



CAPÍTULO 4

Técnicas e instrumental acessíveis e escaláveis para monitoramento de dados de campo relativos a carbono e gases de efeito estufa

Josiléia Acordi Zanatta – Ladislau Martin-Neto – Débora Marcondes Bastos Pereira Milori – Ademir Fontana – Wilson Anderson Holler – Marcos Claudio Pinheiro Rogério – Claudia Pozzi Jantalia – Bruno José Rodrigues Alves – Andre Marcelo de Souza – Carlos Manoel Pedro Vaz

Introdução

A mudança do clima, intensificada pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), é um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade neste século, principalmente por seus efeitos sobre a produção de alimentos e a disponibilidade de água. Os impactos social, ambiental e econômico tendem a se tornar cada vez mais intensos, caso não haja redução significativa de emissões de GEE. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) estabeleceu um ambiente regulatório, universalmente acordado, para a quantificação das emissões de GEE pelos países. Recentemente, o Acordo de Paris avançou no estabelecimento de um instrumento periódico de ampliação internacional da ambição, visando à estabilização do incremento da temperatura média global em até 1,5 °C, preferencialmente, ou 2,0 °C.

Nesse contexto, o Brasil assumiu, durante a 26ª Conferência das Partes (COP 26) da UNFCCC, realizada em Glasgow, o compromisso de neutralizar suas emissões até 2050. Esse compromisso está descrito nas Ações Nacionalmente Determinadas (NDC). Muitas organizações, igualmente engajadas nesse compromisso – e possivelmente pressionadas pelos mercados con-

sumidores mais exigentes – também apresentaram suas ambições de reduzir emissões de GEE nos próximos 30 ou 40 anos, antecipando-se aos debates e às políticas regulatórias que deverão ser implementadas para assegurar a consecução de medidas pelos agentes econômicos responsáveis por emissões. Ao mesmo tempo, mercados consumidores exigirão cada vez mais produtos e serviços com menor intensidade de emissões (emissão de GEE por unidade de produto) ou ambientalmente mais favoráveis. Por isso, é crescente a iniciativa de organizações para conhecerem suas contribuições em termos de emissões e remoções de GEE, com o objetivo de planejar uma transição rumo à neutralidade ou à redução significativa dessas emissões.

A busca das instituições por maneiras de reduzir e compensar as suas emissões de GEE, com o objetivo de alcançar o “net zero” – ou seja, zerar o impacto das suas emissões –, tem levado a uma crescente procura por informações sobre como medir o carbono presente no meio ambiente, calcular a quantidade de gases poluentes emitidos e definir metas para diminuir essas emissões ao longo do tempo. A clara definição de estratégias de monitoramento e controle de emissões de GEE tem se tornado um importante aspecto na conquista de mercados, na diferenciação de preços e na valorização de marcas e empresas, fazendo hoje parte da agenda ambiental e econômica das organizações. A crescente proliferação de iniciativas corporativas, associada à indução regulatória estabelecida pelo Acordo de Paris, tem impulsionado a criação de instrumentos voltados à melhoria do desempenho climático e da sustentabilidade ambiental corporativa, como mercados voluntários, títulos verdes e climáticos e o movimento ESG (*environmental, social and governance*). Esse novo e dinâmico panorama traz oportunidades e desafios para os gestores, conferindo prioridade à gestão climática como estratégia de minimização e compensação das emissões. Todo esse processo, no entanto, exige práticas sistemáticas de monitoramento, relato e verificação, conhecida pela sigla MRV.

Em projetos de desempenho climático, a etapa de monitoramento consiste em gerar informações sobre as emissões, remoções e outros indicadores relacionados a critérios de mitigação ou adaptação às mudanças do clima. A coleta de dados para esse monitoramento pode ocorrer por meio de inventários, estimativas baseadas em cenários de emissão (com o uso de modelagens matemáticas) ou pela medição direta de metas e métricas relacionadas ao clima, de forma pontual ou periódica. A etapa de relato consiste na divulgação transparente e acessível dessas informações ao público interessado. Já a etapa de verificação corresponde à análise das informações divulgadas, assegurando sua confiabilidade por meio de auditorias de rastreabilidade e de replicação da metodologia, de acordo com o propósito.

