



Mudança do clima e a agropecuária brasileira

Noções, mitigação e adaptação



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

DOCUMENTOS 322

Mudança do clima e a agropecuária brasileira Noções, mitigação e adaptação

*Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado
Carlos Magri Ferreira
Márcia Thais de Melo Carvalho
Mellissa Ananias Soler da Silva
Beáta Emöke Madari*

Embrapa Arroz e Feijão
Rodovia GO 462, Km 12 - Zona Rural
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (62) 3533 2105
Fax: (62) 3533 2100
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê de Publicações
da Embrapa Arroz e Feijão

Presidente
Roselene de Queiroz Chaves

Secretário-Executivo
Luiz Roberto Rocha da Silva

Membros
*Ana Lúcia Delalibera de Faria, Luís Fernando Stone,
Newton Cavalcanti de Noronha Júnior, Tereza
Cristina de Oliveira Borba*

Supervisão editorial
Luiz Roberto Rocha da Silva

Revisão de texto
Luiz Roberto Rocha da Silva

Normalização bibliográfica
Ana Lúcia Delalibera de Faria

Tratamento das ilustrações
Fabiano Severino

Projeto gráfico da coleção
Fabiano Severino

Editoração eletrônica
Fabiano Severino

Foto da capa
Beáta Emöke Madari

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

Todos os direitos reservados.

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

Mudança do clima e a agropecuária brasileira : noções, mitigação e adaptação /
Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado... [et al.]. - Santo Antônio de Goiás :
Embrapa Arroz e Feijão, 2022.
PDF (36 p.) - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 322)

1. Mudança climática. 2. Impacto ambiental. 3. Agricultura - clima. 4. Efeito
estufa. I. Machado, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. II. Ferreira, Carlos Magri.
III. Carvalho, Márcia Thaís de Melo. IV. Silva, Mellissa Ananias Soler da. V. Madari,
Beáta Emöke. VI. Embrapa Arroz e Feijão. VII. Série.

CDD 551.68

Ana Lúcia Delalibera de Faria (CRB-1/324)

© Embrapa, 2022

Autores

Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Carlos Magri Ferreira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Desenvolvimento Sustentável, analista da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Márcia Thaís de Melo Carvalho

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Produção Ecológica e Conservação de Recursos, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Mellissa Ananias Soler da Silva

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Beáta Emöke Madari

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Apresentação

O presente documento busca contribuir para o entendimento de tópicos relacionados à mudança climática e à agricultura para nivelar os diversos públicos nas discussões sobre o tema. Não se pretende aqui esgotar o assunto com ampla revisão bibliográfica, mas oferecer informações essenciais corroboradas por publicações científicas relacionadas à produção agropecuária predominante nos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

Justifica-se a publicação apoiando-se em três argumentos: a) há vasta literatura contendo estudos aprofundados sobre mudança do clima, segurança alimentar, manejo sustentável, fluxos de gases de efeito estufa nos ecossistemas terrestres e políticas públicas para agricultura de baixa emissão de carbono, mas destinada a especialistas; b) apesar da agricultura ser altamente vulnerável à mudança do clima, com alta relevância para a riqueza de muitos países em desenvolvimento, relata-se aqui que o setor de agropecuária demorou anos para ser inserido na agenda de negociações da política ambiental global e; c) há um desconhecimento básico das expressões relacionadas à interação da mudança do clima com a agricultura.

Ao final, espera-se que o leitor tenha uma clara compreensão de que o setor de agropecuária, além de contribuir de maneira sustentável para a segurança alimentar, pode ter papel de destaque na mitigação e adaptação à mudança do clima.

Os autores

Sumário

Introdução.....	9
Efeito estufa e mudança do clima	10
Fluxo de carbono.....	12
Sustentabilidade e mudança do clima.....	13
O desafio da compatibilização: produtividade das culturas, mitigação das emissões dos gases de efeito estufa e adaptação à mudança do clima.....	13
Papel da pesquisa agrícola e a redução da emissão de gases de efeito estufa	15
A agropecuária como parte da solução do problema.....	19
Política ambiental global: agropecuária brasileira e a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima	22
Termos para se familiarizar	23
Agradecimentos.....	31
Referências	31

Introdução

As atividades agrícolas são ações humanas estreitamente relacionadas com a utilização dos recursos naturais. Recurso natural pode ser definido como qualquer elemento ou aspecto da natureza que esteja em demanda, seja passível de uso ou sendo usado direta ou indiretamente pelo homem para a satisfação de suas necessidades físicas e culturais em determinado tempo e espaço (Venturi, 2006).

Os principais recursos naturais demandados quando se realiza a agropecuária são solo, água e ar. A produção de alimentos por meio da agropecuária pode afetar outros recursos naturais como a flora e a fauna, que se enquadram na biodiversidade. Como externalidades negativas no meio ambiente tem-se a degradação dos solos pela erosão, contaminações ou poluição por excesso ou uso inadequado de agrotóxicos, perda do patrimônio genético e da biodiversidade devido ao desmatamento e corte de vegetação, redução no número de mamíferos, répteis, aves ou polinizadores e diminuição da quantidade e qualidade da água disponível para outras atividades (Ferreira, 2008; Raitif et al., 2019). No Brasil, a erosão do solo causada pelas fortes chuvas de verão ainda é o principal fator de degradação ambiental, com perdas de solo anuais em torno de 22 toneladas por hectare nas áreas sob pastagens mal manejadas e degradadas, que contrastam com áreas sob florestas com cerca de 0,4 tonelada por hectare ao ano (Galdino et al., 2016; Polidoro et al., 2021).

Após a década de 1960, a sociedade passou a discutir com veemência a relação dos seres humanos com a natureza. O debate fundamentava-se na iminente ameaça de levar ao desgaste e exaustão dos recursos naturais, diante do nível de necessidade e dependência de uso para satisfazer o desejo de consumo e crescimento da população mundial. A discussão permanece até os dias atuais, considerando que o aumento populacional, atrelado a um padrão de consumo muito acima das necessidades básicas, especialmente de classes sociais e países mais ricos, está levando a uma situação de exigência acima da capacidade de resiliência da Terra, ou seja, acima da capacidade de recuperação da natureza. Estimativas mais recentes já confirmam que a fome não será erradicada do mundo até 2030, a menos que ações mais robustas sejam realizadas para acelerar a superação dos desafios, especialmente aquelas que busquem solucionar os problemas de desequilíbrio ou injustiças no acesso a alimentos, e no contexto, as variações e extremos climáticos são um dos fatores que geram múltiplos impactos nos sistemas alimentares, afetando negativamente a segurança alimentar e a nutrição da população (FAO, 2021).

Alternativas comumente apresentadas para poupar e reduzir os efeitos negativos decorrentes do uso dos recursos naturais são: 1) modificar o padrão de consumo da sociedade; 2) criar leis ambientais cada vez mais rígidas (ex. taxaçoão do carbono); e 3) encontrar e empregar técnicas menos poluidoras, mais parcimoniosas na utilização de insumos e mais adequadas para a conservação e recuperação dos recursos naturais (Ferreira, 2008). Neste contexto, a comunicação clara e efetiva sobre os riscos tem um papel fundamental para a agricultura e para as pessoas envolvidas direta ou indiretamente na atividade agrícola (Litre; Bursztyn, 2015).

Os argumentos da necessidade de mudanças nos processos de produção agrícola baseiam-se em: garantir a segurança alimentar global, no aumento da população e da economia industrializada, na disponibilidade de alimentos frente à mudança climática, rápida urbanização, na agricultura convencional de elevados insumos que prejudica e causa perdas na biodiversidade, escassez de terras agricultáveis e água e, finalmente, na poluição gerada (Buckwell et al., 2014).

No Brasil, a agricultura é a segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) após o desmatamento na Amazônia e no Cerrado (Angelo; Rittl, 2019). Assim, como em qualquer parte

do mundo, a agricultura possui uma situação ambivalente em relação à sustentabilidade do planeta; ao mesmo tempo que é uma atividade que contribui para a emissão de gases de efeito estufa, é a atividade que pode minimizar as sequelas produzidas por esses gases. Seja pela adoção de práticas mitigadoras, como a fixação biológica de nitrogênio, evitando o uso de fertilizante nitrogenado industrializado, como pela capacidade de acumular carbono no solo pela adoção do sistema plantio direto com rotação de culturas envolvendo plantas de cobertura (ex. braquiária, aveia preta) e adubos verdes (ex. crotalária, ervilhaca). De modo que as funções da agricultura, que no passado se resumiam em produção de matérias-primas, alimentos e geração de emprego e renda se ampliaram com atribuições relacionadas com geração de energia e insumos biológicos para substituir os insumos derivados de processos químicos poluidores, funções paisagísticas e de qualidade de vida (bucolismo), regulação do clima, manutenção da diversidade faunística e florística e dos serviços ambientais relacionados com a qualidade ambiental (Ferreira, 2008). No âmbito dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, a agricultura, por meio das boas práticas agronômicas, possui estreita aderência ao reforço da resiliência e à capacidade de adaptação a riscos relacionados com o clima no Brasil.

Efeito estufa e mudança do clima

A atmosfera é composta por basicamente 11 gases. Os dois gases predominantes são nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), com participação em torno de 78% e 20%, respectivamente. Os demais gases são argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2), neônio (Ne), hélio (He), metano (CH_4), hidrogênio (H_2), óxido nitroso (N_2O), dióxido de nitrogênio (NO_2), monóxido de nitrogênio (NO) e monóxido de carbono (CO).

O efeito estufa é um fenômeno natural causado pela presença de gases na atmosfera que retêm calor, permitindo que o planeta possua uma temperatura média de 15 °C (Figura 1). Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de aproximadamente -18 °C, não permitindo a existência de água na forma líquida e de vida (Serreze, 2010). Na atmosfera da Terra, os principais gases de efeito estufa são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3). Esses gases são conhecidos como gases-traços, pois ocupam menos de 0,1% do volume da atmosfera, mas possuem relevante papel no balanço energético da Terra. A atmosfera contém também vapor d'água (H_2O ; aproximadamente 1% do volume) que é também um gás de efeito estufa natural contribuindo para a regulação do clima do planeta. A Terra recebe radiação solar (cerca de 342 Wm^{-2} , em média). A radiação infravermelha emitida pelo solo chega até à superfície terrestre que, por sua vez, emite essa radiação na forma de calor para cima e para baixo. Os diferentes gases-traços presentes na atmosfera, particularmente na troposfera, absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Tal processo de absorção e emissão de radiação infravermelha gera aumento na temperatura próxima à superfície da Terra, resultando num efeito estufa natural e importante para o surgimento e manutenção da vida no planeta.

Os seres humanos sempre influenciaram o meio ambiente. Entretanto, foi após o início da Revolução Industrial, em meados do século 18, que o impacto das atividades humanas tomou proporções em escalas continentais e, até mesmo, globais. Atividades humanas, principalmente as que envolvem a extração e queima de combustíveis fósseis, incluindo carvão mineral e gás natural para uso industrial ou residencial e queima da biomassa (desmatamento seguido de queimadas), produzem gases de efeito estufa que afetam a composição da atmosfera. O efeito estufa passa a ser forçado ou intensificado gerando, assim, o aquecimento global, que é o aumento da temperatura global média causado pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera da Terra, originado, na maior parte, pelas atividades humanas (IPCC, 2014). Segundo o sexto Relatório do

Painel Intergovernamental de Mudança do Clima, não há dúvidas sobre a influência humana no aquecimento da atmosfera, da terra e dos oceanos (IPCC, 2021).

Os gases de efeito estufa também possuem diferentes potenciais de aquecimento ou de absorver e reter energia na forma de calor (Smith et al., 2022). Por exemplo, o gás metano e o óxido nitroso apresentam potencial de aquecimento maior que o gás carbônico ($\text{CH}_4 = 27,9$ vezes o CO_2 e $\text{N}_2\text{O} = 273$ vezes o CO_2). O CO_2 é emitido em maiores quantidades devido à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento ou queimada. O CH_4 é relevante em áreas onde se produz arroz inundado (ex. Sul do Brasil, Sudoeste da Ásia) e pecuária bovina. O óxido nitroso (N_2O) que se acumula na atmosfera provem principalmente da adubação mineral nitrogenada na agricultura (ex. ureia). Além disso, a mudança no uso da terra causada pela conversão de florestas em agricultura ou pecuária afeta as propriedades físicas e biológicas da superfície terrestre, com impacto potencial no clima regional e global (Lovejoy; Nobre, 2018).

Com o aquecimento global tem-se a mudança do clima, que se refere à variação em escala regional ou global ao longo do tempo (ex. escassez ou excesso de chuvas na estação úmida, temporais, granizo, tornados, ciclones etc.). Muitas espécies de animais terrestres e aquáticos alteraram sua distribuição geográfica e padrões de migração em resposta à mudança do clima (IPCC, 2014). Atualmente, pessoas forçadas a se deslocarem ou migrarem por motivo de eventos climáticos ou pela elevação do nível dos mares são denominadas 'refugiadas do clima'.

A mudança do clima não é somente elevação na temperatura. Refere-se à variação do clima em escala global ou dos climas regionais do planeta e diz respeito a mudanças de temperatura, precipitação, nebulosidade e outros fenômenos climáticos na atualidade em relação às médias históricas e persistindo por décadas ou mais.

