



AGRICULTURA REGENERATIVA e a SOLUÇÃO DE CARBONO DO SOLO

SETEMBRO 2020

Autores:

Jeff Moyer, Andrew Smith, PhD, Yichao Rui, PhD, Jennifer Hayden, PhD





AGRICULTURA REGENERATIVA É UMA SOLUÇÃO CLIMÁTICA EM QUE TODOS SAEM GANHANDO

*e que já está pronta para
implementação em larga escala.*

O QUE ESTAMOS ESPERANDO?

Índice

3	Resumo Executivo
5	Introdução
9	Um corretivo potente
11	Princípios regenerativos para a saúde do solo e sequestro de carbono
13	Biodiversidade abaixo do solo
17	Biodiversidade acima do solo
25	Armazenando carbono no solo
26	A questão da produtividade
28	Começando a agir
30	Saúde do solo para um futuro vivo
31	Referências

AGRADECIMENTOS

À Fundação Paloma Blanca e Tom e Terry Newmark, proprietários do Finca Luna Nueva Lodge e de fazenda regenerativa na Costa Rica, pelo financiamento deste artigo. Tom também é co-fundador e presidente do The Carbon Underground. Agradecemos também Roland Bunch, Francesca Cotrufo, PhD, David Johnson, PhD, Chellie Pingree e Richard Teague, PhD, por providenciarem entrevistas que ajudaram na elaboração deste artigo.

SUMÁRIO EXECUTIVO

A maneira com a qual lidamos com o solo agricultável importa. É importante para as pessoas, para a sociedade e também para o clima.

Em 2014, o Instituto Rodale lançou o seu histórico documento intitulado “Agricultura regenerativa orgânica e mudança climática: uma solução realista para o aquecimento global”. Este documento foi, inquestionavelmente, influenciador: estimulou a adoção corporativa e governamental da agricultura regenerativa, inspirou muitas organizações agrícolas e agricultores a adotar práticas regenerativas, e acelerou o reconhecimento de que a agricultura feita de maneira adequada deve ser parte de uma resposta eficaz à nossa crise climática.

No entanto, embora o relatório de 2014 tenha sido um alerta necessário, não foi suficientemente eficaz, já que a mudança não aconteceu com a rapidez necessária. O colapso ecológico está acelerando. E está acelerando para um lugar onde onde agora enfrentamos o desafio real de sermos capazes de cultivar alimentos nutritivos em quantidade suficiente para sustentar a crescente população humana. No Dia Mundial do Solo em 2015, a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação fez uma provocação ao afirmar "nós temos aproximadamente 60 anos de colheitas restantes - e depois?"

Essa deterioração da condição do planeta, em conjunto com um aprofundamento da compreensão científica e do apoio à agricultura regenerativa, é o contexto ecológico para este novo relatório. Fazendeiros, pecuaristas, agrônomos e acadêmicos têm trabalhado nestes últimos seis anos, e os avanços feitos por si só apoiam a emissão de uma nova avaliação do estado da ciência e da prática.

Qualquer sucesso que o relatório de 2014 teve deve ser visto em um contexto planetário sombrio: em 2014, havia 396 partes por milhão (ppm) de CO₂ atmosférico, enquanto hoje a Terra está sobrecarregada com 416 ppm. Cada ppm de CO₂ atmosférico corresponde à liberação de 2 bilhões de toneladas de carbono terrestre, portanto, essas dezenove partes por milhão desde 2014 representam a transferência de 38 milhões de toneladas adicionais de carbono, do subsolo para a atmosfera.

Continuando a matemática do clima: o dióxido de carbono é 3,67 vezes o peso do carbono, o que significa que essa transferência de 38 bilhões de toneladas de carbono subterrâneo resultou na deposição de aproximadamente 140 bilhões de novas

toneladas de contaminação por CO₂, juntando-se aos gases de efeito estufa que já superaquecem o nosso planeta. Não há como discutir com essa matemática simples, mas mortal: os dados são inatacáveis. O Programa Mundial de Pesquisa Climática projetou, em julho de 2020, que as tendências atuais CO₂ provavelmente “atingiriam o dobro do ppm pré industrial de CO₂ em 2060,”— até 560 ppm. Como consequência, o grupo de cientistas distintos previu que nosso planeta provavelmente verá um aquecimento maior na faixa de 2.6 °C até 3.9 °C. Essa magnitude de aumento da temperatura é incompatível com a continuação da vida tal qual a conhecemos. Se as tendências não forem revertidas, deixaremos de habitar um planeta habitável.

Este artigo não é apenas uma revisitação do problema ou mais um relatório terrível sobre o estado de saúde do nosso planeta. Não é mais um "alerta" pedindo ao leitor para prestar atenção na ciência ou nas mudanças climáticas que todos podemos ver e sentir ao nosso redor. É um convite.

Enquanto o planeta continua a superaquecer, os sistemas convencionais de produção agrícola e o mau uso da terra arável degradaram, ao longo do tempo, aproximadamente 75% das áreas terrestres do planeta. Além da degradação existente, estamos agora perdendo cerca de 36 bilhões de toneladas de solo todos os anos, com base na estimativa consensual de 2017 feita pelo Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia. Mais uma vez, usando uma matemática simples, porém mortal, os dados sugerem que, desde 2014 (quando o relatório anterior foi publicado), o planeta perdeu mais de 200 bilhões de toneladas de solo, ou aproximadamente 26 toneladas de solo superficial para cada ser humano. Como uma sociedade globalizada, nós continuamos a trocar o nosso solo e o nosso futuro por lucros imediatos e sem mudar os modelos de produção existentes.

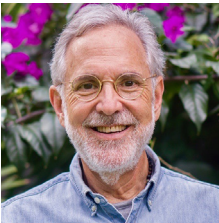
Os impactos ambientais das práticas agrícolas e da translocação de carbono de reservatórios terrestres para atmosféricos podem ser vistos e sentidos em um amplo espectro de espécies. Estudos recentes declararam que estamos vivenciando um apocalipse da biodiversidade, com 1,000,000 de espécies em sério risco de extinção devido à crise climática e perda do habitat. Junte o colapso da biodiversidade com o stress extremo da água que aflige até dezessete nações (com uma população combinada de aproximadamente 1.7 bilhão de pessoas), e fica claro que grande parte do nosso planeta está degradado.

Este artigo não é apenas uma revisitação do problema ou mais um relatório terrível sobre o estado de saúde do nosso planeta. Não é mais um "alerta" pedindo ao leitor para prestar atenção na ciência ou às mudanças climáticas que todos podemos ver e sentir ao redor. É um convite. Um convite para caminhar em uma nova direção. Pretende ser, ao mesmo tempo, um roteiro para a mudança e um apelo à ação para seguirmos um novo caminho. Um convite liderado pela ciência e desenvolvido por agricultores e pecuaristas de todo o mundo. Abençoado por comprometidos cientistas de solo e pela talentosa especialista Dra. Jennifer Hayden, o Instituto Rodale olhou a ciência em desenvolvimento sob uma nova perspectiva — e convida o leitor a dar passos positivos em direção a mudanças impactantes.

Baseado em pesquisas revisadas por pares e nas observações experientes de agrônomos em todo o mundo, este relatório declara, com segurança, que **a adoção de práticas regenerativas em pastagens e áreas cultiváveis pode sequestrar mais de 100% das emissões de CO₂ feitas atualmente pelo homem**, e um solo rico em carbono pode ser construído com rapidez suficiente para resultar em uma considerável redução do dióxido de carbono atmosférico. Agora sabemos o suficiente para ter uma esperança real e, com isso, vem a responsabilidade de trilhar um novo caminho.



Jeffrey W. Moyer
JEFF MOYER
Diretor Executivo, Rodale Institute



Tom Newmark
TOM NEWMARK
Cofundador e presidente, The Carbon Underground

INTRODUÇÃO

As atividades humanas afetam o planeta radicalmente - um poder que vem com uma responsabilidade. As narrativas sociais dominantes ainda priorizam recompensas econômicas, mesmo quando a crise climática e vários outros desastres ambientais interconectados chocam nosso planeta. A Terra tem uma grande influência no que acontece, mas o planeta precisa de nós para cooperar em sua cura, para o bem dos humanos e de toda a vida. Rachel Carson previu este momento em 1962, e suas palavras nos lembram que não é tarde demais para mudar de curso:

“Estamos no ponto em que duas estradas divergem. Mas ao contrário das estradas do poema familiar de Robert Frost, elas não são igualmente justas. A estrada que temos percorrido há muito tempo é aparentemente fácil, uma superestrada lisa na qual avançamos com grande velocidade, mas encontramos um desastre no seu final. A outra bifurcação —menos percorrida - oferece a nossa última e única chance de chegar a um destino que garanta a preservação da Terra.”

—Rachel Carson na Introdução à Primavera Silenciosa [3].

M qgqrck_ jgkclr_p c _epdamj_ ejm`\_jkclrc amlcar\_bm amlqcesc npmbsxgp sk ep\_lbc cvacqgm bc \_jgkclrmq glgk\_eglĆtcgq n\_p\_ mq lmqmqm `gq_tÊq* nmposc lmq amlaclrp_kmq l_ npmbšĆċm bc a_jmpg_q, Lċm ċ qspnpcq_ n_p_ lglesċk npcqr_lbm _rclĬċm osc cq_ _`slbċlag\_ bc a\_p`mgbp_rm q rck sk npcĊm_jrmð bcep_b_Ċċm eclp_jgx_b_ b_ rcpp_* b_ Ċes_ c bm _p; ncpb_q ck `gmbgtcpqgb\_bc c camqgqqrck\_q; dmkc amlrdls\_ c bcdqagðlag\_q lsrpgagml\_gq amk`gl_b_q amk sk pĈngbm _skclrm lm ðlbgac bc m`cqgb\_bc b\_ nmnsj\_Ċċm c bc bmcclĬ\_q pcj\_agml\_b\_qð c bcqrpsgĊċm bc amkslgb\_bc psp\_gq c kcgmq bc qs`qgqrðlag_ n_p_ _epgasjrmpcq ck rmbm m kslbm [2]. M qgqrck_ _epdamj_ bmkgl_lrc bcnc1bc bc glqskmq qglrĈrgamq c npĖnpqmq osc _skclr_k bc asqrm _a_b_ _lm* clos_lrm mq npcĊmq b_q amk kmbgrgcq cqr_el_k c mq qmjmq qc bcrcpgmp_k. Cqgcq npm`jck\_q qspeck bc npĈrga\_q osđkga\_q bc \_epgasjrsp\_\* km1masjrsp\_q bc q\_dp\_ c kĬ ecqrċm bm e\_bm, osc \_emp\_ am`pck m osc _lrcq cp_k _q rcpp_q _epdamj_q k_gq dċprcgq bm kslbmð

“? s lgdmpkgb_bc lm amp_Ċċm bcqrcq qgqrck_q c qs_ bcnc1bðlag_ bc dcprggjx_lrcq osđkgamq* ncqrgagb_q c bm sqm npctclrgtm bc _lrg`gĖrgamq\* jct\_ qgqrck\_rga\_kclrc \_ pcqsjr\_bmq lce\_rgtmq c tsjlcp\_`gjgb_bcq , Y2[*



A Fazenda Finca Luna Nueva na Costa Rica usa um sistema de cultivo sintrópico em campos de cacau recém estabelecidos, incorporando uma diversidade de espécies de plantas.

O que é agricultura regenerativa?

A agricultura regenerativa é um sistema de princípios agrícolas que reabilita todo o ecossistema e aprimora os recursos naturais, em vez de esgotá-los.

Robert Rodale, filho do pioneiro de orgânicos J.I. Rodale, usou o termo regenerativo para distinguir um tipo de agricultura que vai além de simplesmente sustentável. A agricultura regenerativa:

“...aproveita as tendências naturais dos ecossistemas de se regenerarem quando são perturbados. Nesse sentido primário, é distinto de outros tipos de agricultura que se opõem ou ignoram o valor dessas tendências naturais.” [9]

A agricultura regenerativa é marcada por seu trabalho em atingir ciclos fechados de nutrientes, redução ou eliminação de produtos químicos especializados em biocidas, maior colheita e biodiversidade biológica, assim como práticas menos anuais e mais perenes e que imitem os processos ecológicos naturais. Alguns líderes do movimento também acreditam que a agricultura regenerativa deve se estender além do nosso tratamento de recursos naturais e incluir compromissos com o bem estar animal e a justiça social. Estes pilares estão incluídos na Certificação Regenerativa Orgânica [vide página 23].

Ao mesmo tempo, a crise climática continua. Uma década atrás, a o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) disse que precisávamos limitar as emissões de gases estufa para 44 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (44 GtCO₂e) até 2020 [5]. Se não fizéssemos nada de novo para mitigar a crise climática, as projeções sugeriam que em 2020 as emissões anuais poderiam ser de 56 GtCO₂e, deixando uma lacuna de 12 GtCO₂e entre o carbono já na atmosfera e o nosso desejo de continuar vivendo normalmente na Terra [5].

A solução é a agricultura. Não a agricultura industrial a que estamos acostumados, e sim a agricultura que se importa com o planeta Terra.

Em 2018, as emissões globais totalizaram 55.3 GtCO₂e—aaproximando-se do pior cenário possível [6]. (Uma redução de sete por cento a cada ano durante a próxima década é necessária para limitar o aquecimento a 1.5°C) [6]. Além do mais, "a erosão acelerada do solo pode ser a segunda maior fonte de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, e suas estimativas confiáveis não são conhecidas" [7]. Nós passamos a última década trilhando um caminho até o precipício. Os cortes de emissões necessários agora “podem parecer impossíveis” diz Inger Andersen, Diretor Executivo da PNUMA “mas nós temos que tentar” [6].

E, no entanto, há esperança sob os nosso pés. Existe uma biotecnologia para reabilitação planetária massiva que foi testada e está disponível para ampla disseminação agora. O custo é mínimo e é adaptável a contextos locais em todo o mundo.

Ela pode ser implementada amanhã, proporcionando vários benefícios que vão além da estabilização do clima. A solução é a agricultura. Não a agricultura industrial a que estamos acostumados, e sim a agricultura que se importa com o planeta Terra. Cultivar de uma maneira que restaure a qualidade do solo, da água, do ar, dos ecossistemas, dos animais e, em última instância, a humanidade. Agricultura que melhora a capacidade natural do nosso solo de funcionar, de forma que o planeta e toda a sua vida presente também possam funcionar. Este tipo de agricultura é chamada de regenerativa.

A agricultura regenerativa revitaliza a Terra. É uma abordagem sistêmica na qual os agricultores trabalham com a natureza, e não contra ela. É um modelo biológico baseado nos princípios da ecologia. Com a ajuda do produtor, fazendas e pastagens podem bloquear o carbono do subsolo, restaurando solos degradados, abordando a questão da insegurança alimentar e mitigando os impactos da crise climática na produção de alimentos. A agricultura regenerativa também é a nossa melhor esperança para um rápida redução do dióxido de carbono atmosférico. Vamos aprender com agricultores que adotaram as práticas regenerativas e vêm colaborando com a natureza, e que “resolveram o padrão” [8]. Seus resultados são a inspiração que vai alimentar uma mudança total da era fracassada da sustentabilidade para uma era de ouro da regeneração.

Emissões Agrícolas

A agricultura praticada na maior parte do mundo ainda não é parte da solução - e sim, do problema. Em vez de mitigar a crise climática, é uma produtora de emissões de gases de efeito estufa, tanto diretamente, por meio de práticas agrícolas convencionais, quanto indiretamente, por meio de mudanças no uso da terra e do sistema alimentar mais amplo [10]. A produção agrícola é responsável por 10% das emissões anuais (6.2 Gt CO₂e) [11]. **O sistema alimentar em geral, incluindo a produção de fertilizantes e pesticidas e o processamento, transporte, refrigeração e eliminação dos resíduos, é responsável por 30% ou mais do total de emissões anuais [11].**



Com a ampla industrialização da agricultura em meados do século 20, as práticas agrícolas contemporâneas, tais como: fertilizantes sintéticos, pesticidas, cultivo intensivo, monocultura e sistemas de manejo baseados na produção, aceleraram o esgotamento dos estoques de carbono do solo [10,12]. A maioria dos solos agrícolas perdeu de 30 a 75% do carbono orgânico original para a atmosfera, devido às práticas agrícolas tradicionais [13]. Dois terços das terras cultiváveis de milho e trigo do mundo agora têm menos de 2% de carbono orgânico do solo [14]. As emissões de óxido nitroso têm aumentado devido ao excesso de fertilizantes de nitrogênio, e a intensificação da produção de gado e arroz exacerbou a liberação do metano (CH₄) [11].

No entanto, há esperança. Esses solos degradados contêm a promessa de regeneração. Os solos agrícolas degradados são alguns dos melhores solos do planeta para a redução de carbono: eles já são altamente manejados, são acessíveis e têm a capacidade de reter muito carbono — tudo o que é necessário são mudanças no manejo para que isso aconteça. Embora os solos sejam inerentemente diferentes, os solos agrícolas foram escolhidos porque são produtivos e têm a capacidade natural de armazenar carbono por longos períodos.

A agricultura regenerativa, com seu objetivo em obter resultados positivos para o ecossistema, pode ser praticada sob vários nomes: agroecologia, orgânica, biodinâmica, holística, conservação, permacultura, manejo de pastagem intensiva, agrofloresta e muito mais. Não haverá uma única abordagem para a regeneração de fazendas e pastagens degradadas, mas a vanguarda dos produtores e pesquisadores regenerativos sabe o suficiente agora para fornecer orientação para cada fazenda, dados seus contextos físicos, ambientais, sociais e econômicos. Cultivar de forma a sequestrar carbono não é apenas possível em muitos lugares, já está acontecendo em todo o mundo.

