



## C A P Í T U L O 6

# UMA VISÃO SOBRE QUALIDADE DO SOLO E A DINÂMICA DE ENERGIA E NUTRIENTES EM ECOSISTEMAS AGRÍCOLAS

### **Higo Forlan Amaral**

Eng. Agr. Prof. Dr., Programa de Pós-graduação Profissional em Agroecologia,  
Universidade Estadual de Maringá (PROFAGROEC), Maringá, Pr.  
<http://lattes.cnpq.br/2040162561025228>

### **Kátia Regina Freitas Schwan-Estrada**

Profa. Dra. em Agronomia, Departamento de Agronomia (DAG),  
Programa de Pós-graduação em Agroecologia (PROFAGROEC) e de  
Agronomia (PGA), Universidade Estadual de Maringá (UEM).  
<http://lattes.cnpq.br/7333463527916515>

**RESUMO:** Este capítulo oferece uma perspectiva abrangente sobre a inter-relação entre o fluxo de energia, a dinâmica de nutrientes e a qualidade do solo em ecossistemas agrícolas. A análise inicia-se com os fundamentos termodinâmicos, destacando a conservação da energia solar (Primeira Lei) e sua dissipação inerente entre os níveis tróficos (Segunda Lei), processos que moldam a ciclagem de nutrientes e a sustentação da vida. O solo é apresentado como um reservatório ativo e mediador central, transformando a energia capturada pelas plantas em matéria orgânica e regulando a disponibilidade de nutrientes essenciais. Em ecossistemas nativos, esses fluxos são cíclicos e integrados; contudo, em agroecossistemas, as intervenções humanas, como monoculturas dependentes de insumos sintéticos e o preparo intensivo, desestabilizam esses ciclos, degradando a qualidade do solo, comprometendo serviços ecossistêmicos vitais e evidenciando interferências antrópicas. Em contraste, discute-se a importância de estratégias conservacionistas, como o plantio direto, sistemas agroflorestais e a diversificação de culturas, que restauram a complexidade estrutural e biológica do solo, otimizam a ciclagem de carbono e nutrientes, e elevam sua resiliência. Conclui-se que a gestão adequada da qualidade do solo, por meio da valorização desses processos ecológicos e da adoção de práticas sustentáveis, é indispensável para garantir a produtividade agrícola e a integridade ambiental a longo prazo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agroecossistemas; Ciclos Biogeoquímicos; Matéria Orgânica do Solo; Práticas Conservacionistas; Saúde do Solo.

## A PERSPECTIVE ON SOIL QUALITY AND ENERGY AND NUTRIENT DYNAMICS IN AGRICULTURAL ECOSYSTEMS

**ABSTRACT:** This chapter provides a comprehensive perspective on the interrelation between energy flow, nutrient dynamics, and soil quality in agricultural ecosystems. The analysis begins with thermodynamic fundamentals, highlighting solar energy conservation (First Law) and its inherent dissipation across trophic levels (Second Law), processes that shape nutrient cycling and life sustenance. Soil is presented as an active reservoir and central mediator, transforming plant-captured energy into organic matter and regulating essential nutrient availability. In native ecosystems, these flows are cyclic and integrated; however, in agroecosystems, human interventions such as synthetic-input-dependent monocultures and intensive tillage destabilize these cycles, degrading soil quality, compromising vital ecosystem services, and exemplifying anthropogenic interferences. In contrast, the importance of conservationist strategies, including no-till systems, agroforestry, and crop diversification, is discussed. These approaches restore the soil's structural and biological complexity, optimize carbon and nutrient cycling, and enhance its resilience. It is concluded that adequate soil quality management, through the appreciation of these ecological processes and the adoption of sustainable practices, is indispensable for ensuring long-term agricultural productivity and environmental integrity.

