

A agropecuária como parte da solução no enfrentamento das mudanças climáticas globais

CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI,^I

THALITA FERNANDA ABBRUZZINI,^{II}

DENER MÁRCIO DA SILVA OLIVEIRA,^{III}

TIAGO OSÓRIO FERREIRA,^{IV}

FRANCISCO RUIZ,^V ANTONIO CARLOS AZEVEDO,^{VI}

JOÃO LUÍS NUNES CARVALHO,^{VII}

MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN,^{VIII}

LEIDIVAN ALMEIDA FRAZÃO,^{IX}

AMANDA RONIX PEREIRA,^X

STOÉCIO MALTA FERREIRA MAIA^{XI}

Introdução

A AGROPECUÁRIA é uma das principais responsáveis pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) dentre os setores da economia, mas também é uma das atividades humanas mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas globais, especialmente nos países de clima tropical. Projeções apontam perdas de produção para as principais culturas agrícolas brasileiras em diferentes cenários climáticos para os próximos anos.

Nesse sentido, é irrevogável a relevância e a efetividade das políticas públicas e compromissos brasileiros para a mitigação das emissões de GEE nos últimos anos, especialmente por atividades associadas à agropecuária. Essas políticas públicas com foco na agropecuária propõem diferentes práticas de manejo para mitigação das emissões de GEE, com efeitos sinérgicos sobre a conservação do solo e da água, produtividade agrícola e sobre a resiliência desses sistemas às mudanças climáticas.

Além disso, os próprios agricultores brasileiros sempre desenvolveram estratégias de manejo para enfrentar e minimizar os impactos da variabilidade climática, por tratar-se de um setor inteiramente dependente e vulnerável a essa. São práticas adaptadas a diferentes escalas e sistemas de produção, além de amplamente diversificadas e, se bem adotas, podem ser consideradas como parte da solução no enfrentamento das mudanças climáticas globais.

Práticas de manejo como opções de adaptação e mitigação das mudanças climáticas

O Brasil é um dos principais produtores de commodities e serviços agrícolas no mundo. O emprego de tecnologia moderna e a grande diversidade de suas condições edafoclimáticas oferece uma série de vantagens para a modernização e o crescimento do setor agropecuário no país, resultando em ganhos significativos de produtividade. No entanto, há um grande potencial para aprimorar os atuais sistemas de uso e manejo do solo, principalmente por meio da adoção de práticas agrícolas conservacionistas que fomentem a proteção e melhoria das funções ecossistêmicas do solo e promovam a maior sustentabilidade da agricultura no longo prazo. Alguns exemplos de práticas de manejo agropecuárias que são estratégicas para adaptação e mitigação das mudanças climáticas são mencionados a seguir.

Sistema Plantio Direto (SPD)

Práticas de preparo do solo menos intensivas, juntamente com a diversificação de espécies por meio da rotação de culturas e cobertura permanente do solo se configuraram como os três princípios ecológicos fundamentais do Sistema de Plantio Direto (SPD), e são fundamentais para garantir o manejo sustentável dos solos agrícolas (Fuentes-Llanillo et al., 2021).

O SPD foi introduzido no Brasil a partir da década de 1970, fruto da iniciativa de agricultores do sul do país que visavam formas mais efetiva de manejo do solo, a fim de controlar a erosão generalizada causada pelo revolvimento intensivo dos solos agrícolas (Amado et al., 2006). Os SPD são efetivos na prevenção do selamento superficial e desagregação causadas pelo impacto das gotas de chuva na superfície do solo, a melhoria e manutenção da estrutura do solo e a redução do volume e velocidade de escoamento superficial de sedimentos (Engel et al., 2009).

A aceitação do sistema de plantio direto foi relativamente lenta, dado que a área sob sistema de plantio direto atingiu cerca de 1 milhão de hectares somente em 1992. No entanto, os agricultores gradualmente começaram a perceber os grandes benefícios na implantação do sistema, o qual exigia menos operações de campo, diminuindo despesas com maquinário e combustível, além do fato de que as culturas poderiam ser plantadas mais cedo em comparação ao Plantio Convencional (PC), e de contribuir para a conservação do solo e da água.

O sistema de plantio direto tem contribuído para o aumento nos estoques de Carbono (C) (devido ao menor revolvimento do solo e ao contínuo aporte de resíduos das culturas. Maia et al. (2022), em uma ampla revisão de literatura para os biomas Cerrado e Mata Atlântica, derivaram fatores de mudança dos estoques de Carbono Orgânico do Solo (COS) em função da conversão do Cultivo Convencional (CC), pastagens e Vegetação Nativa (VN) para o SPD no Brasil. Na conversão CC – SPD verificou-se que em 20 anos a adoção de SPD apresentou aumentos médios de 22% e 25% nos estoques de C em comparação

com a área sob cultivo convencional, nas camadas de 0-30 e 0-50 cm do solo, respectivamente (Figura 1). Na Mata Atlântica, após 20 anos da conversão do CC para SPD os estoques de C aumentaram 13% e 14%, respectivamente, para as camadas de 0-30 e 0-50 cm (Maia et al., 2022). Os resultados médios entre os diferentes biomas evidenciaram que o SPD pode resultar em ganhos de C que variam entre 6% e 9% na camada 0-30 cm e de 8% a 11% quando se considera a camada de 0-50 cm do solo (Figura 1). Assim, o trabalho de Maia et al. (2022) demonstrou que o efeito benéfico da adoção do sistema de plantio direto não se resume às camadas mais superficiais do solo, conforme observado em outros estudos (Powlson et al., 2022; VandenBygaart, 2016), mas que é variável em função do bioma analisado.

