

**AGRICULTURA
REGENERATIVA COMO
ESTRATÉGIA PARA A
RESILIÊNCIA PRODUTIVA
EM SISTEMAS AGRÍCOLAS
TROPICAIS: INTEGRAÇÃO
ENTRE CONSERVAÇÃO DO
SOLO, EFICIÊNCIA HÍDRICA
E SUSTENTABILIDADE
ECONÔMICA**

**REGENERATIVE AGRICULTURE AS A STRATEGY FOR PRODUCTIVE
RESILIENCE IN TROPICAL AGRICULTURAL SYSTEMS: INTEGRATING SOIL
CONSERVATION, WATER-USE EFFICIENCY AND ECONOMIC
SUSTAINABILITY**

Ciências Biológicas, Ciências Agrárias, Engenharias • 03/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790811537](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790811537)

Igor Madruga de Oliveira¹

Iran Carlos Lovis Trentin²

Rosemberg Alves Pereira³

José Hermógenes Moura da Costa⁴

Daniel Rodrigues dos Santos⁵

Giovane Moreno⁶

Roberta Alves da Silva Ferreira⁷

Murillo Nazareno Cavalcante Aguiar⁸

Odaíze do Socorro Ferreira Cavalcante Lima⁹

Agnaldo Braga Lima¹⁰

RESUMO

A agricultura tropical enfrenta simultaneamente degradação estrutural e biológica dos solos, maior variabilidade das chuvas, aumento da exposição a eventos de calor e seca e pressão por redução de custos e riscos econômicos. Nesse cenário, a agricultura regenerativa tem sido apresentada como abordagem capaz de reorganizar o manejo a partir da saúde do solo, da diversificação biológica e da eficiência no uso de recursos, embora o termo permaneça conceitualmente heterogêneo e não corresponda a um pacote técnico universal. Este artigo analisa a agricultura regenerativa como estratégia de resiliência produtiva em sistemas agrícolas tropicais, integrando três dimensões: conservação e funcionalidade do solo, eficiência hídrica e sustentabilidade econômica. O estudo foi desenvolvido como revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, baseada em literatura científica e documentos acadêmicos verificados, sem emprego de fluxograma PRISMA ou de contagens de triagem não auditáveis. A síntese mostra que os resultados mais consistentes decorrem da combinação de práticas, e não da adoção isolada de uma técnica: cobertura permanente, redução do revolvimento, rotação e diversificação de culturas, plantas de cobertura, raízes vivas por maior período do ano e integração lavoura-pecuária ou lavoura-pecuária-floresta. Essas estratégias podem melhorar infiltração, agregação, ciclagem de nutrientes e estabilidade produtiva, mas seus efeitos sobre armazenamento de água, produtividade e carbono dependem de textura, clima, intensidade de manejo e tempo de adoção. Evidências brasileiras recentes no Cerrado associam diversificação de longo prazo a maior saúde do solo, eficiência de uso da água, rendimento e estabilidade da soja. No plano econômico, os benefícios potenciais decorrem da redução de dependência de insumos, diversificação de receitas e diluição de

riscos, porém a transição pode exigir investimento inicial, conhecimento técnico e horizonte temporal compatível com a maturação dos processos ecológicos. Como contribuição, propõe-se a Matriz Integrada de Resiliência Regenerativa Tropical (MIRRT), que organiza indicadores de solo, água, produção e economia para orientar diagnóstico, monitoramento e tomada de decisão em propriedades tropicais.

Palavras-chave: agricultura regenerativa; saúde do solo; eficiência hídrica; resiliência produtiva; sistemas tropicais; sustentabilidade econômica.

ABSTRACT

Tropical agriculture simultaneously faces structural and biological soil degradation, greater rainfall variability, increasing exposure to heat and drought events, and pressure to reduce production costs and economic risks. In this context, regenerative agriculture has been presented as an approach capable of reorganizing management around soil health, biological diversification, and resource-use efficiency, although the term remains conceptually heterogeneous and does not correspond to a universal technical package. This article analyzes regenerative agriculture as a strategy for productive resilience in tropical agricultural systems by integrating three dimensions: soil conservation and functionality, water-use efficiency, and economic sustainability. The study was conducted as a qualitative systematized review with narrative synthesis, based on verified scientific literature and academic documents, without the use of PRISMA flowcharts or unauditable screening counts. The synthesis indicates that the most consistent outcomes arise from combinations of practices rather than from isolated techniques: permanent soil cover, reduced soil disturbance, crop rotation and diversification, cover crops, living roots for longer

periods, and crop-livestock or crop-livestock-forest integration. These strategies can improve infiltration, aggregation, nutrient cycling, and productive stability, but their effects on water storage, yield, and carbon depend on soil texture, climate, management intensity, and time since adoption. Recent Brazilian evidence from the Cerrado associates long-term crop diversification with improved soil health, water-use efficiency, soybean yield, and yield stability. Economically, potential benefits arise from lower input dependence, diversified revenues, and risk dilution, although transition may require upfront investment, technical knowledge, and a time horizon compatible with ecological process maturation. As a contribution, the article proposes the Integrated Tropical Regenerative Resilience Matrix (MIRRT), which organizes soil, water, production, and economic indicators to support diagnosis, monitoring, and decision-making on tropical farms.

Keywords: regenerative agriculture; soil health; water-use efficiency; productive resilience; tropical systems; economic sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A produção agrícola em regiões tropicais combina alta capacidade biológica de produção com vulnerabilidades edafoclimáticas específicas. Temperaturas elevadas aceleram a decomposição da matéria orgânica; chuvas intensas podem favorecer erosão, selamento superficial e perdas de nutrientes; longos períodos secos ampliam a dependência de água armazenada no perfil; e muitos solos tropicais apresentam baixa fertilidade natural, forte intemperismo e acidez, exigindo manejo criterioso para manter estrutura, atividade biológica e disponibilidade de nutrientes. Ao mesmo tempo, sistemas agrícolas de alta produtividade operam sob forte exposição a preços de fertilizantes, defensivos, combustíveis,

crédito e commodities. A resiliência produtiva, portanto, não pode ser entendida apenas como capacidade de manter rendimento em um único ciclo, mas como a habilidade do sistema de absorver choques climáticos e econômicos, recuperar sua funcionalidade e preservar capacidade produtiva no médio e no longo prazo.

É nesse espaço que a agricultura regenerativa ganhou visibilidade científica e produtiva. A literatura mostra, contudo, que o termo não possui definição universal. Newton et al. (2020), ao revisar usos acadêmicos e práticos da expressão, identificaram definições baseadas em processos, em resultados ou na combinação de ambos. Schreefel et al. (2020) encontraram convergência em torno da conservação do solo, da saúde edáfica e da oferta de serviços ecossistêmicos, mas chamaram atenção para a insuficiente explicitação das dimensões socioeconômicas. Giller et al. (2021) reforçaram que muitas práticas associadas à agricultura regenerativa já integram tradições consolidadas da agronomia, da agricultura conservacionista e da agroecologia, sendo necessário avaliar resultados concretos em vez de presumir benefícios automáticos a partir de rótulos. Essa observação é especialmente importante nos trópicos, onde a mesma prática pode produzir respostas distintas conforme solo, cultura, regime hídrico, sistema de produção e nível tecnológico.

Neste artigo, agricultura regenerativa é tratada como abordagem sistêmica orientada por resultados, na qual práticas agronômicas são selecionadas para restaurar ou ampliar funções ecológicas relevantes à produção. Essa formulação evita dois extremos. O primeiro é transformar a agricultura regenerativa em uma lista fixa de procedimentos, desconsiderando que determinados ambientes exigem intervenções específicas. O segundo é usar a expressão

como categoria genérica sem indicadores mensuráveis. A operacionalização proposta parte de quatro resultados verificáveis: melhoria ou manutenção da funcionalidade do solo; maior eficiência na captura, infiltração, armazenamento e uso produtivo da água; maior estabilidade de produção diante de variabilidade climática; e sustentabilidade econômica avaliada por custos, margens, risco, retorno do investimento e capacidade de permanência do produtor no sistema.