**KEYWORDS:** Agroecosystems; Biogeochemical Cycles; Soil Organic Matter; Conservationist Practices; Soil Health.

### 1 INTRODUÇÃO

O funcionamento dos ecossistemas, sejam eles naturais ou agrícolas, depende intrinsecamente da integração entre o fluxo de energia e o fluxo de nutrientes (Odum; Barret, 2007). Em uma abordagem conjunta, a transferência de energia, que ocorre por meio de processos como fotossíntese, respiração e decomposição, e então o movimento de nutrientes do solo para as plantas formam a base para a sustentação da vida no planeta (Odum; Barret, 2007). Enquanto o fluxo de energia garante a entrada e a distribuição da energia necessária para o desenvolvimento dos organismos, o fluxo de nutrientes assegura que as plantas e outros organismos fotossintéticos (ex.: microalgas) recebam os elementos essenciais para converter essa energia em biomassa, possibilitando o crescimento, a produção de alimentos, fibras e bioenergia.

O solo é o componente integrado que serve como meio para o desenvolvimento das plantas, e também funciona como o principal ambiente onde convergem a energia e os nutrientes (Brady; Weil, 2013). A energia solar, essencial para a fotossíntese, é captada pelas folhas das plantas, que transformam essa energia em

ações metabólicas utilizando os nutrientes absorvidos do solo, oriundos tanto da decomposição da matéria orgânica quanto de aportes minerais e orgânicos. Além disso, o solo desempenha um papel ativo na ciclagem dos nutrientes por meio de processos biológicos que convertem resíduos orgânicos em elementos disponíveis, armazenam carbono (C) e regulam o pH, impactando diretamente na disponibilidade dos nutrientes essenciais para a vida (Brady; Weil, 2013).

Dessa forma, a saúde e a qualidade do solo (QS) assumem papel decisivo na eficiência desses fluxos e, ao menos teoricamente, refletindo-se em sistemas agrícolas produtivos e ecossistemas naturais equilibrados. Quando bem manejados, os processos que regem a energia e os nutrientes garantem a sustentabilidade ambiental e a resiliência dos sistemas produtivos, promovendo a conservação dos recursos e a mitigação dos impactos climáticos. Esta inter-relação entre energia e matéria evidencia a importância da adoção de práticas agrícolas que preservem a integridade do solo, incentivando a utilização sustentável dos recursos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais à vida.

O objetivo deste capítulo é analisar criticamente o papel fundamental e multifuncional do solo na regulação e dinâmica dos fluxos de energia e matéria (nutrientes) em agroecossistemas. Para isso, exploram-se os fundamentos das leis da termodinâmica, comparam-se as características de ecossistemas nativos e agrícolas, discutem-se os impactos das intervenções antrópicas e evidencia-se a necessidade de práticas de manejo sustentáveis para garantir a saúde do solo e a sustentabilidade produtiva.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Leis da Termodinâmica e Aplicações

O funcionamento dos ecossistemas, sejam naturais ou agrícolas, depende intrinsecamente da integração entre o fluxo de energia e nutrientes (Brady; Weil, 2013; Månsson; Mcglade, 1993). Como estes fluxos são acoplados, a energia, captada principalmente na forma de luz solar, é transformada em energia química pelos organismos produtores por meio da fotossíntese. Essa energia, incorporada à biomassa, passa a ser transferida ao longo das cadeias alimentares, enquanto os nutrientes, oriundos da decomposição da matéria orgânica (MO) e de aportes minerais ou orgânicos, são incorporados essencialmente para a formação dessa biomassa, à medida que se desloca pelos níveis tróficos (Månsson; Mcglade, 1993; Odum; Barret, 2007).

A termodinâmica aplicada à ecologia fornece a base para compreender esses processos. De acordo com Odum e Barret (2007), a Primeira Lei da Termodinâmica (Conservação da Energia) estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. Em ecossistemas, isso significa que a energia solar, convertida em energia química pelas plantas, é redistribuída constantemente entre os componentes bióticos do sistema. Paralelamente, os nutrientes, que compõem os elementos estruturais da biomassa, seguem um fluxo dependente dos níveis tróficos, sendo continuamente reciclados.

A Segunda Lei da Termodinâmica (Lei da Entropia) determina que a transferência de energia nunca é 100% eficiente, pois parte dela é dissipada, geralmente sob a forma de calor, à medida que avança na cadeia alimentar (Månsson; Mcglade, 1993). Esse mesmo princípio se aplica ao fluxo de nutrientes: a cada passagem entre os níveis tróficos, há perdas, o que reforça a necessidade de reposição constante dos elementos essenciais. Assim, os ecossistemas apresentam um número limitado de níveis tróficos, refletindo a diminuição gradual da energia disponível para os organismos em cada degrau sucessivo.