A adoção de SPD realizado a partir de áreas de pastagem mostraram resultados similares aos encontrados na conversão a partir de CC; porém, não foi possível fazer distinção entre biomas. A conversão de pastagens para SPD resultou em aumento de 16% do carbono orgânico do solo na camada de 0-30 cm após 20 anos (Figura 1). No entanto, quando a adoção do SPD é feita diretamente de áreas de vegetação nativa, os resultados obtidos por Maia et al. (2022) mostraram que há perda de C do solo no Cerrado que variam entre 8% e 5% nas profundidades de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente. A perda média de COS verificada nos biomas avaliados foi de 4% na camada 0-30 cm; porém, quando se considera a camada de 0-50 cm observa-se um aumento de COS da ordem de 2% (Figura 1), o que indica que o efeito da conversão impactou apenas as camadas mais superficiais do solo, ou que está havendo uma recuperação dos estoques de COS.

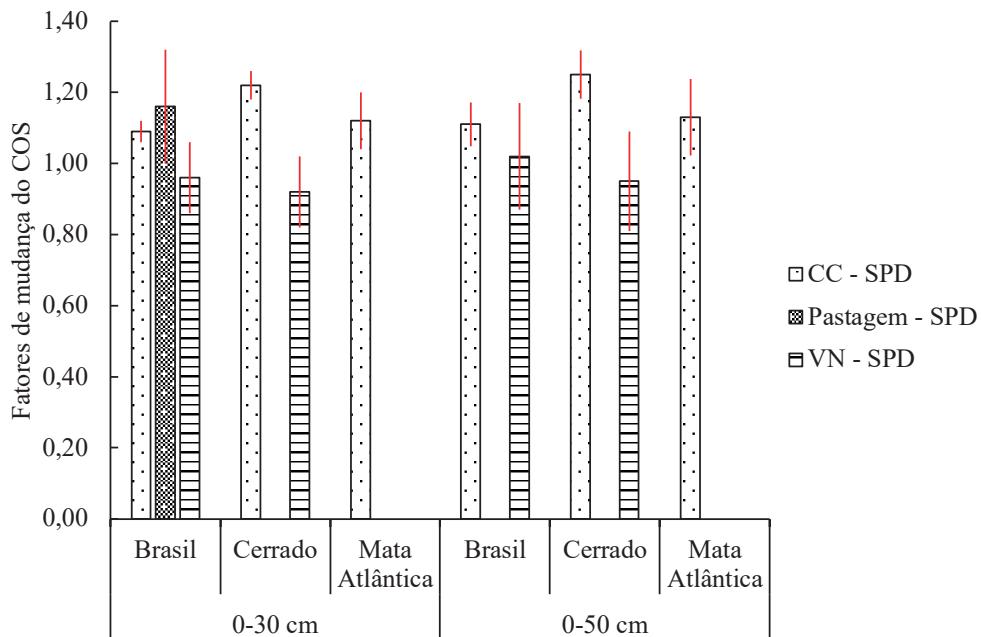
Outra forma de se avaliar a dinâmica do C é por meio das taxas de mudança de estoque. Bayer et al. (2006) observaram que, comparado ao plantio convencional, os estoques de C em um Latossolo com textura média sob sistema de plantio direto aumentaram para $2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C (com taxa de sequestro de $0,30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C), e em Latossolo argiloso para $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C (com taxa de sequestro de $0,60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C). Esses resultados são similares aos de Maia et al. (2022) que, a partir de uma ampla revisão englobando 39 estudos e 124 pares de comparação, obtiveram taxas médias de mudança de C do solo para a camada de solo de 0-30 cm e diferentes conversões envolvendo o SPD (CC-SPD, Pastagem – SPD, VN – SPD). Os resultados mostraram que as mudanças nos estoques de SOC sob SPD apresentam uma significativa relação com o componente temporal. Por exemplo, na conversão de VN para SPD houve o sequestro de COS durante os primeiros anos (1–12 anos), o qual diminui e passa a apresentar uma perda média de C de $0,22 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No entanto, os resultados também mostram uma tendência à estabilização das perdas de COS após 20 anos de conversão. Por outro lado, os modelos empíricos demonstraram que a conversão de CC ou pastagem para SPD tende a sequestrar SOC ao longo do tempo, visto que considerando o período médio de 20 anos, a conversão de CC para SPD resultou em uma taxa de sequestro de $0,63 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, en-

quanto na conversão de pastagem para SPD a taxa média foi de 0,53 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. Além disso, os resultados confirmaram o efeito do tempo no sequestro de COS, pois áreas onde a conversão CC – SPD variou entre 4 e 10 anos apresentaram uma taxa de sequestro de 0,39 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto em áreas com 17 a 26 anos desta conversão, a taxa de sequestro foi 0,59 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. A conversão de pastagens para SPD mostrou resultados semelhantes, visto que áreas com 12 a 20 anos de conversão apresentaram uma taxa de sequestro de 0,45 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, diferente das áreas com tempo de conversão entre 2 e 7 anos, onde o sequestro de C foi de somente 0,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Além da dinâmica do C do solo, o SPD também influencia as emissões de outros GEE, sobretudo do N₂O, e isto está diretamente relacionado com os resíduos culturais remanescentes na superfície do solo e os processos de decomposição dessa biomassa, assim como, com os efeitos do preparo do solo sobre a estrutura do solo, a atividade microbiana, a taxa de decomposição do material orgânico e mineralização do Nitrogênio (N) orgânico do solo, a temperatura e umidade do solo. Assim, o uso do solo em SPD é apontado como uma prática que aumenta a emissão de N₂O para a atmosfera, quando comparado aos solos revolvidos (Bayer et al., 2015).