Como signatário da Convenção e do Acordo de Paris, o Brasil – assim como os demais países signatários – assumiu o compromisso de inventariar periodicamente suas emissões segundo os métodos e princípios reconhecidos pela transparência, comparabilidade, acurácia, consistência, integridade e monitoramento sistemático (*transparency, accuracy, consistency, compatibility and completeness* – TACCC, em inglês) e estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, em inglês). Essa ação deve utilizar o conjunto metodológico acordado internacionalmente, e reconhecido pela Convenção das Partes. Compete ao Brasil, como signatário do Acordo de Paris, determinar o conjunto de medidas nacionalmente adequadas para fomentar uma transição econômica para bases menos intensivas de emissões de GEE, conforme previsto em sua NDC. O País já realizou cinco inventários nacionais (2004, 2010, 2016, 2020 como Comunicação Nacional; e 2024 como Relatório Bianual de Transparência), ainda com forte dependência de informações baseadas em coeficientes técnicos e fatores de emissão pontuais, uma vez que ainda não dispõe de indicadores mensurados em escala nacional (Brasil, 2021, 2024a).

Com a vigência do Acordo de Paris, o Brasil inicia uma nova fase, na qual será exigida a elaboração de inventários de GEE bianuais, além da demonstração do cumprimento das metas de redução de emissões previstas em suas NDCs. A ausência de informações sobre o potencial mitigador de sistemas e atividades agrícolas também afeta o setor produtivo, que necessita comprovar o atingimento de suas metas corporativas de desempenho climático. As emissões brasileiras de GEE estão concentradas, principalmente, no setor mudança do uso da terra (associada ao desmatamento e às queimadas) e no setor agropecuário (Brasil, 2024b). Ambos geram emissões difusas, o que, considerando a dimensão territorial do País, representa um grande desafio para o monitoramento abrangente e eficaz das emissões e remoções.

A coleta de dados é a espinha dorsal de qualquer estratégia de análise, tomada de decisões e orientação de rumos. Para um país de dimensões continentais como o Brasil, representar com precisão todos os ambientes e modelos produtivos, com custos viáveis e num prazo satisfatório, é um desafio adicional. Por isso, o aprimoramento das técnicas de monitoramento, relato e verificação tem se tornado uma prioridade dentro da atuação da Embrapa. O propósito é gerar e adaptar técnicas e instrumentais que tornem os métodos de coleta e monitoramento mais acessíveis e escaláveis, viabilizando seu uso em larga escala e com frequência adequada, tanto para atender os compromissos nacionais quanto para suprir as necessidades do setor produtivo. Muitas técnicas e avaliações de campo podem fornecer subsídios importantes para analisar a mitigação de GEE e a adaptação de sistemas produtivos à mudança do clima.

Neste capítulo, serão destacadas as técnicas de coleta e monitoramento adaptadas ou desenvolvidas pela Embrapa para obter coeficientes técnicos de culturas, estimar estoques de carbono nos diferentes compartimentos dos ecossistemas, mensurar as emissões de GEE liberados pelo solo e por animais em sistemas produtivos, bem como

aferir atributos do ambiente e do solo que são essenciais para as estimativas de emissões e remoções, ou mesmo para o entendimento dos padrões de emissões e remoções de GEE. Uma das premissas adotadas é que essas técnicas devem ser comparadas e validadas com métodos tradicionais de coleta de dados de campo, que geralmente são mais onerosos, demandam mais mão de obra ou qualificação especializada e, em muitos casos, são demasiadamente invasivos, por alterarem o local de coleta ou destruírem a amostra. Portanto, as técnicas alternativas devem ter como vantagens a acessibilidade, agilidade e menor custo, além da facilidade de aplicação em larga escala.

Estado da arte

Ao longo de sua história, a Embrapa vem contribuindo efetivamente para o contínuo crescimento da produção e produtividade da agropecuária do país, para o aumento da competitividade dos produtos brasileiros nos mercados internacionais, para a segurança alimentar da sociedade brasileira e mundial, para a conservação dos recursos naturais, para a preservação do meio ambiente e, enfim, para a construção e consolidação de competência e liderança técnico-científica para uma agropecuária tropical conservacionista (Hungria; Vargas, 2000). Um dos principais desafios que se impõe hoje, e para o horizonte dos próximos 10 a 20 anos, é oferecer estratégias para a transformação ecológica da economia, viabilizando tecnologias inovadoras que garantam a produção de alimentos, fibras e energia em um cenário global de mudança climática, com forte pressão sobre os recursos água, solo e biodiversidade, e exigências crescentes para a redução de impactos ambientais e sociais do processo produtivo.