A Terceira Lei da Termodinâmica, que afirma que a entropia atinge um valor mínimo constante à medida que a temperatura se aproxima do zero absoluto, tem implicações menos diretas na ecologia (Månsson; Mcglade, 1993). Contudo, pode-se inferir que, em condições de temperaturas extremamente baixas, os processos biológicos, incluindo a ciclagem de nutrientes, se tornam muito lentos ou praticamente estagnados.

Tais leis da termodinâmica destacam que, embora a quantidade total de energia e nutrientes em um ecossistema seja conservada, suas transferências são inerentemente ineficientes e sujeitas a perdas. Essa perspectiva reforça a importância de compreender e gerenciar os fluxos de energia e matéria para promover a sustentabilidade dos sistemas ecológicos, sejam eles nativos ou agrícolas.

## 2.2 Fluxos de energia e nutrientes em ecossistemas nativos

Considera-se que ecossistemas nativos (ou naturais) são áreas que não sofreram interferências significativas das atividades humanas, onde as comunidades de plantas, animais e outros organismos evoluíram e se adaptaram às condições ambientais locais. Em ecossistemas nativos, o fluxo de energia e nutrientes ocorre de maneira cíclica e integrada, sustentado por interações entre fatores bióticos e abióticos. O fluxo de energia é a base que sustenta o funcionamento dos ecossistemas nativos. A energia solar, captada pelas plantas através da fotossíntese, é convertida em energia química armazenada na biomassa (Odum; Barret, 2015). Essa energia é então transmitida para os diversos níveis tróficos, dos produtores (plantas) para os consumidores primários, secundários e terciários e finalmente decomposta pelos organismos decompositores, que retornam os nutrientes ao solo (Odum; Barret, 2015).

A intensidade do fluxo de energia varia conforme a diversidade e a abundância dos produtores e a incidência da radiação solar, sendo que a transferência de energia entre os níveis tróficos apresenta perdas, sobretudo na forma de calor, conforme os princípios da termodinâmica (Odum; Barret, 2015).

Esse contínuo processo de captação, transmissão e transformação da energia garante o equilíbrio dos sistemas nativos, permitindo a reciclagem e a manutenção dos elementos essenciais que sustentam todas as formas de vida.

A entrada de nutrientes, por sua vez, se dá principalmente pela decomposição de material orgânico, como folhas e animais mortos, pela deposição atmosférica (chuva carregada de nutrientes) e, em alguns casos, pelo intemperismo de rochas (Odum; Barret, 2015). As plantas e os microrganismos absorvem esses nutrientes do solo para se desenvolver, incorporando-os em sua estrutura. À medida que os herbívoros se alimentam das plantas e os carnívoros consomem esses herbívoros, os nutrientes são transferidos através da cadeia alimentar, com parte dos elementos sendo assimilados e outra parte perdida (por exemplo, por meio de excreções).

Quando os organismos morrem, fungos e bactérias decompositores degradam a MO, reciclando os nutrientes e restabelecendo sua disponibilidade. O solo também atua como reservatório, armazenando nutrientes em suas partículas e matéria orgânica, liberando-os gradualmente conforme as condições ambientais (como umidade e pH) favorecem a absorção.

Dessa forma, os ecossistemas nativos mantêm um ciclo balanceado de entrada, uso, reciclagem e mínima perda de nutrientes, o que sustenta sua biodiversidade e resiliência.

## 2.3 Fluxo de energia e nutrientes em Ecossistemas Agrícolas

Ecossistemas agrícolas (ou agrossistemas) são ambientes modificados pelo ser humano para a produção de alimentos, fibras e outros produtos agrícolas. Nesses sistemas, solo, água e organismos interagem com insumos agrícolas e práticas de manejo, formando redes diferenciais de relações ecológicas que buscam equilibrar produtividade com sustentabilidade ambiental.