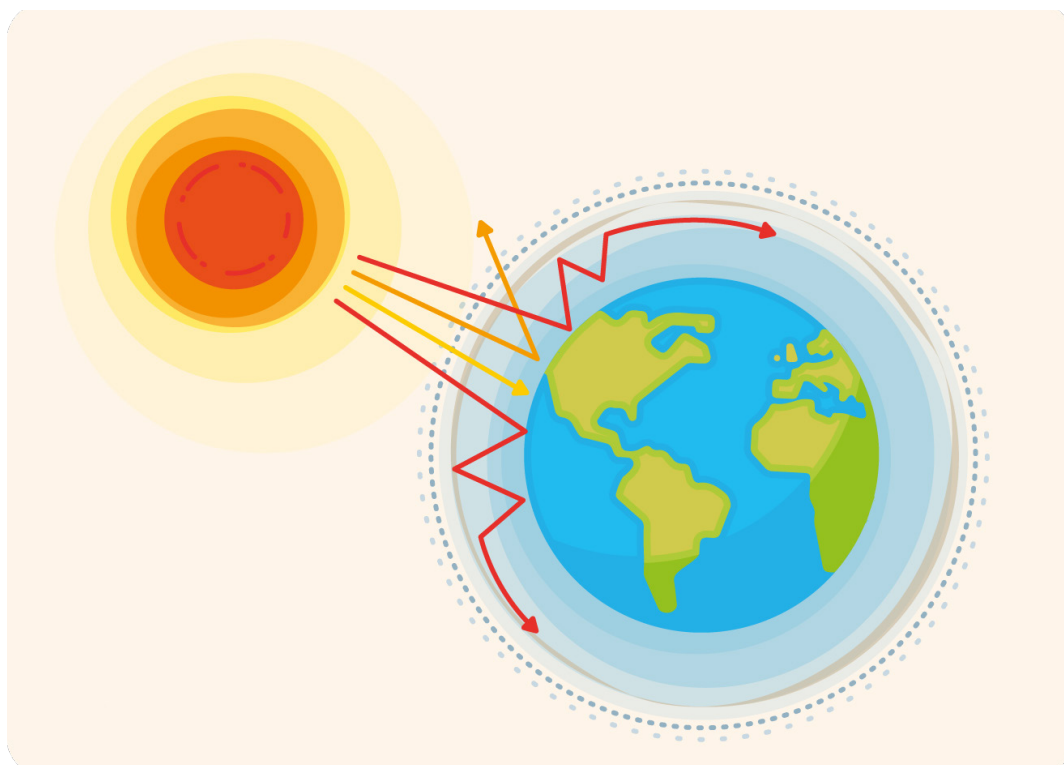


Figura 1. Representação gráfica do efeito estufa na Terra, com os raios solares incidindo no planeta e sendo impedidos de se dissiparem totalmente no espaço pela presença da camada de gases de efeito estufa (GEE). Uma pequena fração atravessa a camada perdendo-se no espaço (seta alaranjada), mas boa parte fica retida proporcionando o efeito estufa essencial para a vida na Terra.

Ilustração: Fabio Noleto

Fluxo de carbono

Fluxo natural de carbono é a quantidade de carbono trocada, de várias maneiras, entre os reservatórios ou compartimentos de carbono da Terra - oceanos, atmosfera, solos e vegetação. O maior reservatório de carbono está representado pelos oceanos, seguido pelas formações fósseis ou geológicas (Figura 2). As formações fósseis contêm 4000 petagramas (Pg) de C referentes ao carvão mineral, 500 Pg C do petróleo e 500 Pg de C do gás natural.

Por outro lado, devido às atividades promovidas pelos seres humanos ou antropogênicas, os fluxos atuais de carbono estão alterados pela queima de diesel e gasolina pelos automóveis, caminhões e aviões, pelo consumo de gás natural e carvão mineral por termelétricas e pelo desmatamento e queimadas de florestas e, na agropecuária (Smith et al., 2008), pela adubação mineral nitrogenada, emissão de metano pelos cultivos irrigados por inundação (ex. arroz irrigado) e pela criação animal, principalmente bovinos. Praticamente a metade das emissões antropogênicas de CO₂ ocorridas entre 1750 e 2011 ocorreram nos últimos 40 anos (IPCC, 2014).

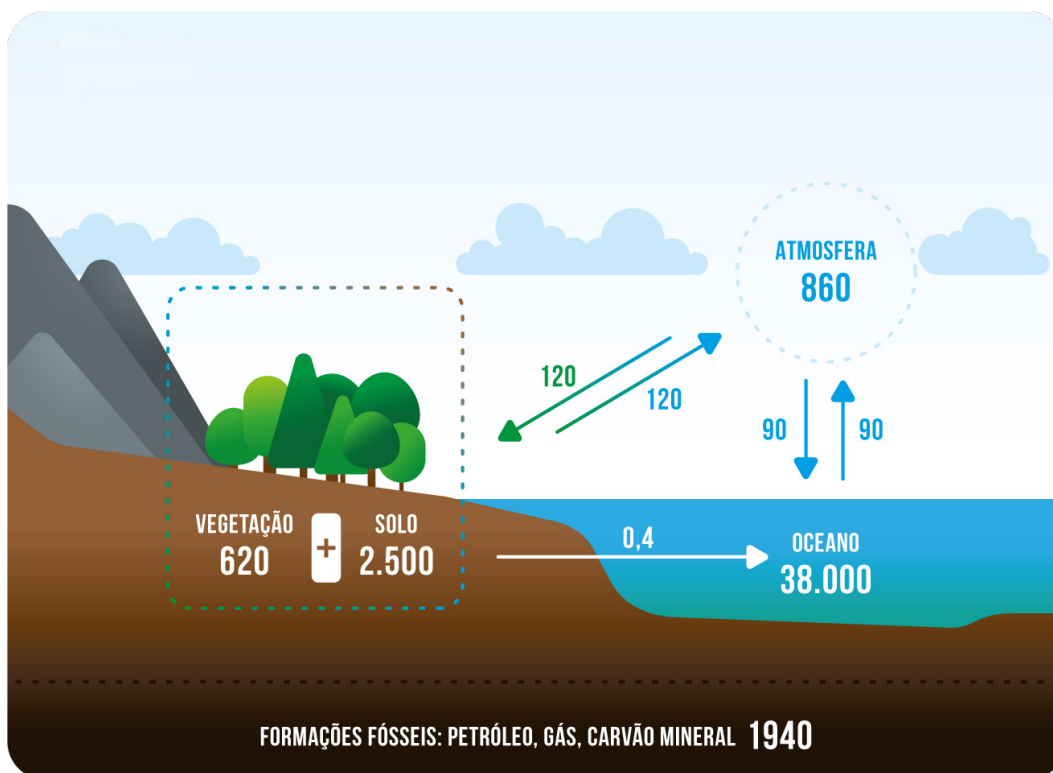


Figura 2. Diagrama demonstrando o ciclo global do carbono com estoques (em petagramas de carbono ou 1 bilhão de quilo de carbono) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos aproximados de carbono (em petagramas de carbono por ano).

Fonte: adaptado de Lal (1999) e Friedlingstein et al. (2020). Ilustração: Fabio Noletto.

Quanto à erosão hídrica do solo ser fonte ou sumidouro de gases de efeito estufa há controvérsias segundo uma análise ecogeomorfológica (Kirkels et al., 2014). A intensidade da emissão de gases de efeito estufa é maior em solos onde há erosão (Liang et al., 2018). A erosão hídrica do solo é causada pelo impacto direto da gota de chuva na superfície dos solos desprovidos de cobertura vegetal viva ou morta (palhada), causando a ruptura dos agregados do solo e encrostamento da superfície (selamento superficial). Com o selamento superficial, a infiltração de água no solo diminui, promovendo acúmulo de água na superfície que, com a declividade do terreno, forma enxurrada, resultando em sulcos de erosão (Hernani et al., 2002). No processo de erosão há desagregação

do solo resultando em emissões de CO₂ para a atmosfera (Barreto et al., 2009). O material de solo carregado pela enxurrada contém também as sementes e fertilizantes que são levados para rios e lagos, gerando perdas na safra agrícola, poluindo e assoreando rios e lagos e encarecendo o tratamento de água nos municípios (Hernani et al., 2002; Sthiannopkao et al., 2007). As boas práticas agronômicas associadas à agricultura conservacionista, como o sistema plantio direto na palha e a integração lavoura-pecuária-floresta, propiciam adequada produção de alimentos e fibras com níveis mínimos e toleráveis de erosão, pois preconizam a contínua cobertura e proteção do solo com biomassa vegetal (Balbino et al., 2011; Motter; Almeida, 2015).

Sustentabilidade e mudança do clima

No final do século passado, especialmente após a Conferência da ONU para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992 (Eco 92), os alertas lançados e constatações observadas levaram a sociedade a desejar que a intensidade de uso dos recursos naturais disponíveis no planeta ocorra sem comprometer as futuras gerações. A perspectiva na gestão do meio ambiente, que enfatiza a necessidade de conciliar as necessidades econômicas atuais e futuras por meio da conservação ou proteção do meio ambiente, é denominada de desenvolvimento sustentável (Chasek et al., 2010). Outro tema recorrente nos últimos anos, que se tornou crítico, é a questão do controle e diminuição do aquecimento global decorrente do efeito estufa forçado por atividades humanas. Aparentemente, com a criação das três convenções da ONU após a Eco 92, Convenção-Quadro da Mudança do Clima (UNFCCC), Convenção da Proteção da Biodiversidade (CBD) e a Convenção de Combate à Desertificação (UNCCD), que se reúnem, individualmente, a cada ano por meio da Convenção das Partes (COP, sigla em inglês), representantes de governos têm se mobilizado, inclusive com a participação da iniciativa privada (ex. Coalizão Brasil, Clima, Florestas & Agricultura - www.coalizaobr.com.br; The B Team - <https://bteam.org/>), para que políticas públicas sejam implementadas em favor da mitigação/adaptação à mudança do clima e proteção da biodiversidade.

O conceito tradicional de desenvolvimento sustentável, que apareceu pela primeira vez no relatório “Nosso Futuro Comum”, elaborado pela Comissão Brundtland em 1987, destaca a capacidade de um sistema de produzir para atender as necessidades da sociedade atual sem comprometer a capacidade da natureza de atender as necessidades das futuras gerações (WCED, 1987; Ferreira, 2008). Para Michelsen et al. (2016), o conceito de desenvolvimento sustentável é eticamente fundamentado, mas não é resultado de pesquisa científica. O conceito pode ser visto em diferentes graus de importância social, interferência na liberdade e autonomia da vida econômica, bem-estar da humanidade e responsabilidade pelo futuro.

A necessidade da sustentabilidade está consagrada e predomina a convicção de que o desenvolvimento da agricultura deve considerar a proteção dos recursos naturais e a manutenção da qualidade ambiental, pois o sucesso da agricultura e sobrevivência da humanidade depende diretamente do uso e conservação desses recursos. Neste contexto, a ciência tem a incumbência de desenvolver tecnologias que promovam e mantenham a produtividade agrícola com simultânea redução dos impactos na natureza, ofertando práticas conservacionistas capazes de manter a produção agrícola dentro dos limites de degradação suportável ou de baixo impacto, atendendo questões econômicas e sociais e redução das emissões de gases de efeito estufa.

O desafio da compatibilização: produtividade das culturas, mitigação das emissões dos gases de efeito estufa e adaptação à mudança do clima

Alimento é um produto sob crescente aumento da demanda e estreitamente relacionado ao crescimento da população, da renda das pessoas e das mudanças nos hábitos alimentares, como o aumento no consumo de carne vermelha e do desperdício. Aumentar a produção de alimentos para uma população global crescente é um grande desafio e a FAO espera que 77% do aumento da produção venha do aumento das produtividades juntamente com 9% da expansão das áreas cultivadas e 14% do aumento da intensificação dos cultivos, que é a soma de todas as áreas colhidas por planta dividida pela área cultivada (Van der Elst; Williams, 2019).

A mudança do clima vai agravar a disponibilidade de recursos, como solo e água, a perda da biodiversidade e vai intensificar as vulnerabilidades sociais, principalmente em regiões onde a economia é altamente dependente dos recursos naturais, como no Brasil. Aumentar a segurança alimentar e reduzir a desnutrição estão vinculados com a simultânea interrupção ou reversão da degradação dos solos, tanto por serem substratos essenciais para produzir alimentos como por serem um recurso limitado, que deve ser manejado para a adaptação e à mitigação dos impactos da mudança do clima (Kongsager et al., 2016). Mitigação é a intervenção humana para reduzir as emissões ou aumentar a captura ou sumidouro de gases de efeito estufa. Em sistemas controlados por humanos, a adaptação é o processo de ajuste ao clima atual ou esperado para reduzir a vulnerabilidade, abrandar o impacto ou explorar as oportunidades benéficas para os seres vivos e sistemas de produção.

Em 2020, no Brasil, o total de emissões atingiu 2,16 bilhões t de CO_{2eq} contra 1,97 bilhão de t em 2019 (Potenza et al., 2021). Repetindo anos anteriores, o principal fator foi o desmatamento, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado, com 46% do total das emissões, o que equivale a cerca de 998 milhões t de CO_{2eq}. O setor agropecuário veio em segundo lugar, com cerca de 577 milhões t CO_{2eq}, ou seja, 27% do total, seguido pelos setores de energia (geração, transporte, escape de metano na exploração de petróleo e gás natural), com 394 milhões de t CO_{2eq}, de processos industriais (produção de aço, ferro gusa e cimento), com aproximadamente 100 milhões t de CO_{2eq} e, por último, o setor de resíduos (lixões e aterros sanitários), com cerca de 92 milhões t de CO_{2eq} emitidos para atmosfera (Figura 3).

Dentro do setor da agropecuária, cerca de 65% das emissões são provenientes da fermentação entérica (o popular 'arroto do boi', resultado da ruminação ou digestão do capim). No âmbito do setor da agropecuária, os bovinos de corte e leiteiros, que emitem grande quantidade de metano pela fermentação entérica, responderam pela maior parte das emissões da agropecuária, com 373 milhões t de CO_{2eq} (96,9%). Em seguida, vêm os solos sob uso ou com emissões diretas de 166 milhões t de CO_{2eq} gerados pelos dejetos de bovinos a pasto (29% do setor de agropecuária), juntamente com impacto do uso de fertilizantes minerais (ex. ureia; 18% do setor de agropecuária). Por último, como a terceira maior fonte de emissões do setor de agropecuária, a calagem (adubação de correção da acidez por meio de carbonato de cálcio ou magnésio) responde por 13% das emissões do setor de agropecuária.

A calagem é uma prática essencial para o sucesso da agricultura no Brasil e, apesar de gerar 0,13 t de CO₂ por tonelada de calcário dolomítico aplicado no solo (IPCC, 2006), a emissão de GEE pode ser compensada pelo longo efeito residual nas lavouras (superior a 4 anos; Fageria; Baligar, 2008) promovendo maior eficiência de adubos minerais NPK (Vanlawe et al., 2015), maior produção de biomassa e acúmulo de carbono em solos corrigidos em comparação com solos agrícolas sob média a alta acidez (Machado et al., 2021).