A conservação do solo ocupa posição central porque a estrutura física, a matéria orgânica, a atividade biológica e a arquitetura de poros determinam grande parte da resposta do agroecossistema à chuva, ao tráfego de máquinas, à compactação e à disponibilidade de nutrientes. Revisões sobre plantio direto mostram que a redução do revolvimento tende a melhorar vários atributos físicos ao longo do tempo, embora os resultados para densidade e resistência à penetração possam variar e dependam de rotação, cobertura e manejo do tráfego (Blanco-Canqui; Ruis, 2018). A meta-análise de Basche e DeLonge (2019) acrescenta que sistemas com cobertura do solo e raízes contínuas apresentam vantagens de infiltração. Entretanto, plantio direto isolado não deve ser confundido com agricultura regenerativa completa: a síntese de Pittelkow et al. (2015) demonstrou que os resultados de produtividade dependem da combinação entre mínimo revolvimento, retenção de resíduos e rotação de culturas.

A dimensão hídrica exige interpretação igualmente cuidadosa. Aumentar matéria orgânica e cobertura pode favorecer agregação, infiltração, redução da evaporação direta e melhor exploração radicular do perfil, mas a literatura não sustenta a ideia de que qualquer incremento de carbono orgânico produzirá, por si só,

grande aumento da água disponível às plantas. Minasny e McBratney (2018), em análise ampla, concluíram que o efeito médio do carbono orgânico sobre a capacidade de água disponível é relativamente pequeno e dependente da textura, sendo maior em solos arenosos que em argilosos. Em contrapartida, a eficiência hídrica do sistema pode melhorar por múltiplos mecanismos que não se resumem ao armazenamento estático de água: maior infiltração, menor escoamento superficial, menor perda evaporativa, cobertura térmica do solo, raízes profundas e sincronização entre consumo de água e demanda da cultura.

A terceira dimensão é econômica. Um sistema regenerativo que melhora indicadores ambientais, mas impõe risco financeiro incompatível com a realidade do produtor, dificilmente será persistente. A sustentabilidade econômica precisa ser analisada no horizonte de transição e de maturação do sistema. Estudos de fazendas regenerativas mostram que rentabilidade pode aumentar quando há redução de insumos e diversificação de receitas, ainda que o rendimento físico de uma cultura isolada não seja máximo (LaCanne; Lundgren, 2018). Em sistemas integrados brasileiros, há evidências de maior margem e viabilidade quando componentes agrícolas e pecuários são combinados de forma tecnicamente coordenada (de Oliveira et al., 2014; Calil; Ribera, 2025). Estudos recentes na Amazônia e no Cerrado também indicam que sistemas lavoura-pecuária-floresta podem apresentar desempenho econômico competitivo ou superior em determinados contextos, embora demandem investimento inicial, gestão mais complexa e mercados capazes de absorver produtos diversificados (dos Reis et al., 2025).

Diante dessa convergência entre processos edáficos, água, estabilidade produtiva e economia, a questão norteadora é: em que condições a agricultura regenerativa pode aumentar a resiliência de sistemas agrícolas tropicais sem sacrificar a viabilidade econômica? O objetivo geral é analisar como práticas regenerativas, quando combinadas e adaptadas ao contexto tropical, podem integrar conservação do solo, eficiência hídrica e sustentabilidade econômica. Especificamente, busca-se discutir os fundamentos conceituais da agricultura regenerativa; examinar evidências sobre solo e água; avaliar diversificação e sistemas integrados; identificar mecanismos econômicos, custos de transição e riscos; e propor um conjunto integrado de indicadores para diagnóstico e monitoramento. A hipótese analítica subjacente é que a resiliência não emerge de uma prática isolada, mas de complementaridades entre processos biológicos, físicos, produtivos e econômicos que precisam ser medidos simultaneamente.

2. METODOLOGIA

O estudo foi estruturado como revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa. Essa classificação foi adotada porque o problema combina literatura conceitual sobre agricultura regenerativa, meta-análises agronômicas, estudos de longo prazo, avaliações econômicas e revisões sobre sistemas integrados, sem que tenha sido executado um protocolo completo de revisão sistemática com deduplicação, registro de todas as ocorrências, dupla triagem independente e fluxograma PRISMA. A opção metodológica preserva transparência: as fontes utilizadas foram verificadas em páginas de periódicos, bases biomédicas e científicas de acesso público e repositórios institucionais, mas não se apresentam contagens de estudos encontrados, excluídos ou incluídos que não

tenham sido obtidas por uma trilha bibliográfica formalmente auditável.

A busca bibliográfica foi realizada em setembro de 2026, priorizando literatura publicada entre 2015 e 2025, com inclusão seletiva de trabalhos anteriores quando necessários à fundamentação de sistemas integrados ou de conceitos consolidados. Foram consultados PubMed/PMC, SciELO, páginas oficiais de periódicos e editoras científicas, entre elas Nature, Elsevier/ScienceDirect, Wiley, Cambridge University Press, PeerJ e Frontiers, além de repositórios institucionais da Universidade de São Paulo e da Embrapa. Os descritores foram combinados em português e inglês, incluindo: agricultura regenerativa/regenerative agriculture; agricultura tropical/tropical agriculture; saúde do solo/soil health; plantio direto/no-tillage; culturas de cobertura/cover crops; diversificação de culturas/crop diversification; eficiência de uso da água/water-use efficiency; infiltração/infiltration; resiliência produtiva/yield resilience; integração lavoura-pecuária/crop-livestock integration; integração lavoura-pecuária-floresta/crop-livestock-forest; rentabilidade/profitability; e viabilidade econômica/economic feasibility.

Foram priorizados artigos revisados por pares, meta-análises, revisões, estudos de longa duração e pesquisas brasileiras ou realizadas em condições tropicais. Estudos de outras regiões foram utilizados apenas quando abordavam mecanismos gerais relevantes, como infiltração, rotação, matéria orgânica ou economia de sistemas regenerativos, e sua extrapolação aos trópicos foi explicitamente limitada. Foram excluídas alegações promocionais sem suporte científico verificável, afirmações de sequestro de carbono sem método de mensuração e conclusões que tratassem associação

como causalidade. Também se evitou assumir que práticas usualmente associadas à agricultura regenerativa produzem o mesmo efeito em todos os solos e climas.

A síntese foi organizada em três eixos de resultado: conservação e funcionalidade do solo; eficiência hídrica e estabilidade produtiva; sustentabilidade econômica. Em seguida, os eixos foram integrados em uma matriz conceitual denominada Matriz Integrada de Resiliência Regenerativa Tropical (MIRRT). A matriz não é um índice validado nem substitui avaliações agronômicas locais; trata-se de uma proposta de organização de indicadores para pesquisas e diagnósticos de campo. O critério central de interpretação foi a coerência entre mecanismo e evidência: uma prática foi considerada promissora quando havia base para explicar o processo esperado e resultados empíricos compatíveis, enquanto efeitos dependentes de contexto foram apresentados com suas condicionantes.

3. AGRICULTURA REGENERATIVA EM SISTEMAS TROPICAIS: BASE CONCEITUAL E CRITÉRIOS DE RESULTADO

A ausência de uma definição universal de agricultura regenerativa é uma característica do campo, não um detalhe terminológico. Newton et al. (2020) mostraram que a expressão pode designar tanto práticas específicas quanto metas ambientais e socioeconômicas. Entre as práticas mais recorrentes aparecem redução do revolvimento, cobertura do solo, rotação, diversificação, integração de animais e uso de insumos orgânicos; entre os resultados, destacam-se saúde do solo, biodiversidade, qualidade da água, sequestro de carbono e rentabilidade. Essa pluralidade pode ser útil por permitir adaptação local, mas também cria risco de uso vago do termo. Para sistemas tropicais, a definição precisa ser

operacional: o que se pretende regenerar, em quanto tempo, por quais mecanismos e com quais indicadores.

Schreefel et al. (2020) propõem tomar a conservação do solo como ponto de entrada para a regeneração de serviços ecossistêmicos. Essa ênfase é particularmente pertinente aos trópicos agrícolas, onde a intensidade das chuvas e a velocidade dos ciclos biogeoquímicos podem tornar a superfície desprotegida rapidamente vulnerável. Entretanto, conservar não significa apenas reduzir erosão visível. Solo funcional envolve estabilidade de agregados, porosidade, infiltração, aeração, atividade microbiana, raízes em profundidade, ciclagem de nutrientes, disponibilidade química adequada e capacidade de sustentar produção sem degradação progressiva. Portanto, a avaliação regenerativa deve integrar indicadores físicos, químicos e biológicos, e não se limitar ao teor de carbono ou à adoção de uma técnica.