De acordo com Gliessman (2001), esse conceito possibilita a análise dos sistemas de produção de alimentos de forma holística, considerando os insumos, a produção e as interconexões entre suas partes. Embora as intervenções humanas modifiquem significativamente as características dos agroecossistemas quando comparados aos ecossistemas nativos, muitos dos processos, estruturas e dinâmicas dos sistemas naturais podem ser identificados na agricultura.

No que tange ao fluxo de energia, os agroecossistemas apresentam uma rede ecológica que envolve insumos energéticos, teias alimentares e impactos ambientais decorrentes da atividade humana (Brady; Weil, 2013).

A produção agrícola depende não só da energia solar, captada pelas plantas por meio da fotossíntese, mas também de energia adicional proveniente de combustíveis fósseis, insumos químicos e, cada vez mais, fontes renováveis (Odum; Barret, 2015). Essa energia é convertida em energia química e armazenada na biomassa, sendo transferida entre os diversos níveis tróficos, dos produtores aos consumidores e, finalmente, aos decompositores, porém, o equilíbrio natural desses sistemas pode ser perturbado por atividades como o desmatamento e a poluição (Odum; Barret, 2015).

Assim, a manutenção de um fluxo energético equilibrado é fundamental para sustentar os organismos e a estabilidade dos sistemas agrícolas, sendo essencial adotar práticas de manejo que minimizem os impactos negativos e promovam uma integração harmoniosa com o ambiente.

O solo, por sua vez, assume um papel central na integração dos fluxos de energia e matéria em agroecossistemas, pois ele é suporte e meio para a entrada de insumos agrícolas. Nesse ambiente, microrganismos e fauna edáfica promovem a decomposição da MO, liberando compostos orgânicos com diversos graus de humificação e contribuindo para a formação de agregados que melhoram a estrutura, a retenção de água, a resistência à erosão e o sequestro de carbono. A magnitude do fluxo está relacionada à quantidade de C e energia introduzidos pelo material vegetal, enquanto a velocidade desse fluxo depende da taxa de decomposição, que pode ser influenciada pelos métodos de preparo e manejo do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

Além de possibilitar a transformação e armazenamento de energia e matéria, o solo também regula a ciclagem de nutrientes. Nos ecossistemas agrícolas, a principal entrada de nutrientes ocorre pela aplicação de fertilizantes, tanto orgânicos, como esterco, quanto inorgânicos, além da fixação biológica de nitrogênio por leguminosas e da deposição atmosférica. As plantas absorvem esses nutrientes para seu crescimento, reprodução e produção, e os resíduos resultantes da colheita, quando reincorporados ao solo, promovem um ciclo contínuo de reciclagem.

Entretanto, práticas inadequadas podem levar a perdas por lixiviação, erosão e volatilização, comprometendo a fertilidade do solo e a qualidade da água. A diversidade dos organismos presentes no solo, desde microrganismos até invertebrados, desempenha papel crucial nesse processo, acelerando a decomposição e promovendo uma ciclagem eficiente dos nutrientes.

A manutenção de um fluxo equilibrado de energia e nutrientes é determinante para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. A saúde e a qualidade do solo são diretamente proporcionais à eficiência dos fluxos de energia e matéria. Ao assegurar um manejo que valorize essas interações, é possível promover uma agricultura resiliente e sustentável, onde o estoque de nutrientes e a disponibilidade de energia garantem não só a produtividade das culturas, mas também a conservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais.

## 2.4 Funções do solo

Conforme Vezanni e Mielniczuk (2011), as funções do solo relacionadas ao fluxo de energia em ecossistemas agrícolas centram-se na entrada, transformação e reorganização da MO oriunda da vegetação.

Primeiro, o solo recebe a energia e a matéria por meio da biomassa produzida pelas plantas. Durante a fotossíntese, as plantas convertem a energia luminosa em energia química, gerando compostos orgânicos ricos em carbono. Esses compostos são posteriormente incorporados ao solo através dos exsudatos, desprendimento de células radiculares e deposição de resíduos aéreos, principalmente ao final do ciclo vegetativo.

