productivity improvement. **Academic Research Journal of Agricultural Science and Research**, v. 7, n. 7, p. 475-483, Nov. 2019. DOI: 10.14662/ARJASR2019.147.

HOU, D. Soil health and ecosystem services. **Soil Use and Management**, v. 39 n 4, p. 1259-1266, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12945>.

JAYARAMAN, S.; DALAL, R. C. No-till farming: prospects, challenges – productivity, soil health, and ecosystem services. **Soil Research**, v. 60, n. 6, p. 435-441, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR22119>.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. State of agricultural systems science. In: ANTLE, J. M.; JONES, J. W.; ROSENZWEIG, C. Towards a new generation of agricultural system models, data, and knowledge products. 2015. Disponível em: <https://agmip.org/wp-content/uploads/2019/01/Towards-a-New-Generation-of-Ag-Systems-Complete.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2026.

KHANGURA, R.; FERRIS, D.; WAGG, C.; BOWYER, J. Regenerative agriculture—a literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. **Sustainability**, v. 15, n. 3, 2338, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032338>.

KOPITTKKE, P. M.; MINASNY, B.; PENDALL, E.; RUMPEL, C.; MCKENNA, B. A. Healthy soil for healthy humans and a healthy planet. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 3, p. 210-221, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2228651>.

LAL, R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3285-3301, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>.

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, p. 544–553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.

LEITE, L. F. C.; GALVÃO, S. R. da S.; HOLANDA NETO, M. R.; ARAÚJO, F. S. Estoque de carbono em latossolo sob plantio direto no Cerrado do Piauí. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009. 19 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 87). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/957853/1/Boletim87Estoquedecarbonaemlatossolo.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2026.

LEITE, L. F. C.; GALVÃO, S. R. S.; HOLANDA NETO, M. R.; ARAÚJO, F. S.; IWATA, B. F. Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 14, n. 12, p. 1273-1280, 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/877721/1/revbrasengagr.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2026,

LEITE, L. F. C.; IWATA, B. de F.; ARAÚJO, A. S. F. Soil organic matter pools in a tropical savanna under agroforestry system in Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 711-723, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400014>.

LIMA, S. S. de; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. das C. O.; COSTA, D. B. da. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em argissolo vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000100006>.

LIPTZIN, D.; NORRIS, C. E.; CAPPELLAZZI, S. B.; G. MAC BEAN, G. M.; COPE, M.; GREUB, K. L. H.; RIEKE, E. L.; TRACY, P. W.; EZRA ABERLE, E.; ASHWORTH, A.; TAVAREZ, O. B.; BARY, A. I.; BAUMHARDT, R. L.; GRACIA, A. B.; BRAINARD, D. C.; BRENNAN, J. R.; REYES, D. B.; BRUHJELL, D.; CARLYLE, C. N.; CRAWFORD, J. J. W.; CREECH, C. F.; STEVE W. CULMAN, S. W.; DEEN, B.; DELL, C. J.; DERNER, J. D.; DUCEY, T. F.; DUIKER, S. W.; DYCK, M. F.; ELLERT, B. H.; ENTZ, M. H.; SOLORIO, A. E.; FONTE, S. J.; FONTEYNE, S.; FORTUNA, A. M.; FOSTER, J. L.; FULTZ, L. M.; GAMBLE, A. V.; GEDDES, C. M.; GRIFFIN-LAHUE, D.; GROVE, J. H.; HAMILTON, S. K.; HAO, X.; HAYDEN, Z. D.; NORA HONSDORF, N.; JULIE A. HOWE, J. A.; IPPOLITO, J. A.; JOHNSON, G. A.; KAUTZ, M. A.; KITCHEN, N. R.; KUMAR, S.; KURTZ, K. S. M.; LARNEY, F. J.; LEWIS, K. L.; LIEBMAN, M.; RAMIREZ, A. L.; MACHADO, S. M.; BIJESH MAHARJAN, B.; GAMIÑO, M. A. M.; MAY, W. E.; MCCLARAN, M. P.; MCDANIEL, M. D.; MILLAR, N.; MITCHELL, J. P.; AMBER D. MOORE, A. D.; MOORE JUNIOR, P. A.; MANUEL MORA GUTIÉRREZ, M. M.; NELSON, K. A.; OMONDI, E. C.; OSBORNE, S. L.; ALCALÁ, L. O.; OWENS, P.; PENA-YEWTUKHIW, E. M.; HANNA J. POFFENBARGER, H. J.; BRENDA PONCE LIRA, B. P.; JENNIFER R. REEVE, J. R.; REINBOTT, T. M.; REITER, M. S.; RITCHEY, E. L.; ROOZEBOOM, K. L.; RUI, Y.; SADEGHPOUR, A.; SAINJU, U. M.; SANFORD, G. R.; SCHILLINGER, W. F.; SCHINDELBECK, R. R.; SCHIPANSKI, M. E.; SCHLEGEL, A. J.; SCOW, K. M.; SHERROD, L. A.; SHOBER, A. L.; SIDHU, S. S.; MOYA, E. S.; LUCE, M. S.; STROCK, J. S.; SUYKER, A. E.; SYKES, V. R.; TAO, H.; CAMPOS, A. T.; VAN EERD, L. L.; ES, H. VAN; VERHULST, N.; VYN, T. J.; WANG, Y.; WATTS, D. B.; WRIGHT, D. L.; ZHANG, T.; MORGAN, C. L. S.; HONEYCUTT, C. W. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, 108708, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108708>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Programas e Estratégias. Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - ABC+ (2020-2030). 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/programas-e-estrategias>. Acesso em: 4 mar. 2026.