Giller et al. (2021) oferecem uma advertência importante: várias práticas chamadas regenerativas são conhecidas há décadas e podem gerar benefícios ou trade-offs conforme o contexto. Essa constatação não reduz sua relevância; ao contrário, desloca a discussão do marketing para a agronomia. Um sistema de plantio direto com rotação diversificada, cobertura abundante e manejo criterioso do tráfego pode produzir respostas distintas de um sistema sem revolvimento, porém com baixa diversidade, longos períodos de pousio e compactação. Da mesma forma, integrar pecuária pode aumentar ciclagem de nutrientes e renda, mas pastejo excessivo pode reduzir cobertura e comprometer estrutura. O princípio regenerativo, nesse sentido, é sistêmico: práticas precisam ser combinadas para produzir funções desejadas e monitoradas para evitar efeitos adversos.

Lal (2020) associa agricultura regenerativa a uma agenda de produção, qualidade do solo e clima, mas os ganhos de carbono devem ser avaliados com prudência. A dinâmica de carbono depende de aporte de biomassa, qualidade dos resíduos, temperatura, umidade, mineralogia, profundidade, manejo e condição inicial do solo. Paustian et al. (2016) destacam o potencial de práticas de manejo do solo para mitigação, ao mesmo tempo que ressaltam desafios de quantificação. Para produtores, isso significa que carbono do solo é um indicador importante, mas não deve ser tratado como sinônimo de saúde do solo nem como garantia de benefício econômico. A mesma concentração de carbono pode coexistir com diferenças relevantes em compactação, acidez, estrutura ou disponibilidade de nutrientes.

A especificidade tropical também está na sazonalidade hídrica. Em parte do Cerrado, por exemplo, a produção de grãos se concentra em uma estação chuvosa bem definida, e o desempenho da segunda safra depende da distribuição das chuvas e da água acumulada no perfil. Sistemas com cobertura, raízes profundas e melhor infiltração podem aumentar a capacidade de atravessar veranicos, mas a intensidade desse efeito depende da profundidade efetivamente explorada pelas raízes, da textura e da ausência de camadas restritivas. Em ambientes amazônicos, por sua vez, chuvas intensas, elevada biomassa potencial e logística diferenciada criam outro conjunto de oportunidades e limitações. Assim, agricultura regenerativa tropical deve ser entendida como arquitetura de manejo adaptativo, não como prescrição uniforme.

A partir dessas premissas, quatro critérios são propostos para caracterizar um sistema regenerativo no âmbito desta revisão. Primeiro, o manejo deve manter ou melhorar funções do solo

mensuráveis ao longo do tempo. Segundo, deve aumentar a eficiência de uso da água no nível do sistema, considerando infiltração, evaporação, transpiração produtiva e rendimento por unidade de água. Terceiro, deve reduzir a vulnerabilidade do rendimento e da renda a choques climáticos e mercadológicos. Quarto, deve apresentar viabilidade econômica sob custos reais e horizonte de investimento compatível com o produtor. Uma prática que melhora apenas um desses critérios pode ser útil, mas a resiliência produtiva depende de integração entre eles.

Quadro 1. Critérios operacionais da agricultura regenerativa para sistemas tropicais

Dimensão	Pergunta de diagnóstico	Indicadores prioritários	Resultado esperado
Solo	O solo mantém ou recupera funções físicas, químicas e biológicas?	Cobertura; matéria orgânica/carbono; agregação; densidade; resistência à penetração; fertilidade; atividade biológica	Maior funcionalidade e menor degradação ao longo do tempo
Água	A chuva ou irrigação é convertida em água acessível e em produção com menor perda?	Infiltração; umidade por profundidade; evapotranspiração; produtividade por mm; escoamento	Maior eficiência de uso da água e menor exposição a veranicos
Produção	O sistema mantém rendimento e reduz variabilidade sob	Produtividade; coeficiente de variação; biomassa de cobertura;	Maior estabilidade e recuperação após choques

	condições adversas?	estabilidade em anos secos	
Economia	A transição preserva fluxo de caixa e aumenta retorno ajustado ao risco?	Custo operacional; margem; VPL; ROI; payback; diversidade de receitas	Viabilidade de longo prazo e menor vulnerabilidade financeira

Fonte: elaboração própria com base na literatura revisada.

4. CONSERVAÇÃO DO SOLO E SAÚDE EDÁFICA COMO BASE DA RESILIÊNCIA

A saúde do solo é frequentemente apresentada como o núcleo da agricultura regenerativa porque conecta processos físicos, químicos e biológicos que sustentam a produção. Em sistemas tropicais intensivos, a manutenção dessa funcionalidade depende fortemente da proteção da superfície e do aporte contínuo de resíduos e raízes. O revolvimento frequente pode romper agregados, acelerar mineralização e deixar o solo exposto; por outro lado, a simples interrupção do preparo mecânico não garante recuperação quando há baixo aporte de biomassa, compactação por tráfego ou rotação simplificada. A revisão de Blanco-Canqui e Ruis (2018) indica que o plantio direto tende a melhorar propriedades físicas com o tempo, mas os efeitos variam por profundidade, clima, textura e práticas complementares. Isso sustenta a ideia de que plantio direto é plataforma de manejo e não resultado regenerativo em si mesmo.

Pittelkow et al. (2015) demonstraram, em meta-análise ampla, que a produtividade sob agricultura conservacionista é condicionada pela combinação de princípios. A redução do revolvimento isolada pode apresentar perdas de rendimento em determinados contextos, enquanto a associação com retenção de resíduos e rotação melhora

o desempenho, sobretudo em sistemas de sequeiro sob clima mais seco. A implicação para os trópicos é direta: palhada, diversidade temporal e plantas de cobertura precisam ser planejadas em função do calendário de chuvas, da cultura principal e da capacidade de produção de biomassa. Sistemas com grande entrada de resíduos e raízes tendem a criar condições mais favoráveis à estrutura e à atividade biológica do que monoculturas com pousio e solo descoberto.

A matéria orgânica desempenha múltiplas funções: participa da formação e estabilidade de agregados, retém nutrientes, alimenta comunidades microbianas e influencia propriedades físicas. Oldfield, Bradford e Wood (2019), em meta-análise global, observaram associação positiva entre carbono orgânico do solo e produtividade de milho e trigo, com respostas que tendem a se estabilizar em concentrações mais elevadas. Os autores, entretanto, destacam que relações observacionais não substituem experimentos capazes de separar causa e efeito. Em sistemas tropicais, a construção de matéria orgânica é particularmente desafiadora pela decomposição acelerada. A estratégia regenerativa, portanto, exige balanço contínuo de carbono: maior produção de biomassa, raízes mais abundantes, cobertura, rotação e redução de perdas.

O papel das raízes merece atenção equivalente ao da palhada. Sistemas com raízes vivas por maior parte do ano alimentam a rizosfera, estruturam bioporos e ampliam o volume de solo explorado. Gramíneas tropicais de alta biomassa podem contribuir para agregação e exploração profunda, enquanto leguminosas podem complementar a rotação por meio da fixação biológica de nitrogênio e de resíduos com composição distinta. A combinação de grupos funcionais evita que diversificação seja apenas aumento

nominal do número de espécies. O objetivo é criar complementaridade: arquiteturas radiculares diferentes, épocas distintas de crescimento, relações carbono:nitrogênio variadas e respostas distintas a estresses.

A diversificação apresenta evidência robusta em escala global. Tamburini et al. (2020), a partir de uma síntese de meta-análises, concluíram que práticas de diversificação agrícola podem aumentar biodiversidade e múltiplos serviços ecossistêmicos sem necessariamente comprometer rendimento. Os benefícios incluem regulação de pragas, ciclagem de nutrientes, fertilidade e regulação hídrica, mas a magnitude dos resultados varia conforme a prática e o ambiente. Para a agricultura regenerativa, a implicação é que diversidade deve ser funcional e associada a objetivos agronômicos: reduzir janelas de solo descoberto, quebrar ciclos de pragas, aumentar biomassa, explorar camadas diferentes do solo e distribuir demanda hídrica e nutricional ao longo do tempo.

No Brasil, sistemas integrados representam uma expressão particularmente relevante dessa lógica. Moraes et al. (2014) descrevem a integração lavoura-pecuária como sistema planejado para explorar sinergias entre compartimentos solo-planta-animal-atmosfera. Em condições tropicais, a rotação entre culturas anuais e forrageiras pode gerar palhada abundante, melhorar ciclagem de nutrientes e oferecer receita pecuária na entressafra. Oliveira et al. (2024), em revisão do Cerrado brasileiro, identificaram efeitos geralmente positivos de sistemas integrados sobre indicadores químicos, físicos e biológicos de saúde do solo, embora ressaltem variação entre estudos e a necessidade de análises sistêmicas. A integração com árvores acrescenta estrutura vertical, sombreamento, raízes profundas e produto florestal, mas aumenta

complexidade de desenho, competição por recursos e horizonte de retorno.