Sequestro de Carbono do Solo

Globalmente, a matéria orgânica do solo contém três a quatro vezes mais carbono do que a atmosfera ou a vegetação terrestre 5,14]. Mesmo pequenas mudanças no carbono do solo podem levar a grandes mudanças na concentração atmosférica de dióxido de carbono, para melhor ou para pior [5]. O PNUMA é inequívoco:

“Para fechar a lacuna de emissões, o uso da terra deve passar rapidamente de ser uma fonte líquida de emissões para um sumidouro líquido” [4].

O manejo aprimorado em fazendas e ranchos com práticas conhecidas e de baixo custo pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa e remover o dióxido de carbono da atmosfera [8,15]. **O sequestro de carbono do solo envolve a biodiversidade acima e abaixo do solo — na vida das plantas e da terra — para capturar o dióxido de carbono com a fotossíntese, atraindo-o para o subsolo e prendendo-o na matéria orgânica presente por meio de microorganismos e associações minerais.**

Se as taxas de sequestro de carbono atingidas por casos exemplares fossem alcançadas em plantações e pastagens de todo o mundo, a agricultura regenerativa sequestraria mais dióxido de carbono (CO₂) do que nossas emissões anuais (Figura 1, página 10), fornecendo um mecanismo para atender às metas globais de emissão do gás, reduzindo o legado do dióxido de carbono e nos dando o tempo necessário para equilibrar as emissões de outros setores.

Gases de Efeito Estufa

Os três gases de efeito estufa mais abundantes são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). As emissões totais de gases de efeito estufa são frequentemente expressas em uma unidade chamada dióxido de carbono equivalente, ou CO₂e. Esta unidade coloca todas as emissões de gases de efeito estufa em um campo nivelado, expressando-as em termos da quantidade de dióxido de carbono, que teria o mesmo efeito de aquecimento global. Em 2018, foram emitidos 55.3 Gt CO₂e. Mais que 2/3 das emissões totais vêm apenas do dióxido de carbono 37.5 GtCO₂.

Quase 1 trilhão de toneladas métricas de emissões de carbono se acumularam na atmosfera, levando a concentrações de CO₂ de 407 ppm in 2018—47% acima dos níveis pré-industriais [13]. O sequestro de carbono do solo se concentra na remoção do dióxido de carbono da atmosfera, mas os sistemas agrícolas regenerativos também reduzem as emissões de dióxido de carbono, óxido nitroso e metano.

Os solos agrícolas degradados são alguns dos melhores solos do planeta para a redução de carbono.



UM CORRETIVO POTENTE

Em 2018, as emissões globais de gases de efeito estufa foram de 55.3 gigatoneladas métricas (Gt CO₂e). A grande maioria dessas emissões —37.5 Gt — vem do dióxido de carbono, que pode ser reduzido significativamente pela agricultura regenerativa [4]. **Dados de estudos sobre agricultura e pastagens mostram o poder de sistemas regenerativos exemplares que, se alcançados globalmente, reduziriam em mais de 100% das atuais emissões anuais de CO₂.** As extrapolações globais das taxas de sequestro de carbono registradas por cientistas agrícolas na Tabela 1 fazem parte de um experimento que demonstra o poder da agricultura regenerativa para retirada do dióxido de carbono atmosférico.

TABELA 1: Potenciais de Sequestro de Carbono

LOCAL/ESTUDO	PRÁTICAS DE USO	CULTURA PRINCIPAL	SEQUESTRO DE CARBONO (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		EXTRAPOLAÇÃO GLOBAL ^b (Gt CO ₂ yr ⁻¹)	
			C ⁺	CO ₂	CO ₂	% CO ₂ Compensação
Cultivos – respondem por aproximadamente 30% das terras agrícolas aráveis						
Global [16]	Culturas de cobertura <i>(meta-análise global)</i>	Várias	0.32	1.17	1.63	4.35
EUA, Atlântico Médio [17]	Sistema regenerativo orgânico - rotação diversa	Rotação de colheita de grãos	0.85	3.12	4.34	11.6
EUA, Atlântico Médio [18]	Sistema regenerativo orgânico - utilização de composto	Milho & Trigo	2.36	8.66	12.04	32.11
Costa Rica [19]	Sistemas agroflorestais multiestrata	Cacau & Poro	4.16	15.27	21.23	56.61
Mediterrâneo [20]	Complementos orgânicos	Azeitonas	5.3	19.45	27.05	72.13
Tropical (Global)* [21]	Culturas de cobertura e adubo verde	Milho	5.8	21.28	29.60	78.93
EUA, Sudoeste [22]*	Composto fúngico <i>(Sistema BEAM)</i>	Carbono <i>(sem cultivo tradicional)</i>	10.27	37.69	52.41	139.76
Pastoreio ou pastagem – responde por aproximadamente 70% das terras cultiváveis aráveis						
EUA, Meio Oeste [23]	Sistemas regenerativos de pastejo	Carne bovina	3.59	13.17	43.04	114.77
EUA, Sudeste [24]	Pastoreio rotativo	Laticínios	8.0	29.36	133.37	355.65

⁺ C é a mudança no carbono do solo em (Mg ha-1 yr-1) e CO2 é o equivalente a C como dióxido de carbono.

^b Potencial sequestro de carbono em gigatoneladas (Gt) se todas as terras agrícolas ou pastagens forem convertidas para o sistema regenerativo e a porcentagem de dióxido de carbono compensada das emissões anuais de gases de efeito estufa em 37.5 Gt [4].

*Não revisado por pares.

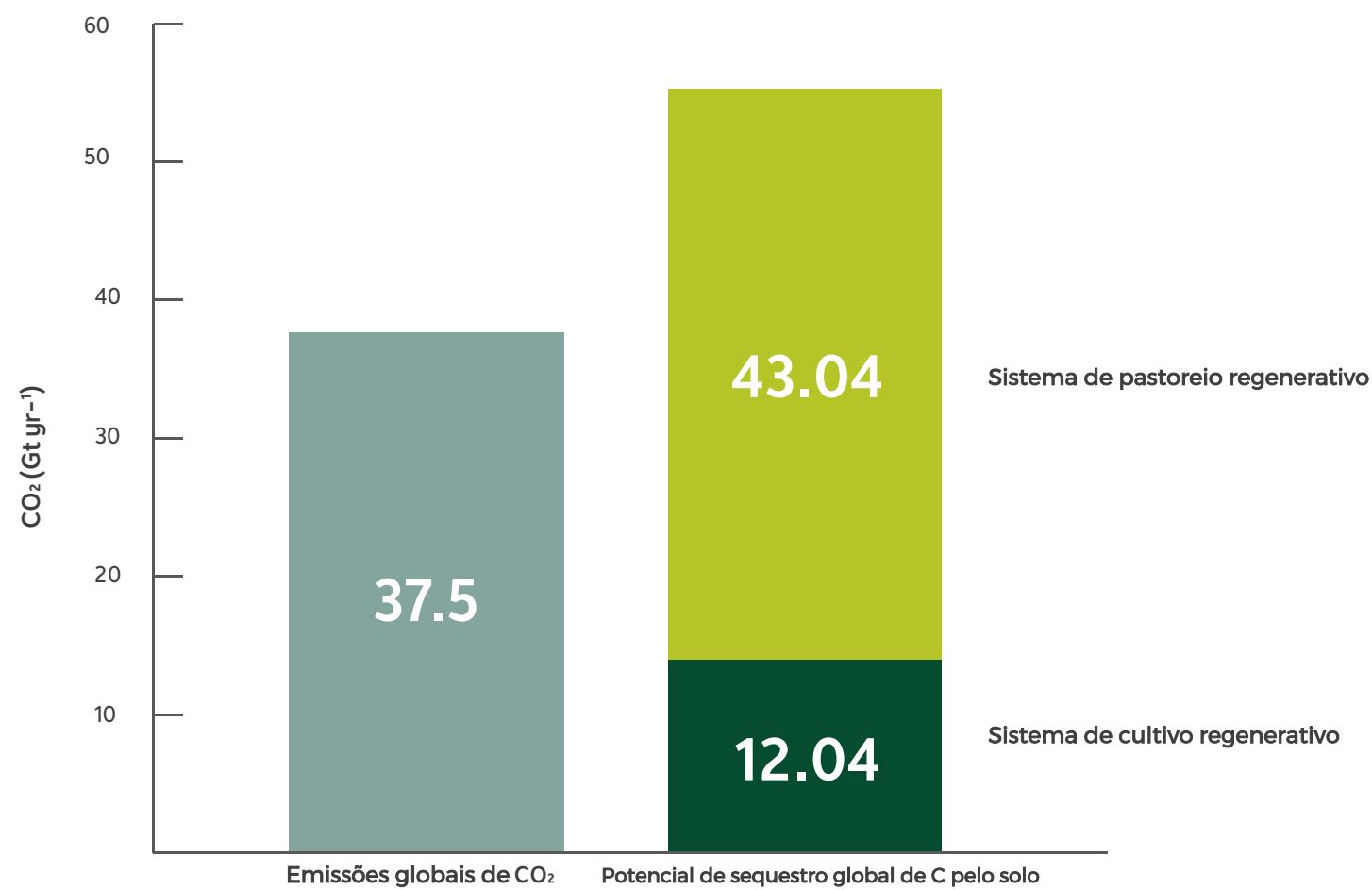
Se apenas as culturas de cobertura fossem adotadas em sistemas convencionais em todas as áreas agrícolas [16] ~4% das emissões anuais de CO₂ poderiam ser sequestradas. No entanto, por práticas de agrupamento, se o manejo de todas as terras agrícolas atuais mudasse para um sistema regenerativo como a área do Meio Atlântico [18], poderíamos potencialmente sequestrar 8 vezes mais do que apenas as culturas de cobertura, ou 32% das emissões anuais de CO₂ (~12 Gt CO₂). E, se todas as pastagens do mundo fossem manejadas para um modelo regenerativo como o estudo do Meio Oeste dos Estados Unidos [23], um adicional de 114% de todas as emissões anuais de CO₂ (~43 Gt CO₂) poderia ser sequestrado.

De acordo com estes cálculos, mudar o sistema de plantações e pastagens mundialmente para sistemas regenerativos é uma combinação poderosa, que poderia diminuir mais de 100% das emissões anuais de CO₂ (Figura 1), sequestrando carbono da atmosfera e armazenando-o no solo.

Embora este exercício intelectual nos mostre o potencial de sequestro de carbono pelo solo, é válido lembrar que os solos são variados e é improvável que possamos alcançar esta mudança radical na produção agrícola rapidamente. Mas mesmo pequenas mudanças terão um impacto — o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) relata "alta confiança" nas evidências de sequestro de carbono no solo como uma estratégia de remoção do dióxido de carbono atmosférico [9].

Há uma oportunidade clara de restaurar solos degradados pela captura de carbono atmosférico por meio da agricultura regenerativa. Investir em capacitação humana, estruturação do conhecimento e técnicas agrícolas comprovadamente seguras pode produzir a mudança de que precisamos para estabilizar o clima, ao mesmo tempo em que fornece co-benefícios para agricultores e consumidores em todos os lugares.

FIGURA 1: Potencial de sequestro de carbono pela adoção global da agricultura regenerativa



PRINCÍPIOS REGENERATIVOS PARA A SAÚDE DO SOLO E O SEQUESTRO DE CARBONO

A agricultura regenerativa é uma abordagem sistêmica para o cultivo, que constrói um solo saudável ao apoiar a biodiversidade acima e abaixo da terra, a fim de sequestrar carbono e nutrientes de volta para o solo.

A biodiversidade é o principal ator do sequestro de carbono do solo e de muitos outros benefícios, na agricultura e no ecossistema como um todo [25]. O carbono e a matéria orgânica do solo são vitais para o crescimento das plantas, mediando a agregação do solo, a temperatura, a infiltração e retenção da água e o ciclo de nutrientes. A matéria orgânica do solo também auxilia os serviços ecossistêmicos: reduz a erosão, filtra os poluentes e fornece habitat e alimento para diversas espécies.

Sem matéria orgânica o suficiente, o solo não consegue suportar a vida microbiana ou vida vegetal sem grandes quantidades de insumos externos. Dois terços das áreas convencionais de milho e trigo foram reduzidas a menos de 2% de matéria orgânica [12], limitando a produtividade e exigindo injeções de insumos químicos. Esta é a produção de alimentos que suportam a vida, ignorando o vasto potencial de se criar alimentos saudáveis a partir da cura da terra. Mas existe outra maneira. Como J.I. Rodale, fundador do movimento de orgânicos na América, escreveu em uma lousa em 1942:

Solo saudável = Alimento saudável = Pessoas saudáveis

As plantações e pastagens podem ser regeneradas, a matéria orgânica do solo pode ser recuperada e a vida do solo pode prosperar novamente - por meio da agricultura regenerativa.

Embora a agricultura regenerativa deve ser uma abordagem de sistemas baseada na região e customizada, existem certas práticas interligadas que fazem parte da maioria dos sistemas regenerativos.

Essas práticas por si só não significam regeneração —elas são um ponto de partida, não o ponto final. No mínimo, as práticas agrícolas regenerativas que suportam o sequestro de carbono pelo solo incluem:

- 1 Diversificação das culturas rotacionais
- 2 Plantio de culturas de cobertura, adubos verdes e perenes
- 3 Retenção de resíduos da colheita
- 4 Uso de fontes naturais de fertilizantes, como o composto
- 5 Manejo de pastagem adequado e/ou integração de sistemas produtivos
- 6 Redução da frequência e profundidade do cultivo
- 7 Eliminação de produtos sintéticos

A agricultura regenerativa está focada em práticas que garantam resultados positivos: estas práticas interligadas sustentam a vida do solo e minimizam a erosão ao reter biomassa de uma ampla variedade de raízes vivas e mortas, brotos e micróbios, que trabalham em conjunto para sequestrar o carbono [8,26].

Embora a maioria das práticas que permitem o sequestro de carbono pelo solo estejam associadas a sistemas agrícolas regenerativos, elas são as “melhores práticas de manejo” que podem ser adaptadas a qualquer tipo de fazenda. No entanto, apoiar a vida do solo não é tão fácil como adotar apenas uma prática: as sinergias de práticas interligadas em um sistema geral são a chave para a biodiversidade que sequestra o carbono no solo [27].

Sequestro de Carbono no Solo

O sequestro de carbono no solo significa maximizar a remoção do dióxido de carbono atmosférico e minimizar as perdas de carbono no solo.

Para que este sequestro ocorra, todo o carbono orgânico sequestrado deve se originar da reserva de carbono atmosférico e ser transferido para a matéria orgânica do solo por meio das plantas e seus resíduos, resíduos microbianos e outros sólidos orgânicos [28].

A matéria orgânica do solo, embora altamente variável, é composta por cerca de 50% de carbono orgânico do solo [29].



Foto: Brittany App, Fazenda Tablas Creek

O ciclo do carbono institui as práticas agrícolas:

- | | | |
|--|--|---|
| • Aplicação de cobertura morta / compostagem | • Aprimoramento das coberturas florestais | • Barreiras de vento herbáceas |
| • Gestão de resíduos e plantio direto | • Contorno das faixas de proteção | • Plantio em áreas críticas |
| • Digestão anaeróbica | • Restauração ribeirinha | • Tratamento dos resíduos de madeira |
| • Culturas complementares | • Mata ciliar como zona-tampão | • Tira de filtragem |
| • Quebra-vento/ Coberturas de abrigo | • Barreiras vegetativas | • Vegetação no entorno das vias de navegação |
| • Sistema Silvopastoril | • Renovação do quebra-vento / coberturas de abrigo | • Plantação de sebes |
| • Uso de forragem e biomassa | • Cultivo em aléias | • Tiras de vegetação que protegem contra o vento e erosão |
| • Gestão dos nutrientes | • Cobertura vegetativa ribeirinha | • Restauração de áreas pantanais |
| • Plantio de árvores e arbustos | • Plantio em escala | |

BIODIVERSIDADE ABAIXO DO SOLO

A vida no solo é excepcionalmente complexa, composta por uma vasta comunidade de bactérias microscópicas, fungos, protozoários e nematóides, assim como meso e macrofauna como artrópodes, minhocas, colêmbolos, aranhas e insetos.

Existem bilhões desses organismos em apenas uma colher de chá de solo saudável. Esta comunidade constrói estoques de carbono através de suas interações subterrâneas com a estrutura física do solo, raízes vivas e matéria orgânica em decomposição; e na superfície com plantas, animais, clima, pessoas e suas práticas agrícolas.

A abundância e composição da vida no solo são fortemente influenciadas pelo sistema agrícola. Para aproveitar o sequestro de carbono pelo solo e seus co-benefícios, os agricultores escolhem estratégias de manejo interligadas que aumentam a biodiversidade acima e abaixo do solo. Uma revisão sistemática de mais de 50 estudos internacionais encontrou quase 60% a mais de biomassa de microrganismos do solo em sistemas agrícolas manejados organicamente em comparação com os convencionais [30]. A vida do solo nos sistemas orgânicos também foi mais de 80% ativa do que nos sistemas convencionais [30]. Isso não é surpresa, visto que a maioria dos sistemas orgânicos e todos os sistemas regenerativos são construídos sobre práticas interligadas e projetadas para aumentar a biodiversidade e apoiar a saúde do solo.