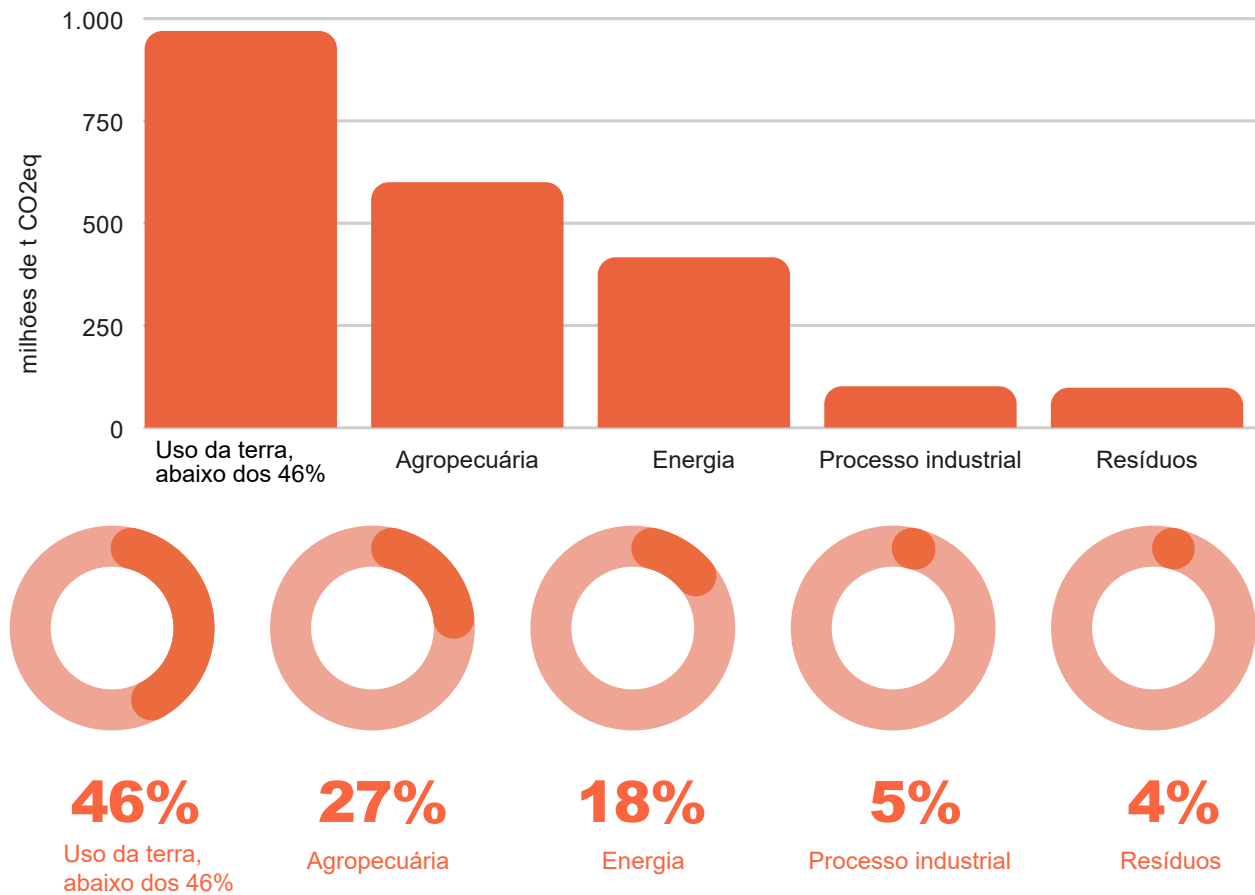


Figura 3. Emissões de gases de efeito estufa do Brasil em 2019 com participação (%) dos diferentes setores no conjunto das emissões brasileiras.

Fonte: adaptado de Potenza et al. (2021).

O cultivo de arroz irrigado por inundação, responsável por cerca de 80% do abastecimento nacional desse cereal, é fonte de emissão de metano, mas a proporção no volume total de emissão de metano do país é inexpressiva (Brasil, 2020). A quantidade de metano emitida por safra de arroz irrigado varia de 250 kg/ha em Goiás a 350 kg/ha no Rio Grande do Sul (Scivitaro et al., 2019). Por outro lado, apesar da menor produtividade, o cultivo de arroz de terras altas, com produtividades de até 4 t/ha, se dá sem necessidade de irrigação por inundação, resultando em baixa emissão de metano e pode ser incluído em esquemas de rotação de culturas em sistema plantio direto (Lacerda; Nascente, 2021).

Papel da pesquisa agrícola e a redução da emissão de gases de efeito estufa

Desde março de 1994, com a implementação da UNFCCC pela sua ratificação por 50 países (em 2009 alcançou 192 países), o tema Mudança do Clima tem chamado atenção das pessoas, especialmente pela divulgação dos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC) e pelos eventos climáticos extremos, como ondas de calor ou de frio, excesso ou ausência de chuva, que se intensificaram, afetando o cotidiano das pessoas e atividades econômicas nas diversas regiões do mundo. Nesse contexto, destaca-se a agricultura por ser bastante vulnerável à mudança do clima (Nelson et al., 2014), inclusive no Brasil, onde a variabilidade e os eventos extremos do clima no período 1979-2008 explicam as flutuações anuais de aproximadamente 800 kg/ha de milho e a variabilidade da produção de arroz entre 25% e 38% e da soja entre 26% e 34% (Assad et al., 2019).

Em 2015, em Paris, França, realizou-se a XXI Conferência das Partes (COP 21) da UNFCCC, que estabeleceu o Acordo de Paris, onde foram delineadas ações que visam manter o aumento da temperatura média global até 2100 bem abaixo de 2 °C, preferencialmente 1,5 °C, em relação aos valores pré-industriais (período entre 1850-1900). O motivo da adoção desse período como referência reside, principalmente, nas menores incertezas da ação humana no aquecimento global (Allen et al., 2018), apesar da Revolução Industrial ter se iniciado na segunda metade do século 18, dando início à forte queima de combustíveis fósseis, como o carvão mineral. Se mantivermos as taxas atuais de emissões de GEEs atingiremos a marca de 1,5° C já em 2040. O Acordo de Paris foi ratificado por 195 países, inclusive o Brasil. O maior desafio é a mudança da matriz energética, baseada em queima de combustíveis fósseis, principalmente petróleo e carvão, setor responsável pelo aumento da concentração de CO₂ de 300 para 412 ppm na atmosfera terrestre desde 1950. A quota de carbono na atmosfera (do inglês 'carbon budget') é a quantidade de CO₂ que podemos emitir dentro do limite do aumento da temperatura em 2°C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2019). O exato tamanho da quota de carbono é ainda impreciso, mas estima-se que a quantidade de CO₂ que ainda se tem para atingir a meta de 1,5°C e 2°C está entre 200 e 800 gigatoneladas (Gt) de CO₂. Mantida a atual taxa de emissão de aproximadamente 40 Gt CO₂/ano, a quota se encerra em pouco menos de 5 a 20 anos, respectivamente a partir de 2015. Essa informação é muito importante para termos ideia do pouco espaço de tempo que temos para emissões adicionais, da importância de cortarmos as fontes atuais de emissão de GEEs (mitigação) e, simultaneamente, ampliarmos o sequestro de carbono, ou seja, a captura de CO₂ da atmosfera incorporando-o a longo prazo a uma biomassa terrestre ou à matéria orgânica do solo na forma de húmus.

Assim, pesquisas científicas devem ser conduzidas para, primeiramente, oferecer informações sobre a quantidade de emissão de GEE que cada prática gera na produção agropecuária, especialmente a adubação com fertilizantes minerais ou orgânicos, o manejo animal com seus resíduos e o uso de insumos de base fóssil (diesel, pesticidas etc). Sabendo-se do tamanho do impacto das práticas agrícolas sobre as emissões, ações de pesquisa podem ser direcionadas para soluções de redução das emissões. O Brasil, pelo seu histórico de Pesquisa & Desenvolvimento em agricultura tropical, tem condições de alavancar a segurança alimentar e, mesmo num sistema bastante limitado quanto a subsídios agrícolas tem contribuído espontaneamente para uma agricultura de sequestro de carbono e de baixa emissão de GEE. Pesquisas iniciadas nos anos 70 resultaram no uso eficiente de corretivos e fertilizantes para diferentes cultivos, uso e conservação do solo e da água com o desenvolvimento do sistema plantio direto para o combate à erosão, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suas variações como ILP (integração lavoura-pecuária), IPF (integração pastagem-florestas) ou ILF (integração lavoura-florestas) e melhoramento genético de plantas e animais, fixação biológica do nitrogênio (FBN) em leguminosas e controle biológico de pragas. Esses são apenas alguns exemplos. O Programa Nacional do Álcool (Proalcool), criado em 1975 para substituir a gasolina pelo etanol da cana-de-açúcar, foi também uma importante contribuição (Vieira Filho; Fishlow, 2017). Embora a produção de bioenergia seja uma relevante contribuição na substituição dos combustíveis fósseis, atenção especial deve ser dada para evitar, por exemplo, o aumento da produção de cana-de-açúcar pela expansão da área de monocultivo, podendo gerar problemas na produção local de alimentos (Caldarelli; Gilio, 2018).

Muito ainda pode ser feito para avançar mais com tecnologias ou práticas que envolvam maior adoção do sistema plantio direto em ILPF, utilização de bioinsumos (ex. bactérias promotoras de crescimento de plantas ou melhor absorção de água, FBN em gramíneas e plantas hospedeiras,

como feijão-comum), consorciação de gramíneas forrageiras com leguminosas para melhor nutrição animal e cultivares mais tolerantes à deficiência hídrica ou altas temperaturas, além da resistência a insetos-pragas e doenças (Pellegrino, 2018). Já em 2009, durante a COP 15 da UNFCCC, realizada em Copenhague, Dinamarca, de maneira voluntária, o Governo do Brasil submeteu o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), parte da Ação de Mitigação Nacionalmente Apropriada (NAMA), que tinha como meta a redução da emissão de 166 milhões t de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ entre 2010 e 2020 (Brasil, 2012). Mais de 15 países tomaram iniciativas similares para a implementação da adaptação e mitigação em larga escala na agricultura como a Austrália (*Australian Carbon Initiative*, com cerca de 200 milhões de dólares australianos), Dinamarca (*Agreement on Green Growth*, com aproximadamente US\$ 2,4 bilhões em seis anos) e China (*Grain for Green*, com cerca de US\$ 29 bilhões em 9 anos) com práticas bem diferenciadas (Cooper et al., 2013).

Logo após submeter sua NAMA, o Governo do Brasil, ainda em 2009, instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima por meio da Lei nº 12.187. Em 9 de dezembro de 2010, foi publicado o Decreto nº 7.390, estabelecendo o Plano ABC e, vinculado a ele, foram criadas linhas de crédito (Programa ABC) disponibilizando financiamento (cerca de R\$ 2,0 bilhões) das práticas selecionadas no âmbito do Plano ABC, com juros mais atrativos e incorporando linhas de crédito do Programa de Incentivo à Produção Sustentável do Agronegócio (Produsa, com cerca de R\$ 1,0 bilhão) e do Programa de Plantio Comercial e Recuperação de Florestas (Propflora) destinadas a finalidades semelhantes e ao mesmo público (Brasil, 2012). O Plano ABC estabeleceu como meta a ampliação da adoção das seguintes práticas ou ações de mitigação e adaptação à mudança do clima: (1) recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas (RPD); (2) implantação de 4 milhões de hectares de Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e dos Sistemas Agroflorestais; (3) adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) em 8 milhões de hectares; (4) ampliação em 5,5 milhões de hectares com aplicação da tecnologia Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); (5) aumento da área de reflorestamento (floresta plantada) em 3,0 milhões de hectares; e (6) tratamento de 4,4 milhões de toneladas de dejetos de animais. Com a implementação dessas ações buscava-se a mitigação das emissões de GEE da ordem de 133,9 a 162,9 milhões de t $\text{CO}_{2\text{eq}}$ até 2020.

Passado o período de 10 anos de implementação da política pública, Manzatto et al. (2020) conduziram uma avaliação sobre o alcance das práticas selecionadas pelo Plano ABC. Observou-se ampliação da ordem de 91 a 114 milhões de hectares, correspondendo entre 93% e 115% da meta compromisso de 33,5 milhões de hectares. No período considerado, houve expansão de 66%, 86% e 45% para RPD, ILP e SPD, respectivamente, com mitigação das emissões variando entre, cerca de 106% e 170% da meta estabelecida (Manzatto et al., 2020). Para TDA, a mitigação das emissões apresentou ampla variação atingindo entre 39% e 103% da meta prevista. No caso da ILPF, a expansão da adoção da prática no período foi de 5,83 milhões de hectares, ou seja, 146% da meta.

Apesar das dificuldades enfrentadas para monitorar a efetiva adoção das práticas do Plano ABC (Gil et al., 2015; Carauta et al., 2021), o Programa ABC gerou estímulos para a maior adoção de sistemas de integração por produtores mais inovadores e pequenos ajustes nos esquemas de financiamento ajudariam bastante na ampliação do uso de práticas mais sustentáveis (Carauta et al., 2018; Cortner et al., 2019). Como consequência, o Plano ABC resultou em motivação para o estabelecimento do Plano ABC+ para o período de 2020 a 2030, como parte da Contribuição

Nacionalmente Determinada (sigla em inglês, NDC) do Brasil no âmbito do Acordo de Paris de 2015 (Brasil, 2021).