A conservação do solo, contudo, não deve ser avaliada apenas por tendência de aumento de carbono. Indicadores de campo precisam captar se o solo está funcional para a cultura. Densidade, resistência à penetração, estabilidade de agregados, infiltração, cobertura, profundidade efetiva de raízes e sinais de erosão são diretamente relevantes. Indicadores químicos como pH, saturação por bases, fósforo, potássio, micronutrientes e capacidade de troca catiônica continuam indispensáveis; agricultura regenerativa não elimina a necessidade de correção e adubação quando diagnosticadas. A dimensão biológica pode ser representada por carbono da biomassa microbiana, respiração, atividade enzimática ou observações padronizadas de macrofauna, desde que interpretadas em conjunto. O princípio é substituir a visão de insumos por hectare por uma visão de funções por hectare.

Essa abordagem integrada ajuda a evitar simplificações. Reduzir fertilizantes indiscriminadamente pode reduzir produtividade e aporte de resíduos, prejudicando o próprio objetivo de regeneração. Eliminar revolvimento em solo com severa compactação pode manter restrições físicas se não houver estratégia de raízes, tráfego ou correção localizada. Aumentar diversidade sem considerar mercado e calendário pode elevar custos operacionais. Agricultura regenerativa tecnicamente consistente exige diagnóstico, sequência de intervenção e monitoramento. A meta não é minimizar cada insumo de forma absoluta, mas aumentar eficiência, reduzir dependências desnecessárias e manter processos ecológicos capazes de sustentar produtividade.

Quadro 2. Práticas regenerativas, mecanismos e condicionantes em ambiente tropical

Prática	Mecanismo predominante	Benefícios potenciais	Condicionantes e riscos
Redução do revolvimento	Preservação de agregados e poros; menor perturbação	Menor erosão; proteção estrutural; economia de operações	Pode manter compactação se usada sem cobertura, rotação e controle de tráfego
Cobertura permanente	Proteção física, menor evaporação e aporte de resíduos	Infiltração, moderação térmica, supressão de plantas daninhas	Exige biomassa suficiente e manejo para não competir por água
Rotação e diversificação	Complementaridade de raízes, resíduos e ciclos biológicos	Ciclagem de nutrientes, quebra de ciclos de pragas, estabilidade	Maior complexidade operacional e necessidade de mercado/planejamento
Plantas de cobertura	Raízes vivas, biomassa, fixação de N em leguminosas	Estrutura, palhada, eficiência hídrica e serviços biológicos	Espécie e data de terminação devem ser compatíveis com balanço hídrico
Integração lavoura-pecuária	Conversão de biomassa em renda e ciclagem de nutrientes	Diversificação de receita, palhada, uso anual da área	Superpastejo e pisoteio concentrado podem remover cobertura e compactar
Integração com árvores	Diversidade estrutural, microclima, raízes profundas	Sombra, carbono, diversificação e potencial de	Competição por luz/água, investimento, mercado e

	e produto florestal	renda de longo prazo	payback mais longo
--	---------------------	----------------------	--------------------

Fonte: elaboração própria com base na literatura revisada.

5. EFICIÊNCIA HÍDRICA: INFILTRAÇÃO, ARMAZENAMENTO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E USO PRODUTIVO DA ÁGUA

A água é o elo mais direto entre saúde do solo e estabilidade produtiva. Em áreas de sequeiro, a precipitação só se converte em produção quando é capturada pelo sistema, infiltra no perfil, permanece acessível às raízes e é utilizada em períodos críticos. Solo descoberto, crostas superficiais, compactação e baixa continuidade de poros aumentam escoamento e perdas; cobertura e estrutura estável tendem a reduzir energia de impacto das gotas e favorecer entrada de água. Basche e DeLonge (2019), em meta-análise de taxas de infiltração, observaram que práticas associadas à cobertura e à presença contínua de raízes foram especialmente eficazes em aumentar infiltração. Esse mecanismo é central para ambientes tropicais de chuva intensa, nos quais poucos eventos podem representar parcela importante da precipitação anual.

A infiltração, porém, não deve ser confundida com disponibilidade efetiva para a cultura. Parte da água infiltrada pode drenar abaixo da zona radicular, ser consumida por plantas de cobertura ou evaporar posteriormente. A textura, a profundidade do solo, a presença de cascalhos, a compactação e a distribuição de raízes definem quanto da água armazenada será acessível. Minasny e McBratney (2018) mostraram que o incremento de carbono orgânico, embora possa alterar retenção, produz aumento médio relativamente modesto da capacidade de água disponível, especialmente em solos mais argilosos. Essa evidência corrige um argumento frequentemente

simplificado: matéria orgânica é importante para a função hídrica, mas o benefício não se reduz a uma suposta multiplicação da capacidade de armazenamento.

O papel da cobertura é mais amplo. A palhada reduz temperatura superficial, protege agregados, diminui evaporação direta e modera amplitude térmica. Em climas quentes, essa função pode ser decisiva durante o estabelecimento da cultura e em intervalos sem chuva. Plantas de cobertura, por sua vez, consomem água enquanto crescem, de modo que o manejo deve considerar época de dessecação, biomassa e regime pluviométrico. Wang et al. (2021), em meta-análise, encontraram que culturas de cobertura podem reduzir a eficiência de armazenamento da precipitação durante o pousio e diminuir água em camadas profundas, mas também aumentar água nas camadas superficiais e elevar a eficiência de uso da água da cultura subsequente. O resultado não é paradoxal: culturas de cobertura utilizam água, porém também modificam evapotranspiração, cobertura e estrutura. O balanço depende de clima e manejo.

Essa dependência é especialmente importante em regiões com estação seca marcada. A decisão sobre espécie e momento de terminação da cobertura deve ser baseada na previsão de chuvas, profundidade radicular da cultura seguinte e capacidade de reabastecimento do perfil. Coberturas de alta biomassa podem ser excelentes para proteger o solo, mas, se terminadas tardiamente em ambiente com pouca chuva antes da semeadura, podem criar competição hídrica. Em regiões úmidas, o mesmo consumo pode ser irrelevante e o maior desafio ser drenagem ou excesso de água. Agricultura regenerativa não elimina o balanço hídrico; ela o torna mais central ao planejamento.

A eficiência de uso da água (EUA) é indicador mais informativo que o armazenamento isolado, pois relaciona produção à água consumida ou disponibilizada. Cherubin et al. (2025), em experimento de longa duração no Cerrado brasileiro, observaram que sistemas diversificados apresentaram maior saúde do solo, maior produtividade e estabilidade da soja e maior eficiência de uso da água que a monocultura soja-pousio. O estudo é particularmente relevante porque integra 16 anos de manejo e múltiplos indicadores de saúde do solo. Os resultados sugerem que a resiliência hídrica emerge de conjunto de propriedades físicas e biológicas, e não de um único atributo. Sistemas com maior biomassa, especialmente combinando gramíneas e leguminosas de cobertura, foram capazes de manter melhor desempenho em anos mais quentes e secos.

A diversidade temporal também pode reduzir risco climático. Bowles et al. (2020), analisando experimentos de longa duração em sistemas de milho da América do Norte, observaram que rotações mais diversas aumentaram rendimento e reduziram perdas em condições adversas. Embora o contexto não seja tropical, o mecanismo é relevante: diferentes culturas alteram resíduos, raízes, nutrientes, biologia e estrutura, produzindo memória ecológica que pode aumentar estabilidade. Em sistemas tropicais, onde é possível realizar mais de uma safra anual em muitas regiões, o desenho de sucessões e consórcios amplia a oportunidade de manter raízes vivas e distribuir riscos.

A água também conecta regeneração à irrigação. Em áreas irrigadas, melhorar infiltração e cobertura pode elevar a fração de água efetivamente utilizada pelas plantas e reduzir perdas por evaporação ou escoamento, mas eficiência hídrica deve ser avaliada em diferentes escalas. Aumentar eficiência na parcela não significa

necessariamente reduzir consumo total se a área irrigada ou o número de ciclos aumentar. Para produtores, indicadores úteis incluem umidade do solo em profundidades críticas, taxa de infiltração, água disponível antes de períodos de maior demanda, evapotranspiração estimada, produtividade por milímetro e estabilidade de rendimento em anos secos. O objetivo regenerativo é produzir mais valor e estabilidade por unidade de água, não apenas maximizar um indicador físico isolado.