Uma vez no solo, essa MO passa por processos de transformação que são mediados principalmente pelos microrganismos e outros organismos edáficos. Esses seres vivos metabolizam os resíduos vegetais, convertendo-os em formas variadas de energia e em compostos orgânicos intermediários, que apresentam diferentes graus de humificação e tempos de permanência. Essa etapa é crucial, pois transforma a energia inicialmente armazenada na biomassa em forma que pode ser utilizada para a manutenção e auto-organização do próprio solo.

O solo, portanto, atua como um reservatório fundamental, não apenas armazenando a MO, mas também promovendo sua transformação por meio da ação conjunta de processos biológicos e químicos. Esse processo de transformação está intimamente ligado à interação com os minerais presentes na matriz do solo.

Já os minerais, que originam a estrutura física do solo, colaboram na formação de agregados, estruturas que se formam pela aglomeração de partículas orgânicas e inorgânicas (Brady; Weil, 2013). A formação desses agregados é um exemplo claro do equilíbrio entre dissipação e auto-organização: a entrada constante de energia e matéria causa momentos de desordem que, em resposta, levam à reorganização estrutural do solo, aumentando sua capacidade de reter água e nutrientes, sua resistência à erosão e seu funcionamento global (Vezanni; Mielniczuk, 2011).

A magnitude está relacionada à quantidade de C e energia que o solo recebe através da biomassa vegetal, enquanto a velocidade refere-se à rapidez com que a MO é decomposta e convertida em energia disponível por meio dos microrganismos (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Em sistemas agrícolas, essas variáveis são moduladas não só pela cultura implantada, pelos métodos de preparo e manejo do solo, manejo cultural e a biodiversidade que influenciam a taxa de decomposição (Vezzani; Mielniczuk, 2011; Brady; Weil, 2013).

A relevância das funções do solo se torna especialmente evidente sob ação agrícola quando se observa a importância contínua das plantas no fornecimento de energia e matéria. Um aporte regular de resíduos vegetais é indispensável para estimular a atividade da biota edáfica e garantir que os processos de ciclagem, mineralização e formação de estruturas complexas sejam sustentados (Brady; Weil, 2013; Gliessman, 2001). Sem esse aporte, o solo tende a perder sua complexidade estrutural, comprometendo a eficiência na retenção de água, no sequestro de carbono e na disponibilização de nutrientes para as plantas, levando a perdas significativas por mineralização, lixiviação e erosão (Brady; Weil, 2013).

As funções do solo relativas ao fluxo de energia nos agroecossistemas envolvem a recepção e a capacidade de transformação e armazenamento da MO, sua transformação por meio da ação dos microrganismos e a reorganização dos componentes físicos e químicos que formam sua estrutura. Esse conjunto de processos não apenas assegura a ciclagem eficiente de nutrientes, bem como, mantém o equilíbrio e a vitalidade do sistema, sendo essencial para a sustentabilidade e a produtividade dos sistemas agrícolas.

A gestão adequada dessas funções é decisiva para promover uma agricultura resiliente, que conserva os recursos naturais e mitiga os impactos ambientais.

## 2.5 Interferências antrópicas

A agricultura, ao longo de sua evolução, demonstrou uma notável capacidade de transformar e reconfigurar ecossistemas, refletida no intrincado intercâmbio de energia e matéria nos ambientes agrícolas modernos.

Inicialmente, era uma interação básica entre homem e natureza, mas evoluiu para empregar estratégias e insumos cada vez mais sofisticados, visando a maximização dos rendimentos dos produtos agrícolas e pecuários. Essa evolução alterou significativamente os ciclos naturais, modificando os fluxos de energia e nutrientes de forma sistêmica.

A influência antrópica, porém, vai além do uso intensivo de insumos, afetando a maneira como energia e matéria interagem e se distribuem nos ambientes moldados pelo cultivo, manifestando-se de diversas formas. Decorrendo impactos das práticas

convencionais, como o uso acelerado de agroquímicos (ex.: fertilizantes sintéticos, pesticidas e herbicidas) que, ao serem aplicados para maximizar o rendimento, introduzem um aporte artificial de certo tipo de energia e matéria (Gliessman, 2001). Esses produtos visam acelerar as transformações bioquímicas nas plantas e otimizar a produção, mas acabam por perturbar os processos naturais que ocorrem no solo.