As ferramentas de agricultura de precisão têm papel importante em possibilitar melhores condições para a gestão das terras em um cenário de mudança climática. O manejo sítio-específico dos recursos naturais é estratégia bastante útil no aperfeiçoamento da eficiência da aplicação de insumos, especialmente adubos minerais nitrogenados e pesticidas de base fóssil, reduzindo perdas por volatilização de amônia ou desequilíbrio nutricional nas plantas resultantes da aplicação excessiva (Bongiovanni; Lowenberg-Deboer, 2004). Contudo, o nível educacional dos produtores, rentabilidade da produção agrícola e percepção de maior lucratividade são fatores que condicionam a adoção da agricultura de precisão (Tey; Brindal, 2022). No Brasil, em recente levantamento sobre adoção de tecnologias da agricultura digital e percepção dos produtores, constatou-se que 84% dos produtores entrevistados utilizam pelo menos uma tecnologia digital, enquanto o principal benefício se refere ao aumento da produtividade, os custos dos equipamentos e dos programas computacionais, além da conectividade são as principais barreiras (Bolfé et al., 2020).

A inovação tecnológica é reconhecidamente determinante da competitividade de qualquer atividade agrícola ou agroindustrial. Consequentemente, a sustentabilidade de sistemas produtivos depende dos resultados das pesquisas, principalmente daquelas obtidas na fronteira do conhecimento (Clark et al., 2016). E aqui se constata a alta relevância da colaboração científica internacional, especialmente considerando o comércio internacional de vários produtos agrícolas brasileiros constantemente sob risco de sofrerem barreiras não-tarifárias por parte de países importadores. A colaboração científica internacional pode contribuir para a confiança entre as partes (Royal Society, 2010).

De acordo com Wiek e Lang (2016), a ciência da sustentabilidade se diferencia em dois fluxos de pesquisa: (1) o descritivo-analítico e (2) o transformacional. Enquanto o primeiro trata principalmente em descrever e analisar problemas de sustentabilidade conhecendo sua causa, porém sem buscar sobre como intervir para a superação dos desafios, o segundo visa identificar opções de soluções corroboradas por evidências para resolver os problemas enfrentados.

Existem muitas pesquisas no âmbito descritivo-analítico. O maior desafio está na realização das pesquisas transformacionais. Neste caso, devido à complexidade dos problemas, a superação do desafio pela pesquisa transformacional é maior que a descritiva-analítica. Além disso, os resultados sugerindo mudança de procedimentos somente causarão impactos se forem efetivamente adotados. A adoção depende de ações executadas por partes interessadas, pelos atores (do inglês 'stakeholders') que não sejam pesquisadores, o que não ocorre sem gerenciamento e governança para a transição. Wiek e Lang (2016), para ilustrar a diferença entre a pesquisa em sustentabilidade descritiva-analítica e a transformacional, usou as pesquisas sobre mudanças climáticas e relataram o seguinte:

...Muitas pesquisas nessa área abordam fontes de emissão, vias, concentrações atmosféricas de CO₂, mudanças de temperatura e efeitos, como aumento do nível do mar, além de impactos nas sociedades, por exemplo, migração de regiões costeiras. Essa pesquisa aprimora nossa compreensão das complexas relações de causa-efeito no sistema homem-clima. No entanto, ela não fornece nenhum conhecimento sobre o que podemos fazer a fim de mitigar ou adaptar-se às mudanças climáticas de maneira eficaz. O último está sendo buscado em pesquisas transformacionais sobre mudanças climáticas. Aqui, os pesquisadores desenvolvem e testam diferentes estratégias e práticas que podem alterar as fontes de emissão atuais, vias, concentrações atmosféricas de CO₂, mudanças de temperatura, efeitos e impactos que convergem para uma visão sustentável...

A pesquisa agrícola tem tratado o assunto e equacionado as causas das emissões, práticas e condutas que podem reduzir as emissões ou remover o CO₂ da atmosfera. As propostas implicam em mudanças em larga escala na maneira como o mundo produz e consome alimentos, incluindo práticas agrícolas e externas à agricultura. Após, apresenta as causas, consequências e alternativas para redução de efeitos negativos referendados com dados científicos.

Segundo o relatório do IPCC, o uso da terra e a estabilidade climática são fenômenos de equilíbrio delicado: acertar pode reduzir as emissões e criar cobenefícios significativos; errar pode fomentar as mudanças climáticas, gerar insegurança alimentar e agravar os problemas ambientais (IPCC, 2019). Para contribuir visando reduzir emissões e gerar cobenefícios, como a produção de alimentos, o recente Relatório Mundial do WRI apresenta 22 soluções para criar sistemas alimentares e terrestres mais sustentáveis (Searchinger et al., 2019). É possível produzir alimentos contribuindo para a redução da mudança do clima, preservando florestas e com rentabilidade – simplesmente não podemos fazê-lo da maneira como estamos fazendo as coisas agora, ou seja, derrubando florestas nativas para expansão agrícola, preparando o solo com arados e grades sem planejamento conservacionista, persistindo na pecuária sob pastagem degradada e aplicando insumos de modo indiscriminado. O sucesso da 'intensificação sustentável' e intensidade das emissões como uma métrica depende bastante se os ganhos de produtividade caminham lado a lado com as restrições na quantidade total de alimentos produzidos: menos animais, menos área e menores emissões do que mais alimentos em mais áreas e maiores emissões (Leahy et al., 2020). A intensificação sustentável significa aumentar a produtividade agrícola com simultânea melhoria no manejo do meio ambiente. Não quer dizer apenas aumento da produtividade das lavouras e pastagens

A agropecuária como parte da solução do problema

Os ecossistemas terrestres são simultaneamente fonte e sumidouro de gases de efeito estufa. Fonte (do inglês *source*) é quando há liberação de CO₂, N₂O ou CH₄ para a atmosfera, sendo que a origem pode ser natural (ex. vulcões, pântanos) ou antropogênica (ex. combustão de gasolina ou diesel, fertilizantes nitrogenados) e sumidouro (do inglês 'sink') quando há redução da concentração de gases de efeito estufa, principalmente CO₂, na atmosfera por meio da captura do GEE, transformando-o, por exemplo, em estruturas vegetais via fotossíntese (Tian et al., 2016). Entre 2010 e 2019, as emissões anuais de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis e mudança de uso da terra foram de 10,9 Gt CO₂ enquanto que as remoções pelos oceanos e componentes terrestres foram de 5,9 Gt CO₂ (Friedlingstein et al., 2020). Portanto, a agricultura é essencial, seja por participar da solução do problema, seja por ofertar alimentos de maneira simultânea. Ressalta-se que a agricultura também é vítima, pois é vulnerável à mudança do clima. Salienta-se a vulnerabilidade nas principais regiões produtoras de grãos no Centro-Oeste e região do MATOPIBA - acrônimo formado com as iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Zilli et al., 2020), onde o bioma Cerrado é predominante.

É muito importante, contudo, zerarmos o desmatamento ou evitarmos a conversão de florestas nativas ou de solos nunca antes cultivados destinando-os para a agricultura ou pecuária. Esses solos sob vegetação nativa são uma reserva natural de carbono acumulado ao longo de milhares de anos, além de possuírem enorme riqueza em biodiversidade. Em 2019, os elevados índices de desmatamento, juntamente com as emissões da agropecuária brasileira, responderam por 72% das emissões totais do país. Isso significa que, após dez anos de política de clima, o Brasil ainda apresenta emissões de antes da adoção da política de combate à mudança do clima (Albuquerque

et al., 2020). O manejo adequado dos solos cultivados, principalmente de áreas já transformadas e cultivadas até 2008, pode contribuir bastante para que sejam sumidouros, ou seja, sequestrando CO₂ da atmosfera na forma de matéria orgânica e biomassa.

Boas práticas agrícolas consagradas há anos pela ciência, como a agricultura conservacionista (ex. sistema plantio direto na palha com rotação de culturas envolvendo plantas de cobertura e adubos verdes para solo coberto ano todo, terraceamento, ILPF com suas variações, uso de bactérias fixadoras de nitrogênio para as culturas e manejo integrado de pragas com uso de controle biológico) são condutas que possibilitam a mitigação das emissões de GEE e a adaptação à mudança do clima (Burke; Lobell, 2010; Komarek et al., 2021).

A partir de 2015, especificamente com o lançamento da Iniciativa 4 por 1000 – Carbono do Solo em prol da Segurança Alimentar e Mudança do Clima, o sequestro de carbono pelo solo agrícola passou a ser considerado nas contabilizações do balanço de carbono, que é a diferença entre a fonte e o sumidouro num sistema de produção (Minasny et al., 2017; Rumpel et al., 2020). A referência 4 por 1000 diz respeito à proposta do projeto de aumentar em uma taxa anual de 0,4%, que equivale 4 em 1000, o estoque de carbono orgânico nos solos cultivados a uma profundidade de 40 cm. Essa taxa corresponderia atualmente à emissão mundial de dióxido de carbono (CO₂) em um ano.

No Brasil, o balanço entre sumidouros de carbono (ex. florestas plantadas, lavouras sob sistema plantio direto, pastos bem manejados, ILPF) e fontes de emissão (ex. lavouras sob aração e gradagens, pastagens degradadas) resultou em remoção líquida de 39,7 t CO_{2eq}. Importante destacar que Latossolos argilosos possuem significativa capacidade de acumular mais carbono em profundidade, variando entre 55,8 t C/ha (0-20 cm) e 176,1 t C/ha (0-100 cm) sob plantio direto com rotação de culturas envolvendo plantas de cobertura e leguminosas (Boddey et al., 2010) e entre 62,0 t C/ha (0-30 cm) e 128,3 t C/ha (0-100 cm) sob integração lavoura-pecuária-floresta (Oliveira et al., 2018).

Na Figura 4 ilustra-se a pastagem degradada com indicação de fontes de emissão e de sumidouro de GEE, onde se observa a dificuldade do animal em se alimentar da baixa produção de forragem, que não favorece o sequestro de carbono pelo solo e resulta em baixa produção de leite com simultânea alta emissão de GEE. Situação similar ocorre em pastagens degradadas de bovinocultura de corte, em que os animais, por não terem quantidade suficiente de forragem, podem emitir mais GEE por quilo de carne produzido em um longo tempo para o abate dos animais, chegando a superar 36 meses (Cardoso et al., 2016). Por outro lado, na Figura 5, observam-se os benefícios da recuperação de um pasto degradado quanto à capacidade de acumular carbono, favorecendo um balanço de carbono tendendo a zero ou até mesmo negativo (Madari et al., 2018) num sistema de integração lavoura-pecuária de seis anos de condução.

Nesse sentido, como descrito anteriormente, políticas públicas, como o Plano ABC, lançado em 2009, têm sua continuidade garantida como Plano ABC+ para o período 2020-2030. O plano para uma agricultura de baixa emissão de C (ABC+) preconiza promover a adoção de boas práticas agronômicas mitigadoras da emissão de GEE junto aos agricultores e pecuaristas, levando em conta os diversos elementos da paisagem rural. Será incentivador da adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis (SPSABC), enfatizando eficiência agropecuária com estímulo à regularização ambiental, conservação do solo e da água e proteção à biodiversidade (Brasil, 2021).

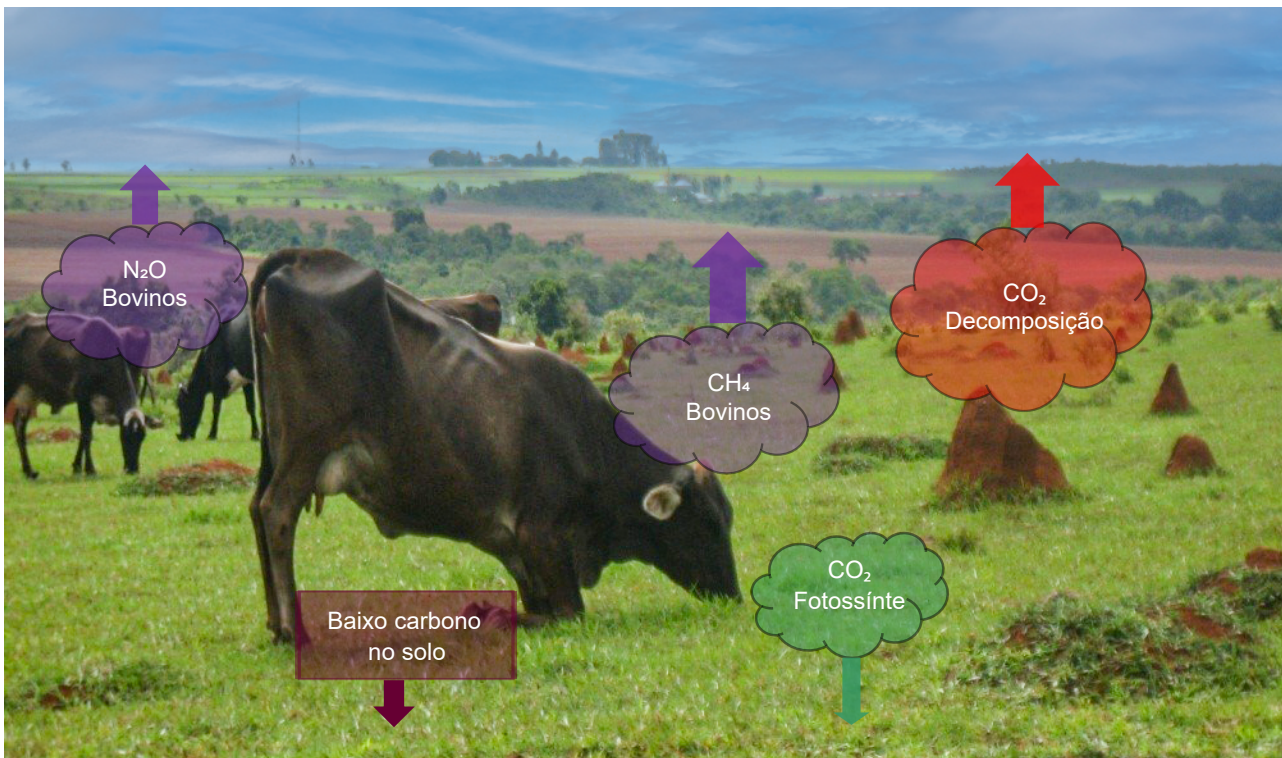


Figura 4. Pastagem degradada sob bovinocultura de leite no bioma Cerrado ilustrando fontes (cor roxa e vermelha) e sumidouros (cor verde e marrom) de GEEs. O tamanho das setas indica a magnitude do sequestro e emissões.