Em síntese, práticas regenerativas podem melhorar o funcionamento hídrico por quatro vias: aumentar entrada de água no solo, reduzir perdas não produtivas, ampliar o volume radicular explorado e estabilizar a eficiência de conversão de água em biomassa ou produto econômico. O peso relativo de cada via varia conforme textura e clima. Essa visão ajuda a construir recomendações tecnicamente defensáveis: em solos arenosos, aumentar carbono e cobertura pode ter efeito proporcionalmente maior sobre retenção; em solos argilosos compactados, estrutura e continuidade de macroporos podem ser mais decisivas; em regiões de alta evaporação, palhada e arquitetura do dossel ganham importância; em ambientes com excesso hídrico, drenagem e tráfego devem ser considerados.

Tabela 1. Evidências selecionadas sobre água, produtividade e resiliência

Estudo	Contexto	Resultado relevante	Interpretação para sistemas tropicais
Basche e DeLonge (2019)	Meta-análise de infiltração	Práticas com cobertura e raízes contínuas foram	Reforça importância de superfície

		associadas a maior infiltração	protegida e bioporos em chuvas intensas
Wang et al. (2021)	Meta-análise de culturas de cobertura	Efeito hídrico variável; aumento médio da eficiência de uso da água da cultura seguinte	Mostra que o balanço entre consumo da cobertura e benefícios depende do manejo
Minasny e McBratney (2018)	Meta-análise e bases globais	Efeito médio relativamente pequeno do carbono orgânico sobre água disponível	Evita atribuir a resiliência hídrica a um único mecanismo
Cherubin et al. (2025)	Experimento de 16 anos no Cerrado	Diversificação aumentou saúde do solo, produtividade, estabilidade e eficiência hídrica da soja	Evidência direta de integração entre solo, água e resiliência em ambiente tropical

Fonte: elaboração própria com base na literatura revisada.

6. DIVERSIFICAÇÃO E SISTEMAS INTEGRADOS COMO MECANISMOS DE RESILIÊNCIA TROPICAL

A diversificação é uma das características mais recorrentes nas definições de agricultura regenerativa porque atua simultaneamente sobre processos ecológicos e econômicos. Do ponto de vista biológico, diferentes espécies ampliam a diversidade de resíduos, exsudatos, arquiteturas radiculares e interações com microrganismos. Do ponto de vista fitossanitário, rotações podem interromper ciclos de patógenos e pragas. Do ponto de vista físico,

espécies com grande produção de raízes e biomassa favorecem cobertura e estrutura. Do ponto de vista econômico, múltiplos produtos podem reduzir dependência de uma única cultura e distribuir receitas ao longo do ano. Tamburini et al. (2020) mostram que diversificação, em média, favorece múltiplos serviços ecossistêmicos sem necessariamente reduzir produtividade, ainda que existam trade-offs e variações contextuais.

No Cerrado, a diversificação de sucessões e rotações assume papel estratégico por causa da janela entre safra principal e estação seca. O uso de milheto, braquiárias, crotalárias e outras espécies pode ser orientado por objetivos distintos: produção de palhada, reciclagem de nutrientes, supressão de plantas daninhas, fixação biológica de nitrogênio, descompactação biológica ou forragem. Cherubin et al. (2025) demonstram que sistemas diversificados de longa duração podem superar a monocultura soja-pousio em saúde do solo, rendimento e estabilidade. Essa evidência reforça que a regeneração é cumulativa: vários dos benefícios requerem anos de entrada de biomassa e repetição de ciclos radiculares para se tornarem claramente detectáveis.

A integração lavoura-pecuária acrescenta um componente que transforma biomassa vegetal em produto animal e pode acelerar ciclagem de nutrientes. Em sistemas bem manejados, a pastagem entra na rotação como cultura de serviço e atividade econômica. Moraes et al. (2014) destacam que os sistemas integrados precisam ser estudados como unidades, porque seus efeitos resultam de interações entre solo, plantas, animais e atmosfera. de Oliveira et al. (2014), em sistema no Sul do Brasil, observaram melhor desempenho econômico da integração lavoura-pecuária em comparação ao sistema sem pastejo, sem redução do rendimento

da soja, desde que o manejo da altura do pasto fosse adequado. Embora subtropical, o estudo ilustra um princípio aplicável: a presença animal pode gerar receita e ciclagem, mas a intensidade de pastejo determina se o efeito será benéfico ou degradante.

Em condições tropicais, espécies forrageiras do gênero *Urochloa* são amplamente utilizadas por sua adaptação, produção de biomassa e capacidade radicular. Quando inseridas após ou em consórcio com culturas anuais, podem fornecer palhada de elevada persistência e pasto durante a estação seca. Entretanto, o sistema exige planejamento de lotação, altura de entrada e saída, distribuição de bebedouros e prevenção de áreas de pisoteio concentrado. O objetivo não é simplesmente colocar animais na lavoura, mas sincronizar pastejo com manutenção de cobertura e estrutura. A agricultura regenerativa oferece aqui uma linguagem útil: o animal é componente de ciclagem e diversificação, não um fator independente do solo.

A integração lavoura-pecuária-floresta adiciona outra camada de complexidade. Árvores podem oferecer madeira, sombra, microclima e raízes profundas, além de aumentar diversidade estrutural. Oliveira et al. (2024) encontraram, na revisão do Cerrado, que sistemas integrados com componentes arbóreos apresentam potencial para melhorar saúde do solo e conciliar produção com balanço de carbono, mas os resultados dependem de desenho e idade do sistema. Competição por luz e água, custos de implantação, tempo de retorno florestal e acesso ao mercado de madeira são variáveis decisivas. Em áreas com déficit hídrico, espaçamento e espécie arbórea precisam ser compatíveis com disponibilidade de água e cultura agrícola.

A diversificação também precisa ser avaliada em escala de propriedade. Uma rotação tecnicamente desejável pode ser economicamente inviável se não houver semente, máquina, assistência técnica ou mercado para o produto. O desenho regenerativo deve distinguir culturas de renda, culturas de serviço e componentes que cumprem ambas as funções. Plantas de cobertura podem não gerar receita direta, mas reduzir custos ou risco em ciclos seguintes. Forrageiras podem produzir serviço de solo e receita pecuária. Árvores podem funcionar como capital de longo prazo. A análise sistêmica deve monetizar quando possível benefícios e custos, mas também registrar serviços que afetam risco, como estabilidade de rendimento e menor vulnerabilidade a seca.

Por isso, a diversidade mais eficiente não é necessariamente a maior diversidade possível. Um sistema com muitas espécies mal sincronizadas pode elevar custo de sementes, operações e manejo sem gerar benefício proporcional. A literatura favorece uma abordagem funcional: escolher espécies por nichos e funções complementares. Em propriedades de grãos tropicais, por exemplo, um conjunto reduzido de espécies bem adaptadas pode produzir mais biomassa e continuidade radicular que uma mistura complexa de baixa emergência. Em propriedades mistas, a inclusão de pecuária pode ser mais relevante que aumentar o número de plantas. A regeneração deve ser medida por resultados do sistema, não pelo número de práticas adotadas.

7. SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA: CUSTO DE TRANSIÇÃO, RENTABILIDADE E GESTÃO DO RISCO

A dimensão econômica é indispensável porque a adoção de práticas regenerativas ocorre em propriedades reais, com restrições de caixa,

crédito, mão de obra, equipamentos e conhecimento. Muitas práticas exigem custos iniciais antes que seus benefícios se tornem plenamente observáveis. Sementes de cobertura, adaptação de semeadoras, cercas, bebedouros, aquisição ou locação de animais, correção de solo, planejamento de pastejo e implantação de árvores podem elevar desembolso nos primeiros anos. Em contrapartida, economias com fertilizantes, defensivos, operações de preparo e suplementação animal podem surgir progressivamente. Avaliar apenas um ciclo agrícola tende a subestimar investimentos de longo prazo e superestimar práticas que entregam retorno imediato, mas degradam o capital natural.