Esse desequilíbrio pode levar, por exemplo, à eliminação de microrganismos benéficos, prejudicando os ciclos naturais de decomposição e ciclagem de nutrientes. Além disso, a prevalência das monoculturas canaliza o fluxo de energia de forma concentrada, promovendo uma homogeneização do ambiente que reduz a diversidade dos organismos envolvidos em processos de ciclagem e aumenta a vulnerabilidade do sistema perante pragas e alterações ambientais (Gliessman, 2001).

Adicionalmente, a mecanização intensiva, que se baseia fortemente no uso de combustíveis fósseis, adiciona outra camada de complexidade, pois a energia extra oriunda desses insumos não segue os mesmos ciclos naturais, contribuindo para a emissão de gases e para o agravamento do desequilíbrio energético do agroecossistema (Gliessman, 2001).

Nesse contexto, o solo revela-se o substrato fundamental capaz de mitigar ou potencializar os efeitos dessas interferências. Em sua função de reservatório, o solo armazena uma ampla gama de nutrientes essenciais, os quais se encontram tanto na fração orgânica quanto na inorgânica (Brady; Weil, 2013). Por outro lado, técnicas e sistemas conservacionistas de agricultura e produção de alimentos, como os sistemas agroflorestais, podem contribuir significativamente para a manutenção dos fluxos de energia e nutrientes nos ecossistemas agrícolas (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Viabilizando alternativas agrícolas para diminuir e mitigar os impactos de técnicas convencionais.

Então, o solo exerce funções primordiais para a melhor dinâmica de energia, matéria e nutrientes nos agroecossistemas. Um ponto essencial é considerar a MO, proveniente da biomassa vegetal, que inclui exsudatos, resíduos e o desprendimento de células durante o ciclo vegetativo, como o principal veículo pelo qual a energia fica incorporada ao sistema. Ao entrar no solo, essa MO é submetida à ação de uma rica comunidade de microrganismos e de organismos maiores, como minhocas e outros invertebrados (Brady; Weil, 2013).

Esses organismos realizam a decomposição, transformando os resíduos vegetais em compostos orgânicos intermediários com distintos graus de humificação e diferentes tempos de permanência, os quais funcionam tanto como reservas de energia quanto como fontes contínuas de carbono para a atividade biológica (Brady; Weil, 2013). A ciclagem de nutrientes, portanto, é uma função vital do solo e está intimamente ligada a essa transformação. Esse processo natural reduz a dependência

de insumos externos, uma vez que os nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, são liberados de forma gradual por meio da ação dos microrganismos, estando disponíveis para as plantas (Brady; Weil, 2013).

Ao mesmo tempo, o solo exerce funções importantes como filtragem e “buffering”, atuando na contenção de substâncias químicas e impedindo que poluentes ou excessos de nutrientes atinjam os lençóis freáticos e corpos d’água superficiais, ajudando a prevenir problemas como a eutrofização e a contaminação ambiental (Brady; Weil, 2013). A fixação biológica de nitrogênio, especialmente em associações simbióticas entre leguminosas e bactérias fixadoras, é outro exemplo de como o solo interage de maneira sustentável com os ciclos naturais, enriquecendo a reserva de nitrogênio de forma autógena (Brady; Weil, 2013).

Outro aspecto da função do solo diz respeito à sua capacidade de promover interações físicas essenciais, como a formação de agregados (Brady; Weil, 2013). Esses agregados resultam da associação entre partículas minerais e residuais orgânicos e representam momentos de auto-organização, onde o sistema responde à entrada contínua de energia e matéria (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Durante essa dinâmica, há dissipações de energia que levam a estados transitórios de desordem, seguidos pela reorganização que fortalece a integridade estrutural do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2011). A formação de agregados não só melhora a capacidade de retenção de água e nutrientes do solo, como também aumenta sua resistência à erosão e possibilita a troca iônica eficiente, regulando o pH e garantindo que os nutrientes permaneçam acessíveis às plantas.