Foto: Embrapa

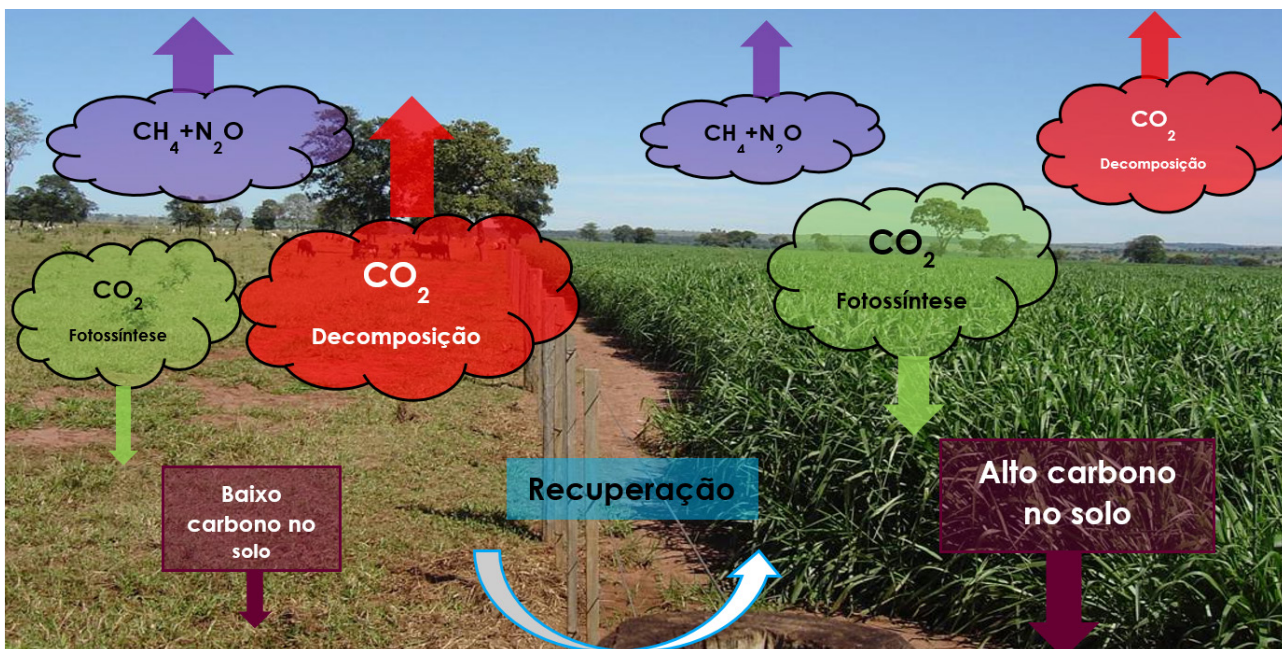


Figura 5. Pastagem degradada (à esquerda) e recuperada (à direita) ilustrando fontes (cor roxa e vermelha) e sumidouros (cor verde e marrom) de GEEs. O tamanho das setas indica a magnitude do sequestro e emissões.

Fonte: Embrapa

Grosso modo, eficiência significa fazer mais com menos. As relações de eficiência mais comuns são: uso eficiente da água (R\$ ou kg/m³), uso eficiente do solo (R\$ ou kg/ha ou produtividade), uso eficiente de nutrientes (R\$ ou kg/kg N), intensidade de emissão (R\$ ou kg/CO_{2eq}). Por outro lado, a intensificação é o processo de aumento da eficiência. FAO (2004) define a intensificação

agropecuária como um aumento na produção agrícola (as saídas) por unidade de insumos usados ou aplicados (fertilizantes, água, sementes, dinheiro, tempo ou ração). A agricultura de alto uso de insumos pode ser menos eficiente do que a agricultura de baixo uso de insumos (mas de alta intensidade de conhecimento, gestão) que pode produzir a mesma quantidade, porém com menor custo de produção.

Política ambiental global: agropecuária brasileira e a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima

Embora o setor de agropecuária tenha relevante participação no equilíbrio climático global, com cerca de 12% das emissões globais de CO_{2eq}, e muitos países, especialmente os menos desenvolvidos, sejam os mais vulneráveis a eventos extremos do clima, como altas temperaturas ou chuvas torrenciais, a agricultura ficou praticamente 'órfã' por 16 anos, vindo a ser incluída nos últimos momentos das atividades do Grupo de Trabalho Ad Hoc da Ação Cooperativa de Longo-Prazo na COP17 em Durban, África do Sul, em 2011 (Matthews, 2021). Agricultura era tratada dentro de temas como a desertificação ou florestas, quando estas últimas são derrubadas para dar lugar à pastagem ou às culturas anuais (Chasek et al., 2010). Embora a agricultura tenha finalmente entrado na agenda da UNFCCC, as negociações têm sido morosas, em grande parte devido à resistência de países em desenvolvimento em discutir mitigação em um setor que tem pesada contribuição no perfil das emissões desses países e à importância da segurança alimentar que os motiva a dar ênfase na adaptação à mudança do clima (Matthews, 2021).

Em 2017, durante a COP23 presidida pelas Ilhas Fiji, foi adotado o Grupo de Trabalho em Agricultura de Koronivia (KJWA) que reconhece o potencial singular da agricultura na questão da mudança climática. O KJWA trata de seis tópicos relacionados entre si: solos, uso de nutrientes, água, pecuária, métodos para avaliar a adaptação e as dimensões socioeconômicas e de segurança alimentar da mudança do clima. Em relatório recente, o Brasil é mencionado pelo sucesso obtido no aumento das produtividades dos cultivos com base na Ciência e em políticas públicas bem direcionadas e coerentes que, em 50 anos, resultaram em notável desenvolvimento agropecuário. Entre 2004 e 2012, antes do aumento recente das taxas de desmatamento, o Brasil já havia demonstrado que é possível implementar políticas públicas com organização institucional para o equilíbrio entre o desenvolvimento agropecuário e a proteção das florestas (Cohn et al., 2014; Assunção et al., 2015; Messias et al., 2021).

Importante lembrar que embora a agropecuária brasileira tenha obtido grandes avanços no âmbito da inovação e competitividade, há regiões ainda carentes e existem desigualdades produtivas (Vieira Filho; Fishlow, 2017). O Brasil, juntamente com Grupo 77 + China¹, apesar da desafiadora articulação de grupo tão amplo, tem se esforçado na promoção e intercâmbio de soluções tecnológicas com mobilização de apoio financeiro. Em novembro de 2021, em Glasgow, durante a COP26 da Convenção do Clima, não se chegou a uma sugestão de acordo para consideração e adoção pelas Partes no âmbito do KJWA. Portanto, as negociações deverão continuar para a COP27 em Sharm El-Sheikh, Egito, em 2022.

O Acordo de Paris, implementado em 2016, é um acordo histórico, pois promoveu sensível mudança no formato das negociações na UNFCCC, não trabalhando mais com a divisão entre o grupo de países ou partes do Anexo I e o grupo Não-Anexo I. O acordo introduziu um procedimento no qual

¹ Grupo dos 77 e China: criado em 1964 no âmbito da Conferência da ONU para o Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) é um grupo de negociação política nas negociações na UNFCCC e em todos os organismos da ONU, cujos membros possuem interesses comuns. Atualmente consiste de 134 países membros e o Brasil faz parte (<https://www.g77.org>).

mais de 190 países devem reduzir gradativamente suas emissões buscando alcançar a neutralidade climática ou um balanço entre emissões e remoções de CO_{2eq} em 2050 (UNFCCC, 2021). A cada 5 anos, os países signatários devem apresentar relatórios contendo as reduções alcançadas nas emissões, além das medidas adotadas. Para tanto, em 2020, cada país apresentou sua NDC que substituiu a pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) para 2030. Entretanto, as novas metas apresentadas dificilmente nos manterão abaixo de 1,5 °C. Houve várias submissões de novas NDCs, inclusive do Brasil, pouco antes do início da COP26 de Glasgow. Contudo, em 4 de novembro de 2021, uma análise atualizada realizada pelas Nações Unidas revelou que, mesmo com a implementação na sua totalidade tanto das NDCs novas como as existentes, as emissões se elevarão em aproximadamente 14% até 2030 e que estaremos no caminho do catastrófico aquecimento de 2,7 °C no final deste século (Åberg et al., 2021).

Embora o Acordo de Paris reafirme a necessidade do apoio financeiro em torno de 100 bilhões de dólares provenientes, principalmente, de países ricos para as ações de mitigação e adaptação em países mais vulneráveis, esses últimos anseiam por maiores investimentos em adaptação, contrariando maior interesse de países ricos em priorizar a mitigação. O motivo dessa controvérsia reside no posicionamento de países vulneráveis e mais necessitados sobre a maior responsabilidade na mitigação das emissões por parte dos países mais ricos. Como os países mais vulneráveis já sofrem as consequências da mudança do clima, eles defendem priorização para financiamento da adaptação à mudança do clima, principalmente para o setor da agricultura. Discussões em torno do financiamento tiveram destaque na COP26, mas ainda não ficou claro quando o montante de 100 milhões de dólares será alcançado (Åberg et al., 2021).

Durante a COP26 da Convenção do Clima em Glasgow, Escócia, houve avanços para o conjunto de regras no âmbito do Acordo de Paris (COP25), especificamente o Artigo 6, que lida com a cooperação internacional para o alcance dos objetivos climáticos, incluindo a criação de um Livro de Regras (do inglês 'framework') para o mercado internacional de carbono. De acordo com Matthews (2021), o Artigo 6 cobre três diferentes mecanismos internacionais de cooperação:

Mecanismo que permitiria um país que tenha superado suas metas de redução de emissão de GEE vender para outra nação que necessite cumprir com sua meta de redução;

Mecanismo para novo mercado internacional de carbono denominado Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (SDM), gerenciado por um órgão das Nações Unidas para a negociação das reduções de emissões obtidas em qualquer região no mundo, seja do setor público ou do setor privado;

O terceiro mecanismo consistiria de um esquema para cooperação entre países em que nenhuma comercialização de créditos de carbono estaria envolvida como, por exemplo, auxílios ao desenvolvimento.

Apesar do Artigo 6 não mencionar diretamente a Agricultura, a introdução de mecanismos de negociação de emissões internacionais bastante amplos pode dar margem para a inserção da Agricultura e Carbono dos Solos, considerando o alto potencial para demonstrar redução nas emissões e sequestro de carbono.

Termos para se familiarizar

Para acadêmicos, pesquisadores, extensionistas, agentes financeiros, consultores e agricultores, a mudança do clima e a economia de baixa emissão de carbono vêm preenchendo de modo marcante a agenda de trabalho nos últimos anos. A sociedade tem demandado esclarecimentos sobre a

contribuição dos diferentes setores produtivos, incluindo a pesquisa e o desenvolvimento, para a superação do desafio da Mudança do Clima. Assim, o significado de algumas expressões ou jargões é essencial para comunicação clara e precisa (UNFCCC, 2006; Ambrizzi; Araújo, 2014; IPAM, 2015). Apesar do despertar generalizado para as questões relacionadas com o desenvolvimento sustentável e mudança do clima, observa-se certo desconhecimento teórico básico e dos termos técnicos utilizados no meio acadêmico e que estão também presentes na mídia em geral (Folha de São Paulo, 2021). Esse fato dificulta à compreensão da mudança do clima e suas consequências para a agricultura brasileira. Abaixo, seguem significados de alguns termos com tradução para o inglês e suas siglas:

Ações de mitigação nacionalmente apropriadas (*Nationally Appropriate Mitigation Action - NAMA*): É o nome dado às metas voluntárias de corte de emissões propostas pelos países no Acordo de Copenhague em 2009 (COP 15), que deverão ser implementadas até 2020. A NAMA do Brasil foi inscrita na Política Nacional sobre Mudança do Clima, lei de 2009, que determina que o país deverá reduzir suas emissões em 36,1% a 38,9% em relação ao que emitiria em 2020 se nada fosse feito. Aqui entra o Plano ABC do MAPA, em que se prioriza o financiamento da produção agropecuária de baixa emissão de carbono, estimulando o manejo conservacionista do solo. Em 2015, na COP 21 de Paris, NAMAS passaram a ser denominadas NDC que todos os países deveriam apresentar em 2020 no âmbito do Acordo de Paris e com relatórios a cada 5 anos sobre cumprimento de metas de redução de emissões.

Análise do ciclo de vida - ACV (*Life Cycle Assessment - LCA*): Método para avaliar impactos ambientais com base na contabilidade de materiais e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente durante todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de recursos naturais, incluindo os processos de transformação e de transporte, até a fase de uso e disposição final do produto (Barizon et al., 2021). No Brasil está normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT ISSO 1440:2009 e ABNT ISSO 14044:2009). A diferença entre ACV e Pegada de Carbono reside nas categorias de impacto avaliadas pelos dois métodos. A Pegada de Carbono é dedicada a uma categoria de impacto ambiental apenas: emissões de gases de efeito estufa em $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Por outro lado, a ACV considera mais categorias de impacto como, por exemplo, o potencial de acidificação (soma das emissões de NH_3 , NO_x e SO_x ao longo do ciclo de vida) e o potencial de eutrofização (soma de fluxos de nitrogênio para o lençol freático ou corpos d'água).

Biodiversidade (*Biodiversity*): Biodiversidade (a contração da “diversidade biológica”) é um termo usado para descrever a totalidade e variedade da vida na Terra. Formalmente, a Convenção sobre Diversidade Biológica define biodiversidade como “a variabilidade entre organismos vivos de todas as fontes, incluindo ecossistemas terrestres, marinhos e outros ecossistemas aquáticos, e os complexos ecológicos dos quais fazem parte; isso inclui diversidade dentro de espécies, entre espécies e de ecossistemas. Essa visão agora é geralmente aceita e podemos considerar três níveis de biodiversidade: diversidade genética, diversidade de espécies e diversidade de ecossistemas.

Biosfera (*Biosphere*): Parte do sistema do Planeta Terra englobando todos os ecossistemas e organismos vivos na atmosfera, na biosfera terrestre ou nos oceanos (biosfera marinha), incluindo matéria orgânica em decomposição como a liteira, matéria orgânica do solo e detritos oceânicos.