O protagonismo da Embrapa no tema mudança climática é bastante amplo, apoiando desde a definição de estratégias de mitigação e adaptação climática até a realização de estimativas domésti-

cas de emissões e remoções de GEE, desde a primeira edição do inventário nacional. Sua atuação inclui o aprimoramento de coeficientes técnicos de culturas, a estimativa de taxas de sequestro e estoques de carbono em decorrência de mudanças no uso do solo e de práticas de manejo, bem como a definição de fatores de emissão adaptados às condições nacionais (Brasil, 2020).

Nos últimos anos, a Embrapa tem sido cada vez mais demandada pelo setor privado para apoiar na realização da contabilidade das emissões, principalmente nos cálculos de balanço e pegada de carbono, estimativas de emissões de GEE e caracterização de perfil ambiental de produtos. O balanço de carbono, assim como outras métricas relacionadas, têm se tornado um importante aspecto na aferição do alcance de metas corporativas de redução de emissões de GEE. Essa mensuração é fundamental para a conquista de mercado, a diferenciação de preços e a valorização de marcas, compondo, atualmente, a agenda ambiental e econômica das organizações.

Diante do crescente número de iniciativas corporativas, associadas à indução regulatória estabelecida pelo Acordo de Paris, cresce também a necessidade de aprimorar as técnicas de coleta e monitoramento de emissões de GEE nos setores da agricultura e de mudança do uso da terra. A coleta e o monitoramento de dados de campo podem ser executados com o uso de diferentes tecnologias. A técnica mais adequada depende da escala e da variável que se pretende monitorar. Nesse contexto, a Embrapa vem desenvolvendo e adaptando técnicas e instrumentação que permitem o reduzir custos, ampliar a escalabilidade e a agilizar o levantamento de dados relacionados ao fluxo de GEE, ao carbono presente em vários compartimentos, inclusive no solo, além de outros aspectos ambientais igualmente importantes.

O investimento na ampliação da infraestrutura de coleta e na padronização metodológica de alternativas aos métodos tradicionais oferecerá alto impacto na viabilidade do monitoramento, por aumen-

tar a eficiência e acurácia nos dados gerados. Esses avanços são relevantes tanto para o inventário nacional de GEE, quanto para certificações, programas de incentivos e os compromissos assumidos por empreendimentos de menor escala, voltados ao alcance de metas de desempenho climático.

O setor agropecuário tem grande importância econômica para o Brasil e ocupa 32% do território nacional. No entanto, a maior parte da área do país é coberta por florestas nativas, que representam 59% do total e estão em diferentes estados de conservação (Tabela 4.1). Além disso, há mais 10 milhões de hectares de plantios florestais, o que corresponde a 1% do território nacional. As florestas nativas do Brasil possuem alta biodiversidade e variadas formações vegetais, o que dificulta a medição representativa de carbono e emissões de GEE. Apesar dos desafios, elas são essenciais para o cumprimento das metas assumidas no Acordo de Paris e, na NDC nacional, destacam-se como o setor mais relevante para a mitigação das emissões de GEE.

Tabela 4.1. Área destinada a cada uso do solo e detalhamento da agropecuária nos seus setores principais, com base nos dados do MapBiomas (2024).

Uso do solo	Área (ha)	Área (%)
Floresta	502.572.052	59,0
Vegetação arbustiva e herbácea	46.450.811	5,5
Área não vegetada	6.773.077	0,8
Corpos da água	18.298.211	2,2
Agropecuária	276.671.946	32,5
Pastagem	164.574.066	59,5
Agricultura	60.992.647	22,1
Silvicultura	8.940.366	3,2
Outros usos	42.164.867	15,2

O método tradicional para estimar os estoques de carbono na biomassa vegetal das florestas baseia-se em inventários de campo. Nesses levantamen-

tos, são coletadas informações como diâmetro e altura de árvores, identificação das espécies e famílias botânicas. Esses dados permitem avaliar a quantidade e a qualidade dos recursos florestais, bem como acompanhar a mortalidade e o crescimento das árvores ao longo do tempo, proporcionando uma visão mais precisa da dinâmica da área estudada. O estoque de carbono é estimado a partir de equações alométricas, que relacionam as dimensões das árvores com a biomassa. Essas equações podem ser específicas para uma espécie vegetal, ou genéricas, aplicadas a grupos para os quais não há modelos próprios.