Ademais, o solo exerce funções interligadas que dependem diretamente da biodiversidade do solo, suas interações promovem a aeração, fragmentação e redistribuição da matéria orgânica, o que potencializa ainda mais a ciclagem dos nutrientes e altera a velocidade com que o carbono é decomposto. A magnitude do fluxo (quantidade total de carbono introduzida) e a velocidade do fluxo (taxa de decomposição) são moduladas tanto pelos tipos de culturas cultivadas quanto pelos métodos de preparo e manejo do solo (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

É importante ressaltar que, em ecossistemas agrícolas, essas funções do solo podem ser comprometidas ou, inversamente, potencializadas decorrente das práticas de manejo. Sistemas de cultivo diversificados, como a rotação de culturas, o sistema de plantio direto e as agroflorestas, tendem a se aproximar dos ciclos naturais, promovendo uma reintrodução contínua da matéria orgânica e estimulando o equilíbrio do fluxo de energia e matéria.

Embora as interferências antrópicas, como o uso intensificado de agroquímicos, a mecanização e as monoculturas, direcionem os fluxos de energia e matéria de maneira desigual e potencialmente prejudicial, as práticas conservacionistas podem

beneficiar as funções do solo, conforme suas aptidões naturais e oferecer mecanismos adequados de mitigação para sistemas alimentares (Gliessman, 2001). Ao funcionar como reservatório e transformador da matéria orgânica, promovendo a ciclagem e a regeneração dos nutrientes, este substrato essencial se torna o pilar da produção agrícola sustentável.

A compreensão das complexas interações entre energia e nutrientes é essencial para desenvolver práticas de manejo que garantam não só a produtividade, mas também a integridade ecológica dos agroecossistemas a longo prazo. Indicadores dessa complexidade incluem:

O uso intensivo de agroquímicos e a predominância de monoculturas, que impõem fluxos artificiais de energia e matéria e perturbam os processos naturais de decomposição e ciclagem dos nutrientes. Esses fatores contribuem para a degradação do solo, aumento das emissões de gases estufa e maior vulnerabilidade a pragas e variações climáticas.

Manejo intensivo e inadequado do solo, que aceleram a perda de elementos essenciais e comprometem a saúde e a qualidade do solo, elevando os riscos de perda de fertilidade e contaminação ambiental.

O solo como reservatório e regulador dos nutrientes, cuja capacidade de armazenar, ciclar e filtrar substâncias químicas é crucial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

A viabilidade de práticas sustentáveis, como a rotação de culturas, o plantio direto e os sistemas agroflorestais, que imitam a diversidade natural e promovem a recuperação e o equilíbrio dos fluxos energéticos e dos nutrientes. Integrar estratégias produtivas com a preservação ambiental, com o solo como elemento central, é indispensável para garantir a resiliência e a sustentabilidade dos agroecossistemas diante dos desafios impostos pelas práticas agrícolas modernas.

## 2.6 Qualidade do solo

A qualidade do solo (QS) é um elemento essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas, pois garante não apenas a multifuncionalidade do solo como um sistema biológico ativo, mas também o suporte necessário para o crescimento saudável das plantas, a filtragem adequada da água e a manutenção da biodiversidade (Doran; Parkin, 2015). Contudo, as interferências provocadas pela atividade humana vêm alterando esse equilíbrio natural, impactando de forma significativa tanto os fluxos de nutrientes quanto os de energia.

Um solo de alta qualidade apresenta-se como um elemento crucial para o desenvolvimento das culturas e sustentabilidade ambiental, pois suas características, como riqueza em MO, estrutura adequada, boa aeração, capacidade de retenção de umidade e biodiversidade, potencializam a disponibilidade de nutrientes essenciais (Doran; Zeiss, 2000).

Quando práticas agrícolas insustentáveis, como o cultivo em monocultura ou o uso exagerado de fertilizantes químicos, são aplicadas, ocorre uma degradação progressiva do solo. Essa degradação se manifesta pela depleção dos nutrientes, que, por sua vez, compromete a produtividade e a vitalidade dos cultivos.