A análise econômica regenerativa precisa separar produtividade física de rentabilidade. LaCanne e Lundgren (2018), em fazendas de milho nos Estados Unidos, encontraram maior rentabilidade em sistemas definidos pelos autores como regenerativos, apesar de menor rendimento de grãos, resultado associado a menores custos de insumos e receitas diversificadas. O estudo não deve ser generalizado diretamente aos trópicos, mas é conceitualmente importante: maximizar sacas por hectare não é equivalente a maximizar margem, retorno sobre capital ou resiliência financeira. Para agricultores tropicais, a decisão deve considerar margem bruta, custo operacional, fluxo de caixa, necessidade de capital de giro e variabilidade interanual, além de rendimento.

Os sistemas integrados brasileiros fornecem evidência mais diretamente aplicável. de Oliveira et al. (2014) verificaram que a integração lavoura-pecuária melhorou o retorno econômico em comparação a um sistema de soja com cobertura sem pastejo, dentro das condições estudadas. Calil e Ribera (2025), utilizando análise estocástica de valor presente líquido para integração lavoura-

pecuária no Brasil, encontraram vantagem econômica nos cenários integrados, inclusive quando incorporaram risco de preço e rendimento. Esses resultados sugerem que diversificação produtiva pode funcionar como instrumento financeiro, não apenas agrônomo. O produtor deixa de depender de uma única fonte de receita e pode aproveitar diferentes janelas de mercado.

Estudos recentes ampliam essa perspectiva para sistemas com árvores. dos Reis et al. (2025) analisaram casos de integração lavoura-pecuária-floresta no Cerrado e na Amazônia e encontraram indicadores de viabilidade favoráveis no longo prazo em comparação com sistemas tradicionais de referência. Entretanto, os próprios resultados evidenciam condicionantes: investimentos iniciais mais altos, tempo de retorno de vários anos, custos logísticos e dependência de mercado para madeira ou produtos florestais. A lição não é que a integração florestal seja universalmente superior, mas que a diversidade de produtos pode aumentar retorno quando o desenho técnico e o ambiente de mercado estão alinhados.

A sustentabilidade econômica também deve incorporar risco climático. Sistemas com solo mais estruturado, maior cobertura e diversidade podem reduzir a variabilidade do rendimento, e essa estabilidade possui valor econômico mesmo quando a média de produtividade muda pouco. Cherubin et al. (2025) observaram menor variabilidade da soja em sistemas diversificados do Cerrado. Bowles et al. (2020), em outro contexto climático, também mostraram que rotações mais diversas amorteceram perdas em anos adversos. Em termos financeiros, menor variância de rendimento reduz probabilidade de margens negativas, necessidade de crédito emergencial e risco de descapitalização. Esse

benefício raramente aparece quando a comparação se limita à média de produção.

A transição regenerativa pode ser planejada em fases para reduzir risco. Uma estratégia prudente é iniciar em talhões representativos, estabelecer linha de base de indicadores, testar espécies de cobertura e ajustar máquinas antes de ampliar área. Em propriedades com pecuária, a integração pode começar por períodos de pastejo controlado sobre coberturas, sem investimento florestal imediato. A adoção escalonada permite aprender com a própria fazenda e evita tratar recomendações regionais como receitas exatas. Indicadores econômicos devem acompanhar o processo desde o início, incluindo custo de sementes, horas de máquina, fertilizantes, defensivos, mão de obra, arrendamento, suplementação, receita por atividade e valor de ativos necessários.

A redução de insumos deve ser interpretada como consequência de maior eficiência, não como meta ideológica. Se a correção de acidez ou a reposição de nutrientes é necessária para sustentar produção e biomassa, omiti-la pode diminuir produtividade e atrasar a regeneração. A economia econômica emerge quando processos biológicos e melhor manejo substituem usos ineficientes ou redundantes de insumos. Por exemplo, uma leguminosa bem estabelecida pode reduzir necessidade de nitrogênio em uma cultura subsequente; rotação pode reduzir pressão de determinado patógeno; palhada pode diminuir plantas daninhas e evaporação; pecuária pode converter cobertura em receita. Cada economia precisa ser comprovada por orçamento parcial ou análise de custo total.

Outro elemento é o custo de conhecimento. Sistemas diversificados exigem mais informação, planejamento e monitoramento. O agricultor precisa dominar calendários de espécies, dinâmica de palhada, pastejo, fertilidade e fitossanidade em um sistema com mais interações. Assistência técnica e experimentação local reduzem esse custo. Do ponto de vista de pesquisa, a análise econômica deve incluir aprendizagem e adaptação, porque a eficiência de um sistema regenerativo tende a aumentar à medida que o produtor domina o manejo. Comparações feitas no primeiro ano podem confundir efeito de transição com desempenho de estado estável.

Por fim, sustentabilidade econômica deve ser avaliada em horizonte compatível com os processos ecológicos. Indicadores como valor presente líquido, taxa interna de retorno, retorno sobre investimento, payback, margem por hectare e custo por unidade de produto permitem comparar alternativas em vários anos. Calil e Ribera (2025) mostram a utilidade de incorporar risco e distribuição de resultados, e dos Reis et al. (2025) demonstram a importância de considerar retornos diferenciados entre componentes. A recomendação metodológica é clara: projetos regenerativos devem apresentar orçamento de transição, cenários de preço e produtividade, análise de sensibilidade e indicadores de risco, em vez de promessas genéricas de redução de custos.

Quadro 3. Indicadores econômicos para a transição regenerativa

Indicador	O que mede	Por que é relevante	Cuidado de interpretação
Margem bruta	Receita menos custos variáveis	Mostra efeito operacional por safra/atividade	Não capta investimento e depreciação integralmente

Custo por unidade	Custo total por kg, saca ou arroba	Permite avaliar eficiência mesmo quando a produtividade muda	Depende de rateio correto em sistemas com múltiplos produtos
Fluxo de caixa	Entradas e saídas no tempo	Identifica pressão financeira durante a transição	Deve incluir capital de giro e sazonalidade
VPL	Valor presente dos fluxos futuros	Compara alternativas de longo prazo	Sensível à taxa de desconto e hipóteses de preços
ROI e TIR	Retorno do capital investido	Avaliam atratividade econômica	Devem ser analisados com risco e horizonte de investimento
Payback	Tempo para recuperar investimento	Importante para capacidade financeira do produtor	Não mede sozinho rentabilidade após recuperação
Variabilidade da margem	Estabilidade financeira entre anos	Captura resiliência econômica	Requer série temporal suficiente

Fonte: elaboração própria com base na literatura revisada.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO: INTEGRAÇÃO SOLO-ÁGUA-PRODUÇÃO-ECONOMIA

A síntese da literatura permite identificar um padrão consistente: os benefícios mais robustos aparecem quando práticas são combinadas para atuar sobre mecanismos complementares. Redução de revolvimento sem cobertura pode ser insuficiente; cobertura sem diversidade pode não romper ciclos biológicos;

diversidade sem manejo hídrico pode consumir água em momento crítico; integração pecuária sem controle de lotação pode compactar e remover cobertura; e práticas ambientais sem planejamento econômico podem não persistir. A agricultura regenerativa, portanto, funciona melhor como lógica de desenho de sistema do que como certificação de práticas individuais. Essa conclusão converge com as críticas conceituais de Newton et al. (2020) e Giller et al. (2021) e com as evidências de agricultura conservacionista sintetizadas por Pittelkow et al. (2015).

No eixo do solo, a literatura sustenta com maior confiança a importância de cobertura, diversidade, raízes e tempo de adoção. Blanco-Canqui e Ruis (2018) mostram que mudanças físicas sob plantio direto se acumulam e são mediadas por práticas complementares. Oldfield, Bradford e Wood (2019) associam maior matéria orgânica a maior potencial de rendimento, embora não permitam concluir causalidade simples. Tamburini et al. (2020) reforçam que diversidade melhora múltiplas funções do agroecossistema. Em conjunto, esses trabalhos sustentam um princípio operacional: um sistema regenerativo tropical deve maximizar a duração da cobertura e da atividade radicular dentro dos limites hídricos e econômicos da propriedade.

No eixo hídrico, a evidência é mais nuançada. Basche e DeLonge (2019) demonstram efeitos favoráveis de práticas alternativas sobre infiltração, mas Minasny e McBratney (2018) mostram que o efeito direto da matéria orgânica sobre capacidade de água disponível é menor do que muitas narrativas sugerem. Wang et al. (2021) revelam trade-offs de culturas de cobertura: podem consumir água durante o pousio, mas também elevar eficiência de uso da água da cultura seguinte. Essa combinação de resultados é valiosa porque impede

promessas excessivas e orienta manejo adaptativo. A pergunta correta não é se uma prática “aumenta água”, mas em qual camada, em qual momento do ciclo e por qual mecanismo.