Carbono neutro (*Carbon neutral*): Ser neutro em carbono refere-se à condição equivalente a um resultado de carbono zero, equilibrando a quantidade de carbono na forma de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ emitida com a quantidade sequestrada ou removida da atmosfera. Portanto, torna-se carbono neutro quando, grosso modo, um processo ou uma atividade possui ‘zero’ de liberação de carbono, pois esse processo ou atividade tem seu carbono liberado compensado ou neutralizado pela mesma

quantidade de carbono sequestrada por outro processo ou atividade. Vale lembrar que o mais efetivo combate ao aumento da concentração de GEE na atmosfera é evitar a sua emissão (perda de outros compartimentos para a atmosfera). A compensação (neutralização) da emissão nunca é tão eficiente quanto evitar a emissão, porque uma vez que o GEE é emitido, terá seu impacto negativo. Entretanto, medidas de neutralização contribuem para a mitigação (diminuição) do efeito negativo da emissão de GEE.

Ciclo de carbono (*Carbon cycle*): Consiste na passagem do carbono sob diferentes formas por três grandes compartimentos de carbono ligados entre si pela movimentação do carbono de um compartimento para outro. Os principais compartimentos são: (1) os Oceanos e os Sedimentos (compartimentos geológicos - jazidas de petróleo, gás natural, xisto etc.); (2) a Biosfera Terrestre (ou Ecossistemas Terrestres - solo e vegetação); e (3) a Atmosfera. A movimentação de carbono entre esses grandes compartimentos ocorre por meio de uma gama de processos químicos, físicos, geológicos e biológicos. O Oceano é a maior fonte de carbono no ciclo. O carbono presente nos sedimentos se movimentam e passam para a Atmosfera ou Biosfera Global principalmente quando extraído pelo homem na forma, por exemplo, de petróleo ou gás natural para produção de energia.

Combustíveis fósseis (*fossil fuels*): Depósitos subterrâneos contêm combustíveis fósseis que se formaram a partir da decomposição de plantas e animais que viveram há cerca de 300 milhões de anos. Carvão mineral, petróleo, gás natural ou gás liquefeito de petróleo, óleo ou gás de xisto são todos combustíveis fósseis e são consideradas fontes não-renováveis de energia. A queima de combustíveis fósseis atualmente é responsável por mais de 85% da demanda energética da sociedade moderna. Com a queima de combustíveis fósseis liberamos CO₂ extra na atmosfera, que até então estava “enterrado” e inativo, e que liberado para a atmosfera contribui, em grande parte, ao superaquecimento da atmosfera do planeta.

Compensação de carbono (*Carbon offset*): É uma transação contábil em que uma redução ou sequestro de emissões de carbono em um ponto substitui teoricamente a produção e emissão de carbono em outro ponto, para que o resultado reflita uma redução de carbono liberado na atmosfera.

Conferência das partes - COP (*Conference of the Parties - COP*): É uma instância suprema de tomada de decisão da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC), também conhecida como UNFCCC (do original em inglês United Nations Framework Convention on Climate Change). A CQNUMC é resultante de um tratado internacional da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, conhecida como a Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro em 1992. As quatro primeiras reuniões da COP foram realizadas anualmente. A partir da quinta reunião, a COP passou a se reunir de dois em dois anos. Trata-se de reunião de grande porte que conta com a participação de delegações oficiais dos 188 membros da Convenção sobre Diversidade Biológica (187 países e um bloco regional), observadores de países não-parte, representantes dos principais organismos internacionais (incluindo os órgãos das Nações Unidas), organizações acadêmicas, organizações não governamentais, organizações empresariais, lideranças indígenas, imprensa e demais observadores.

Créditos de carbono (*Carbon credits*): São direitos ou permissões negociáveis de emissões que funcionam sob o Sistema cap and trade. Por exemplo, uma empresa que tem como meta reduzir 20 toneladas de equivalente de carbono e reduza 30 toneladas, essa empresa pode gerar dez toneladas de crédito de carbono para negociação.

Desmatamento (*Deforestation*): É a conversão de áreas florestais em terras não florestais para uso agrícola, pastagem, urbanização ou especulação imobiliária (área sem nenhuma atividade

econômica onde o proprietário aguarda pagamento pela eventual desapropriação). Geralmente, a remoção ou destruição da cobertura florestal resulta em um ambiente degradado com biodiversidade reduzida.

Dióxido de carbono (*Carbon dioxide*): Fórmula química: CO_2 é uma substância química composta de dois átomos de oxigênio ligados a um átomo de carbono. Também chamado de gás carbônico ele é um importante gás de efeito estufa devido ao fato de transmitir a luz visível, mas absorver ou capturar fortemente a radiação infravermelha. Todos os animais, seres humanos, plantas, fungos e microrganismos produzem gás carbônico pela respiração. As plantas e algas, todavia, utilizam gás carbônico durante a fotossíntese gerando oxigênio, tecido vegetal, madeira ou palha. A queima de combustíveis fósseis (gasolina, diesel, gás natural ou GLP) ou da biomassa vegetal gera gás carbônico como subproduto. A presença do CO_2 na atmosfera é natural e é necessário, pois sem ele a vida terrestre como é não existiria. É um gás necessário para a fotossíntese das plantas e também para manter uma temperatura média da superfície terrestre adequada para a vida. O Planeta levou bilhões de anos para chegar ao equilíbrio climático que propiciou o desenvolvimento de biomas tais como conhecemos, com padrões climáticos específicos mantidos pela interação solo-seres vivos-atmosfera. Atualmente, entretanto, o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera tem provocado tanto desequilíbrio em processos fisiológicos das plantas (fotossíntese, respiração) quanto o superaquecimento da atmosfera, com consequentes desequilíbrios climáticos.

Ecossistema (*Ecosystem*): Todos os organismos em uma determinada área, juntamente com o ambiente físico com o qual eles interagem (por exemplo, uma floresta, um recife de coral ou uma piscina de rochas) em uma determinada região.

Efeito estufa (*Greenhouse effect*): É o aumento da temperatura na superfície terrestre que ocorre quando os gases de efeito estufa na atmosfera capturam a energia infravermelha do Sol e o irradiam aquecendo o planeta. O efeito estufa é um fenômeno natural que mantém a temperatura média do Planeta em 14 °C, propiciando a presença de água na forma líquida, sólida e gasosa e, assim, a manutenção da vida. Porém, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem afetado o equilíbrio climático.

Equivalente de CO_2 (CO_2eq) (*CO₂ equivalent*): Trata-se de uma unidade normalmente utilizada na contabilização do total de emissões de GEE de uma empresa, um país ou um setor (ex. agricultura, transporte). O $\text{CO}_{2\text{eq}}$ é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEE pelo seu potencial de aquecimento global. O potencial de aquecimento global do metano é 27,9 vezes maior do que o potencial do CO_2 . Assim, o CO_2eq do metano é igual a 27,9. O CO_2eq do óxido nitroso é 273.

Estoque de carbono (*Carbon stock*): A quantidade absoluta de carbono da matéria orgânica viva (biomassa da parte aérea ou no solo) ou em decomposição (palha, substâncias húmicas do solo) presente em determinada área ou volume expressada em Megagramas por hectare (Mg/ha). Um hectare equivale a uma área de um quarteirão (10.000 metros quadrados).

Fluxo ou taxa de carbono (*Carbon flux; carbon rate*): Transferência de carbono de um pool de carbono para outro em unidades de medida de massa por unidade de área e tempo (por exemplo, t/ha/ano de C).

Gases de efeito estufa (GEE) (*Greenhouse gases (GHG)*): São gases na atmosfera da Terra que agem como um 'cobertor', reduzindo a perda de calor para o espaço no Universo e mantendo a temperatura global. Esses gases permitem que o raio solar penetre pela atmosfera livremente. Quando o raio solar atinge a superfície da Terra, uma parte dos raios infravermelhos (calor) é refletida para o espaço, outra parte é capturada pelos GEE, mantendo o calor na atmosfera. Muitos gases exibem essa propriedade

de manter o efeito estufa. Graças ao efeito estufa a temperatura média do planeta se manteve em torno de 14 °C, um ambiente ótimo para o desenvolvimento da vida. Os GEE (gás carbônico, metano, óxido nitroso, vapor d'água ou nuvens) são produzidos naturalmente nos processos de trocas gasosas do ambiente terrestre com a atmosfera, enquanto outros são exclusivamente produzidos pelo homem (os gases usados em aerossóis, como os CFCs: cloro-flúor-carbono, por exemplo).

Gerenciamento baseado em ecossistemas (*Ecosystem based management*): Uma abordagem de gerenciamento que reconhece toda a gama de interações dentro de um ecossistema, incluindo seres humanos, em vez de considerar questões isoladas, espécies ou serviços de ecossistema isoladamente.

Grupo de Trabalho Ad Hoc sobre a Plataforma de Durban para Ação Melhorada ADP (*Ad-hoc working group on the Durban Platform for Enhanced Action ADP*): Trata-se de uma das iniciativas mais importantes no momento. O nome indica o grupo (formado por todos os países) que negociou novo acordo do clima, que foi concluído em Paris na COP 21 em dezembro de 2015, com metas de redução de emissões para todas as nações do planeta, ricos e pobres. O objetivo final do ADP é evitar que o aquecimento da Terra ultrapasse 2 °C no final desse século. Haverá necessidade de aumentar a ambição das metas de redução ('enhanced action') para fechar a lacuna ('gap') entre aquilo que a Ciência recomenda (por meio do IPCC) e a somatória dos esforços atuais de mitigação, que seria capturar entre 8 e 12 bilhões de toneladas de CO₂eq a serem implementados a partir de 2020.

Intensificação sustentável (*Sustainable intensification*): Consiste em práticas ou sistemas agropecuários nos quais a produção é mantida ou aumentada com simultâneo incremento no desempenho dos componentes ambientais (sequestro de carbono, infiltração de água nos solos, proteção dos polinizadores). Essas condutas são adotadas sem desmatamento, expansão ou abertura de novas áreas, prezando pelo aumento ou manutenção da produtividade ou produção por meio da melhoria da eficiência do uso de insumos e recursos naturais no sistema de produção, o que, geralmente, resulta em redução do custo ambiental e econômico.

Limite e comércio de emissões (*Cap and trade system*): Expressão associada a créditos de carbono. É um esquema que permite que as empresas com altas emissões de gases de efeito estufa comprem direitos de emitir gases nocivos no ar de empresas com menos emissões, com o objetivo de reduzir o impacto geral no meio ambiente. Um sistema que limita a quantidade de poluição que as empresas podem produzir. O que significa que uma empresa que reduz sua poluição é recompensada financeiramente. Uma autoridade central (normalmente uma entidade governamental ou internacional) define um limite ('cap') na quantidade de poluentes que pode ser produzido. Empresas ou outros grupos geram créditos que representam um direito ou 'autorização' para liberar uma quantidade específica de poluentes. A quantidade total de créditos não pode exceder o 'cap' ou o limite. Sistemas *cap and trade* trabalham com a ideia de que empresas que precisam aumentar suas emissões devem comprar créditos daquelas que poluem menos. Uma negociação também denominada nesse caso de negociação de emissões - *emissions trade* - se trata da transferência de créditos entre empresas ou organizações. Na prática, o comprador paga por poluir enquanto o vendedor é recompensado por reduzir as emissões.

Limites planetários (*Planetary boundaries*): Conceito desenvolvido em 2009 por um grupo de pesquisadores em 2009 para descrever nove limites biofísicos seguros, os quais o sistema terrestre não pode ultrapassar sem consequências desastrosas: i) mudanças climáticas; ii) Perda da integridade da biosfera; iii) alterações nos fluxos biogeoquímicos - nitrogênio e fósforo; iv) mudança de uso da terra; v) libertação de novas entidades (substâncias sintéticas); vi) carga atmosférica de aerossol (micropartículas emitidas no ar); vii) captação de água doce; e viii) acidificação do oceano; ix) perda de ozônio estratosférico.

Mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) (*Clean development mechanism*): A meta de diminuir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera deu origem à criação do Protocolo de Quioto. Assinado em 1997, o acordo internacional determinou a redução da emissão de gases, estipulando uma redução média de 5,2% entre 2008 e 2012, com base da emissão do ano de 1990. Um novo texto prevê cortes de pelo menos 25% a 40% nas emissões em 2020, sobre os níveis de 1990, para os países desenvolvidos. Longe de atingir as metas propostas, foi definido para os países com esse perfil a possibilidade de adquirir créditos de outros países que tivessem projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O Departamento de Mudanças Climáticas do Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA) explica que o MDL possibilita que países em desenvolvimento se beneficiem das atividades de redução de emissões de gases do efeito estufa, incluindo a posterior venda das Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). Em 2015, na COP 21 de Paris, o MDL foi substituído pelo Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (SDM).

Pegada de carbono (*Carbon footprint*): No âmbito da agropecuária refere-se à contabilização das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) em $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para a produção de 1 kg ou 1 L de determinado produto agropecuário, normalmente abrangendo o processo do 'berço à porteira da propriedade rural' (from cradle to gate). Ou seja, essa contabilização envolve as emissões de GEEs de todos os insumos necessários para a produção na lavoura, desde a fabricação do insumo incluindo (ou não) o transporte da fábrica à propriedade rural. Carmo et al. (2016) apresentaram a pegada de carbono para a produção de 1 kg de feijoeiro comum irrigado em algumas propriedades rurais em Goiás.

Planos nacionais de adaptação (PAN) (*National adaptation plans (NAP)*): Cada país membro da Convenção do Clima deverá adotar compromissos nacionais de adaptação às mudanças climáticas que são inevitáveis e integrá-las no seu planejamento. No Brasil, uma consulta pública sobre o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima permaneceu aberta até 7 de Dezembro de 2015 em <https://mma.gov.br/consultapublicapna/>.