Diversas ações de manejo inapropriado podem provocar desequilíbrios que vão além da mera perda de produtividade, tais como (Brady; Weil, 2013):

**Aplicação Excessiva de Fertilizantes:** O emprego intensivo de fertilizantes químicos, apesar de proporcionar um aumento momentâneo na oferta de nutrientes para as plantas, pode levar a um acúmulo desequilibrado de certos elementos no solo. Esse excesso não somente prejudica a saúde vegetal, mas também promove a lixiviação dos nutrientes, contribuindo para a contaminação de corpos hídricos e para a eutrofização.

A remoção de áreas de cobertura vegetal, muitas vezes decorrente do desmatamento e de práticas de manejo inadequadas, expõe o solo aos agentes erosivos. Essa exposição intensifica a perda das camadas superiores, que são ricas em matéria orgânica e nutrientes, resultando em um solo menos fértil e na diminuição da produtividade da terra.

A utilização excessiva de agroquímicos pode afetar negativamente a comunidade microbiana presente no solo. Esses microrganismos são fundamentais, já que participam da decomposição da matéria orgânica, do processo de fixação de nitrogênio e da ciclagem dos nutrientes, garantindo que os elementos essenciais sejam naturalmente disponibilizados para as plantas.

Além das questões nutricionais, as práticas agrícolas inadequadas podem causar modificações na estrutura física do solo. Por exemplo, a irrigação mal planejada e o uso frequente de maquinários pesados resultam em compactação, comprometendo não só a infiltração e a retenção de água, mas também a aeração necessária para a atividade biológica. Uma estrutura comprometida impede a formação adequada de agregados e dificulta os processos de troca iônica e de fixação dos nutrientes, prejudicando tanto as plantas quanto os organismos benéficos do solo (Brady; Weil, 2013).

Em contrapartida, a adoção de práticas agrícolas que respeitem os processos naturais pode ajudar a restaurar e até mesmo preservar a qualidade do solo (Gliessman, 2001). Estratégias como a rotação de culturas, o plantio direto, a integração de sistemas agroflorestais e a agricultura de conservação buscam restabelecer o equilíbrio natural. Essas práticas promovem a incorporação de MO, incentivam a formação de agregados e aumentam a atividade das micorrizas, contribuindo para uma ciclagem de nutrientes mais robusta e para a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo (Gliessman, 2001).

A QS e os fluxos de energia e nutrientes são interdependentes e fundamentais para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. As interferências antrópicas, sejam elas oriundas do uso intensivo de agroquímicos, monoculturas, mecanização ou desmatamento, alteram os processos naturais que sustentam o solo e, por conseguinte, a produtividade agrícola (Gliessman, 2001). Diante disso, a adoção de práticas sustentáveis, que valorizem e protejam os recursos naturais, é indispensável para garantir a resiliência e a saúde dos agroecossistemas ao longo do tempo, assegurando não apenas a produção de alimentos, mas também a manutenção dos serviços ambientais que o solo oferece (Gliessman, 2001).

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Práticas conservacionistas são essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas, pois melhoram a qualidade do solo e equilibram o fluxo de energia. O plantio direto, a incorporação de resíduos e o uso de culturas de cobertura preservam a matéria orgânica, protegem contra erosão e favorecem a ciclagem eficiente de nutrientes. O manejo racional de insumos e técnicas adequadas de irrigação mantêm o solo produtivo e biodiverso. A diversidade de culturas e o controle das monoculturas tornam o sistema mais resiliente, garantindo proteção natural contra pragas e doenças. Assim, a adoção dessas práticas é indispensável para uma produção agrícola sustentável, resiliente e ambientalmente responsável.

### 4 REFERÊNCIAS

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3o ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. p.1–21, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaspecpub35.c1>>. Acesso em: 4/3/2025.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, v. 15, n. 1, p. 3–11, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139300000676>>. Acesso em: 15/7/2025.

GLIESSMAN, Stephen R. *Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 653 p.

MÅNSSON, B. Å.; MCGLADE, J. M. Ecology, thermodynamics and H.T. Odum's conjectures. *Oecologia*, v. 93, n. 4, p. 582–596, 1993.

ODUM, Eugene P.; BARRET, Gare W. Fundamento de Ecologia. 5. ed. São Paulo: Cengage, 2015. 632 p.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. O Solo como sistema. Curitiba: Edição dos Autores, 2011. 104 p.