Finalizando a abordagem do potencial do SPD para a mitigação das emissões de GEE no Brasil, é fundamental mencionar a metodologia de análise de ciclo de vida para comparar o SPD com o CC. Nesse contexto, o trabalho de Silva et al. (2024) utilizou dados de um experimento de campo de 34 anos para estimar a intensidade de emissões de GEE no ciclo de vida da produção de milho em sistemas agrícolas sob SPD e CC combinados com culturas de cobertura de gramíneas (aveia) e leguminosas (ervilhaca) no sul do Brasil, e encontraram que a intensidade das emissões de GEE do ciclo de vida do milho foi negativa em SPD com gramínea e leguminosas como culturas de cobertura, -0,7 e -0,1 kg CO₂e kg⁻¹ de milho, respectivamente, enquanto com o CC com aveia como cultura de cobertura teve uma intensidade de emissão de 1,0 kg CO₂e kg⁻¹ de milho. É importante destacar que para tal resultado, o sequestro de C promovido pelos solos, bem como menores emissões de GEE devido à queima de combustível fóssil (diesel) foram preponderantes. De acordo com Silva et al. (2024), os SPD consumiram em média 3,8 L ha⁻¹ de diesel, enquanto nos sistemas convencionais, o consumo foi de 28,1 L ha⁻¹, ou seja, uma redução de 86,4%.

A adoção do sistema de plantio direto também traz outros efeitos positivos, como a redução da erosão do solo e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, o que pode aumentar a capacidade de infiltração e retenção de água no solo e a disponibilidade de nutrientes na superfície do solo, construindo um ambiente mais favorável ao crescimento radicular das culturas (Moraes et al., 2014), aumentando, assim, a eficiência de uso da água e, por consequência, a redução das perdas de produtividade ocasionadas por eventos de seca. Ou seja, a adoção do SPD, quando bem executada, pode resultar em sistemas de produção mais resilientes e adaptados as mudanças globais do clima.



Fonte: Adaptado de Maia et al. (2022).

Figura 1 – Fatores de mudança do carbono do solo (COS área avaliada/COS área de referência) para áreas com 20 anos sob sistema de plantio direto (SPD) convertidas a partir de cultivo convencional (CC), pastagem, e vegetação nativa (VN), para as camadas de 0-30 e 0-50 cm. Considerou-se os resultados médios para o Brasil e biomas Cerrado e Mata Atlântica. As barras representam o desvio padrão. A linha representa a condição de referência (1,0), indicando as diferenças do SPD em relação ao CC, pastagem e VN.

Sistemas integrados

Nas últimas décadas, a agricultura brasileira vem passando por profundas modificações e a adoção de sistemas integrados de cultivo vem ganhando destaque. Esses sistemas integrados são implementados visando aumentar a eficiência produtiva do setor agropecuário e florestal, além de aumentar a oferta de diversos serviços ecossistêmicos em áreas de pastagens severamente degradadas. A estratégia de integração contempla quatro modalidades de sistemas de cultivo, assim caracterizados: (i) Integração Lavoura-Pecuária ou Agropastoril (ILP); (ii) Integração Pecuária-Floresta ou Silvipastoril (IPF); (iii) Integração Lavoura-Floresta ou Silviagrícola (ILF); e (iv) Integração lavoura-peguária-floresta ou Agrossilvipastoril (ILPF).

Os sistemas de integração podem ser definidos como estratégias que integram atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, em cultivo consorciado ou em sucessão ou em rotação, na busca de efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental e a viabilidade econômica (Balbino et al., 2011).

Atualmente, no Brasil, esses sistemas de integração são considerados alternativas de intensificação sustentável dos setores de agricultura, pecuária e florestal, pois promovem aumentos na produção de alimentos, fibras e energia, juntamente com a melhoria de serviços ecossistêmicos. Os sistemas integrados de produção promovem melhoria da qualidade do solo (Almeida et al., 2021) e aumento dos estoques de C (Freitas et al., 2020; Frazão et al., 2021), além de reduzir as emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera (Torres et al., 2014).

É importante destacar que os sistemas mais diversificados de integração, tal como o ILPF, podem ser constituídos de grande diversidade de plantas de lavouras e de pastagens, e de arranjos e densidades arbóreas. Assim, sequestro, fluxo e estoque de C são regulados pelos fatores e mudanças de atributos do sistema solo-planta decorrentes dos diferentes arranjos dos agrossistemas, ecorregiões e formas de manejo dos componentes dos sistemas. Dessa forma, o conteúdo de C e a taxa anual de sequestro/imobilização de C nesses sistemas podem variar consideravelmente em função dos sistemas de cultivo e das práticas adotados de manejo do solo. Embora haja exemplos de utilização da ILPF no Brasil, a diversidade de condições regionais do país indica a necessidade de estudos regionalizados, visando entender as demandas específicas de implantação e os efeitos que cada arranjo do sistema de ILPF imprime sobre os sistemas solo e planta, para, assim, diminuir o grau de incertezas na estimativa do potencial de sequestro de C na fitomassa e no solo.