Potencial de aquecimento global (PAG) (*Global warming potential (GWP)*): É uma métrica que estima a contribuição relativa de determinado gás de efeito estufa para o aquecimento global em relação à mesma quantidade de um gás de referência, o CO_2 , cujo PAG é 1. O PAG é calculado sobre um intervalo de tempo específico que deve ser declarado juntamente com o valor de PAG. Por exemplo, o PAG do metano em 100 anos na atmosfera é 27,9 vezes maior do que o PAG do CO_2 . Isso significa que 1 tonelada do metano absorve 27,9 vezes mais radiação do que 1 tonelada de CO_2 num período de 100 anos na atmosfera. O PAG do óxido nitroso (N_2O) é 273.

Pretendida contribuição nacionalmente determinada (*Intended nationally determined contribution (INDC)*): São metas que cada país apresentou durante o ano de 2015 para seu corte de emissões até 2030. As INDC foram baseadas nas NAMAS de Copenhague e representam uma mudança de abordagem na maneira de propor metas: em vez de uma meta geral, determinada pela COP, como foi em Quioto ('top down' - de cima para baixo), agora as metas serão oferecidas pelos países ('bottom up') e somadas para ver se chegam na escala necessária para mitigar o aquecimento global. O nível de ambição das INDC determinará se o planeta terá chance de manter o aquecimento em, no máximo, 2 °C. O I (que significa 'intentioned' ou 'pretendida') do INDC existe para que se dê margem para fazer soma, ver quanto falta para pagar a conta e quem irá colocar mais na mesa - a partir dos critérios de responsabilidade, capacidade e equidade. Em 2015, na COP 21 de Paris, NAMAS passaram a ser denominadas NDC (Contribuições Nacionalmente Apropriadas) que todos os países deveriam apresentar em 2020 no âmbito do Acordo de Paris e com relatórios a cada cinco anos sobre cumprimento de metas de redução de emissões.

Protocolo de Quioto (*Kyoto Protocol*): É um acordo firmado sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Os países que ratificam este protocolo concordam em reduzir suas emissões de dióxido de carbono e cinco outros gases de efeito estufa (GEE) ou comprar compensações se mantiverem ou aumentarem as emissões desses gases. O Protocolo foi adotado em Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997 e promulgado em 16 de fevereiro de 2005 - 180 países ratificaram o tratado até o momento. Apenas 60% dos principais países produtores de gases de efeito estufa estão incluídos entre os 180. Em dezembro de 2007, os EUA não aceitaram o protocolo. O primeiro período de compromisso do Protocolo de Quioto terminou em 2012, mas em maio de 2007 as negociações internacionais sobre compromissos futuros se iniciaram. O Protocolo de Quioto foi extinto em 2015 na COP 21 de Paris.

Recursos naturais (*Natural resource*): São matérias-primas úteis que recebemos da Terra. Eles ocorrem naturalmente, o que significa que os humanos não podem produzir recursos naturais. Em vez disso, usamos e modificamos os recursos naturais de maneiras que são benéficas para nós. Em objetos feitos pelo homem são usados materiais obtidos a partir de recursos naturais. Alguns exemplos de recursos naturais e as formas como podemos usá-los são: ar, animais, carvão, minerais, gás natural, petróleo, plantas, luz solar, água, solos. Os recursos naturais podem ser renováveis e não renováveis. São renováveis, por exemplo, a energia do sol e do vento. O solo, pelo longo tempo que leva para ser renovado, é considerado não renovável. Os não renováveis típicos são o petróleo e minérios em geral.

Redução de emissões por desmatamento e degradação florestal (REDD+) (*Reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+)*): O sinal de mais (“plus”) acrescenta: conservação de estoques de carbono, manejo sustentável de florestas e ampliação dos estoques de carbono de florestas. É a maneira como o desmatamento está tratado no texto do regime futuro do clima, prevendo compensações financeiras para países que, como o Brasil, conseguirem reduzir suas emissões totais cortando a taxa de desmatamento. As ações de REDD+ são consideradas a maneira mais barata e rápida de reduzir as emissões de carbono, razão pela qual a negociação do texto desse mecanismo está bem mais avançada do que a do ADP (definido abaixo). Não há ainda um mercado formal de emissões florestais, mas o Fundo Amazônia do Brasil é um exemplo de REDD+ que funciona com verba de doações internacionais.

Reservatório de carbono (*Carbon pool*): É um compartimento (ex. solo, vegetação, água) que tem capacidade para acumular ou liberar carbono.

Resiliência (*Resilience*): É a capacidade de um sistema - seja floresta, cidade ou economia e seus componentes de antecipar, absorver, suportar, acomodar ou se recuperar de perturbações, como mudanças climáticas, crises financeiras e efeitos da ação de atividades econômicas de maneira oportuna e eficiente, inclusive garantindo a preservação, restauração ou melhoria de suas estruturas e funções básicas essenciais. Os sete princípios são: i) manter a diversidade e a redundância, ii) gerenciar a conectividade, iii) gerenciar variáveis lentas e retroalimentação, iv) fomentar o pensamento complexo de sistemas adaptativos, v) incentivar o aprendizado, vi) ampliar a participação e vii) promover sistemas de governança policêntrica.

Sequestro de carbono (*C sequestration/uptake*): É o processo de aumentar o conteúdo de carbono de um reservatório na Terra que não seja a atmosfera. Ou seja, quando algo está aprisionado em materiais vegetais, como o carbono em árvores ou solos e não está prontamente disponível no ambiente. O termo sequestro de carbono descreve o fato do carbono estar aprisionado ou capturado no tecido vegetal como uma árvore ou na matéria orgânica do solo como substância húmica. A quantidade de carbono retida no solo é cerca de três vezes a quantidade presente na

atmosfera. Por isso, é importante implementar o manejo conservacionista do solo (ex. plantio direto, terraceamento em nível, rotação de culturas com plantas de cobertura, integração lavoura-pecuária-floresta) nas atividades agropecuárias. Manejo conservacionista significa manejar o solo mantendo sua qualidade para que possa exercer sua função em sequestrar carbono (manter ou acumular ainda mais C) ao invés de perder ou lançar mais C para a atmosfera, onde permaneceria como CO₂.

Serviços de ecossistema (*Ecosystem services*): São os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas, por exemplo, fornecimento de água limpa, regulação do clima, polinização de culturas e qualidade de vida ou atendimento das necessidades culturais das pessoas. Cinco etapas da revisão de serviços ecossistêmicos – ESR - são: i) determinação dos limites corporativos; ii) identificação dos serviços ecossistêmicos “prioritários”, iii) análise do status e as tendências nesses serviços do ecossistema, iv) identificação dos riscos e oportunidades de negócios, v) desenvolvimento de estratégias para minimizar os riscos e maximizar oportunidades.

Sumidouro/dreno/dissipador de carbono (*Carbon sink*): Qualquer processo ou mecanismo que remove um gás de efeito estufa, um aerossol ou um precursor de um gás de efeito estufa da atmosfera. Um determinado reservatório (tanque ou piscina) pode ser um sumidouro de carbono atmosférico se, durante um determinado intervalo de tempo, mais carbono estiver fluindo para ela do que saindo dela.

Taxação de carbono (*Carbon taxation*): Refere-se a uma taxa, normalmente anual, aplicada pelo governo para cada tonelada de CO_{2eq} emitido por uma empresa ou atividade regulamentada. A taxa é uma decisão de cada governo e tem por objetivo motivar as reduções nas emissões para o cumprimento das metas estabelecidas nos NDCs dos países. Maiores detalhes podem ser obtidos nos estudos de Mourinho et al. (2003) e Tang et al. (2021).

Tier: Expressão utilizada pelo IPCC para informar o nível de complexidade metodológica para se estimar as emissões de GEE que se dividem em três níveis: *Tier 1*, *Tier 2* e *Tier 3*. A complexidade e, conseqüentemente, a precisão do cálculo aumentam com o aumento do *Tier*. A metodologia considerada *Tier 1* permite calcular as emissões de GEE utilizando-se valores de fatores default (padrão) fornecidos pelo IPCC. Contudo, por serem default, esses fatores possuem incertezas ou foram medidos em ecossistemas bastante distintos e, assim, a precisão das estimativas de emissões de GEE fica comprometida em um país que não possui valores medidos localmente seguindo um método científico para as suas condições de solo e clima. À medida que o país ou uma instituição de pesquisa avança em pesquisas e conhecimento dos processos de emissões de GEE em seus próprios sistemas produtivos, o país não depende mais de fatores *default* e, assim, é considerado que esse país passe a utilizar os níveis *Tier 2* ou *3*. A Embrapa, incluindo a Embrapa Arroz e Feijão, tem gerado resultados de pesquisa para fatores de emissão de fertilizantes nitrogenados para o cultivo de feijão, arroz irrigado e arroz de terras altas.

Vazamento (*leakage*): Significado 1 - Emissões que acontecem quando um projeto de mitigação é implementado em um lugar e as forças econômicas responsáveis pelas emissões neste lugar migram para outro, emitindo a mesma quantidade de carbono. Vazamentos são preocupações constantes em projetos de Uso da Terra, Mudança de Uso das Terras e Florestas (LULUCF) e REDD+ e foram uma das razões pelas quais a redução de desmatamento ficou fora do Protocolo de Quioto. Havia o temor de que, ao cercar uma área de floresta sob risco de derrubada, os exploradores simplesmente migrariam para outro lugar.

Vazamento (*leakage*): Significado 2 - expressão usada quando há uma proposta em construção e, por meio da imprensa, busca-se “testá-la” vazando estrategicamente um documento confidencial de

negociação. Muito comum nas COPs. Na COP 15 em Copenhague houve um texto negociado pela presidência dinamarquesa da COP15 com alguns países industrializados, sem consulta a outros países. Isso vazou para o jornal The Guardian da Grã-Bretanha e causou uma crise na COP15 sepultando a liderança política dos dinamarqueses.

White paper: Trata-se de um relatório ou guia oficial que informa os leitores, de maneira concisa, sobre um assunto complexo e apresenta a filosofia do órgão emissor sobre o assunto. Destina-se a ajudar os leitores a entender um problema, resolver um problema ou tomar uma decisão. Esse instrumento é utilizado pela COP para lançar um debate com membros buscando facilitar um consenso. Na COP isso acontece quando um país ou uma parte busca colocar uma ideia em discussão apresentando-a a outras delegações para checar se a ideia tem chance de ser acatada. Se uma proposta é ousada demais, ela pode ser vazada e ser difundida pelos meios de comunicação, especialmente mídias sociais.

Agradecimentos

Estão reunidas aqui informações organizadas no âmbito do Projeto IntegraC – Tecnologias para Sequestro de Carbono em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Cerrado - Embrapa SEG 20.18.03.043.00.00 e do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, financiado pela Cooperação Técnica aprovada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) com recursos do Financiamento Internacional do Clima do Governo do Reino Unido, tendo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como beneficiário institucional. O Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) é o responsável pela execução e administração do projeto e a Associação Rede ILPF, por meio da Embrapa, é a responsável pela coordenação científica e apoio técnico.

Referências

- ÅBERG, A.; BENTON, T. G.; FROGGATT, A.; GIRITHARAN, A.; JEFFS, N.; QUIGGIN, D.; TOWNED, R. **COP26:** what happened, what does this mean, and what happens next?: summary analysis. London: The Royal Institute of International Affairs, 2021. 15 p. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2021/11/cop26-what-happened-what-does-mean-and-what-happens-next>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- ALBUQUERQUE, I.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T.; BARCELLOS, F.; COLUNA, I.; COSTA JUNIOR, C.; CREMER, M.; PIATTO, M.; POTENZA, R.; QUINTANA, G.; SHIMBO, J.; TSAI, D.; ZMBRES, B. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019.** 2020. SEEG 8. Disponível em: <http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>. Acesso em: 14 jul. 2021.
- ALLEN, M. R.; DUBE, O. P.; SOLECKI, W.; ARAGÓN-DURAND, F.; CRAMER, W.; HUMPHREYS, S.; KAINUMA, M.; KALA, J.; MAHOWALD, N.; MULUGUETTA, Y.; PEREZ, R.; WAIRIU, M.; ZICKFIELD, K. Framing and context. In: MASSON-DEMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; XHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUNA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; XHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (ed.). **Global warming of 1.5°C:** an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/download/#full>. Acesso em: 15 abr. 2022.
- AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. (ed.). **Base científica das mudanças climáticas:** primeiro relatório de avaliação nacional. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. v. 1, 464 p.
- ANGELO, C.; RITTL, C. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil 1970-2018.** 2019. SEEG 7. Disponível em: <http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>. Acesso em: 23 dez. 2021.
- ASSAD, E. D.; COSTA, L. C.; MARTINS, S. C.; CALMON, M.; FELTRAN-BARBIERI, R.; CAMPANILLI, M.; NOBRE, C. A. **Papel do Plano ABC e do PLANAVEG na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas.** São Paulo: WRI Brasil, 2019. 46 p. Working paper. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205832/1/WorkingPaper-MudancasClimaticas.pdf>.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: prices or policies? **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 6, p. 697-722, Dec. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1355770X15000078>.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 132 p. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103901/1/balbino-01.pdf>.

BARIZON, R. R. M.; MATSUURA, M. I. S. F.; SCACHETTI, M. T.; SILVA, G. B. S.; COSTA, M. P.; GAROFALO, D. F. T.; LANES, V. F.; PICOLI, G.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MORANDI, M. A. B. **Modelo PestLCI: parametrização para os cenários brasileiros de produção agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. 30 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 132). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134598>.

BARRETO, R. C.; MADARI, B. E.; MADDOCK, J. E. L.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; FRANCHINI, J.; COSTA, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 132, p. 243-251, Aug. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.008>.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784-795, Feb. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02020.x>.

BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I. D.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C.; VICTORIA, D. C.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; FERREIRA, V. R.; RAMIREZ, A. R. Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. **Agriculture**, v. 10, n. 12, p. 1-16, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10120653>.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 359-387, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.a>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília, DF, 2012. 172 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo**. Brasília, DF, 2021. 28 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta comunicação nacional do Brasil à convenção - quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2020. 516 p.