Pesquisas recentes destacam o papel predominante dos micróbios do solo na construção de estoques de carbono. Ao contrário do que se pensava anteriormente, não é o material vegetal recalcitrante que persiste e cria estoques de carbono no solo a longo prazo; e sim os micróbios que processam essa matéria vegetal e que são os maiores responsáveis pelo sequestro de carbono pelo solo [31,32]. O carbono estável do solo é formado principalmente por necromassa microbiana (biomassa morta) ligada a minerais (silte e argila) no solo. A estocagem de carbono a longo prazo depende da sua proteção derivada dos micróbios resultantes da decomposição. Esta proteção ocorre nos poros do solo em uma faixa de tamanho aproximado de 30-150 micrômetros, que são criados por raízes de diversas culturas—não de monoculturas [33].

Isso significa que, para permitir o armazenamento de carbono no solo, os agricultores devem se concentrar em promover diversos aportes de carbono a fim de criar estruturas de poros e alimentar os micróbios do solo, ambos obtidos com uma ampla variedade de raízes de plantas. Essas raízes ajudam os micróbios a construir biomassa, que se torna amálgama de necromassa mineral, capaz de estocar carbono por longos períodos de tempo [34].

Alimentar a vida do solo para estimular a biodiversidade e abundância significa administrar a fazenda de forma que haja raízes vivas no solo durante a maior parte do ano. As raízes ajudam na saúde do solo ao alimentar diretamente os micróbios com seus exsudados, incluindo açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos; ao criar o tipo certo de estrutura do solo para proteger o carbono, e ao fazer parcerias com fungos micorrízicos para armazenar carbono e os nutrientes [33,35]. Como líder ecologista do solo, Francesca Cotrufo, PhD da Universidade do Estado de Colorado, afirma:

“Está ficando muito claro que, para regenerar os solos, temos que possuir insumos contínuos e diversos, e isso vem principalmente de raízes vivas”.
—(Entrevista Cotrufo)

Os agricultores também devem gerenciar a eficiência do uso do carbono microbiano ao aplicar insumos de alta qualidade em suas plantações. Quando processam estes insumos, os micróbios usam o carbono simultaneamente para crescimento e manutenção. A eficiência do uso do carbono é a proporção da entrada de carbono que os micróbios assimilam em relação ao carbono perdido, ou respirado, para fora do sistema como dióxido de carbono [36]. O solo tem uma proteção conservadora de carbono para nitrogênio de aproximadamente 10:1. Isso significa que, para que ocorra o sequestro de carbono, cada 10 unidades do mesmo requerem 1 unidade de nitrogênio. Isso explica porque as entradas de alto carbono estão, de forma contrária, desassociadas a ganhos proporcionais de carbono no solo. A aplicação de insumos diversos, mas de baixa qualidade (alta proporção C:N) (por exemplo, alta proporção de serragem ou aparas de madeira) ou culturas de cobertura (apenas cereais, por exemplo) resulta em baixa eficiência de uso de carbono, o que causa uma maior perda proporcional. Essas entradas de alta proporção de carbono para nitrogênio também colocam os micróbios sob estresse, resultando na extração de nitrogênio da matéria orgânica existente no solo. Para evitar isso, os agricultores devem incluir insumos de alta qualidade (com baixa proporção C:N) como plantas de cobertura de leguminosas e esterco composto de vegetais ou minhocas, que são mais eficientes na construção do carbono.

As plantas dependem dos nutrientes disponíveis fornecidos pelo solo. Este ciclo de nutrientes depende da rápida renovação da matéria de carbono pelos micróbios, resultando em matéria orgânica particulada (MOP), que não armazena carbono por longos períodos [34]. Manejar o solo agrícola para aumentar a biodiversidade e a abundância de vida abaixo do solo resulta no acúmulo de matéria orgânica capaz de estocar carbono em curto e longo prazo. Ambos os tipos de matéria orgânica são necessários para o funcionamento adequado do ecossistema, retenção e ciclagem de nutrientes e produção de alimentos.

SEQUESTRO DE CARBONO - COMO FUNCIONA

1 FOTOSSÍNTESE

Durante a fotossíntese, as plantas convertem dióxido de carbono (um gás) em açúcar (moléculas de carboidrato).

2 TROCA DE NUTRIENTES

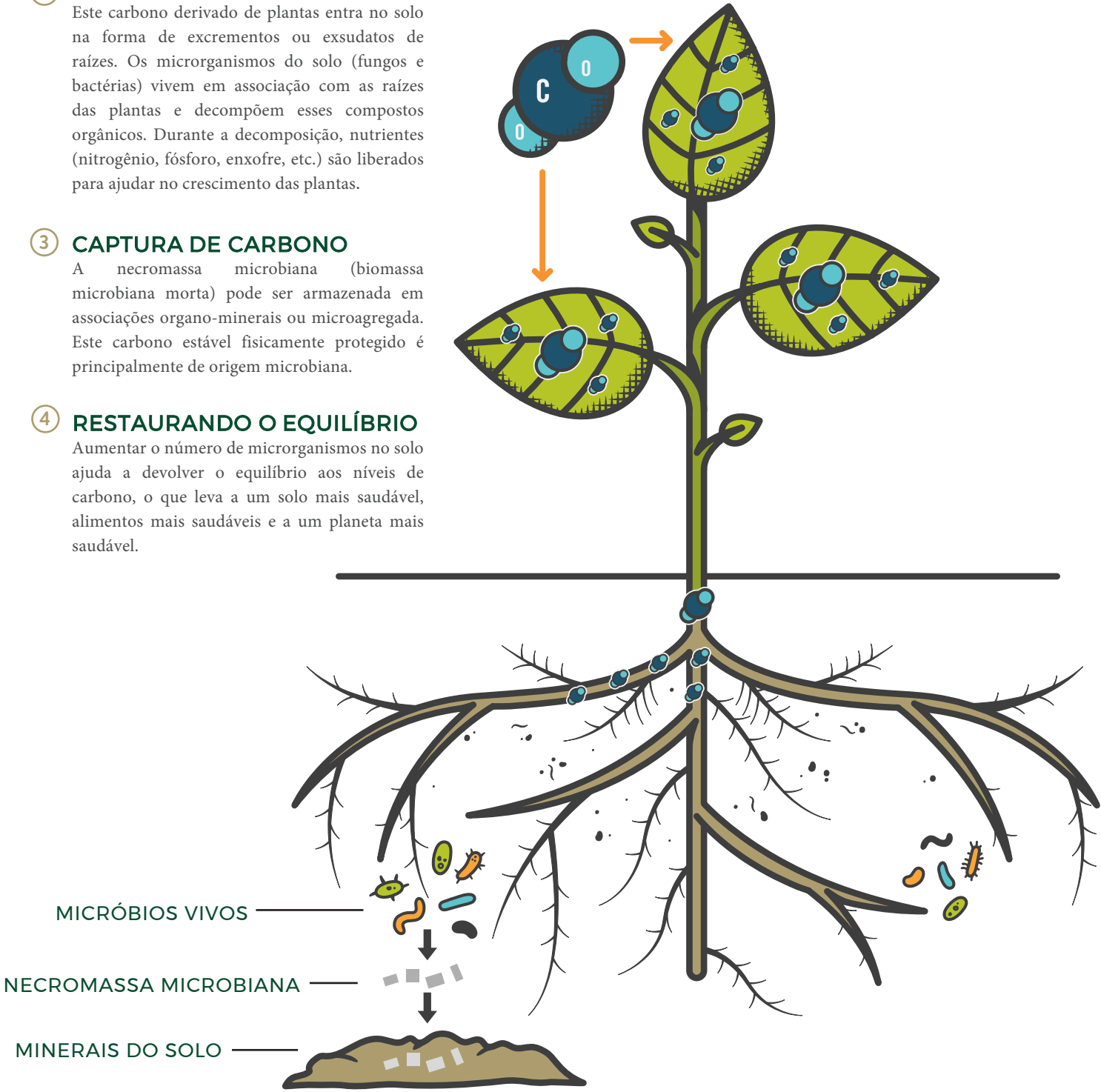
Este carbono derivado de plantas entra no solo na forma de excrementos ou exsudatos de raízes. Os microrganismos do solo (fungos e bactérias) vivem em associação com as raízes das plantas e decompõem esses compostos orgânicos. Durante a decomposição, nutrientes (nitrogênio, fósforo, enxofre, etc.) são liberados para ajudar no crescimento das plantas.

3 CAPTURA DE CARBONO

A necromassa microbiana (biomassa microbiana morta) pode ser armazenada em associações organo-minerais ou microagregada. Este carbono estável fisicamente protegido é principalmente de origem microbiana.

4 RESTAURANDO O EQUILÍBRIO

Aumentar o número de microrganismos no solo ajuda a devolver o equilíbrio aos níveis de carbono, o que leva a um solo mais saudável, alimentos mais saudáveis e a um planeta mais saudável.



NITROGÊNIO

O carbono não faz o ciclo sozinho. O tipo de nitrogênio usado em um sistema agrícola está vinculado à capacidade de armazenamento de carbono desse sistema. Estudos de longo prazo demonstram que, ao estimular a fertilidade das culturas por meio de compostos ou adubos, aumenta-se a capacidade do solo em estocar carbono; enquanto que o uso de fertilizantes sintéticos resulta na perda ou nenhuma mudança no carbono do solo [37,38]. Fontes orgânicas de nitrogênio apoiam o sequestro de carbono pelo solo, alimentando os micróbios responsáveis por seu armazenamento. Fontes sintéticas de nitrogênio estimulam a proliferação de bactérias que rapidamente transformam a amônia em nitrato, que é facilmente respirado ou perdido no solo [39–41].

Quando o composto substitui o nitrogênio sintético, as plantas desenvolvem mais raízes.

Reduzir as perdas causadas por fertilizantes nitrogenados é fundamental. Menos da metade das 109 milhões de toneladas métricas usadas a cada ano de fertilizantes de nitrogênio à base de combustível fóssil é assimilada nas plantações. O restante é lixiviado para as águas subterrâneas, criando as zonas marinhas mortas; ou perdido por meio de potentes emissões de gases de efeito estufa de óxido nitroso [42]. Além disso, a produção industrial de fertilizantes nitrogenados contribui diretamente com dois a três por cento de todas as emissões globais de gases de efeito estufa; e a acidificação dos solos agrícolas devido ao nitrogênio sintético também contribui com outros dois a três por cento das emissões [43].

Quando o composto substitui o nitrogênio sintético, as plantas desenvolvem mais raízes, absorvendo mais carbono atmosférico no processo [44]. **Verificou-se que as culturas de cobertura de leguminosas são duas vezes mais eficientes no armazenamento de carbono orgânico no solo do que a fertilização com nitrogênio** [45]. Em um experimento de campo realizado durante várias décadas que comparou o sequestro de carbono pelo solo com a adubação, constatou-se que a fertilização orgânica melhorou significativamente a capacidade de estocagem de carbono pelo solo em comparação com a fertilização química [46]. Em um experimento de cultivo de trigo e milho, o composto orgânico levou a uma taxa anual de 0.38 toneladas métricas de carbono armazenado por hectare, em comparação com 0.23 para fertilizantes industriais [47]. Após 34 anos em Testes de Sistemas Agrícolas do Instituto Rodale, o sistema de adubo orgânico tinha entre 18 a 21% a mais de carbono orgânico no solo do que o sistema convencional [48]. Neste experimento de longo prazo, a taxa de sequestro de carbono pelo solo foi mais alta nos primeiros 15 anos [17].

Os sistemas regenerativos podem fornecer o nitrogênio necessário para sequestro de carbono pelo solo ao incluir leguminosas fixadoras de nitrogênio e/ou árvores na propriedade agrícola, tornando desnecessária a fertilização com nitrogênio sintético. Leguminosas plantadas para servir como cobertura para a safra, forragem, ou colheitas rentáveis em sistemas regenerativos trabalham com o rizóbio, uma bactéria do solo, para fixar o nitrogênio atmosférico que alimenta as plantas e os microrganismos. Esta relação de fixação de nitrogênio apoia o armazenamento de carbono, enquanto reduz as perdas de nitrogênio e os danos ambientais provenientes da fertilização sintética [49]. Fungos ectomicorrízicos, aqueles associados mais com árvores, trabalham com as bactérias com o intuito de controlar a quantidade de nitrogênio disponível, mantendo a comunidade que vive no solo em equilíbrio ao suprimir a respiração de carbono e aumentar seus níveis de estocagem [50–52]. Os agricultores podem promover a fixação de nitrogênio atmosférico ao inocular leguminosas e com plantações de árvores com rizóbios ou fungos ectomicorrízicos.



As culturas de cobertura de leguminosas, como o trevo carmesim, são duas vezes mais eficientes no armazenamento de carbono no solo do que a fertilização com nitrogênio.

ENCARTE ESPECIAL: TESTES DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

TESTES DE SISTEMAS AGRÍCOLAS DO INSTITUTO RODALE - EST. 1981

A comparação mais duradoura da América do Norte entre a agricultura orgânica e a convencional.

O Instituto Rodale vem comparando vários sistemas de cultivo de grãos há mais de 40 anos. Os Testes de Sistemas Agrícolas, dividido em 72 ações realizadas em 11 acres na sede do Instituto Rodale em Kutztown, PA, provou que as práticas regenerativas - incluindo cultivos para cobertura, rotação de culturas e compostagem - levam ao aumento da saúde do solo e do armazenamento de carbono, enquanto geram rendimentos competitivos, usando menos energia e sendo mais rentável para os agricultores.

Saiba mais em RodaleInstitute.org/FST.

Resumo dos Resultados

Os testes empregados mostraram que, em comparação com os métodos convencionais, os sistemas orgânicos:

- **GERAM** rendimentos competitivos, com um bom plano de gestão
- **RENDEM** até 40% em épocas de seca
- **RESULTAM** em lucros de 3-6x maiores para os agricultores
- **MELHORAM** a saúde do solo e produzem matéria orgânica ao longo do tempo
- **USAM** 45% menos energia
- **LIBERAM** 40% menos emissões de carbono
- **PRESERVAM** o lençol freático, por não lixiviarem atrazina, produto químico tóxico



Os Sistemas



CONVENCIONAL SINTÉTICO

Este sistema representa uma típica fazenda de grãos dos EUA. Depende de nitrogênio sintético para produtividade, e as ervas daninhas são controladas por herbicidas sintéticos selecionados e aplicados conforme taxas recomendadas pela Extensão Cooperativa da Universidade do Estado da Pensilvânia. OGMs foram introduzidos em 2008.



ORGÂNICO LEGUMINOSO

Este sistema representa um sistema orgânico rentável de grãos. Apresenta uma rotatividade média que consiste em safras anuais de grãos e plantas de cobertura. A única fonte de fertilidade do sistema são as culturas de leguminosas, e a rotação de culturas fornece a principal linha de defesa contra pragas.



ADUBO ORGÂNICO

Este sistema representa uma operação orgânica de laticínios ou carne bovina. Apresenta uma longa rotação de safras anuais de grãos para ração e culturas forrageiras perenes. A fertilidade do solo é promovida pelas colheitas de leguminosas e aplicações periódicas de esterco compostado. Uma rotação diversificada de culturas é a principal linha de defesa contra pragas.

Cada sistema é dividido em dois: plantio direto e plantio indireto, para um total de 6 sistemas.

FUNGOS

As proporções entre fungos e bactérias são ecologicamente importantes para o armazenamento de carbono e a sustentabilidade do sistema agrícola em geral [53–55]. Solos com maior proporção de fungos para bactérias são caracterizados pela maior eficiência no uso de carbono [53]. Os dois grupos de fungos benéficos para o solo e importantes para o sequestro do carbono são os decompositores — fungos saprotróficos — e os fungos associados à raiz, ou micorrízicos [56]. Aumentos na abundância e diversidade das plantas [57] e fertilizantes orgânicos [58–60] aumentam a biomassa fúngica e a proporção de fungos para bactérias.

Muitas espécies de plantas dependem diretamente desses fungos para crescimento e sobrevivência.

Noventa por cento de todas as plantas vivem em simbiose com fungos micorrízicos [35]. Esses fungos são particularmente importantes para o sequestro de carbono. Eles recebem uma porção significativa do carbono subterrâneo que vem da planta como única fonte de energia, e, em troca, fornecem até 80% do nitrogênio e fósforo para a planta [61]. Os fungos micorrízicos também fornecem ao solo e às plantas outros benefícios importantes, tais como resistência à seca e demais tensões por meio da mediação da estrutura física do solo e da água [62–65]. Muitas espécies de plantas dependem diretamente desses fungos para crescimento e sobrevivência, tanto que os pesquisadores sugeriram que

BIODIVERSIDADE ACIMA DO SOLO

Uma rica biodiversidade resulta em um solo mais saudável e maior sequestro de carbono, da atmosfera para o subterrâneo [25,76].

A falta de vida acima do solo — ou seja, o solo descoberto — impede a fotossíntese e estimula a erosão. A perda de solo para o vento e a chuva diminui a produtividade agrícola e anula qualquer esperança de transformar a agricultura de um problema climático para uma solução climática.

Outro sinal de um sistema mal projetado é a monocultura — um tipo de cultivo que cobre uma vasta área. Monoculturas e rotações simplistas

“o papel da simbiose no ciclo global de nutrientes é significativo” [61,66].