A evidência do Cerrado brasileiro aproxima as dimensões do solo e da água da realidade tropical. Cherubin et al. (2025) observaram que diversificação de longo prazo melhorou indicadores de saúde do solo, produtividade, estabilidade e eficiência de uso da água da soja em comparação ao sistema soja-pousio. O resultado é relevante por demonstrar que saúde do solo pode ser tratada como atributo funcional relacionado à resiliência, e não apenas como conjunto de indicadores ambientais. Ao mesmo tempo, a magnitude dos ganhos obtidos naquele experimento não deve ser aplicada automaticamente a outras regiões; o valor científico está em comprovar o mecanismo em condição tropical e indicar quais componentes merecem monitoramento.

No eixo econômico, os estudos analisados mostram que diversificação pode criar valor por diferentes caminhos. LaCanne e Lundgren (2018) destacam redução de custos e múltiplas receitas; de Oliveira et al. (2014) mostram ganho de margem em integração lavoura-pecuária; Calil e Ribera (2025) incorporam risco e identificam vantagem em cenários integrados; dos Reis et al. (2025) apontam potencial de sistemas lavoura-pecuária-floresta no Cerrado e na Amazônia. Entretanto, a heterogeneidade desses estudos impede uma taxa universal de retorno. Rentabilidade depende de preços, escala, logística, mercado de animais e madeira, custo de capital, infraestrutura e habilidade gerencial. O argumento científico adequado é que a diversificação abre mecanismos de resiliência financeira, não que garante lucro.

A integração das evidências também mostra que produtividade média não é suficiente para medir resiliência. Um sistema pode manter média semelhante e reduzir variabilidade, o que já tem valor econômico. Pode produzir menos da cultura principal e mais renda total por incorporar pecuária. Pode aumentar custo no primeiro ano e reduzir custo médio após estabilização. Pode melhorar infiltração sem aumentar significativamente a capacidade total de água disponível. Esses exemplos reforçam a necessidade de indicadores multidimensionais e séries temporais. Comparações de uma única safra são inadequadas para processos que envolvem reconstrução de estrutura do solo, aumento de biomassa e aprendizado gerencial.

A partir da literatura, propõe-se a Matriz Integrada de Resiliência Regenerativa Tropical (MIRRT). A matriz organiza quatro dimensões: Solo, Água, Produção e Economia. Em Solo, o monitoramento inclui cobertura, carbono ou matéria orgânica, agregação, densidade, resistência à penetração, infiltração, fertilidade e indicadores biológicos. Em Água, inclui umidade por profundidade, infiltração, evapotranspiração, produtividade por milímetro e ocorrência de estresse em fases críticas. Em Produção, inclui rendimento, variabilidade interanual, estabilidade em anos secos, biomassa de cobertura e diversidade funcional. Em Economia, inclui custo operacional, margem bruta, custo por unidade, fluxo de caixa, valor presente líquido, retorno sobre investimento, payback e participação de diferentes atividades na receita.

A MIRRT deve ser interpretada como ferramenta de raciocínio e não como escore universal. O desempenho regenerativo pode ser acompanhado por tendências: melhora, estabilidade ou deterioração em relação à linha de base da própria propriedade. Essa abordagem evita comparações injustas entre solos e climas

distintos. Também permite identificar trade-offs. Se a biomassa de cobertura aumenta, mas a água na semeadura cai sistematicamente, é necessário ajustar terminação. Se o carbono aumenta, mas a compactação superficial piora, o tráfego ou pastejo precisa ser revisto. Se o rendimento se mantém, mas o custo total cresce e o retorno sobre investimento cai, o sistema não está economicamente resiliente. A regeneração torna-se, assim, um processo de gestão baseada em evidências.

Uma implicação importante é que agricultores tropicais não precisam adotar todas as práticas ao mesmo tempo. A priorização deve considerar o principal fator limitante. Em área com erosão, cobertura e controle do escoamento são urgentes. Em solo compactado, raízes estruturantes, tráfego controlado e diagnóstico físico ganham prioridade. Em área com baixa diversidade e alta pressão fitossanitária, rotação e consórcios podem trazer maior retorno. Em propriedade exposta a volatilidade de receita, integração com pecuária ou novas culturas pode ser estratégica. O sistema regenerativo é construído por sequência de intervenções coerentes, cada uma com indicador e critério de sucesso.

Também emerge uma agenda de pesquisa. São necessários mais experimentos tropicais de longa duração que mensurem simultaneamente solo, água, rendimento, custos e risco. Grande parte dos trabalhos avalia um subconjunto de variáveis, dificultando entender causalidade e trade-offs. É especialmente importante padronizar indicadores de saúde do solo e relatá-los em profundidade suficiente para capturar efeitos radiculares, bem como associar dados biofísicos a séries de fluxo de caixa. Para sistemas integrados, a unidade de análise deve ser a fazenda ou o sistema

completo, evitando comparar apenas uma cultura e ignorar produtos animais ou florestais.

Em termos de extensão rural, a literatura sugere que a recomendação regenerativa deve ser menos prescritiva e mais diagnóstica. Em vez de perguntar se o produtor utiliza plantio direto ou cobertura, deve-se perguntar se há solo exposto em períodos críticos, se a infiltração está melhorando, se raízes exploram profundidade, se a produtividade é mais estável e se a margem líquida suporta a estratégia. Essa mudança aproxima agricultura regenerativa da agronomia de precisão e do manejo adaptativo, permitindo utilizar sensores, amostragem georreferenciada, registros econômicos e experimentos em faixas para aprender dentro da propriedade.

Quadro 4. Matriz Integrada de Resiliência Regenerativa Tropical (MIRRT)

Eixo	Indicadores de linha de base	Indicadores de tendência	Sinal de alerta
Solo	Cobertura; carbono/matéria orgânica; pH; nutrientes; densidade; infiltração; resistência; biologia	Aumento de cobertura e estabilidade; melhoria estrutural; fertilidade equilibrada	Erosão, compactação crescente, raízes rasas, desequilíbrio químico

Água	Umidade do perfil; infiltração; escoamento; evapotranspiração; EUA	Maior infiltração e produtividade por unidade de água; menor estresse em períodos críticos	Solo seco na semeadura por manejo inadequado de cobertura; encharcamento ou perdas por runoff
Produção	Rendimento por cultura; biomassa; variabilidade; incidência de pragas/doenças	Maior estabilidade, diversidade funcional e recuperação após eventos adversos	Queda persistente de produtividade ou aumento da variabilidade
Economia	Custos, margem, receita por atividade, capital de giro, VPL/ROI/payback	Redução de custo unitário, diversificação de receita, melhora do retorno ajustado ao risco	Pressão de caixa, aumento de dívida, dependência de mercado inexistente ou retorno excessivamente longo

Fonte: elaboração própria com base na literatura revisada.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura regenerativa pode constituir estratégia relevante para a resiliência produtiva de sistemas agrícolas tropicais quando é tratada como abordagem mensurável de manejo e não como rótulo. A revisão mostra que a principal convergência científica está na centralidade do solo e na integração de práticas que preservam cobertura, aumentam diversidade, prolongam a presença de raízes vivas e reduzem perturbações desnecessárias. Esses elementos podem melhorar estrutura, infiltração, ciclagem de nutrientes e atividade biológica, mas seus efeitos dependem de tempo, clima,

textura, fertilidade e qualidade de manejo. Por isso, nenhuma prática isolada é suficiente para definir o caráter regenerativo de um sistema. O critério deve ser a trajetória de suas funções e resultados.

A conservação do solo é a base física e biológica dessa trajetória. Plantio direto, retenção de resíduos, culturas de cobertura e rotação apresentam maior consistência quando utilizados de forma complementar. A literatura também indica que matéria orgânica e carbono do solo são indicadores importantes, associados à produtividade e à qualidade estrutural, mas não devem ser transformados em métricas exclusivas. Um solo pode acumular carbono e continuar limitado por compactação, acidez, baixa disponibilidade de nutrientes ou restrição radicular. O monitoramento regenerativo precisa combinar atributos físicos, químicos e biológicos e, principalmente, relacioná-los ao desempenho da cultura em anos normais e adversos.