O sistema ILP, modelo de produção integrada mais amplamente difundido no Brasil, também é uma estratégia para potencializar o acúmulo de C no solo. Carvalho et al. (2010), ao avaliar as modificações nos estoques de C do solo em função dos principais processos de mudança de uso da terra nos biomas Amazônia e Cerrado, observaram que a conversão de áreas de sucessão de cultivos (soja/milho) para sistemas de ILP (ambos em sistema de plantio direto) resultou em acúmulo de C no solo, sendo que as taxas variaram de 0,82 a 2,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Os autores ressaltaram que a magnitude desses valores depende das culturas implantadas, das condições edafoclimáticas e, ainda, do tempo de implantação do sistema de ILP.

Ao avaliar os estoques de C sob sistema convencional, IPF e ILPF na Caatinga, Sacramento et al. (2013) verificaram, após 13 anos de condução do sistema de ILPF, um maior armazenamento de C, comparativamente aos sistemas convencional e IPF. Freitas et al. (2020), em estudo realizado em área de transição de Cerrado para Caatinga, verificaram que a conversão de pastagem de baixa produtividade em sistemas de ILPF resultou em taxas de acúmulo de C entre 1,0 e 4,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a camada de 0-30 cm de profundidade.

Coser et al. (2018), em estudo realizado no Distrito Federal, verificaram que a conversão de pastagem de baixa produtividade em sistema de ILPF resultou em acúmulo de C na ordem de 3,48 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-40 cm de profundidade.

Os resultados obtidos com a ILPF e SAF indicam que são alternativas economicamente viáveis, ambientalmente corretas e socialmente justas para o aumento da produção segura de alimentos, fibras e agroenergia. A diversificação de atividades na propriedade reduz os riscos climáticos e de mercado, melhoram a renda e a qualidade de vida no campo. Além disso, contribuem para a mitigação do desmatamento, redução da erosão, sequestro de C e diminuição das emissões de gases do efeito estufa, possibilitando a produção agrícola sustentável.

Recuperação de pastagens degradadas

As pastagens representam 70% da área total agrícola global e fornecem habitat para uma grande diversidade de fauna e flora contribuindo com outros serviços ecossistêmicos, incluindo a regulação e armazenamento dos fluxos de água, produção de forragem.

As pastagens são agroecossistemas com alto potencial de sequestro e acúmulo de C no solo. O sequestro de C pelos solos sob pastagem representa 29% de todo o potencial que essa estratégia apresenta para mitigar o aquecimento global, mostrando-se como opção para diminuir a pegada de C da produção de bovinos no Brasil. Em uma ampla revisão sobre a dinâmica do C nas pastagens do Brasil, Oliveira et al. (2018) observaram que as pastagens, quando manejadas adequadamente (controle efetivo de plantas invasoras e adequada taxa de lotação), podem aumentar os estoques de C do solo em 15% no período de 30 anos. Por outro lado, as áreas que receberam algum tipo de insumo (como adubação, calagem etc.) apresentaram aumento de 8% de C estocado no solo no mesmo período. Entretanto, pastagens recuperadas, podem promover ganho de C da ordem de 23% em relação à pastagem degradada. A partir desses dados, estimou-se que o cumprimento da meta do plano ABC e da NDC juntos (recuperação de 30 milhões de ha de pastagens degradadas), resultará no acúmulo de 12 Tg de C ano⁻¹ no solo. Se essas pastagens não forem recuperadas, ocorrerá uma perda de 4,2 Tg de C ano⁻¹.

A redução na disponibilidade de N no solo destaca-se como um dos principais fatores limitantes associados ao declínio de pastagens de braquiária. Além disso, o sequestro e acúmulo de C no solo são dependentes do balanço de N, de modo que não ocorre sequestro de C em solo se o N não for suprido de modo adequado para o aumento da biomassa de pastos. Dessa forma, é razoável supor que a adição de fertilizantes nitrogenados em pastagens consiste em eficiente estratégia de recuperação da pastagem e, por conseguinte, do acúmulo de C no solo. Entretanto, a prática de aumentar o aporte de N em pastos, além de onerosa, pode determinar acréscimos nas emissões de N₂O em solos agrícolas, se o N for de origem mineral. Dessa forma, a fixação biológica do nitrogênio é uma estratégia relevante para a recuperação e sequestro de C em pastagens brasileiras.

A introdução de forrageiras leguminosas em áreas de pastagem com gramíneas no Brasil, em média, acresceu em 0,72 Mg de C ha⁻¹ ano⁻¹ os estoques de C no solo. A despeito da inserção de leguminosas fixadoras de N em áreas de pasta-

gens, alguns genótipos de braquiária podem obter mais de 20% do N acumulado por meio de associações com bactérias do gênero *Azospirillum* (Reis et al., 2024).

Biocarvão

A conversão de biomassa decomponível em matéria orgânica pouco ou não biodegradável tem sido amplamente estudada como estratégia para a mitigação das mudanças climáticas em função do aumento do armazenamento de C estável no solo, com redução do fluxo e do CO₂ da atmosfera. O processo de transformação termoquímica de biomassa numa ampla faixa de temperatura (geralmente entre 300 - 700 °C), na ausência ou em baixa concentração de oxigênio (O₂), chamado de pirólise, e a aplicação do subproduto sólido obtido nesse processo, denominado biocarvão (também conhecido como biochar, em inglês), em solos agrícolas ou florestais pode retardar a decomposição do C capturado pelas plantas no processo de fotossíntese que, de outra forma, seria perdido na forma de CO₂ e retornaria para a atmosfera. O biocarvão é caracterizado por ser um resíduo carbonizado oriundo da pirólise de materiais orgânicos, rico em carbono, de alta área superficial específica, porosidade e elevado teor de cinzas.