BUCKWELL, A.; UHRE, A. N.; WILLIAMS, A.; POLAKOVA, J.; BLUM, W. E.; SCHIEFER, J.; LAIR, G. J.; HEISSENHUBER, A.; SCHIEßL, P.; KRÄMER, C.; HABER, W. **The sustainable intensification of European agriculture: a review sponsored by the RISE Foundation**. 2014. Disponível em: http://www.risefoundation.eu/images/files/2014/2014_%20SI_RISE_FULL_EN.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

BURKE, M.; LOBELL, D. Food security and adaptation to climate change: what do we know? In: LOBELL, D.; BURKE, M. (ed.). **Climate change and food security: adapting agriculture to a warmer world**. Dordrecht: Springer, 2010. p. 133-153. (Advances in global change research, 37). DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2953-9_1.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264-274, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.008>.

CARAUTA, M.; LATYNSKIY, E.; MÖSSINGER, J.; GIL, J.; LIBERA, A.; HAMPF, A.; MONTEIRO, L.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Can preferential credit programs speed up the adoption of low-carbon agricultural systems in Mato Grosso, Brazil? Results from bioeconomic microsimulation. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 117-128, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1104-x>.

CARAUTA, M.; TROOST, C.; GUZMAN-BUSTAMANTE, I.; HAMPF, A.; LIBERA, A.; MEURER, K.; BÖNECKE, E.; FRANKO, U.; RODRIGUES, R. A. R.; BERGER, T. Climate-related land use policies in Brazil: how much has been achieved with economic incentives in agriculture? **Land Use Policy**, v. 109, 105618, Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105618>.

CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEM, A.; ALVES, B. J. R.; CARVALHO, I. N. O.; SOARES, L. H. B.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86-96, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007>.

- CARMO, H. F.; MADARI, B. E.; WANDER, A. E.; MOREIRA, F. R. B.; GONZAGA, A. C. O.; SILVEIRA, P. M.; SILVA, A. G.; SILVA, J. G.; MACHADO, P. L. O. A. Balanço energético e pegada de carbono nos sistemas de produção integrada e convencional de feijão-comum irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 7, p. 1069-1077, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900006>.
- CHASEK, P. S.; DOWNIE, D. L.; BROWN, J. W. **Global environmental politics**. 5th ed. Boulder: Westview Press, 2010. 473 p.
- CLARK, W. C.; TOMICH, T. P.; VAN NOORDWIJK, M.; GUSTON, D.; CATACUTAN, D.; DICKSON, N. M.; McNIE, E. Boundary work for sustainable development: natural resource management at the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 17, p. 4615-4622, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0900231108>.
- COHN, A. S.; MOSNIER, A.; HAVILIK, P.; VALIN, H.; HERRERO, M.; SCHMID, E.; O'HARE, M.; OBERSTEINER, M. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, May 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307163111>.
- COOPER, P. J. M.; CAPIELLO, S.; VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; ZOUGMORÉ, R.; KINYANGI, J. **Large-scale implementation of adaptation and mitigation actions in agriculture**. Copenhagen: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, 2013. 101 p. (Working paper, 50). Disponível em: <https://hdl.handle.net/10568/33279>. Acesso em: 16 maio 2022.
- CORTNER, O.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; FERREIRA, J.; NILES, M. T.; REIS, J.; Gil, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 82, p. 841-853, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.006>.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v. 99, p. 345-399, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0).
- FAO. **The ethics of sustainable agricultural Intensification**. Rome, 2004. Disponível em: <https://www.fao.org/3/j0902e/j0902e03.htm>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- FAO. **The state of food security and nutrition in the world 2021: transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all**. Rome: FAO: IFAD: UNICEF: WFP: WHO, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4474en>.
- FERREIRA, C. M. **Fundamentos para a implantação e avaliação da produção sustentável de grãos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 228 p.
- FOLHA DE SÃO PAULO. **Manual da redação: as normas de escrita e conduta do principal jornal do país**. 21. ed. São Paulo: Publifolha, 2021. 512 p.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W. et al. Global carbon budget 2020. **Earth System Science Data**, v. 12, p. 3269-3340, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- GALDINO, S.; SANO, E. E.; ANDRADE, R. G.; GREGO, C. R.; NOGUEIRA, S. F.; BRAGANTINI, C.; FLOSI, A. H. G. Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 3, p. 773-784, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2414>.
- GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Adoption, and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 199, p. 394-406, Jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.008>.
- HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 47-60. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215162/1/A-erosao-e-seu-impacto-2002.pdf>.
- IPAM. INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. **Glossário**. 2015. Disponível em: <http://ipam.org.br/glossario/>. Acesso em: 11 ago. 2021.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 15 abr. 2022.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014. 151 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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**. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/07/210714-IPCCJ7230-SRCCL-Complete-BOOK-HRES.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Acesso em: 15 abr. 2022.

KIRKELS, F. M. S. A.; CAMMERAAT, L. H.; KUHN, N. J. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: a review of different concepts. **Geomorphology**, v. 226, p. 94-105, Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023>.

KOMAREK, A. M.; THIERFELDER, C.; STEWARD, P. R. Conservation agriculture improves adaptive capacity of cropping systems to climate stress in Malawi. **Agricultural Systems**, v. 190, 103117, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103117>.

KONGSAGER, R.; LOCATELLI, B.; CHAZARIN, F. Addressing climate change mitigation and adaptation together: a global assessment of agriculture and forestry projects. **Environmental Management**, v. 57, p. 271-282, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0605-y>.

LACERDA, M. C.; NASCENTE, A. S. **Tecnologias para o cultivo do arroz de terras altas em sistema plantio direto na região do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. 33 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica, 94). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1132414>.

LAL, R. World soils and the greenhouse effect. **The IGBP Global Change Newsletter**, n. 37, p. 4-5, 1999.

LEAHY, S.; CLARK, H.; REISINGER, A. Challenges and prospects for agricultural greenhouse gas mitigation pathways consistent with the Paris agreement. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 69, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00069>.

LIANG, Y.; LAL, R.; GUO, S.; LIU, R.; HU, Y. Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. **Scientific Reports**, v. 8, 520, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18922-6>.

LITRE, G.; BURSZTYN, M. Percepções e adaptação aos riscos climáticos e socioeconômicos na pecuária familiar do bioma Pampa. **Ambiente e Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 55-80, jul./set. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC668V1832015>.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point. **Science Advances**, v. 4, n. 2, eaat2340, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.

MACHADO, P. L. O. A.; BENITES, V. M.; BOLAN, N. **Liming acidic soils**. In: FAO. Recarbonizing global soils: a technical manual of recommended management practices: cropland, grassland, integrated systems, and farming approaches. Rome: FAO, 2021. p. 273-287. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb6595en>.

MADARI, B. E.; MAGGIOTTO, S. R.; CARVALHO, M. T. M.; CORRÊA, R. S.; OLIVEIRA, J. M.; MEDEIROS, J. C.; SILVA, M. A. S.; MACHADO, P. L. O. A. Mixed farming systems as potential carbon sinks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEGATIVE CO2 EMISSIONS, 2018, Gothenburg. **Abstracts**. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2018.

MANZATTO, C. V.; ARAUJO, L. S.; ASSAD, E. D.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; VICENTE, L. E.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBMANN, D. G. S. W.; VICENTE, A. K. **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 35 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 122). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1123612>.

MATTHEWS, A. Are the COP26 climate change negotiations ready to embrace agriculture? **Euro Choices**, v. 20, n. 2, p. 4-10, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12325>.

MESSIAS, C. G.; SILVA, D.; SILVA, M. B.; LIMA, T. C.; ALMEIDA, C. A. Análise das taxas de desmatamento e seus fatores associados na Amazônia Legal Brasileira nas últimas três décadas. **RA'EGA**, v. 52, p. 18-41, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v52i0.74087>.

MICHELSSEN, G.; ADOUMBERT, M.; MARTENS, P.; VON HAUFF, M. Sustainable Development - Background and Context. In: HEINRICH, H.; MARTEN, P.; MICHELSSEN, G.; WIEK, A. (ed.). **Sustainability science: an introduction**. Dordrecht: Springer, 2016. p. 5-30. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7242-6_2.

MINASNY, B.; MALONE, B. P.; McBRATNEY, A.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; ZUENG-SANG, C.; CHENG, K. DAS, B. S.; FIELD, D.; GIMONA, A.; HEDLEY, C. B.; HONG, S. Y.; MANDAL, B.; MARCHANT, B. P.; MARTIN, M.; McCONKEY, B. G.; MULDER, V. L.; O'ROURKE, S.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ODEH, I.; STOLBOVOY, V.; STOCKMANN, U.; SULAEMAN, Y.; TSUI, C. C.; VAGEN, T. G.; WESEMAEL, B. V.; WINOWIECK, L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, v. 292, p. 59-86, Apr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.

MOTTER, P.; ALMEIDA, H. G. **Plantio direto**: a tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015. 144 p.

MOURINHO, O. A. F.; MOTTA, R. S.; ALVES, Y. L. B. **Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral**. Rio de Janeiro: IPEA, 2003. 50 p. (IPEA. Texto para discussão, 976.)

NELSON, G. C.; VALIN, H.; SANDS, R. D.; HAVLÍK, P.; AHAMMAD, H.; DERYNG, D.; ELLIOTT, J.; FUJIMORI, S.; HASEGAWA, T.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; VON LAMPE, M.; LOTZE-CAMPEN, H.; D'CROZ, D. M.; VAN MEIJL, H.; VAN DER MENSBRUGGHE, D.; MÜLLER, C.; POPP, A.; ROBERTSON, R.; ROBINSON, S.; SCHMID, E.; SCHMITZ, C.; TABEAU, A.; WILLENBOCKEL, D. Climate change effects on agriculture: economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 9, p. 3274-3279, Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 18, n. 1, p. 105-116, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0>.

PELLEGRINO, G. Q. **Principais tendências em PD&I na interface entre mudanças climáticas e agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 9 p. Rede de Observatórios do Agropensa.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C.; RODRIGUES, R. A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. *Land Degradation & Development*, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, Jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; SILVA, F. B.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020**. 2021. SEEG 9. Disponível em: <http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>. Acesso em: 23 dez. 2021.

RAITIF, J.; PLANTEGENEST, M.; ROUSSEL, J. M. From stream to land: Ecosystem services provided by stream insects to agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 270-271, p. 32-40, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.013>.

ROYAL SOCIETY. **New frontiers in science diplomacy**: navigating the changing balance of power. London, 2010. 44 p.

RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; CHENU, C.; CARDENAS, M. G.; KAONGA, M.; KOUTIKA, L. S.; LADHA, J.; MADARI, B.; SHIRATO, Y.; SMITH, P.; SOUDI, B.; SOUSSANA, J. F.; WHITEHEAD, D.; WOLLENBERG, E. The 4p1000 initiative: opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio*, v. 49, p. 350-360, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>.

SCIVITARO, W. B.; VEÇOZZI, T. A.; JARDIM, T. M.; LUCAS, N. F.; SILVA, M. A. S.; MASCARENHAS, Y. S.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E.; CONCENÇO, G. **Emissões de gases de efeito estufa do cultivo de arroz irrigado em ecossistemas subtropical e tropical**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2019. 22 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 3240. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1116835>.

SEARCHINGER, T.; WAITE, R.; HANSON, C.; RANGANATHAN, J. **Creating a sustainable food future**: a menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050: final report. Washington: World Resources Institute, 2019. 564 p.

SERREZE, M. C. Understanding recent climate change. *Conservation Biology*, v. 24, n. 1, p. 10-17, Feb. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01408.x>.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; McCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTENKO, O.; HOWDEN, M.; McALLISTER, T.; PAN, G.; ROMANENKOV, V.; SCHNEIDER, U.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M.; SMITH, J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological Sciences*, v. 363, n. 1492, p. 789-813, Feb. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>.

- SMITH, C.; NICHOLS, Z. R. J.; ARMOUR, K.; COLLINS, W.; FORSTER, P.; MEINSHAUSSEN, M.; PALMER, M. D.; WATANABE, M. The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKCI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (ed.). **Climate change 2021: the physical science basis: contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em 23 mar. 2022.
- STHIANNOPKAO, S.; TAKIZAWA, S.; HOMEWONG, J.; WIROJANAGUD, W. Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern provinces of Thailand. **Environmental International**, v. 33, n. 5, p. 706-711, July 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.12.007>.
- TANG, W.; LI, H.; CHEN, J. Optimizing carbon taxation target and level: Enterprises, consumers, or both? **Journal of Cleaner Production**, v. 282, 124515, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124515>.
- TEY, Y. S.; BRINDAL, M. A meta-analysis of factors driving the adoption of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 353-372, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09840-9>.
- TIAN, H.; LU, C.; CIAIS, P.; MICHALAK, A. M. et al. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. **Nature**, v. 531, p. 225-228, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16946>.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Handbook**. Bonn: Climate Change Secretariat, 2006. 216 p.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Paris agreement**. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- VAN DER ELST, K.; WILLIAMS, A. Environmental and natural resources. In: SERRAJ, R.; PINGALI, P. (ed.). **Agriculture & food systems to 2050: global trends, challenges and opportunities**. Singapore: World Scientific Publishing, 2019. p. 193-214.
- VANLAWÉ, B.; DESCHEEMACKER, K.; GILLER, K. E.; HUISING, J.; MERCKX, R.; NZIGUHEBA, G.; WENDT, J.; ZINGORE, S. Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. **Soil**, v. 1, n. 1, p. 491-508, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-491-2015>.
- VENTURI, L. A. B. Recurso natural: a construção de um conceito. **GEOUSP Espaço e Tempo**, v. 10, n. 1, p. 9-17, 2006. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2006.74004>.
- VIEIRA FILHO, J. E.; FISHLOW, A. **Agricultura e indústria no Brasil: inovação e competitividade**. Brasília, DF: IPEA, 2017. 305 p.
- WCED. World Commission on Environment and Development. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987. 300 p.
- WIEK, A.; LANG, D. J. Transformational sustainability research methodology. In: HEINRICHS, H.; MARTENS, P.; MICHELSEN, G.; WIEK, A. (ed.). **Sustainability science: an introduction**. Dordrecht: Springer, 2016. p. 31-41. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7242-6_3.
- ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLÈRE, D.; HAVLÍK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M. A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, n. 139384, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384>.

Embrapa

Arroz e Feijão