MENDES, I. de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, O. D. D. da; OLIVEIRA, M. I.; MALAQUIAS, J. V. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 369).

Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133109/1/Tecnologia-Bioas-Documentos-369.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2026.

MILLER-KLUGESHERZ, J. A.; SANDERSON, M. R. Good for the soil, but good for the farmer? Addiction and recovery in transitions to regenerative agriculture. **Journal of Rural Studies**, v. 103, 103123, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103123>.

MOEBIUS-CLUNE, B. N.; MOEBIUS-CLUNE, D. J.; GUGINO, B. K.; IDOWU, O. J.; SCHINDELBECK, R. R.; RISTOW, A. J.; ES, H. M. van; THIES, J. E.; SHAYLER, H. A.; MCBRIDE, M. B.; KURTZ, K S. M.; WOLFE, D. W.; ABAWI, G. S. Comprehensive assessment of soil health — the cornell framework. 3rd ed. Geneva, NY: Cornell University, 2016. Disponível em: <https://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2026.

NUNES, M. R.; VEUM, K. S.; PARKER, P. A.; HOLAN, S. H.; KARLEN, D. L.; AMSILI, J. P.; ES, H. M. VAN; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C. A.; MOORMAN, T. B. The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 4, p. 1196-1213, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20244>.

POWLSON, D. S. Is ‘soil health’ meaningful as a scientific concept or as terminology? **Soil Use and Management**. v. 37, n. 3, p. 403-405, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12721>.

REHBERGER, E.; WEST, P. C.; SPILLANE, C.; MCKEOWN, P. C. What climate and environmental benefits of regenerative agriculture practices? an evidence review. **Environmental Research Communications**, v. 5, n. 5, 052001, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/2515-7620/acd6dc>.

RHODES, C. J. The imperative for regenerative agriculture. **Science Progress**, v. 100, n. 1, p. 80-129, 2017. DOI: 10.3184/003685017X14876775256165.

RODRÍGUEZ, B. C.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; RODRÍGUEZ, M. S.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; RUIZ, B. G.; TAVIRA, S. C. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review. **Soil Systems**, v. 6, n. 4, 87, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087>.

SANTOS, S. F. da C. B. do; SOUZA, H. A. de; ARAÚJO NETO, R. B. de; SAGRILO, E.; FERREIRA, A. C. M.; CARVALHO, S. P.; BRITO, L. de C. R. de; LEITE, L. F. C. Soil microbiological attributes and soybean grain yield in succession to corn intercropped with forage in the Maranhão Eastern Cerrado. **International Journal of Plant Production**, v. 15, p. 669-677, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00167-z>.

SHRESTHA, J.; SUBEDI, S.; TIMSINA, K. P.; CHAUDHARY, A.; KANDEL, M.; TRIPATHI, S. Conservation agriculture as an approach towards sustainable crop production: a review. **Farming & Management**, v. 5, p. 7-15, 2020. DOI:10.31830/2456-8724.2020.002.

SILVA, A. M. M.; ARAÚJO, V. L. V. P. de; CARDOSO, E. J. B. N. Revisiting the past to understand the present and future of soil health in Brazil. **Frontiers in Soil Science**, v. 3, 172436, 2023. DOI: doi: 10.3389/fsoil.2023.1172436.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

SUMBERG, J. Future agricultures: the promise and pitfalls of a (re)turn to nature. **Outlook on Agriculture**, v. 51, n. 1, p. 3-10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/00307270221078027>.

TOOR, G. S.; YANG, Y.; DAS, S.; DORSEY, S.; FELTON, G. Soil health in agricultural ecosystems: current status and future perspectives. In: Sparks, D. L. Advances in agronomy: book series. **Advances in Agronomy**, v. 168, cap. 4, p. 157-201, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.004>.

VOGADO, R. F.; SOUZA, H. A. de; ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; GUALBERTO, A. V. S.; CUNHA, J. R. da; LEITE, L. F. C. Simulating soil carbon and nitrogen trends under an integrated system in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, e 62574, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.62574>.

WILLIAMS, H.; COLOMBI, T.; KELLER, T. The influence of soil management on soil health: an on-farm study in southern Sweden. **Geoderma**, v. 360, 114010, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114010>.