Os fungos micorrízicos secretam uma proteína chamada glomalina; esta parceria entre fungo-raiz e sua glomalina é amplamente responsável por criar agregados estáveis de solo, que evitam que o carbono presente no solo seja liberado como dióxido de carbono atmosférico [67,68]. Esta estabilização inicial de curto prazo garante o tempo para que a matéria orgânica crie ligações com metais e minerais. Os complexos organo-minerais ou organometálicos resultantes disso podem permanecer no solo por milênios [26,34].

Uma vez que os fungos micorrízicos precisam de raízes para sobreviver, estratégias de cultivo que incluem plantações perenes, árvores nas bordas, cultivo reduzido e plantas com sistemas de raízes fibrosas e longas incentivam a estabilização de longo prazo do carbono no solo [57,67,69,70]. Experimentos de longo prazo comparando sistemas orgânicos e convencionais encontram níveis mais altos de fungos micorrízicos em sistemas orgânicos [71-73], presumivelmente devido à maior diversidade de plantas por meio de rotações mais longas de culturas e o uso de plantas de cobertura e adubos verdes. Efeitos promissores têm sido mostrados na inoculação de fungos no solo, especialmente em casos em que o preparo frequente ou intensivo do solo destruiu a população nativa [22,74]. Fungos micorrízicos podem ser introduzidos por meio de inoculações que são facilmente preparadas na fazenda [74,75] e podem ser uma estratégia para acelerar o sequestro de carbono e a regeneração de solos degradados.

de culturas requerem insumos químicos para controlar plantas daninhas, insetos e doenças e para auxiliar na produtividade. Estes insumos destroem a biologia do solo e exacerbam a perda de carbono pelo mesmo.

Em geral, os sistemas baseados em princípios de manejo orgânico promovem a biodiversidade. Uma pesquisa recente comparando mais de 60 safras de sistemas convencionais e orgânicos em todo o mundo verificou que os sistemas orgânicos promoveram significativamente mais biodiversidade, tanto em abundância quanto em riqueza de espécies [77,78]. Qualquer fazenda, seja ela orgânica certificada ou não, podem usar de modelos orgânicos para introduzir um conjunto de práticas que regeneram a vida do solo, concentrando-se na biodiversidade tanto acima quanto abaixo da terra.

CULTURAS DIVERSIFICADAS

Apenas 9 culturas são responsáveis por quase 70% do uso de todas as terras agrícolas do mundo: cana-de-açúcar, milho, arroz, trigo, batata, soja, dendê, beterraba-sacarina e mandioca [79]. São comumente cultivadas em monoculturas ou a partir de rotações curtas de safras comerciais, como as rotações milho-soja. O desenvolvimento de apenas uma ou duas culturas torna a fazenda propensa à devastação por surtos de pragas ou condições climáticas extremas, que estão se tornando mais comuns por conta da crise climática. O aumento da biodiversidade acima do solo por meio do plantio de diversas culturas em rotação, plantas de cobertura, cultivos em faixa, coabitação de culturas, cultivos em vários níveis de solo e integração lavoura-pecuária leva à resiliência a esses tipos de impactos, enquanto auxilia no sequestro de carbono do solo.

As plantas de cobertura são igualmente importantes em sistemas de larga e pequena escala.

Mudar as rotações de cultivos de monocultura com pousio para policultura sem pousio aumenta a biodiversidade do solo e sequestra carbono [30,80,81]. Por exemplo, constatou-se que a mudança de uma rotação trigo-pousio para trigo-girassol ou trigo-leguminosa aumentou significativamente os estoques de carbono do solo [80] e um sistema contínuo de cevada mais que dobrou os estoques de carbono do solo em comparação com um sistema de cevada-pousio. A integração de espécies de gramíneas com sementes como plantas de cobertura, adubação verde ou em rotação aumenta os níveis de carbono devido aos sistemas radiculares fibrosos e profundos dessas plantas perenes [80,83]. Tanto a rotação melhorada de safras comerciais quanto a introdução de culturas de cobertura resultam em uma cobertura contínua, o que aumenta a massa microbiana e o carbono do solo, garantindo a disponibilidade de energia e raízes hospedeiras para bactérias e fungos [81,84,85].

A diversificação com culturas de cobertura é mais eficaz do que o plantio direto no sequestro do carbono. Em um experimento de 30 anos de cultivo de milho seguido de cobertura verde no Brasil, o efeito de uma cobertura de leguminosas nos estoques de carbono no solo foi melhor do que o efeito de não preparar o solo. Similarmente, no Experimento de Sistemas Agrícolas promovido pelo Instituto Rodale, as diferenças nos níveis de carbono do solo não foram afetados pela intensidade em seu preparo, mas diferiram significativamente entre os sistemas orgânico e convencional [87]. O carbono orgânico do solo (COS), o carbono da massa microbiana (CMB), o carbono ativo e o carbono extraível em água foram todos maiores no sistema de adubação orgânica do Instituto Rodale em comparação com o convencional, enquanto o COS e CMB foram maiores no sistema de leguminosas orgânicas em comparação

com o sistema convencional. Ambos os sistemas orgânicos combinam uma diversidade de plantas de cobertura e adubos verdes com o sistema de fertilização, que inclui uma safra de feno perene e estrume compostado como insumos adicionais. O sistema convencional trata-se de uma rotação milho-soja com insumos químicos e sem culturas de cobertura. Após dez anos de plantio direto contínuo, o sistema convencional apresentou os níveis mais baixos de carbono orgânico no solo em todos os seis Experimentos de Sistemas Agrícolas, incluindo os seus equivalentes do sistema convencional arado. Isso sugere que apenas o plantio direto, na ausência de plantas de cobertura e sem rotações de culturas diversas, não sequestra carbono. O plantio sem preparo prévio do solo pode limitar a velocidade com que ocorre a perda de carbono e a degradação do solo, mas não sequestra o carbono.

Uma meta-análise de estudos mundiais constatou que as plantas de cobertura são quase tão eficazes no sequestro de carbono quanto o reflorestamento da área de plantio, ao mesmo tempo em que reduzem a lixiviação de nutrientes, a erosão do vento e da água e a pressão das pragas [16]. Elas são igualmente importantes em sistemas de grande e pequena escala. Culturas de cobertura e adubos verdes são um componente crítico para a agricultura regenerativa tropical, onde os sistemas de milho de pequenos produtores, intercalados com leguminosas, podem sequestrar quase seis toneladas métricas de carbono por hectare ao ano [21]. É importante ressaltar que "sequestrar esse carbono é um subproduto capaz de dobrar ou triplicar os seus próprios rendimentos agrícolas" [do pequeno produtor] [21].



As Fazendas da Apricot Lane, localizadas em Moorpark, California, cultivam uma variedade de gramíneas, leguminosas fixadoras de nitrogênio, ervas nativas e flores sob 75 variedades de árvores frutíferas certificadas orgânicas e biodinâmicas.



O composto ajuda a desviar os resíduos dos aterros, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, fornecem fertilidade orgânica. Foto: Herb Pharm.

COBERTURA MORTA E COMPOSTO

A diversificação de culturas também desempenha um importante papel no sequestro de carbono do solo, quando os resíduos de plantas e raízes são retidos ao invés de removidos ou queimados [81,88–90]. Esses resíduos sustentam a cadeia alimentar do solo, construindo estruturas bioquímicas mais complexas que servem como precursores para a construção da matéria orgânica do solo [34,77]. A redução de resíduos, seja da cultura principal ou a de cobertura, tornou-se comum para a produção de biocombustíveis, mas essa prática esgota a matéria orgânica do solo[91]. Reter os resíduos das colheitas como cobertura morta evita a erosão, inibe o crescimento de ervas daninhas, modera a temperatura do solo, reduz a evaporação de água, fornece a matéria orgânica que será "reciclada" pelas minhocas e protege o solo de eventos climáticos externos.

Os benefícios do composto podem aparecer rapidamente.

Além de reter resíduos como cobertura morta, o composto feito de restos de plantas e/ou esterco aumenta a biodiversidade do solo e a biomassa microbiana, o que melhora a estrutura do solo, a ciclagem de nutrientes e a supressão de doenças [18,92-96]. O composto é altamente eficiente na construção de carbono do solo, alimentando micróbios e atuando diretamente na formação de associações organo-minerais [96]. Os benefícios do composto podem aparecer rapidamente: após apenas uma aplicação de composto à base de plantas, o carbono orgânico do solo e a estabilidade dos agregados podem aumentar significativamente nos anos seguintes, comparados com solos não corrigidos [97,98]. Em um teste de 10 anos, os campos adubados com esterco de vacas sequestraram mais de duas toneladas de carbono por hectare ao ano, enquanto o sistema equivalente de cultivo convencional perdeu carbono [18].

Usar somente pequenas quantidades de composto vegetal rico em fungos para inocular solos pode resultar em um sequestro de carbono substancial e melhorias da saúde destes solos [22,99,100]. Por exemplo, uma única aplicação de composto em pastagens aumentou o carbono de lençóis freáticos instáveis e fisicamente protegidos ao longo dos anos subsequentes [100]. O composto também ajuda a desviar os resíduos dos aterros sanitários, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que fornece fertilidade orgânica [101].

No entanto, depender de composto (especialmente esterco) para promover o sequestro de carbono em terras agrícolas pode ser difícil por conta dos suprimentos limitados e dos custos econômicos e ambientais de transporte [101,102]. Isto é especialmente relevante na agricultura familiar de recursos limitados, quando o gado não está presente [21]. Além disso, é difícil atribuir valores referentes ao sequestro de carbono quando suas entradas são originadas fora de uma fazenda e transportadas por distâncias consideráveis, se levarmos em conta o seu ciclo de vida completo. Portanto, a compostagem de resíduos locais e da fazenda, que reciclam nutrientes, deve ser naturalmente promovida. Por exemplo, a incorporação de esterco e resíduos das colheitas em sistemas integrados de lavoura-pecuária sequestra carbono, melhora o funcionamento do solo e mitiga a erosão[103-105]. Os agricultores podem selecionar aditivos apropriados de uma variedade de coberturas mortas e compostos disponíveis na fazenda ou localmente, a fim de sustentar a vida do solo e sua matéria orgânica de forma que adicione carbono ao sistema, em vez de redistribuí-lo.

REDUZINDO O PREPARO DO SOLO

A aragem afeta claramente a vida do solo — quebra agregados, destrói redes de fungos, aumenta a evaporação da água e a degradação de matéria orgânica e pode levar à erosão pelo vento e pela água. Solos arados, expostos e erodidos permitem que o carbono do solo, anteriormente estável, seja liberado como gás de efeito estufa [106,107]. A mudança de técnicas de cultivo regular e profundo para técnicas de cultivo reduzido melhora a estrutura do solo, reduz as emissões de dióxido de carbono e contribui para o aumento do carbono orgânico do solo [108,109].

Há evidências crescentes de que o plantio direto convencional, sozinho, não sequestra carbono.

Os efeitos interligados provenientes de práticas regenerativas destacam-se pelos resultados altamente variáveis que os pesquisadores registram em experimentos de cultivos. **Há evidências crescentes de que o plantio direto convencional, sozinho, não sequestra carbono, mas deve ser parte de uma abordagem sistêmica**, especialmente quando se considera todo o solo ao invés de apenas a sua superfície [110]. Por exemplo, depois de sete anos comparando os sistemas convencionais de milho, um com preparo prévio reduzido e outro de plantio direto, constatou-se que o primeiro resultou em mais emissões de dióxido de carbono e óxido nitroso [111]. Uma revisão de mais de 30 estudos não encontrou nenhuma diferença no estoque de carbono orgânico do solo entre áreas aradas e não aradas [16]; e um experimento que testava o trabalho simplificado do solo em conjunto com plantas de cobertura

em sistemas convencionais, não encontrou nenhum benefício no que se refere aos níveis de estoque de carbono no solo com preparo reduzido [112]. Os sistemas de plantio direto podem reverter melhor a tendência de perda de carbono orgânico pelo solo quando fazem parte de uma abordagem sistêmica para regeneração, que inclui plantas de cobertura, rotações aprimoradas de cultivo e redução ou eliminação de insumos sintéticos [90, 91]. As melhorias no solo ocorrem quando as práticas de plantio direto convencionais são substituídas por técnicas de agricultura orgânica, embora algum preparo do solo seja usado em sistemas orgânicos [113]. O carbono e nitrogênio do solo foram maiores depois de nove anos em um sistema orgânico com cultivo reduzido em comparação com três sistemas convencionais de plantio direto, dois dos quais incluíam plantas de cobertura [113]. Quaisquer ganhos de carbono no solo alcançados sob o plantio direto convencional podem ser anulados por maiores emissões de óxido nitroso devido à fertilização sintética com nitrogênio nesses sistemas [114,115].

Os sistemas regenerativos orgânicos de plantio reduzido dependem do cultivo de coberturas densas para a supressão de ervas daninhas [116]. Em conjunto com os benefícios do manejo orgânico em geral, demonstrou-se que o carbono orgânico do solo nestes sistemas aumentou em nove por cento após dois anos, e mais de vinte por cento após seis anos [116,117]. Um relatório recente sobre o plantio reduzido em sistemas orgânicos descobriu que revolver o solo em menor profundidade resulta em estoques de carbono significativamente mais elevados e, embora a abundância de ervas daninhas tenha aumentado, a colheita não foi necessariamente afetada [118].



O prensador de rolo do Instituto Rodale, mostrado aqui, transforma as plantas de cobertura em palhagem, responsável por combater as ervas daninhas em um sistema de plantio direto orgânico

MANEJO DE PASTAGEM

A pecuária regenerativa engloba o potencial de sequestro de sistemas de pastoreio altamente manejados para aumentar a capacidade natural de drenagem de pastagens perenes e bosques [5,25,104,119]. Os pastos representam mais de 70% da área agrícola global (há 1.4 bilhão de hectares de terras cultiváveis contra 3.3 bilhões de hectares de prados e pastagens) [79]. Dessa forma, as pastagens podem fornecer o maior potencial para sequestrar carbono por meio da agricultura regenerativa, se geridas de maneira adequada para regenerar os solos, proporcionando um enorme depósito de carbono com muito co-benefícios para os ecossistemas, ruminantes e pecuaristas.

O gado em si não é o problema. É a maneira que escolhemos para criá-lo que origina o problema.

No entanto, a pecuária está cada vez mais "sem terra" [79]. Mesmo em lugares antes conhecidos por suas pastagens, como Brasil e Argentina, terras desmatadas que antes abrigavam pastagens extensas para o gado agora estão sendo transformadas em terras para cultivo de soja convencional, a fim de alimentar o gado mantido em terrenos lotados [120]. Esses sistemas pecuários convencionais contribuem com cerca de 7–18% das emissões globais de gases de efeito estufa [23].

Mas o gado em si não é o problema. É a maneira que escolhemos para criá-lo que origina o problema. Os níveis de emissões de gases de efeito estufa provenientes da produção da carne dependem do tipo de manejo de pastagem [23,122], ou da falta dele. Com o manejo apropriado, o gado ruminante pode aumentar o carbono sequestrado pelo solo, ultrapassando as emissões de gases de efeito estufa, e pode apoiar e aprimorar outros serviços essenciais do ecossistema [121, 122].

A pecuária regenerativa é um termo genérico que abrange muitas formas de manejo intensivo de pastagem, como o manejo adaptável em múltiplas áreas, o manejo holístico e o pastoreio coletivo. Embora esses sistemas tenham as suas diferenças, a semelhança está no movimento frequente e calculado de uma grande densidade de ruminantes, considerando-se o tamanho do rebanho e a quantidade de forragem disponível. Decisivamente, estes manejos que permitem a movimentação do rebanho permitem que a forragem se recupere nas pastagens

(conforme entrevista com Teague), imitando grandes rebanhos encontrados na natureza, o que permite que o carbono orgânico do solo aumente mesmo em taxas de lotação consideradas prejudiciais à saúde do solo em sistemas de criação de animais [122, 123].

O pastoreio regenerativo também pode ser empregado em sistemas de integração lavoura-pecuária. O manejo cuidadoso nesses sistemas é fundamental para aumentar o carbono orgânico do solo. Em um estudo de nove anos em pastagens que contavam com plantas de cobertura, pesquisadores brasileiros encontraram maiores estoques de carbono orgânico e nitrogênio no solo sob manejo de intensidade moderada e leve (20-40cm de altura) do que em sistemas sem pastejo ou com manejo de alta intensidade [124]. Conclusões semelhantes foram feitas por outros pesquisadores que investigavam sistemas de integração agropastoril [105,125,126]. A adição de pastoreio rotacional com o cultivo rotacionado de diferentes safras pode fornecer vários benefícios que vão além do aumento de armazenamento de carbono, incluindo a ampliação da atividade de glicosidade do solo, cálcio, magnésio, nitrogênio, pH do solo e um aumento na proporção de carbono para nitrogênio [127].

Os pesquisadores também identificaram emissões reduzidas de metano em sistemas de pecuária regenerativa.

Além de aprimorar o manejo do gado, pastagens que contam com mais tipos de capim, e também aquelas que incluem legumes, sequestram mais carbono do que as que possuem pouca diversidade [128]. Os pesquisadores também identificaram emissões reduzidas de metano em sistemas de pecuária regenerativa, o que sugere que pode haver uma relação com a maior diversidade presente nestes sistemas [121]. Em geral, as mudanças no manejo de pastagens apresentam um potencial para a mitigação das mudanças climáticas, superando até mesmo as políticas destinadas a reduzir o desmatamento ou direcionar as práticas de produção agrícola [129].