O processo da pirólise resulta na formação de subprodutos líquidos (bio-óleo), sólidos (biocarvão) e gasosos. A proporção da formação entre os subprodutos da pirólise pode variar de acordo com as condições do processo (e.g. temperatura da reação) e em função da qualidade da matéria prima utilizada. Por exemplo, a realização da pirólise lenta promove uma proporção de 30:40:30 em porcentagem entre a formação de biocarvão, bio-óleo e gás, respectivamente. Por outro lado, a pirólise rápida favorece a produção de bio-óleo (50%-70%), 10-30% biocarvão e 15%-20% de gases (Laird, 2009).

Existe uma ampla gama de matérias-primas, sendo ou não biomassa lignocelulósica, que podem ser utilizadas para a produção de biocarvão, tais como estercos, resíduos agrícolas e florestais (por exemplo, casca de arroz, casca de café, palha de milho, palha de cana de açúcar, caule de soja, resíduos de laranja, casca de eucalipto e/ou pinus, resíduos de madeira); subprodutos, resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos (por exemplo, lodo de esgoto, bagaço de cana de açúcar, cama de frango, lixo), além de materiais não convencionais, como resíduos de pneus, papéis e ossos. Devido a essa diversidade de matérias-primas, o subproduto sólido resultante da pirólise é um material altamente heterogêneo e suas propriedades dependem, em grande parte, da composição química da matéria-prima e das condições do processo de produção (Conz et al., 2017).

Cerca de 97% do carbono presente no biocarvão é encontrado sob formas recalcitrantes devido à transformação do carbono lábil da biomassa em estruturas aromáticas quimicamente estáveis durante a pirólise, aumentando sua resistência contra a degradação microbiana. No entanto, é importante mencionar que nem todo o C contido no biocarvão é recalcitrante. Dependendo das condições de pirólise e da origem da matéria-prima utilizada para a sua produção, alguns biocarvões podem conter diferentes quantidades de C lábil.

Recentemente, Sanei et al. (2024) aplicaram conceitos da pedologia orgânica e geoquímica, tradicionalmente utilizados para estudar o maceral inertinite (um dos componentes orgânicos mais estáveis da Terra), na avaliação da recalctrância do biocarvão. Ao quantificar o nível de evolução do carbono orgânico no biocarvão utilizando ferramentas e métodos já estabelecidos para a inertinite, os autores demonstraram que o biocarvão apresenta características semelhantes a esse maceral geologicamente estável. Essa descoberta reforça a hipótese de que o biocarvão pode atuar como um sumidouro de carbono de longo prazo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Diante do exposto, o biocarvão tem ganhado atenção como uma ferramenta promissora para aumentar o sequestro de C nos solos, e foi incluído no relatório do IPCC em 2014 (Smith, 2014) como uma opção de mitigação do lado da oferta, o que significa que as emissões de CO₂ devido ao manejo e uso da terra podem ser reduzidas e os estoques de C podem ser aumentados por meio da aplicação de biocarvão no solo. Apesar de se tratar de uma estratégia de manejo do solo promissora para a redução do C emitido para a atmosfera, a aplicação do biocarvão ao solo ainda não está bem estabelecida em operações agrícolas de grande escala. Além disso, no Brasil o seu uso ainda é pouco difundido fora do meio acadêmico-científico ou fomentado por meio de políticas públicas e/ou programas governamentais, e o maior interesse por este material no setor agropecuário está centrado principalmente no seu uso como condicionador de solo e/ou alternativa no manejo de resíduos, e não tanto no seu potencial de mitigação das mudanças climáticas. Por isso, as políticas e diretrizes relativas à gestão de resíduos sólidos e iniciativas relacionadas às mudanças climáticas são de grande relevância para a implementação efetiva do biocarvão como agente mitigador das mudanças climáticas.