A eficiência hídrica é a dimensão que traduz mais diretamente a saúde do solo em resiliência climática. Os benefícios não decorrem apenas de aumentar água retida, mas de melhorar todo o percurso da água: interceptar chuva com cobertura, favorecer infiltração, reduzir escoamento e evaporação, manter poros e raízes ativas e converter maior fração da água consumida em produção. As evidências mostram que culturas de cobertura podem gerar benefícios e custos hídricos, dependendo do momento de manejo. Essa ambivalência não enfraquece a estratégia regenerativa; ela reforça a necessidade de tomada de decisão baseada em balanço hídrico e contexto local. Em climas tropicais, espécie, biomassa e data de terminação são tão importantes quanto a presença da cobertura em si.

A diversificação aparece como mecanismo transversal porque atua sobre solo, água, pragas, nutrientes e risco econômico. Resultados recentes no Cerrado mostram que sucessões e rotações de longo prazo podem aumentar saúde do solo, rendimento, estabilidade e eficiência de uso da água da soja. Sistemas integrados lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta ampliam essa lógica ao transformar biomassa e área em múltiplos produtos. O potencial, entretanto, depende de manejo de pastejo, escolha de espécies, infraestrutura, logística e mercado. A integração não é automaticamente regenerativa: superpastejo, excesso de tráfego ou desenho arbóreo inadequado podem criar novas limitações. O valor do conceito está em orientar interações positivas e monitorar os efeitos do conjunto.

A sustentabilidade econômica precisa ocupar o mesmo nível de importância que solo e água. Sistemas regenerativos podem reduzir dependência de insumos, gerar receitas adicionais e diminuir variabilidade, mas a transição pode exigir capital e aprendizagem. Estudos econômicos de sistemas integrados no Brasil indicam vantagens em determinados cenários, inclusive quando se considera risco, enquanto análises com componente florestal mostram que retorno depende do horizonte de investimento e de condições de mercado. Portanto, projetos de transição devem incluir fluxo de caixa, análise de sensibilidade, custo de oportunidade e cenários de preço e produtividade. Rentabilidade não pode ser inferida a partir de indicadores ambientais nem de produtividade física isolada.

A Matriz Integrada de Resiliência Regenerativa Tropical proposta neste artigo oferece uma forma de organizar essa complexidade. Ao integrar Solo, Água, Produção e Economia, a MIRRT permite que cada propriedade estabeleça linha de base, metas e indicadores de

tendência. Seu uso mais promissor está no acompanhamento longitudinal: observar se a cobertura aumenta, se a infiltração melhora, se raízes aprofundam, se o rendimento se torna menos variável e se a margem e o retorno do capital evoluem. A matriz também facilita reconhecer trade-offs antes que se transformem em falhas de sistema. Trata-se de uma estrutura para decisão e pesquisa, que deve ser validada e calibrada em diferentes sistemas tropicais.

Em perspectiva, a agricultura regenerativa será mais cientificamente útil quanto menos depender de afirmações universais e mais se apoiar em métricas, experimentos de longa duração e adaptação local. Os trópicos oferecem grande potencial para intensificação biológica pela elevada produção de biomassa e pela possibilidade de múltiplos ciclos, mas também impõem rápida decomposição, forte sazonalidade e riscos de erosão e estresse hídrico. A resiliência produtiva emerge quando o manejo transforma essas características em vantagens: solo coberto, raízes ativas, diversidade funcional, integração de componentes e gestão econômica capaz de sustentar a transição. A contribuição central desta revisão é mostrar que regeneração, eficiência hídrica e viabilidade financeira não são objetivos paralelos; são dimensões interdependentes de um mesmo sistema de produção que precisa permanecer funcional diante de choques climáticos, biológicos e econômicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASCHE, Andrea D.; DELONGE, Marcia S. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: a meta-analysis. PLOS ONE, v. 14, n. 9, e0215702, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>.

BLANCO-CANQUI, Humberto; RUIS, Sabrina J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, v. 326, p. 164-200, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>.

BOWLES, Timothy M. et al. Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. *One Earth*, v. 2, n. 3, p. 284-293, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>.

CALIL, Yuri C. D.; RIBERA, Luis. Economic Feasibility of Crop-Livestock Integration System in Brazil. *Agribusiness*, v. 41, n. 4, p. 1028-1038, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/agr.22007>.

CHERUBIN, Maurício Roberto et al. Long-term effects of crop diversification on soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystems. *Journal of Environmental Management*, v. 392, 126845, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126845>.

DE OLIVEIRA, Carlos Alberto Oliveira et al. Comparison of an integrated crop-livestock system with soybean only: Economic and production responses in southern Brazil. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 29, n. 3, p. 230-238, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170513000410>.

DOS REIS, Julio Cesar et al. Integrated crop-livestock-forest systems: a path to improved agro-economic performance in the Brazilian Amazon and Cerrado. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 9, 1518747, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1518747>.

GILLER, Ken E. et al. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, v. 50, n. 1, p. 13-25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>.

LACANNE, Claire E.; LUNDGREN, Jonathan G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. PeerJ, v. 6, e4428, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.4428>.

LAL, Rattan. Regenerative agriculture for food and climate. Journal of Soil and Water Conservation, v. 75, n. 5, p. 123A-124A, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A>.

MINASNY, Budiman; MCBRATNEY, Alex B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. European Journal of Soil Science, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.

MORAES, Anibal de et al. Research on Integrated Crop-Livestock Systems in Brazil. Revista Ciência Agronômica, v. 45, n. 5 esp., p. 1024-1031, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

NEWTON, Peter; CIVITA, Nicole; FRANKEL-GOLDWATER, Lee; BARTEL, Katharine; JOHNS, Colleen. What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 4, 577723, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723>.

OLDFIELD, Emily E.; BRADFORD, Mark A.; WOOD, Stephen A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. SOIL, v. 5, p. 15-32, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>.

OLIVEIRA, Dener M. S. et al. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. Geoderma Regional, v. 37, e00796, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>.

PAUSTIAN, Keith et al. Climate-smart soils. *Nature*, v. 532, p. 49-57, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature17174>.

PITTELKOW, Cameron M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, v. 517, p. 365-368, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13809>.

SCHREEFEL, Loekie; SCHULTE, Rogier P. O.; DE BOER, Imke J. M.; SCHRIJVER, Annemiek Pas; VAN ZANTEN, Hannah H. E. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, v. 26, 100404, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.

TAMBURINI, Giovanni et al. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, v. 6, n. 45, eaba1715, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>.

WANG, Jun; ZHANG, Shaohong; SAINJU, Upendra M.; GHIMIRE, Rajan; ZHAO, Fazhu. A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, v. 256, 107085, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107085>.

¹ Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Especializações e MBA em Aperfeiçoamento na Cultura da Soja: Solos, Nutrição e Fitossanidade pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI); Agricultura de Precisão, Fertilidade, Manejo de Solos e Nutrição de Plantas e Fitotecnia pela Faculdade Iguaçu; Educação do Campo e Agroecologia pelo Instituto Federal Farroupilha (IFF); Engenharia de Segurança do Trabalho pela UniRedentor; MBA em

Planejamento e Gestão Estratégica pelo Instituto Brasileiro de Pós-Graduação e Extensão (IBPEX). Engenheiro Agrônomo pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

² Professor da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento da Amazônia Sustentável (PPGDAS/UNIFAP). Pós-Doutor em Demografia pela Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Doutor em Agroecologia pela Universidad de Antioquia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

³ Mestrando em Extensão Rural pelo Programa de Pós-Graduação em Extensão Rural (PPGExR) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Engenheiro Agrônomo pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0663-7853>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0269570249821175>.

⁴ Doutor em Sociologia. Docente do Programa de Pós-Graduação em Extensão Rural (PPGExR) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Graduado em Ciências Sociais pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4617-1839>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0446672105586918>.

⁵ Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária Pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Doutorando em Agronomia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Mestre em Bioenergia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Especialista em Agronegócio, Gestão Empresarial e Inteligência Competitiva pela Faculdade Metropolitana de Campinas e em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Focus. Engenheiro Agrônomo pela UFPR. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁷ Mestra em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e doutoranda em Desenvolvimento Rural Sustentável pela UNIOESTE. Graduada em Pedagogia pela Universidade Castelo Branco (UCB) e acadêmica do Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Paranaense (UNIPAR). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁸ Mestrando em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Formação em Gestão Pública, História e Pedagogia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁹ Mestra em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Neuropsicopedagoga clínica e institucional. Pedagoga. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

¹⁰ Doutor e Mestre em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Matemático e Pedagogo. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).