COMPLEXIDADE DO SISTEMA

A agricultura regenerativa é uma abordagem sistêmica e intensiva em conhecimento, baseada no pensamento ecológico. Não é simplesmente redutível a um apanhado de práticas; ao invés disso, é guiada por princípios e resultados. Mesmo em sistemas orgânicos que cultivam as mesmas safras e utilizam o mesmo preparo do solo, as escolhas de manejo, como o tipo e frequência das culturas de cobertura e o uso de composto, têm efeitos significativos no que se refere à saúde do solo a longo prazo [85]. Pesquisadores que estudaram nove sistemas agrícolas diferentes - alguns orgânicos, alguns convencionais - descobriram que, ao longo de vinte anos, apenas um desses sistemas (de cultura orgânica milho-tomate-plantas de cobertura e que utilizava estrume como adubo), aumentou o carbono orgânico em todo o solo [102].

O potencial e a taxa de carbono sequestrado pelo solo, para qualquer tipo de sistema de cultivo, depende da interação de muitos fatores [85,130,131], incluindo: o conteúdo existente e histórico de carbono orgânico no solo, o clima e posição em que as terras agrícolas estão situadas, e duração da época de crescimento do cultivo [veja a barra lateral para mais fatores].

Esta complexidade significa que os agricultores podem criar sistemas regenerativos melhores quando se baseiam na ecologia para tomar decisões na gestão de suas fazendas, considerando suas particularidades.

“Globalmente, os agricultores correm o risco de se tornarem clientes passivos da agroindústria, na qual a falta de conhecimentos ecológicos se traduz em maior dependência de insumos sintéticos comprados.” [132]

Rotações mais longas e mais complexas, incluindo plantas de cobertura, ervas perenes e árvores, garantem a sobrevivência de diversas raízes vivas no solo durante a maior parte do ano — um importante princípio para a agricultura regenerativa. Reintroduzir o manejo de pastagens, reter os resíduos das colheitas, diminuir o preparo do solo e adicionar compostos ou inoculantes microbianos pode melhorar ainda mais a saúde do solo.

Estas práticas sinérgicas se combinam para formar sistemas regenerativos, que promovem a biodiversidade acima e abaixo do solo. O conjunto de práticas que formam um sistema agrícola apropriado pode ser diferente conforme o local, mas o menu de práticas regenerativas é amplo e suficientemente comprovado para que cada fazenda implemente algumas mudanças em sua gestão, que ajude a mudar o conceito de agricultura - de um problema de crise climática para uma parte da solução.

Fatores para o sequestro de carbono

- conteúdo de carbono existente e histórico
- clima e posição em que as terras agrícolas estão situadas
- duração da época de crescimento do cultivo
- tipo de solo, profundidade e capacidade de retenção de água
- as principais safras ou gado
- tipo e taxa de fertilizante utilizado
- nitrogênio disponível no solo
- uso de inseticidas, fungicidas e herbicidas
- tipos de culturas de cobertura e rotação
- intensidade no preparo do solo
- tipo e frequência de aplicações de composto
- uso de irrigação
- manejo preventivo da terra quando o carbono é estocado e outras opções de manejo.



Foto: Alexandre Family Farms

ONDE ESTÁ A AGRICULTURA REGENERATIVA NO MERCADO?

Nos últimos anos, várias organizações sem fins lucrativos e marcas têm desenvolvido definições da agricultura regenerativa, rotulagem e certificação de produtos e sistemas de medição de resultados.

Embora o termo "regenerativo" esteja atualmente vulnerável a propagandas enganosas, estas iniciativas buscam desenvolver os critérios — e transparência — a fim de ajudar os consumidores a identificarem produtos regenerativos no mercado:



Regenerative Organic Certification (Certificação Regenerativa Orgânica)

RegenOrganic.org
? Acprgdga_Čcm Pceclcp_rgt_ Mpećlga_ s k lmtm pĒrsjm bc _jrm n_bpćm jgbcp_bm ncj_ ?jg_lČ_ Pceclcp_rgt_ Mpećlga_ (c _nmg_b_ nmp k_pa_q c mpe_lgx_ČĚcq qc k dg lq jsap_rgtmq am k m m G lqgrsr m Pmb_jc* N_r_eēlg_c Dr. Bronners), rcoscp _ acprgdga_Čcm mpećlga_ am k m ` \_qc, clos\_lrm \_bgagm l\_ apgrčp gmq n\_p\_ \_ q Ġbc bm qmj m, `ck cqr_p _lg k_j c ges_jb_bc qmag_j8

SAÚDE DO SOLO	BEM ESTAR ANIMAL	IGUALDADE SOCIAL
• Constrói matéria orgânica no solo • Lavoura de conservação • Culturas de cobertura • Rotações de colheita • Sem GMO ou adição de genes • Sistemas sem solo • Sem entradas sintéticas • Promove a biodiversidade • Pastoreio rotativo	• Cinco liberdades: livre de desconforto; livre de medo e angústia; livre da fome; livre de dor, lesão ou doença; liberdade para expressar comportamento normal • Alimentado com grama/ cultivado em pasto • Transporte limitado • Sem CAFOs (operação de alimentação alimentar concentrada) • Abrigo adequado	• Capacitação • Organizações democráticas • Pagamentos justos aos agricultores • Liberdade de associação • Boas condições de trabalho • Salários condignos • Compromissos de longo prazo • Sem trabalho forçado • Transparência e responsabilidade

ROC Star Farms

Os primeiros produtos com Certificação Orgânica Regenerativa chegaram às prateleiras em 2020. Esta certificação é para alimentos, fibras e produtos de higiene pessoal.



Foto: Instituto Savory



Programa 'Land to Market' do Instituto Savory savory.global/land-to-market

Verificação de Resultados Ecológicos (EOV) é um protocolo científico, resultante do programa regenerativo do Instituto Savory "Land to Market" (em tradução livre, da Terra para o Mercado). Seu objetivo é dar voz à terra no mercado. O protocolo avalia vários indicadores de saúde ambiental, incluindo: matéria orgânica do solo, carbono do solo, capacidade de retenção de água pelo solo, taxas de infiltração de água e biodiversidade. Ele utiliza uma combinação de dados quantitativos e qualitativos e registros fotográficos, que funcionam sinergicamente para contabilizar as mudanças nos ecossistemas. O protocolo emprega uma variedade de indicadores que ajudam os produtores a implementarem melhorias de gestão, em conjunto com outros indicadores empíricos que têm valor no mercado. Em julho de 2020, por meio da rede global de centros do Instituto Savory, mais de 2 milhões de acres foram medidos pelo EOV.



Soil Carbon Initiative (Iniciativa de Carbono do Solo)

SoilCarbonInitiative.org

A Soil Carbon Initiative (Iniciativa de Carbono do Solo, em livre tradução), criada pelo The Carbon Underground, é um conjunto de normas agrícolas baseadas em dados científicos empíricos, que busca ajudar os agricultores e as cadeias de fornecimento a medir as melhorias na saúde e no carbono do solo. A SCI cria uma estrutura que convoca a todos que lidam com o solo a enfrentar a crise climática através da construção de um solo mais saudável e, consequentemente, com maior capacidade de sequestro de carbono. A iniciativa não dita práticas - então não importa o tipo de sistema agrícola (seja orgânico, regenerativo, não transgênico, convencional) - a SCI pode medir a saúde e o carbono do solo. Seu enfoque permite que as cadeias de abastecimento usem o SCI para medir os resultados de programas específicos para a melhoria da saúde do solo.

Os agricultores demonstram o seu compromisso anualmente, ao submeter evidências de aprendizagem/ensino sobre a saúde do solo e do ecossistema como um todo, e das ações tomadas a fim de aprimorá-la. As ações estão alinhadas com cinco princípios da saúde do solo:

- 1 Minimizar as intervenções no solo
- 2 Maximizar a diversidade de cultivos e a biodiversidade nas fazendas
- 3 Manter o solo protegido
- 4 Manter as raízes vivas na maior parte do ano
- 5 Integrar a pecuária com a lavoura



Fazendeiro de coco no Sri Lanka. Cortesia de Serendipol Ltda., companhia estabelecida em parceria com o Dr. Bronner e fornecedora de óleo de coco regenerativo orgânico.

ARMAZENANDO CARBONO NO SOLO

O sequestro de carbono pelos solos regenerativos pode acontecer rapidamente, mas armazenar este carbono por longos períodos de tempo é um processo ainda mais difícil.

Uma vez que o ciclo do carbono é dinâmico e o estudo dos solos inerentemente complexo, os fatores que influenciam o tempo de retenção de carbono pelo solo estão sendo pesquisados ativamente [34,133].

Todo o carbono presente na terra está em fluxo, e o grau de proteção nos solos que contam com a estabilidade de seus agregados - livrando-os de decompositores e reduzindo a evaporação da água - determina em grande parte por quanto tempo ele será mantido no solo [26].

É mais provável que o carbono esteja protegido no subsolo, a um ou dois metros de profundidade.

O carbono presente na matéria orgânica associada a minerais (MOaM) tem um ponto de saturação, mas é estável ao longo de períodos milenares, enquanto que os ciclos da matéria orgânica particulada (MOP) são mais rápidos em fornecer nutrientes às plantas a cada estação, mas são capazes de reter o carbono indefinidamente [134]. A estrutura do solo possui um papel crítico na estabilidade do carbono armazenado [33, 135, 87], podendo ser aprimorado por meio do manejo de cultivos e diversos tipos de plantas com raízes crescendo durante o maior tempo possível.

É mais provável que o carbono esteja protegido no subsolo, a um ou dois metros de profundidade [5,136–140]. Ainda assim, é raro que o carbonoseja medido abaixo de 30 a 40 centímetros de profundidade da superfície arada do solo [16], o que significa que é provável que os dados atuais subestimem os estoques de carbono. Estudos recentes que comparavam sistemas combinados de vegetais e grãos, orgânicos e convencionais, encontrou diferenças significativas nos perfis mais profundos do solo [48, 87, 102]. Se o solo não tivesse sido medido abaixo de 30 centímetros, quase 60% do carbono presente no sistema orgânico não teria sido contabilizado [102]. Em contrapartida, a profundidade de medição rasa teria sugerido que o sistema convencional teve mais ganho de carbono, quando na verdade as medições mais profundas revelarem uma perda geral de carbono nesse sistema [102].

Isso é importante porque os sistemas que contam com preparo reduzido do solo, nos quais a perda de carbono era considerada maior em comparação com os sistemas de plantio direto, podem ter redistribuído o carbono abaixo do nível da superfície arada do solo e fora do alcance da maioria das amostras coletadas [28]. Além dos 30 centímetros no perfil do solo, a idade do carbono aumenta, grande parte dele persistindo por milhares de anos [141].

O sequestro de carbono de maneira rápida e estável, nas condições encorajadas pela agricultura regenerativa, é possível. Adições de matéria orgânica fresca podem, nas circunstâncias certas, serem sequestradas de forma ágil e eficaz. Depois de apenas uma aplicação de composto e esterco de gado, os níveis de carbono orgânico do solo foram significativamente mais elevados nos anos seguintes, mesmo após a contabilização do carbono nas alterações [97,99]. Dois anos após a conversão de um sistema degradado de cultivo convencional em pastagem regenerativa, as fazendas leiteiras no sul dos Estados Unidos começaram a sequestrar carbono a uma taxa de 4.6 toneladas métricas por hectare ao ano. Essa taxa aumentou para incríveis 9 toneladas métricas por ano antes que os pesquisadores notassem o efeito platô e declínio na taxa de sequestro após seis anos [24]. Similarmente, em solos tropicais, os resultados sugerem que dois anos de manejo orgânico podem aumentar de forma significativa e consistente o carbono presente na biomassa microbiana [142].

Estes resultados apontam que o carbono estável do solo pode ser construído com rapidez suficiente para resultar em uma rápida redução do dióxido de carbono atmosférico a partir da transição para sistemas de agricultura regenerativa.



Foto: Instituto Savory



O sistema de experimentos agrícolas do Instituto Rodale provou que os sistemas orgânicos (à direita) podem performar melhor do que os sistemas convencionais (à esquerda) em tempos de seca.

A QUESTÃO DA PRODUTIVIDADE

A produtividade das safras é frequentemente apontada como a razão pela qual não podemos escalar sistemas regenerativos orgânicos, mas as evidências não sustentam essa afirmação.

Uma meta-análise das publicações analisadas mostra que, em média, a produtividade das colheitas em sistemas orgânicos é menor comparando-se aos sistemas convencionais [143,144]. Mas a diferença no rendimento é mais prevalente quando as práticas adotadas pelo sistema orgânico imitam as do convencional [145], ou seja, quando os as normas agrícolas para a produção orgânica são aplicadas usando-se a mesma mentalidade dos sistemas convencionais, intensivos em produtos químicos. Os sistemas regenerativos possuem uma abordagem holística da agricultura - eles buscam melhorar a saúde do solo, e não simplesmente trocar produtos químicos por insumos aprovados para cultivo orgânico.

A produtividade real em sistemas bem projetados de agricultura regenerativa, ao invés de ficar na média geral, mostrou-se superior aos sistemas convencionais em quase todas as safras de alimentos, incluindo milho, trigo, arroz, soja e girassol [18,72,143]. Os pesquisadores descobriram que a "adoção da agricultura orgânica sob condições agroecológicas, onde ela tem melhor desempenho, pode fechar a lacuna de produtividade entre os sistemas orgânico e convencional" [144,146].

Em 2016, o sistema de plantio direto orgânico do Instituto Rodale, que usava o esterco como adubo, produziu 200 alqueires de milho por acre — um rendimento recorde para o sistema orgânico e bem acima da média do condado e da produtividade do milho convencional no mesmo ano (140 alqueires por acre). Ao longo de um período de quarenta anos, não houve diferença estatística no rendimento das colheitas orgânica e convencional dentro deste experimento [17,147].

Foi notado que a lacuna na produtividade orgânica também surge, em parte, devido à falta de variedades adaptadas para seus sistemas [31]. As sementes convencionais e os sistemas químicos em que estão inseridas se beneficiaram de imensos financiamentos de P&D por parte de empresas privadas e seus parceiros de pesquisa nas universidades, enquanto o melhoramento ecológico de plantas para a produção orgânica não [148-150].

É importante ressaltar que a produtividade em sistemas orgânicos é mais resistente às bruscas mudanças climáticas que ocorrem no contexto de crise atual. Conforme comprovado pelo sistema de experimentos agrícolas de longo prazo do Instituto Rodale, durante os anos de seca, os rendimentos foram de 30% a 100% maiores nos cultivos orgânicos [151,152]. A resiliência das safras frente às mudanças climáticas é um importante co-benefício porque "o solo que é resistente ao clima pode estabilizar a produtividade, reduzir as incertezas e garantir o sucesso da colheita mesmo em condições climáticas extremas" [5].

Uma forte base empírica vem sendo construída, mostrando que os sistemas regenerativos trazem uma ampla gama de benefícios tradicionalmente subvalorizados que são tão importante quanto à produtividade [2,77,146,153]. Quando comparados aos sistemas convencionais, os regenerativos melhoram:

- Abundância da biodiversidade e riqueza de espécies
- Saúde do solo, incluindo níveis de carbono
- Impacto de pesticidas nos alimentos e ecossistemas
- A produção total das fazendas
- Densidade de nutrientes no que é colhido
- Resistência a impactos climáticos
- Provisão de serviços ecossistêmicos
- Eficiente no uso de recursos
- Criação de empregos e bem estar do trabalhador rural
- Rentabilidade
- Revitalização da comunidade rural

O MITO DA ESCASSEZ DE ALIMENTOS

Não há escassez global de alimentos. E nem estamos no caminho para que isso aconteça. A produção mundial de alimentos tem crescido vigorosamente, fornecendo 2.900 calorias para cada pessoa pessoa por dia na atualidade, 22% mais do que o necessário [154].

O uso contínuo da frase ‘logo teremos que alimentar nove bilhões de pessoas’ até como justificativa para buscar maior produtividade é ambíguo. **A fome e o acesso a alimentos não são questões que dizem respeito aos rendimentos das colheitas.** São questões econômicas e sociais que, em grande parte, resultam de políticas inapropriadas de agricultura e desenvolvimento, que criam e reforçam o problema da fome [155]. Atualmente, nós produzimos calorias em excesso. Na verdade, já produzimos calorias capazes de alimentar nove bilhões de pessoas. Entretanto, fazemos isso de uma maneira que degrada os solos e prejudica o meio ambiente, colocando nossa própria saúde e a produção de alimentos em risco.

Atualmente, mais de 40% da safra global é desperdiçada por ano.

A fome e o acesso aos alimentos em todo o mundo são resultado da desigualdade, que pode ser amenizada em parte com o apoio da agricultura regenerativa de pequena escala, tanto urbana quanto rural [156]. Para os pequenos agricultores para os quais a colheita

é uma questão de comer ou não comer, a agricultura regenerativa com poucos insumos é a melhor maneira de aumentar a produtividade, conforme documentado por agrônomos em regiões tropicais por mais de 50 anos [21].

Pouco mais de 55% da produção agrícola mundial é consumida diretamente por pessoas [158]. A disponibilidade de calorias poderia ser aumentada em até 70% se mudássemos as safras destinadas à produção de ração animal e biocombustíveis para o consumo humano direto [157]. Se o gado fosse criado em pastagens ao invés de competir por terras férteis adequadas para a produção de alimentos ao homem, “uma mudança de 100% para a agricultura orgânica poderia alimentar, de maneira sustentável, a população humana em 2050, mesmo com uma lacuna de produtividade” [158]. Aliás, mais de 40% da safra global da atualidade é desperdiçada por ano [159].