Intemperismo acelerado de rochas

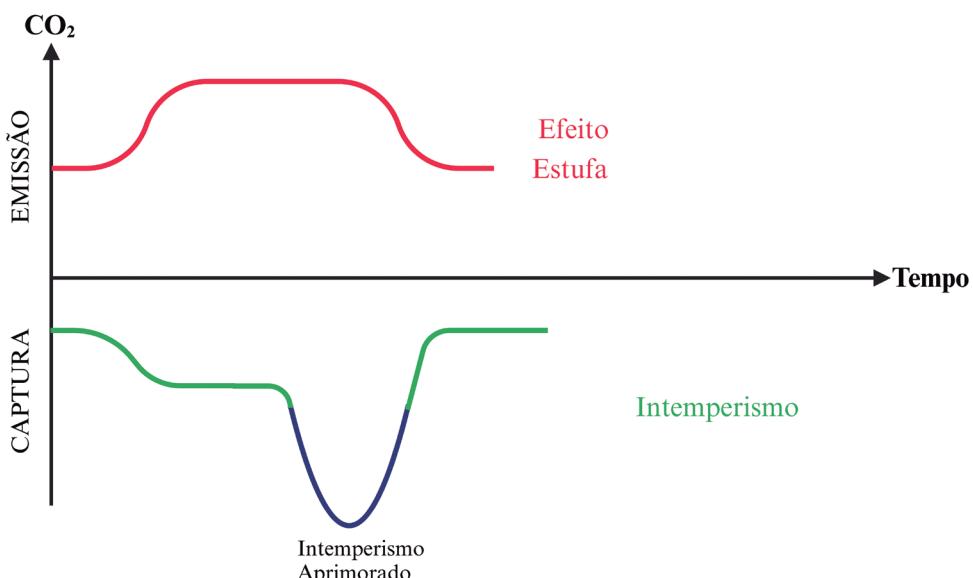
As rochas expostas na superfície da Terra estão em contato com a atmosfera. Nas regiões onde existe água suficiente, o gás carbônico atmosférico solubiliza-se parcialmente, tornando-se ácido carbônico que, por hidrólise, intemperiza os minerais das rochas e produz ânions bicarbonato. No solo, a respiração das raízes e do microbioma aumenta a pressão parcial de gás carbônico em até dezenas de vezes aquela da atmosfera (Flechard et al., 2007), aumentando a massa de bicarbonato produzida. Parte desse bicarbonato lixivia para as águas subterrâneas e, enfim, para os oceanos onde precipita-se como minerais carbonatados, inserindo-se no lento ciclo das rochas. Esse mecanismo, que é bem mais complexo que a descrição acima, transfere carbono da atmosfera para as rochas, tampona o efeito estufa terrestre e é conhecido como o termostato terrestre. Ele atua na escala geológica, tomando centenas de milhares a milhões de anos para reequilibrar o CO_{2atm} e o efeito estufa.

O intemperismo aprimorado de rochas (IAR, ou ERW na sigla em inglês) é uma tecnologia baseada no aumento de eficiência deste processo. Da

química, lembramos que para aumentar a massa de um produto de interesse, podemos interferir em uma reação química em pelo menos duas maneiras: aumentando a massa dos reagentes (estequiométrica) e aumentando a taxa da reação (cinética).

Assim, colocando minerais “frescos”, não intemperizados, no solo, e aumentando sua superfície reativa, aumenta-se a massa de reagentes participando da reação (estequiométrica). Simultaneamente, expondo a rocha fresca a ambientes úmidos e quentes, aumenta-se a velocidade da reação (cinética). Desse modo, mais carbono é retirado da atmosfera em um mesmo intervalo de tempo.

O objetivo do Intemperismo Aprimorado de Rochas (IAR) é manipular o termostato terrestre de modo a aumentar a captura de $\text{CO}_{2\text{atm}}$ em um dado intervalo de tempo (Figura 2).



Fonte: Próprios autores.

Figura 2 – Conceito de termostato do intemperismo, e do Intemperismo Aprimorado de Rochas (IAR).

Além da captura de carbono, a aplicação de rochas moídas pode produzir benefícios às culturas agrícolas, como fornecimento de nutrientes para as plantas, neutralização da acidez e formação de novas partículas reativas no solo.

O Brasil se constitui em um cenário privilegiado para essa tecnologia porque tem legislação que regulamenta a produção, comercialização de pós de rocha para aplicação agrícola, tem a quase totalidade do território exposta à climas quentes e úmidos e constitui-se, naturalmente, e é o maior sumidouro silicato de carbono do planeta (Zhang et al., 2021). O primeiro crédito de carbono gerado por IAR/ERW certificado no mundo foi emitido para uma área no Brasil, em dezembro de 2024.

Nossa taxa média do sumidouro silicatado de carbono é de 5.58 t de $\text{CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Zhang et al., 2021). No estado de São Paulo, Fernandes et al. (2016) estimaram essa taxa em 8.8 t de $\text{CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,2 \cdot 10^6 \text{ mol CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) para a Bacia do Rio Sorocaba, próximo à cidade de Sorocaba, e da Conceição et al. (2015) em 17.6 t de $\text{CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,4 \cdot 10^6 \text{ mol de CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) para a bacia do Rio Preto, nos arredores da cidade de Ribeirão Preto.

Ainda há muito para se investigar no uso do IAR para captura de carbono, sendo um dos principais obstáculos o tempo necessário para obtenção de resultados experimentais, em campo, robustos (Edwards et al., 2017).

Tecnossolos

Tecnossolos são solos antropogênicos formados a partir de materiais fabricados ou alterados pela atividade humana, como rejeitos de mineração e resíduos industriais ou urbanos. Esses materiais, denominados artefatos, compõem pelo menos 20% do volume do Tecnossolo até 1 metro de profundidade. Por serem solos que podem ser construídos intencionalmente para a resolução de problemas ambientais, os Tecnossolos têm sido empregados na recuperação de áreas degradadas, destacando-se também pelo potencial de sequestro de carbono.

Portanto, ao projetar Tecnossolos, o foco deve estar em otimizar a formação e o funcionamento do solo. Com base nas propriedades dos resíduos iniciais, como tamanho de partículas reduzido, ausência de poluentes e presença de minerais facilmente intemperizáveis, determina-se a possibilidade de utilizá-los na construção de Tecnossolos. Considerando que a produção anual de rejeitos de mineração no Brasil está projetada para atingir 11 bilhões de toneladas até 2030 (Ipea, 2012), é fundamental explorar o potencial de diversos tipos de rejeitos de mineração para produzir Tecnossolos saudáveis com alta capacidade de armazenamento de carbono. No Brasil, onde a mineração é uma atividade de destaque, o uso de rejeitos para a construção de Tecnossolos poderia transformar passivos ambientais em soluções baseadas na natureza. Estima-se que a aplicação de Tecnossolos para recuperar cavas de mineração possa restaurar até 60% dos estoques de carbono perdidos com a remoção do solo (Ruiz et al., 2023).

Além disso, como os Tecnossolos podem se tornar solos de elevada fertilidade, as áreas recuperadas podem ser dedicadas à agricultura. Estudos mostram que Tecnossolos construídos com rejeitos de mineração são capazes de produzir culturas agrícolas, como cana de açúcar e pastagem, o que, além de mitigar as emissões de CO_2 , também contribui para a produção de alimento e energia (Ruiz et al., 2020). Ainda, é importante ressaltar que a introdução de Tecnossolos com alta fertilidade natural pode reduzir a necessidade de insumos externos, como fertilizantes, o que também tem um efeito positivo na redução das emissões de GEE. Assim, a aplicação de Tecnossolos na agricultura representa uma oportunidade de unir recuperação ambiental com produção agrícola sustentável.

Em suma, a construção de Tecnossolos para a mitigação das mudanças climáticas é uma solução baseada na natureza promissora, mas ainda pouco explorada no Brasil e no mundo. Essa tecnologia apoia-se em processos naturais, como intemperismo, formação do solo e estabilização do carbono orgânico, para recuperar áreas degradadas e criar solos saudáveis que promovam sequestro de carbono além da produção de alimentos, fibras e energia. Para que seu potencial seja plenamente realizado, é essencial explorar diferentes tipos de resíduos, assegurando o uso seguro, inteligente e sustentável desses solos. Dessa forma, os setores mineral e agrícola poderão adotar uma abordagem mais sustentável e inovadora para o futuro.

Considerações finais

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de alimentos, rações, fibras e (bio)combustíveis. As estimativas indicavam que o país precisaria aumentar a sua produção alimentar em 40% para satisfazer a procura global até 2050. Todavia, o potencial de adoção de práticas de manejo regenerativas e usos da terra sustentáveis, não somente para sequestrar C mas também para reduzir as emissões de GEE, permanece pouco claro. A síntese das informações disponíveis sobre a capacidade de absorção de C no solo é importante para identificar áreas e sistemas prioritários a serem monitorados, um passo essencial para estimar adequadamente o potencial de sequestro de C em grande escala.

No entanto, para transformar a ciência e a tecnologia em ação é necessário haver coordenação de intervenções técnicas e políticas de alto impacto que satisfaçam as necessidades de todos os atores dos setores agropecuários. O Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP) é um dos exemplos de iniciativas acadêmicas que tem como objetivo auxiliar o Brasil na implementação de estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas. Nesse contexto, a missão do CCarbon/USP é desenvolver soluções e estratégias inovadoras em agricultura tropical sustentável, baseada em carbono, para mitigar as mudanças climáticas e melhorar os padrões e condições de vida. Sua visão é ser reconhecido como um centro de classe mundial, líder em agricultura tropical de baixo C e qualificação de recursos humanos por meio de atividades de pesquisa, inovação e divulgação.

É evidente que existem vários desafios para implementar e executar tais estratégias de adaptação e mitigação, uma vez que o nível de complexidade é bastante superior ao dos sistemas de produção convencionais. Assim, são necessárias políticas públicas internacionais, nacionais e regionais que incentivem a adoção de melhores práticas de gestão agropecuária, incluindo aquelas apresentadas neste documento, para que além de auxiliar no enfrentamento das mudanças climáticas possam alavancar significativos benefícios sociais e econômicos para a sociedade como um todo.

Referências

- ALMEIDA, L. L. S. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, v.205, n.1, p.e104785, 2021.
- AMADO, T. J. C. et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *Journal of Environment Quality*, v.35, p.1599-607, 2006.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. *Marco referencial em integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 130p.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, v.86, n.1, p.237-45, 2006.
- BAYER, C. et al. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.146, p.213-22, 2015.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.110, p.175-86, 2010.
- CONCEIÇÃO, F. T. et al. Chemical weathering rate, denudation rate, and atmospheric and soil CO₂ consumption of Paraná flood basalts in São Paulo State, Brazil. *Geomorphology*, v.233, p.41-51, 2015.
- CONZ, R. F. et al. Effect of pyrolysis temperature and feedstock type on agricultural properties and stability of biochars. *Agricultural Sciences*, v.8, p.914-33, 2017.
- COSER, T. R. et al. Short-term buildup of carbon from a low-productivity pasture-land to an agrosilviculture system in the Brazilian savannah. *Agricultural Systems*, v.166, p.184-95, 2018.
- EDWARDS, D. P. et al. Climate change mitigation: Potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biology Letters*, v.13, p.4-11, 2017.
- ENGEL, F. L. et al. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.103, p.216-21, 2009.
- FERNANDES, A. M. et al. Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO₂ consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in southeastern Brazil. *Chemical Geology*, v.443, p.54-66, 2016.
- FLECHARD, C. R. et al. Temporal changes in soil pore space CO₂ concentration and storage under permanent grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.142, p.66-84, 2007.
- FRAZÃO, L.A. et al. Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrosilvicultural systems in the Southeast of Brazil. *Soil Research*, v.59, p.794-805, 2021.
- FREITAS, I. C. et al. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangeland Ecology & Management*, v.73, p.776-85, 2020.

FUENTES-LLANILLO, R. et al. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.208, p.104877, 2021.

IPEA. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas*. 2012. 45p.

LAIRD, D. A. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v.3, p.547-62, 2009.

MAIA, S. M. F. et al. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.220, p.105368, 2022.