Está claro que nós precisamos fazer escolhas alimentares ambientalmente conscientes, mas nós também precisamos focar nossos recursos em resolver a questão do desperdício de alimentos, devolvendo o gado às pastagens e reduzindo o uso de terras férteis para a produção de combustíveis. Ao adotarmos uma visão holística sobre o sistema alimentar, vemos que a produtividade em si pouco significa. **A agricultura regenerativa pode certamente alimentar o mundo. E pode fazer isso enquanto estabiliza o clima, regenera ecossistemas, restaura a biodiversidade e promove melhorias nas comunidades rurais.**



COMEÇANDO A AGIR

Nós precisamos reduzir os gases de efeito estufa na atmosfera agora.

Isso requer uma ação política forte que possa apoiar a transformação total de nossos setores de energia e transportes. Ao mesmo tempo, sabemos que o enorme reservatório subterrâneo de carbono foi drenado por práticas agrícolas intensivas. Podemos reabastecer este reservatório ao recarbonizar os solos agrícolas e as pastagens.

Os agricultores lideraram a revolução da agricultura regenerativa, e muitos precisam de um pouco mais de conhecimento, experiência e suporte para mudar suas práticas. No entanto, mais do que um olhar atento [160], usar uma abordagem diferente pode ser mais difícil. A agricultura industrial, que é convencional em larga escala, está presa a um sistema que precisa mais do que a vontade do agricultor em mudar. É um sistema construído sob grandes montantes de capital, insumos próprios, sementes que foram propositalmente modificadas para funcionar apenas em sistemas quimicamente controlados, e em escalas que não podem ser facilmente visualizadas - apenas com satélites geolocalizados por quilômetros a fio. As grandes reservas de capital produzem commodities a custo baixo. A única maneira desses sistemas funcionarem é por meio da externalização de custos e sua enorme dimensão aliada com políticas agrícolas governamentais e que envolvem interesses de grandes corporações do agronegócio. Para recarbonizar, precisamos oferecer suporte local personalizado para adoção de práticas regenerativas em todas as fazendas, incluindo operações de larga escala.

Nos últimos cinco anos, a agricultura regenerativa, a produção e sequestro de carbono e a saúde do solo foram temas que ganharam bastante atenção. Entre várias iniciativas internacionais, o “4 por 1000” lançado na COP21 em 2015, estimulou muitos governos a adotarem o sequestro de carbono pelo solo como uma de suas estratégias para a mudança climática. O programa voluntário destaca que “uma taxa de crescimento anual de 0,4% nos estoques de carbono nos primeiros 30-40 cm do solo reduziria significativamente a concentração de CO₂ na atmosfera relacionado às atividades humanas.” Nos Estados Unidos, um projeto de lei apresentado no início de 2020, a Lei da Resiliência da Agricultura, faria com que o país aderisse à iniciativa 4 por 1000, e lista um conjunto abrangente de medidas de apoio à política agrícola regenerativa.

Seja político, agricultor ou consumidor — todo mundo pode fazer algo para apoiar a mudança do sistema alimentar, de industrial para regenerativo.

O QUE OS CONSUMIDORES PODEM FAZER?

Colocar pressão!

① ***Pressione as cadeias de abastecimento.*** Nós precisamos impedir que a indústria de alimentos sustente-se a partir de produtos e ingredientes alimentícios e/ou fibrosos que degradem os ecossistemas. Diga aos produtores que as cadeias de suprimentos ecologicamente destrutivas são uma bomba-relógio prestes a explodir suas marcas. Deixe-os saber que não é mais aceitável produzir alimentos às custas do futuro da humanidade. Exija produtos alimentícios e fibrosos que tenham origem em fazendas que adotem práticas regenerativas.

② ***Dê esperanças aos políticos.*** Temos que abordar os líderes governamentais com estratégias regenerativas. Muitos deles caem no mito da revolução verde de que podemos intensificar a agricultura convencional de maneira sustentável. Eles sabem que os solos de seus estados e nações estão sendo destruídos, mas não veem outra alternativa. Diga a eles que existe uma solução melhor, mostre-lhes este relatório e a quem possa interessar. Deixe-os saber que apoia suas ações em mudar a agricultura do lado problemático da equação climática para o lado da solução.

③ ***Inicie uma conversa.*** Solicite à mercearia, escola, local de trabalho, hospital local e outras instituições e organizações que você frequenta para comprarem produtos derivados de práticas agrícolas regenerativas. Se eles não puderem falar diretamente com o produtor, peça-os para olhar os rótulos de produtos certificados por terceiros, como o Certificado Orgânico Regenerativo, 'Land to Market', Projeto Orgânico Real e a Iniciativa de Carbono do Solo.

④ ***Compre de maneira regenerativa.*** Quando possível, compra de marcas que buscam alimentos e ingredientes de fazendas regenerativas. Deixe-os saber que você aprecia suas práticas de suprimentos. Melhor ainda, compre diretamente de fazendas regenerativas. Muitas que vendem ao público são orgulhosamente transparente sobre suas práticas. Mas lembre-se que a maioria destas fazendas, especialmente aquelas de grande escala, mais distantes das áreas metropolitanas, não estão preparadas para vender diretamente ao público - as compras por si só não vão mudar isso.

O QUE OS AGRICULTORES PODEM FAZER?

Aumentar este movimento!

- 1 **Faça a comunidade crescer.** O movimento da agricultura regenerativa é liderado pelos agricultores; se você não conhece nenhum grupo por perto, junte-se a organizações regionais, nacionais ou internacionais para troca de experiências com outros agricultores sobre orgânicos, regeneração, agroecologia, manejo holístico ou agrofloresta sintrópica, entre outros temas. Se você já frequenta estes círculos, considere criar um Plano de Fazenda de Carbono ou torne-se certificado em um padrão mais rigoroso que vai além do orgânico, como a Certificação Regenerativa Orgânica, Projeto Real Orgânico, 'Land to Market' (para pecuaristas), ou Iniciativa de Carbono do Solo. Você pode também montar um grupo local ou regional para regenerar a escala de paisagens, organizar uma Aliança Regenerativa ou iniciar/juntar-se a um conselho de política alimentar onde diversos constituintes criam um caminho para o sistema regenerativo alimentar adaptável ao contexto local.
- 2 **Experimente, observe, compartilhe.** Por se tratar de um movimento liderado por agricultores, realizar experimentos em fazendas reais é algo crítico. É quando você muda as suas práticas com base no que está aprendendo, observando e medindo em termos de saúde do solo e biodiversidade, e então compartilha estes resultados com outras pessoas. Seja conversando informalmente com seus vizinhos, promovendo dias de campo, postando em redes sociais, fazendo parcerias com pesquisadores ou falando em conferências e outras reuniões, quando você testa, observa e compartilha a história de regeneração da sua fazenda, você inspira as demais pessoas, fornece dados para pesquisadores e políticos, e promove benefícios para sua fazenda, comunidade e para o sistema alimentar como um todo.
- 3 **Medindo resultados.** Os sistemas regenerativos fornecem uma ampla gama de benefícios que a sociedade valoriza. Altos rendimentos nas colheitas, densidade de nutrientes, resiliência a impactos climáticos, serviços para o ecossistema como reduzir o uso de fertilizantes e o escoamento, e criação de empregos são alguns deles [2]. Além disso, as fazendas podem acompanhar a construção de matéria orgânica do solo onde serviços de amostragem estão disponíveis e são acessíveis. Em geral, 50% da matéria orgânica do solo é constituída de carbono [29]. Para algumas regiões, testar o sequestro de carbono pelo solo pode ser viável em um futuro próximo, por meio de sensores de solo acessíveis e outros métodos acurados de contabilização do carbono [140]. Existem também formas de observar, sem qualquer custo, os impactos na saúde do solo relacionados às mudanças de manejo, incluindo observar a biodiversidade, agregação do solo e testes de infiltração de água. Você pode obter ou desenhar um cartão para acompanhar a saúde do solo, registrando observações e medindo o progresso de sua fazenda.

O QUE OS POLÍTICOS PODEM FAZER?

Desestimular a destruição do solo!

- 1 **Aprenda com seu eleitorado.** A agricultura regenerativa é um movimento liderado pelos agricultores e apoiado por consumidores em todo o mundo, e não tem o poder de lobby do agronegócio industrial. Tenha como prioridade construir ativamente relações com este movimento. Mesmo nos lugares mais improváveis, existem pessoas empenhadas a mudar o sistema alimentar, de um problema para uma solução climática. Encontre estes eleitores; eles podem ser agricultores regenerativos, lojas de alimentos saudáveis e seus compradores diretos, organizações de agricultura sustentável ou até mesmo pesquisadores nas universidades. Desenvolva relacionamentos com quem o manterá informado sobre agricultura regenerativa, local e globalmente.
- 2 **Apoie a agricultura regenerativa, a orgânica, e a regenerativa orgânica.** Políticas que apoiam a agricultura regenerativa reconhecem e recompensam os agricultores por produzirem matéria orgânica no solo. Estas ações são mais focadas em apoiar e recompensar os resultados positivos. Existe uma ampla variedade de políticas que podem ser adotadas, desde a divisão dos custos diretos com o cultivo de plantas de cobertura até a facilitação da aprendizagem entre agricultores, financiamento de pesquisas voltadas para orgânicos, criação de conselhos locais ou regionais sobre política alimentar, elaboração de iniciativas para integração de culturas e muito mais. A complexidade atual na precisão das medições de resultados significa que pode ser mais viável apoiar sistemas de práticas interligadas, como o projeto norte-americano da Lei da Resiliência da Agricultura, do que recompensar os resultados.
- 3 **Desestime a destruição do solo.** Políticos podem mudar as práticas destrutivas do solo de diversas maneiras. Comece repensando os subsídios baseados em produções de commodities, seguros agrícolas, uso de biocombustíveis, financiamento governamental para pesquisas com uso intensivo de produtos químicos e fusões de corporações do agronegócio. Pense como uma Lei de Saúde do Solo pode ser introduzida [5]. Esteja atento ao poder político global das corporações do agronegócio industrial; sua consolidação é uma séria ameaça à mudança do sistema alimentar para abordagens regenerativas [161].



SAÚDE DO SOLO PARA UM FUTURO VIVO

A crise climática é uma oportunidade monumental para mudar de rumo.

Agora é a hora de criar um futuro que abrace a vida, um futuro onde solo saudável, ar puro e água potável estejam disponíveis a todos. De muitas maneiras, uma reestruturação fundamental na maneira como cultivamos os nossos alimentos está no cerne desta mudança; nós precisamos cooperar com a natureza. A cansada era da sustentabilidade acabou. Voltamos agora para a regeneração. A agricultura regenerativa é a nossa melhor esperança para a criação de um futuro no qual todos queremos viver, um futuro no qual as crianças ficarão felizes em desfrutar.

A agricultura regenerativa está alinhada com as práticas de agroecologia adotadas por agricultores preocupados com a soberania dos alimentos em todo o mundo. A escolha de práticas agrícolas que criam sistemas regenerativos pode aumentar os estoques de carbono do solo, diminuir as emissões de gases de efeito estufa, manter a produtividade, melhorar a retenção da água e saúde das plantas, elevar a rentabilidade das fazendas e revitalizar as comunidades rurais tradicionais, ao mesmo tempo em que garante a biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas.

O sequestro de carbono pelo solo por meio da agricultura regenerativa é uma remédio contra o aquecimento global, escalável para a humanidade e pronto para implementação imediata. Agricultores já estão liderando a evolução dos sistemas regenerativos. Mas nós precisamos escalar e escalar para tornarmos a regeneração possível em fazendas de cultivo convencional, fazendas de pequenos proprietários em áreas tropicais, pomares e ranchos no mundo todo, de maneira que faça sentido em cada um destes lugares.

Esta mudança exigirá que todos nós trabalhemos juntos — agricultores, consumidores e políticos —para criar um amplo apoio por parte da sociedade em direção aos sistemas regenerativos. Nós precisamos colocar uma pressão positiva sobre as cadeias de suprimentos, melhorar a medição dos solos - compartilhando o progresso nas fazendas - e impedir a destruição do solo.

Robert Rodale nos encorajou a ter esta visão de regeneração em 1985:

Minha esperança é que a era da sustentabilidade não se mantenha por mais de 10 ou 15 anos e que possamos ir além, para a ideia de regeneração, onde o que estejamos realmente fazendo com a terra americana não seja apenas produzir alimentos, mas regenerar, melhorar e restaurar as paisagens e espírito americano a um nível mais alto" [162].

Quase 35 anos depois, o espectro da crise climática forneceu uma oportunidade incomparável de aproveitar o conhecimento tecnológico de ponta, a engenhosidade humana e a rica história de agricultores que trabalharam em conjunto com a sabedoria dos ecossistemas naturais para chegar a um clima estável. É hora de curar a nossa terra e a nós mesmos.

REFERÊNCIAS

¹ Carson, R. Silent spring; Mariner Books, 1962;

² IPES-Food From Uniformity to Diversity: A paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems; International Panel of Experts on Sustainable Food Systems, 2016;

³ UNEP The emissions gap report 2010; United Nations Environment Programme: Nairobi, 2010;

⁴ UNEP Emissions Gap Report 2019; 2019;

⁵ Lal, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. Soil Science and Plant Nutrition 2020, 66, 1–9, doi:10.1080/00380768.2020.1718548.

⁶ Berry, W. The Gift of Good Land: Further Essays Cultural and Agricultural; Counterpoint Press, 1981; ISBN 978-1-64009-169-6.

⁷ The Search for Systems that Regenerate Agricultural Potential, In Research issues related to strategic planning for United States agriculture in a global setting: proceedings and minutes, thirty-sixth annual meeting of Agricultural Research Institute, October 7-9, 1987, Washington, D.C; Agriculture Research Institute (U.S.), Rodale, R., Eds.; Agriculture Research Institute: Bethesda, Md, 1987.

⁸ Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 2004, 123, 1–22, doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032.

⁹ IPCC Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2020;

¹⁰ Khan, S.A.; Mulvaney, R.L.; Ellsworth, T.R.; Boast, C.W. The Myth of Nitrogen Fertilization for Soil Carbon Sequestration. Journal of Environment Quality 2007, 36, 1821, doi:10.2134/jeq2007.0099.

¹¹ Lal, R.; Follett, R.F.; Stewart, B.A.; Kimble, J.M. SOIL CARBON SEQUESTRATION TO MITIGATE CLIMATE CHANGE AND ADVANCE FOOD SECURITY. Soil Science December 2007 2007, 172, 943–956, doi:10.1097/ss.0b013e31815cc498.

¹² Oldfield, E.E.; Bradford, M.A.; Wood, S.A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields SOIL 2019, 5, 15–32, doi:https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019.

¹³ Global Carbon Project. Carbon Budget and Trends 2019.

¹⁴ Schmidt, M.W.I.; Torn, M.S.; Abiven, S.; Dittmar, T.; Guggenberger, G.; Janssens, I.A.; Kleber, M.; Kögel-Knabner, I.; Lehmann, J.; Manning, D.A.C.; et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature 2011, 478, 49–56.

¹⁵ Smith, P.; Martino, D.; Cai, Z.; Gwary, D.; Janzen, H.; Kumar, P.; McCarl, B.; Ogle, S.; O’Mara, F.; Rice, C.; et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. Phil. Trans. R. Soc. B 2008, 363, 789–813, doi:10.1098/rstb.2007.2184.

¹⁶ Poeplau, C.; Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 2015, 200, 33–41, doi:10.1016/j.agee.2014.10.024.

¹⁷ Drinkwater, L.E.; Wagoner, P.; Sanntonio, M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. Nature 1998, 396, 262-265.

¹⁸ Hepperly, P.; Lotter, D.; Ulsh, C.Z.; Seidel, R.; Reider, C. Compost, Manure and Synthetic Fertilizer Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content. Compost Science & Utilization 2009, 17, 117–126.

¹⁹ Beer, J.; Bonnemann, A.; Chavez, W.; Fassbender, HW.; Imbach, AC.; Martel, I. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) or poro (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. Agroforestry Syststems 1990, 12: 229–249. doi:10.1007/BF00137286

²⁰ Vicente-Vicente, J.L.; García-Ruiz, R.; Francaviglia, R.; Aguilera, E.; Smith, P. Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 2016, 235, 204–214, doi:10.1016/j.agee.2016.10.024.

²¹ Bunch, R.; Berkelaar, D.; Motis, T.; Bunch, J.; Swartz, S. Restoring the Soil: How to Use Green Manure/Cover Crops to Fertilize the Soil and Overcome Droughts; ECHO Incorporated, 2019; ISBN 978-1-946263-30-8.

²² Johnson, D.; Ellington, J.; Eaton, W. Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix. Peer J Preprints 2015.

REFERÊNCIAS

²³ Stanley, P.L.; Rowntree, J.E.; Beede, D.K.; DeLonge, M.S.; Hamm, M.W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. Agricultural Systems 2018, 162, 249–258, doi:10.1016/j.agry.2018.02.003.

²⁴ Machmuller, M.B.; Kramer, M.G.; Cyle, T.K.; Hill, N.; Hancock, D.; Thompson, A. Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. Nat Commun 2015, 6, 1–5, doi:10.1038/ncomms7995.

²⁵ Hungate, B.A.; Barbier, E.B.; Ando, A.W.; Marks, S.P.; Reich, P.B.; Gestel, N. van; Tilman, D.; Knops, J.M.H.; Hooper, D.U.; Butterfield, B.J.; et al. The economic value of grassland species for carbon storage. Science Advances 2017, 3, e1601880, doi:10.1126/sciadv.1601880.

²⁶ Lorenz, K.; Lal, R. Cropland Soil Carbon Dynamics. In Recarbonization of the Biosphere; Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von, Eds.; Springer Netherlands, 2012; pp. 303–346 ISBN 978-94-007-4158-4.

²⁷ Leffler, C.; Pardo, L.; Heubbers, A.; Carvalho, P.C. de F.; Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agriculture and environmental quality. Agriculture, Ecosystems & Environment 2014, 190, 4–8, doi:10.1016/j.agee.2013.08.009.

²⁸ Olson, K.R.; Al-Kaisi, M.M.; Lal, R.; Lowery, B. Experimental Consideration, Treatments, and Methods in Determining Soil Organic Carbon Sequestration Rates. Soil Science Society of America Journal 2014, 78, 348–360, doi:10.2136/sssaj2013.09.0412.

²⁹ Pribyl, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. Geoderma 2010, 156, 75–83, doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.003.

³⁰ Lori, M.; Symnaczik, S.; Mäder, P.; Deyn, G.D.; Gatteringer, A. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta analysis and meta-regression. PLOS ONE 2017, 12, e0180442, doi:10.1371/journal.pone.0180442.

³¹ Cotrufo, M.F.; Wallenstein, M.D.; Boot, C.M.; Denef, K.; Paul, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology 2013, 19, 988–995, doi:10.1111/gcb.12113.

³² Liang, C.; Schimel, J.P.; Jastrow, J.D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature Microbiology 2017, 2, 1–6, doi:10.1038/nmicrobiol.2017.105.

³³ Kravchenko, A.N.; Guber, A.K.; Razavi, B.S.; Koestel, J.; Quigley, M.Y.; Robertson, G.P.; Kuzyakov, Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. Nat Commun 2019, 10, 1–10, doi:10.1038/s41467-019-11057-4.

³⁴ Lavallee, J.M.; Soong, J.L.; Cotrufo, M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. Global Change Biology 2020, 26, 261–273, doi:10.1111/gcb.14859.

³⁵ Canarini, A.; Kaiser, C.; Merchant, A.; Richter, A.; Wanek, W. Root Exudation of Primary Metabolites: Mechanisms and Their Roles in Plant Responses to Environmental Stimuli. Front. Plant Sci. 2019, 10, doi:10.3389/fpls.2019.00157.

³⁶ Kallenbach, C.M.; Wallenstein, M.D.; Schipanksi, M.E.; Grandy, A.S. Managing Agroecosystems for Soil Microbial Carbon Use Efficiency: Ecological Unknowns, Potential Outcomes, and a Path Forward. Front. Microbiol. 2019, 10, doi:10.3389/fmicb.2019.01146.

³⁷ Nafziger, E.D.; Dunker, R.E. Soil Organic Carbon Trends Over 100 Years in the Morrow Plots. Agronomy Journal 2011, 103, 261–267, doi:10.2134/agronj2010.0213s.

³⁸ Macdonald, A.J. Rothamsted long-term experiments: Guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive; Rothamsted Research: Harpenden, UK, 2018;

³⁹ Carey, C.J.; Dove, N.C.; Beman, J.M.; Hart, S.C.; Aronson, E.L. Meta-analysis reveals ammonia-oxidizing bacteria respond more strongly to nitrogen addition than ammonia-oxidizing archaea. Soil Biology and Biochemistry 2016, 99, 158–166, doi:10.1016/j.soilbio.2016.05.014.

⁴⁰ Ouyang, Y.; Norton, J.M.; Stark, J.M.; Reeve, J.R.; Habteselassie, M.Y. Ammonia-oxidizing bacteria are more responsive than archaea to nitrogen source in an agricultural soil. Soil Biology and Biochemistry 2016, 96, 4–15, doi:10.1016/j.soilbio.2016.01.012.

⁴¹ Behnke, G.D.; Zabaloy, M.C.; Riggins, C.W.; Rodríguez-Zas, S.; Huang, L.; Villamil, M.B. Acidification in corn monocultures favor fungi, ammonia oxidizing bacteria, and nirK- denitrifier groups. Science of The Total Environment 2020, 720, 137514, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137514.

⁴² Peoples, M.B.; Hauggaard-Nielsen, H.; Huguenin-Elie, O.; Jensen, E.S.; Justes, E.; Williams, M. Chapter 8 - The Contributions of Legumes to Reducing the Environmental Risk of Agricultural Production. In Agroecosystem Diversity; Lemaire, G., Carvalho, P.C.D.F., Kronberg, S., Recous, S., Eds.; Academic Press, 2019; pp. 123–143 ISBN 978-0-12-811050-8.

⁴³ Zamanian, K.; Zarebanadkouki, M.; Kuzyakov, Y. Nitrogen fertilization raises CO2 efflux from inorganic carbon: A global assessment Global Change Biology 2018, 24, 2810–2817, doi:10.1111/gcb.14148.

REFERÊNCIAS

⁴⁴ Khorramdel, S.; Koocheki, A.; Nassiri Mahallati, M.; Khorasani, R.; Ghorbani, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil and Tillage Research* 2013, 133, 25–31, doi:10.1016/j.still.2013.04.008.

⁴⁵ Veloso, M.G.; Angers, D.A.; Tiecher, T.; Giacomini, S.; Dieckow, J.; Bayer, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2018, 268, 15–23, doi:10.1016/j.agee.2018.08.024.

⁴⁶ Wen, Y.; Liu, W.; Deng, W.; He, X.; Yu, G. Impact of agricultural fertilization practices on organo-mineral associations in four long term field experiments: Implications for soil C sequestration. *Science of The Total Environment* 2019, 651, 591–600, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.233.

⁴⁷ Bughio, M.A.; Wang, P.; Meng, F.; Qing, C.; Kuzyakov, Y.; Wang, X.; Junejo, S.A. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil. *Geoderma* 2016, 262, 12–19, doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.003.

⁴⁸ Lorenz, K.; Omondi, E.; Lal, R. Deep soil organic carbon and total nitrogen after 34 years under conventional and organic management practices at the Rodale Institute Farming Systems Trial Under Review 2020.

⁴⁹ Jensen, E.S.; Peoples, M.B.; Boddey, R.M.; Gresshoff, P.M.; Hauggaard-Nielsen, H.; J.R. Alves, B.; Morrison, M.J. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2012, 32, 329–364, doi:10.1007/s13593-011-0056-7.

⁵⁰ Averill, C.; Turner, B.L.; Finzi, A.C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature* 2014, 505, 543–545, doi:10.1038/nature12901.

⁵¹ Averill, C.; Hawkes, C.V. Ectomycorrhizal fungi slow soil carbon cycling. *Ecology Letters* 2016, 19, 937–947, doi:10.1111/ele.12631.

⁵² Tatsumi, C.; Taniguchi, T.; Du, S.; Yamanaka, N.; Tateno, R. Soil nitrogen cycling is determined by the competition between mycorrhiza and ammonia-oxidizing prokaryotes. *Ecology* 2020, 101, e02963, doi:10.1002/ecy.2963.

⁵³ Six, J.; Frey, S.D.; Thiet, R.K.; Batten, K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 2006, 70, 555–569, doi:10.2136/sssaj2004.0347.

⁵⁴ de Vries, F.T.; Thébault, E.; Liiri, M.; Birkhofer, K.; Tsiafouli, M.A.; Bjørnlund, L.; Jørgensen, H.B.; Brady, M.V.; Christensen, S.; Rüter, P.C. de; et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 2013, 110, 14296–14301, doi:10.1073/pnas.1305198110.

⁵⁵ Malik, A.A.; Chowdhury, S.; Schlager, V.; Oliver, A.; Puissant, J.; Vazquez, P.G.M.; Jehmlich, N.; von Bergen, M.; Griffiths, R.I.; Gleixner, G. Soil Fungal:Bacterial Ratios Are Linked to Altered Carbon Cycling. *Front. Microbiol.* 2016, 7, doi:10.3389/fmicb.2016.01247.

⁵⁶ Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage; Johnson, N.C., Gehring, C., Jansa, J., Eds.; Elsevier, 2016; ISBN 978-0-12-804383-7.

⁵⁷ Eisenhauer, N.; Lanoue, A.; Strecker, T.; Scheu, S.; Steinauer, K.; Thakur, M.P.; Mommer, L. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific Reports* 2017, 7, 44641, doi:10.1038/srep44641.

⁵⁸ Ngosong, C.; Jarosch, M.; Raupp, J.; Neumann, E.; Ruess, L. The impact of farming practice on soil microorganisms and arbuscular mycorrhizal fungi: Crop type versus long-term mineral and organic fertilization. *Applied Soil Ecology* 2010, 46, 134–142, doi:10.1016/j.apsoil.2010.07.004.

⁵⁹ Heijboer, A.; ten Berge, H.F.M.; de Ruiter, P.C.; Jørgensen, H.B.; Kowalchuk, G.A.; Bloem, J. Plant biomass, soil microbial community structure and nitrogen cycling under different organic amendment regimes; a 15N tracer-based approach. *Applied Soil Ecology* 2016, 107, 251–260, doi:10.1016/j.apsoil.2016.06.009.

⁶⁰ Chen, Y.; Hu, N.; Zhang, Q.; Lou, Y.; Li, Z.; Tang, Z.; Kuzyakov, Y.; Wang, Y. Impacts of green manure amendment on detritus micro-food web in a double-rice cropping system. *Applied Soil Ecology* 2019, 138, 32–36, doi:10.1016/j.apsoil.2019.02.013.

⁶¹ van der Heijden, M.G.A.; Martin, F.M.; Selosse, M.-A.; Sanders, I.R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytol* 2015, 205, 1406–1423, doi:10.1111/nph.13288.

⁶² Allen, M.F. Mycorrhizal Fungi: Highways for Water and Nutrients in Arid Soils. *Vadose Zone Journal* 2007, 6, 291–297, doi:10.2136/vzj2006.0068.

⁶³ Wilson, G.W.; Rice, C.W.; Rillig, M.C.; Springer, A.; Hartnett, D.C. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecology Letters* 2009, 12, 452–461.

⁶⁴ Rillig, M.C.; Mardatin, N.F.; Leifheit, E.F.; Antunes, P.M. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is

REFERÊNCIAS

sufficient to maintain water-stable soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry* 2010, 42, 1189–1191.

⁶⁵ Smith, S.E.; Facelli, E.; Pope, S.; Andrew Smith, F. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil* 2010, 326, 3–20, doi:10.1007/s11104-009-9981-5.

⁶⁶ Clemmensen, K.E.; Bahr, A.; Ovaskainen, O.; Dahlberg, A.; Ekblad, A.; Wallander, H.; Stenlid, J.; Finlay, R.D.; Wardle, D.A.; Lindborg, L. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science* 2013, 339, 1615–1618, doi:10.1126/science.1231923.

⁶⁷ Kell, D.B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Ann Bot* 2011, 108, 407–418, doi:10.1093/aob/mcr175.

⁶⁸ Heitkamp, F.; Jacobs, A.; Jungkunst, H.F.; Heinze, S.; Wendland, M.; Kuzyakov, Y. Processes of Soil Carbon Dynamics and Ecosystem Carbon Cycling in a Changing World. In *Recarbonization of the Biosphere*; Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von, Eds.; Springer Netherlands, 2012; pp. 395–428 ISBN 978-94-007-4158-4.

⁶⁹ Oades, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 1984, 76, 319–337, doi:10.1007/BF02205590.

⁷⁰ Piccolo, A. The Nature of Soil Organic Matter and Innovative Soil Managements to Fight Global Changes and Maintain Agricultural Productivity. In *Carbon Sequestration in Agricultural Soils*; Piccolo, A., Ed.; Springer Berlin Heidelberg, 2012; pp. 1–19 ISBN 978-3-642-23384-5.

⁷¹ Douds, D.D.; Janke, R.; Peters, S. VAM fungus spore populations and colonization of roots of maize and soybean under conventional and low-input sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems, & Environment* 1993, 43, 325-335.

⁷² Hepperly, P.; Seidel, R.; Hanson, J.; Douds, D.D. *Organic farming enhances soil carbon and its benefits*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

⁷³ Oehl, F.; Mäder, P.; Dubois, D.; Ineichen, K.; Boller, T.; Wiemken, A. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 2004, 138, 574-583.

⁷⁴ Douds, D.D.; Nagahashi, G.; Shenk, J.E. Frequent cultivation prior to planting to prevent weed competition results in an opportunity for the use of arbuscular mycorrhizal fungus inoculum. *Renewable Agriculture and Food Systems* 2012, 27, 251–255, doi:10.1017/S1742170511000391.

⁷⁵ Douds Jr., D.D.; Nagahashi, G.; Hepperly, P.R. On-farm production of inoculum of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and assessment of diluents of compost for inoculum production. *Bioresource Technology* 2010, 101, 2326–2330, doi:10.1016/j.biortech.2009.11.071.

⁷⁶ Lange, M.; Eisenhauer, N.; Sierra, C.A.; Bessler, H.; Engels, C.; Griffiths, R.I.; Mellado-Vázquez, P.G.; Malik, A.A.; Roy, J.; Scheu, S.; et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications* 2015, 6, 6707, doi:10.1038/ncomms7707.

⁷⁷ Smith, O.M.; Cohen, A.L.; Reganold, J.P.; Jones, M.S.; Orpet, R.J.; Taylor, J.M.; Thurman, J.H.; Cornell, K.A.; Olsson, R.L.; Ge, Y.; et al. Landscape context affects the sustainability of organic farming systems. *PNAS* 2020, 117, 2870–2878, doi:10.1073/pnas.1906909117.

⁷⁸ Wickramasinghe, L.P.; Harris, S.; Jones, G.; Vaughan Jennings, N. Abundance and species richness of nocturnal insects on organic and conventional farms: effects of agricultural intensification on bat foraging. *Conservation Biology* 2004, 18, 1283-1292.

⁷⁹ FAO The State of the World’s Biodiversity for Food and Agriculture; Bélanger, J., Pilling, D. (eds), Eds.; FAO: Rome, Italy, 2019; ISBN 978-92-5-131270-4.

⁸⁰ West, T.O. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 2002.

⁸¹ Wang, Q.; Li, Y.; Alva, A. Cover Crops in Mono- and Biculture for Accumulation of Biomass and Soil Organic Carbon. *Journal of Sustainable Agriculture* 2012, 36, 423–439, doi:10.1080/10440046.2011.627991.

⁸² Álvaro-Fuentes, J.; Paustian, K. Potential soil carbon sequestration in a semiarid Mediterranean agroecosystem under climate change: Quantifying management and climate effects. *Plant Soil* 2011, 338, 261–272, doi:10.1007/s11104-010-0304-7.

⁸³ Conant, R.T.; Paustian, K.; Elliott, E.T. GRASSLAND MANAGEMENT AND CONVERSION INTO GRASSLAND: EFFECTS ON SOIL CARBON. *Ecological Applications* 2001, 11, 343–355, doi:10.1890/1051-0761(2001)011[0343:GMACIG]2.0.CO;2.

⁸⁴ Pandey, C.B.; Begum, M. The effect of a perennial cover crop on net soil N mineralization and microbial biomass carbon in coconut plantations in the humid tropics. *Soil Use and Management* 2010, 26, 158–166, doi:10.1111/j.1475-2743.2010.00272.x.

REFERÊNCIAS

⁸⁵ Brennan, E.B.; Acosta-Martinez, V. Cover cropping frequency is the main driver of soil microbial changes during six years of organic vegetable production. *Soil Biology and Biochemistry* 2017, 109, 188–204, doi:10.1016/j.soilbio.2017.01.014.

⁸⁶ Veloso, M.G.; Cecagno, D.; Bayer, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. *Soil and Tillage Research* 2019, 190, 139–146, doi:10.1016/j.still.2019.03.003.

⁸⁷ Littrell, J.; Jagadamma, S.; Omondi, E.; Xu, S.; Saha, D.; Lee J. Long-term organic Management combined with conservation tillage for enhanced soil organic carbon organic accumulation and aggregation Under Review 2020.

⁸⁸ Govaerts, B.; Mezzalama, M.; Unno, Y.; Sayre, K.D.; Luna-Guido, M.; Vanherck, K.; Dendooven, L.; Deckers, J. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. *Applied Soil Ecology* 2007, 37, 18–30.

⁸⁹ Brown, S.; Cotton, M. Changes in Soil Properties and Carbon Sequestration Potential as a Result of Compost or Mulch Application: Results of On-farm Sampling; University Of Washington, 2008;

⁹⁰ de Moraes Sá, J.C.; Séguy, L.; Tivet, F.; Lal, R.; Bouzinac, S.; Borszowskei, P.R.; Briedis, C.; dos Santos, J.B.; da Cruz Hartman, D.; Bertoloni, C.G.; et al. Carbon Depletion by Plowing and Its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. *Land Degradation & Development* 2013, n/a–n/a, doi:10.1002/ldr.2218.

⁹¹ Blanco-Canqui, H. Crop Residue Removal for Bioenergy Reduces Soil Carbon Pools: How Can We Offset Carbon Losses? *Bioenerg. Res.* 2013, 6, 358–371, doi:10.1007/s12155-012-9221-3.

⁹² Lal, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 2004, 304, 1623–1627, doi:10.2307/3837021.

⁹³ Ingham, E. How the soil food web and compost increase soil organic matter content. In *Proceedings of the Organics-Solutions to Climate Change*; Sydney, 2006; p. 13.