MORAES, A. D. et al. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v.45, p.1024-31, 2014.

OLIVEIRA, J. M. et al. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change*, v.18, p.105-16, 2018.

POWLSON, D. S. et al. Is it possible to attain the same soil organic matter content in arable agricultural soils as under natural vegetation? *Outlook on Agriculture*, v.51, p.91-104, 2022.

REIS, B. R. et al. Changes in soil bacterial community structure in a short-term trial with different silicate rock powders. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v.11, p.1-16, 2024.

RUIZ, F.; CHERUBIN, M. R.; FERREIRA, T. O. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. *Journal of Environmental Management*, v.276, p.111344, 2020.

RUIZ, F. et al. Soil organic matter stabilization during early stages of Technosol development from Ca, Mg and pyrite-rich parent material. *Catena*, v.232, p.107435, 2023.

SACRAMENTO, J. A. A. S. D. et al. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.784-95, 2013.

SANEI, H. et al. Assessing biochar's permanence: An infinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, v.281, p.33-41, 2024.

SILVA, G. R. D. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions in Maize No-Till Agroecosystems in Southern Brazil Based on a Long-Term Experiment. *Sustainability*, v.16, p.4012, 2024.

SMITH, P. *Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)*. New York: Cambridge University Press, 2014. p.811-922.

TORRES, C. M. M. E. et al. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.34, p.235-44, 2014.

VANDENBYGAART, A. J. The myth that no-till can mitigate global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.216, p.98-99, 2016.

ZHANG, S. et al. Global CO₂ Consumption by Silicate Rock Chemical Weathering: Its Past and Future. *Earth's Future*, v.9, p.e2020EF001938, 2021.

RESUMO – O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de alimentos, rações, fibras e (bio)combustíveis. O setor da agropecuária é um dos principais responsáveis pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) dentre os setores da economia, mas também é uma das atividades humanas mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas globais, especialmente nos países de clima tropical. Entretanto, a adoção de práticas de manejo regenerativas e usos da terra sustentáveis não somente podem aumentar o sequestro de Carbono (C) como também reduzir as emissões de GEE para atmosfera. Este documento traz informações gerais, disponíveis na literatura, sobre algumas das práticas de manejo agropecuárias que são consideradas opções de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVES: Plantio direto, Sistemas integrados, Recuperação de pastagens degradadas, Biocarvão, Intemperismo acelerado de rochas, Tecnossolos.

ABSTRACT – Brazil is one of the world's largest producers and exporters of food, feed, fiber and (bio)fuels. The agricultural sector is one of the main responsible for the emission of Greenhouse Gases (GHG) among sectors of the economy, but it is also one of the human activities most vulnerable to the effects of global climate change, especially in countries with a tropical climate. However, the adoption of regenerative management practices and sustainable land uses can not only increase Carbon (C) sequestration but also reduce GHG emissions into the atmosphere. This document provides general information, available in the literature, about some of the agricultural management practices that are considered options for adapting and mitigating climate change.

KEYWORDS: No-tillage, Integrated systems, Recovery of degraded pastures, Biochar, Accelerated rock weathering, Technosols.

Carlos Eduardo Pellegrino Cerri é professor do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – cepcerri@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-4374-4056>.

Thalita Fernanda Abbruzzini é pesquisadora no Instituto de Geologia, Departamento de Ciências Ambientais e do Solo, Universidade Nacional Autônoma do México, México. @ – thalita.ufla@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0001-7192-1438>.

Dener Márcio da Silva Oliveira é professor adjunto da Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrárias, Florestal, Minas Gerais e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – dener.oliveira@ufv.br / <https://orcid.org/0000-0001-9514-9147>.

Tiago Osório Ferreira é professor do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo e do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – toferreira@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-4088-7457>.

Francisco Ruiz é pós-doutor do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – francisco.ruiz@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-2612-009X>.

Antonio Carlos Azevedo é professor do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – aazevedo@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-1681-3212>.

João Luís Nunes Carvalho é pesquisador do Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR/CNPEM), Campinas, São Paulo Paulo, e do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – joao.carvalho@lnbr.cn pem.br / <https://orcid.org/0000-0002-9792-9259>.

Maurício Roberto Cherubin é professor do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo, e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – cherubin@usp.br / <https://orcid.org/0000-0001-7920-836>.

Leidivan Almeida Frazão é professora da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Montes Claros, Minas Gerais, e pesquisadora do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – leidivan.frazao@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-7147-7821>.

Amanda Ronix Pereira é pós-doutora do Departamento de Ciência do Solo, Esalq/USP, Piracicaba, São Paulo e pesquisadora do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – amanda.ronix@usp.br / <https://orcid.org/0009-0002-0457-7563>.

Stoécio Malta Ferreira Maia é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL) Marechal Deodoro, Alagoas e pesquisador do Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCarbon/USP). @ – stoecio.maia@ifal.edu.br / <https://orcid.org/0000-0001-6491-2517>.

Recebido em 25.2.2025 e aceito em 12.3.2025.

^{I,IV,V,VI,VIII,X} Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

^{II} Universidade Nacional Autônoma do México, Instituto de Geologia, Departamento de Ciências Ambientais e do Solo, México, México.

^{III} Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrárias, Florestal, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

^{VII} Laboratório Nacional de Biorrenováveis, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Campinas, São Paulo, Brasil.

^{IX} Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, Minas Gerais, Brasil

^{XI} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Marechal Deodoro, Alagoas, Brasil.