⁹⁴ Hartmann, M.; Frey, B.; Mayer, J.; Mäder, P.; Widmer, F. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 2015, 9, 1177-1194.

⁹⁵ Treonis, A.M.; Austin, E.E.; Buyer, J.S.; Maul, J.E.; Spicer, L.; Zasada, I.A. Effects of organic amendments and tillage on soil microorganisms and microfauna. *Applied Soil Ecology* 2010, 46, 103-110.

⁹⁶ Fronning, B.E.; Thelen, K.D.; Min, D.-H. Use of Manure, Compost, and Cover Crops to Supplant Crop Residue Carbon in Corn Stover Removed Cropping Systems. *Agronomy Journal* 2008, 100, 1703–1710, doi:10.2134/agronj2008.0052.

⁹⁷ Porter, G.A.; Bradbury, W.B.; Sisson, J.A.; Opena, G.B.; McBurnie, J.C. Soil Management and Supplemental Irrigation Effects on Potato: I. Soil Properties, Tuber Yield, and Quality. *Agronomy Journal* 1999, 91, 416, doi:10.2134/agronj1999.00021962009100030010x.

⁹⁸ Chirinda, N.; Olesen, J.E.; Porter, J.R.; Schjønning, P. Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2010, 139, 584–594, doi:10.1016/j.agee.2010.10.001.

⁹⁹ Ryals, R.; Silver, W.L. Effects of organic matter amendments on net primary productivity and greenhouse gas emissions in annual grasslands. *Ecological Applications* 2013, 23, 46–59, doi:10.1890/12-0620.1.

¹⁰⁰ Ryals, R.; Kaiser, M.; Torn, M.S.; Berhe, A.A.; Silver, W.L. Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry* 2014, 68, 52–61, doi:10.1016/j.soilbio.2013.09.011.

¹⁰¹ Harrison, B.P.; Chopra, E.; Ryals, R.; Campbell, J.E. Quantifying the Farmland Application of Compost to Help Meet California's Organic Waste Diversion Law. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 4545–4553, doi:10.1021/acs.est.9b05377.

¹⁰² Tautges, N.E.; Chiartas, J.L.; Gaudin, A.C.M.; O’Geen, A.T.; Herrera, I.; Scow, K.M. Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops and compost on soil carbon sequestration differ in surface and subsurface soils. *Global Change Biology* 2019, 25, 3753–3766, doi:10.1111/gcb.14762.

¹⁰³ Franzluebbbers, A.J.; Lemaire, G.; de Faccio Carvalho, P.C.; Sulc, R.M.; Dedieu, B. Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems: Environmental outcomes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 1–3, doi:10.1016/j.agee.2014.04.028.

¹⁰⁴ Soussana, J.-F.; Lemaire, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 9–17, doi:10.1016/j.agee.2013.10.012.

REFERÊNCIAS

¹⁰⁵ Carvalho, P.C. de F.; Peterson, C.A.; Nunes, P.A. de A.; Martins, A.P.; de Souza Filho, W.; Bertolazi, V.T.; Kunrath, T.R.; de Moraes, A.; Anghinoni, I. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *J Anim Sci* 2018, 96, 3513–3525, doi:10.1093/jas/sky085.

¹⁰⁶ Lal, R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 2003, 29, 437–450, doi:10.1016/S0160-4120(02)00192-7.

¹⁰⁷ Montgomery, D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2007, 104, 13268.

¹⁰⁸ Abdalla, M.; Osborne, B.; Lanigan, G.; Forristal, D.; Williams, M.; Smith, P.; Jones, M.B. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use and Management* 2013, 29, 199–209, doi:10.1111/sum.12030.

¹⁰⁹ Sekaran, U.; Sagar, K.L.; Denardin, L.G.D.O.; Singh, J.; Singh, N.; Abagandura, G.O.; Kumar, S.; Farmaha, B.S.; Bly, A.; Martins, A.P. Responses of soil biochemical properties and microbial community structure to short and long-term no-till systems. *European Journal of Soil Science* 2020, n/a, doi:10.1111/ejss.12924.

¹¹⁰ Powlson, D.S.; Stirling, C.M.; Jat, M.L.; Gerard, B.G.; Palm, C.A.; Sanchez, P.A.; Cassman, K.G. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 2014, 4, 678–683, doi:10.1038/nclimate2292.

¹¹¹ Lognoul, M.; Theodorakopoulos, N.; Hiel, M.-P.; Regaert, D.; Broux, F.; Heinesch, B.; Bodson, B.; Vandenbol, M.; Aubinet, M. Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N2O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil and Tillage Research* 2017, 167, 80–89, doi:10.1016/j.still.2016.11.008.

¹¹² Camarotto, C.; Piccoli, I.; Ferro, N.D.; Polese, R.; Chiarini, F.; Furlan, L.; Morari, F. Have we reached the turning point? Looking for evidence of SOC increase under conservation agriculture and cover crop practices. *European Journal of Soil Science* 2020, n/a, doi:10.1111/ejss.12953.

¹¹³ Teasdale, J.R.; Coffman, C.B.; Mangum, R.W. Potential Long-Term Benefits of No-Tillage and Organic Cropping Systems for Grain Production and Soil Improvement. *Agronomy Journal* 2007, 99, 1297–1301.

¹¹⁴ Stöckle, C.; Higgins, S.; Kemanian, A.; Nelson, R.; Huggins, D.; Marcos, J.; Collins, H. Carbon storage and nitrous oxide emissions of cropping systems in eastern Washington: A simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation* 2012, 67, 365–377, doi:10.2489/jswc.67.5.365.

¹¹⁵ Skinner, C.; Gattinger, A.; Muller, A.; Mäder, P.; Fließbach, A.; Stolze, M.; Ruser, R.; Niggli, U. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management — A global meta-analysis. *Science of The Total Environment* 2014, 468–469, 553–563, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.08.098.

¹¹⁶ Carr, P.; Gramig, G.; Liebig, M. Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality. *Sustainability* 2013, 5, 3172–3201, doi:10.3390/su5073172.

¹¹⁷ Gadermaier, F.; Berner, A.; Fließbach, A.; Friedel, J.K.; Mäder, P. Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems* 2011, 27, 68–80, doi:10.1017/S1742170510000554.

¹¹⁸ Cooper, J.; Baranski, M.; Stewart, G.; Nobel-de Lange, M.; Bårberi, P.; Fließbach, A.; Peigné, J.; Berner, A.; Brock, C.; Casagrande, M.; et al. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 2016, 36, 22, doi:10.1007/s13593-016-0354-1.

¹¹⁹ Ramachandran Nair, P.K.; Nair, V.D.; Mohan Kumar, B.; Showalter, J.M. Chapter Five - Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In *Advances in Agronomy*; Sparks, D.L., Ed.; Academic Press, 2010; Vol. 108, pp. 237–307.

¹²⁰ Sy, V.D.; Herold, M.; Achard, F.; Beuchle, R.; Clevers, J.G.P.W.; Lindquist, E.; Verchot, L. Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. *Environ. Res. Lett.* 2015, 10, 124004, doi:10.1088/1748-9326/10/12/124004.

¹²¹ Rowntree, J.E.; Ryals, R.; DeLonge, M.S.; Teague, W.R.; Chiavegato, M.B.; Byck, P.; Wang, T.; Xu, S. Potential mitigation of midwest grass-finished beef production emissions with soil carbon sequestration in the United States of America. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society* 2016, 4, 31–38.

¹²² Teague, W.R.; Apfelbaum, S.; Lal, R.; Kreuter, U.P.; Rowntree, J.; Davies, C.A.; Conser, R.; Rasmussen, M.; Hatfield, J.; Wang, T.; et al. The role of ruminants in reducing agriculture’s carbon footprint in North America. *Journal of Soil and Water Conservation* 2016, 71, 156–164, doi:10.2489/jswc.71.2.156.

¹²³ Bork, E.W.; Raatz, L.L.; Carlyle, C.N.; Hewins, D.B.; Thompson, K.A. Soil carbon increases with long-term cattle stocking in northern temperate grasslands. *Soil Use and Management* 2020, 36, 387–399, doi:10.1111/sum.12580.

REFERÊNCIAS

¹²⁴ Assmann, J.M.; Anghinoni, I.; Martins, A.P.; Costa, S.E.V.G. de A.; Cecagno, D.; Carlos, F.S.; Carvalho, P.C. de F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 52–59, doi:10.1016/j.agee.2013.12.003.

¹²⁵ Ribeiro, R.H.; Ibarra, M.A.; Besen, M.R.; Bayer, C.; Piva, J.T. Managing grazing intensity to reduce the global warming potential in integrated crop–livestock systems under no-till agriculture. *European Journal of Soil Science* n/a, doi:10.1111/ejss.12904.

¹²⁶ Silva, F.D. da; Amado, T.J.C.; Ferreira, A.O.; Assmann, J.M.; Anghinoni, I.; Carvalho, P.C. de F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 60–69, doi:10.1016/j.agee.2013.12.005.

¹²⁷ Galindo, F.S.; Delate, K.; Heins, B.; Phillips, H.; Smith, A.; Pagliari, P.H. Cropping System and Rotational Grazing Effects on Soil Fertility and Enzymatic Activity in an Integrated Organic Crop–Livestock System. *Agronomy* 2020, 10, 803, doi:10.3390/agronomy10060803.

¹²⁸ Sollenberger, L.E.; Kohmann, M.M.; Dubeux, J.C.B.; Silveira, M.L. Grassland Management Affects Delivery of Regulating and Supporting Ecosystem Services. *Crop Science* 2019, 59, 441–459, doi:10.2135/cropsci2018.09.0594.

¹²⁹ De Pinto, A.; Li, M.; Haruna, A.; Hyman, G.G.; Martinez, M.A.L.; Creamer, B.; Kwon, H.-Y.; Garcia, J.B.V.; Tapasco, J.; Martinez, J.D. Low Emission Development Strategies in Agriculture. An Agriculture, Forestry, and Other Land Uses (AFOLU) Perspective. *World Development* 2016, 87, 180–203, doi:10.1016/j.worlddev.2016.06.013.

¹³⁰ Lal, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 2018, 24, 3285–3301, doi:10.1111/gcb.14054.

¹³¹ Kassam, A.; Friedrich, T.; Derpsch, R. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 2019, 76, 29–51, doi:10.1080/00207233.2018.1494927.

¹³² Wyckhuys, K.A.G.; Heong, K.L.; Sanchez-Bayo, F.; Bianchi, F.J.J.A.; Lundgren, J.G.; Bentley, J.W. Ecological illiteracy can deepen farmers’ pesticide dependency. *Environ. Res. Lett.* 2019, 14, 093004, doi:10.1088/1748-9326/ab34c9.

¹³³ Janzen, H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry* 2006, 38, 419–424, doi:10.1016/j.soilbio.2005.10.008.

¹³⁴ Cotrufo, M.F.; Ranalli, M.G.; Haddix, M.L.; Six, J.; Lugato, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 2019, 12, 989–994, doi:10.1038/s41561-019-0484-6.

¹³⁵ Jastrow, J.D.; Amonette, J.E.; Bailey, V.L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change* 2007, 80, 5–23, doi:10.1007/s10584-006-9178-3.

¹³⁶ Jobbágy, E.G.; Jackson, R.B. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications* 2000, 10, 423–436, doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2.

¹³⁷ Fontaine, S.; Barot, S.; Barré, P.; Bdioui, N.; Mary, B.; Rumpel, C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 2007, 450, 277–280, doi:10.1038/nature06275.

¹³⁸ Gattinger, A.; Muller, A.; Haeni, M.; Skinner, C.; Fliessbach, A.; Buchmann, N.; Mäder, P.; Stolze, M.; Smith, P.; Scialabba, N.E.-H. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2012, 109, 18226–18231.

¹³⁹ Hicks Pries, C.E.; Sulman, B.N.; West, C.; O’Neill, C.; Poppleton, E.; Porras, R.C.; Castanha, C.; Zhu, B.; Wiedemeier, D.B.; Torn, M.S. Root litter decomposition slows with soil depth. *Soil Biology and Biochemistry* 2018, 125, 103–114, doi:10.1016/j.soilbio.2018.07.002.

¹⁴⁰ Nayak, A.K.; Rahman, M.M.; Naidu, R.; Dhal, B.; Swain, C.K.; Nayak, A.D.; Tripathi, R.; Shahid, M.; Islam, M.R.; Pathak, H. Current and emerging methodologies for estimating carbon sequestration in agricultural soils: A review. *Science of The Total Environment* 2019, 665, 890–912, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.125.

¹⁴¹ Rumpel, C.; Chabbi, A.; Marschner, B. Carbon Storage and Sequestration in Subsoil Horizons: Knowledge, Gaps and Potentials. In *Recarbonization of the Biosphere*; Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von, Eds.; Springer Netherlands, 2012; pp. 445–464 ISBN 978-94-007-4158-4.

¹⁴² Santos, V.B.; Araújo, A.S.F.; Leite, L.F.C.; Nunes, L.A.P.L.; Melo, W.J. Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. *Geoderma* 2012, 170, 227–231, doi:10.1016/j.geoderma.2011.11.007.

¹⁴³ de Ponti, T.; Rijk, B.; van Ittersum, M.K. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural Systems* 2012, 108, 1–9, doi:10.1016/j.agsy.2011.12.004.

¹⁴⁴ Ponisio, L.C.; M’Gonigle, L.K.; Mace, K.C.; Palomino, J.; de Valpine, P.; Kremen, C. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 2015, 282, 20141396.

¹⁴⁵ Seufert, V.; Ramankutty, N.; Foley, J.A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 2012, 485, 229–232, doi:10.1038/nature11069.

¹⁴⁶ Reganold, J.P.; Wachter, J.M. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants* 2016, 2, 1–8, doi:10.1038/nplants.2015.221.

¹⁴⁷ Rodale Institute Farming Systems Trial Available online: (<https://rodaleinstitute.org/science/farming-systems-trial/>) (accessed on Aug 4, 2020).

¹⁴⁸ Kloppenburg, J.R. First the seed: the political economy of plant biotechnology, 1492-2000; Cambridge University Press: Cambridge [Cambridgeshire], 1988; ISBN 978-0-521-32691-9.

¹⁴⁹ Shiva, V. Biotechnological development and the conservation of biodiversity. *Biopolitics: A feminist and ecological reader on biotechnology* 1995, 193–213.

¹⁵⁰ Wirz, J.; Kunz, P.; Hurter, U. Seed as a commons: breeding as a source for real economy, Law, and culture: assessment and future perspectives for non-profit seed and breeding Initiatives. *Goetheanum*, 2017.

¹⁵¹ Lotter, D.W.; Seidel, R.; Liebhardt, W. The performance of organic and conventional cropping systems in an extreme climate year. *American Journal of Alternative Agriculture* 2003, 18, 146-154.

¹⁵² Pimentel, D.; Hepperly, P.; Hanson, J.; Douds, D.; Seidel, R. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience* 2005, 55, 573–582.

¹⁵³ van der Werf, H.M.G.; Knudsen, M.T.; Cederberg, C. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *Nature Sustainability* 2020, 3, 419–425, doi:10.1038/s41893-020-0489-6.

¹⁵⁴ FAO FAOSTAT: Selected Indicators/World; 2018;

¹⁵⁵ Magdoff, F.; Foster, J.B.; Buttel, F.H. Hungry for profit: the agribusiness threat to farmers, food, and the environment; Monthly Review Press, 2000; ISBN 978-1-58367-016-3.

¹⁵⁶ UNCTAD Trade and Environment Review 2013, Wake up before it is too late: Make agriculture truly sustainable now for food security in a changing climate 2013.

¹⁵⁷ Cassidy, E.S.; West, P.C.; Gerber, J.S.; Foley, J.A. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environ. Res. Lett.* 2013, 8, 034015, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034015.

¹⁵⁸ Muller, A.; Schader, C.; El-Hage Scialabba, N.; Brüggemann, J.; Isensee, A.; Erb, K.-H.; Smith, P.; Klocke, P.; Leiber, F.; Stolze, M.; et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature Communications* 2017, 8, 1290, doi:10.1038/s41467-017-01410-w.

¹⁵⁹ Alexander, P.; Brown, C.; Arneth, A.; Finnigan, J.; Moran, D.; Rounsevell, M.D.A. Losses, inefficiencies and waste in the global food system. *Agricultural Systems* 2017, 153, 190–200, doi:10.1016/j.agsy.2017.01.014.

¹⁶⁰ Jackson, W. Consulting the Genius of the Place: An Ecological Approach to a New Agriculture; Catapult, 2011; ISBN 978-1-58243-848-1.

¹⁶¹ IPES-Food Too big to feed: Exploring the impacts of mega-mergers, concentration and concentration of power in the agri-food sector.; International Panel of Experts on Sustainable Food Systems, 2017;

¹⁶² Oral history Interview by Jane Gates with Robert Rodale with an introduction by Jayne MacLean; The National Agriculture Library: Beltsville, MD, 1985;



O Instituto Rodale é uma organização sem fins lucrativos dedicada a impulsionar a agricultura orgânica por meio de pesquisas e ações de divulgação. O Instituto Rodale está comprometido em revolucionar as pesquisas em agricultura orgânica, defendendo políticas que apoiem os agricultores e eduquem as pessoas sobre como os orgânicos são a opção mais segura e saudável para as pessoas e para o planeta.

Direitos Autorais © 2020 Instituto Rodale

611 Siegfriedale Road, Kutztown, PA 19530
610-683-1400 | RodaleInstitute.org