O método de amostragem é o mais utilizado, no qual parte da área é avaliada e considerada representativa do todo. Os inventários de campo são fundamentais para estimar os estoques de carbono da biomassa vegetal, mas apresentam desafios significativos: requerem equipes treinadas, demandam tempo extenso e são bastante trabalhosos. Além disso, o processamento posterior dos dados pode ser tão demorado quanto a coleta em campo, dificultando revisões em caso de erros ou dúvidas. Devido à laboriosidade, sua eficiência na geração de dados em larga escala é limitada, sobretudo diante dos compromissos assumidos em escala nacional.

Métodos indiretos, baseados em tecnologias não destrutivas, têm-se mostrado promissores para ampliar a capacidade de geração de informações e complementar os inventários nacionais. Com a evolução das geotecnologias, a cada dia surgem novas ferramentas e métodos, o que tem beneficiado em grandes proporções o planejamento e a execução de inventários florestais, colocando a atividade sob uma nova ótica. Assim, o inventário de campo ganha novas ferramentas como sensoriamento remoto, através das suas muitas técnicas, com o uso de imagens de satélites (VANTs ou drones) e varredura por LiDAR (Sousa et al., 2020; Santos et al., 2021; Ferreira et al., 2022; Costa et al., 2023). Porém, como toda nova ferramenta que chega ao campo, precisa de ajustes às condições e ao objeto de aplicação, com a necessidade de

novos modelos e algoritmos de resposta coerentes a cada situação florestal (Souza et al., 2024).

Nesse contexto, a Embrapa desenvolve técnicas voltadas para a identificação de espécies florestais, a quantificação dos atributos da floresta e a estimativa do estoque de carbono presente na biomassa vegetal. Essas técnicas apresentam uma grande variação de custos, sendo os serviços com drones ou VANTs os mais acessíveis, o que facilita o acesso do público ao uso dessas tecnologias. Contudo, o processamento de dados ainda exige recursos humanos qualificados para assegurar a credibilidade dos resultados.

O carbono presente no solo é tão importante quanto aquele estocado na vegetação. A agricultura e o uso da terra influenciam muito a quantidade de carbono armazenada no solo, que pode ser igual ou até maior do que a encontrada na vegetação. Em 2021, a Embrapa divulgou um mapa do carbono no solo na resolução espacial de 90 m (escala equivalente entre 1:250.000 e 1:100.000) em subcamadas até 100 cm de profundidade (Vasques et al., 2021). Apesar de ser um avanço estratégico, essa base de dados ainda não pode ser usada como referência para propriedades rurais ou para acompanhar mudanças no estoque de carbono causadas por boas práticas agrícolas, como sistema plantio direto, a integração lavoura-pecuária-floresta e o uso de bioinsumos.

O monitoramento do estoque de carbono do solo requer duas medições principais: concentração de carbono e densidade do solo. Ambas são avaliações onerosas seja pelo esforço físico, seja pelo custo financeiro. Por outro lado, o monitoramento do carbono no solo vem ganhando importância, e há uma busca crescente por métodos mais rápidos e acessíveis para coletar e analisar amostras de solo. Esses métodos devem ser eficientes, econômicos e gerar o mínimo de resíduos laboratoriais possível.

A quantificação precisa da variação temporal da concentração de carbono é um desafio, face à sua lenta evolução ao longo do tempo e a elevada variabilidade no espaço (Haynes, 2005). Para mo-

monitorar e analisar a variação do carbono no solo, é fundamental definir métodos confiáveis de quantificação. O carbono pode ser medido por meio de métodos de combustão a seco (ISO 10694:1995) e também por via úmida, como o método de Walkley-Black (FAO, 2020). Este último é baseado na oxidação do carbono presente na amostra com uma solução de dicromato de potássio, e também é conhecido como o método da combustão úmida. Esse método tem o inconveniente de gerar elevada quantidade de resíduos químicos. No entanto, é o método mais usado nos laboratórios de análise do solo que atendem às propriedades rurais no Brasil, pois é relativamente barato e dispensa o uso de equipamentos especializados.

Apesar de os resultados obtidos com esse método serem largamente adotados para calibrar a recomendação de adubação nitrogenada para muitas culturas, sua aplicação no monitoramento das mudanças nos estoques de carbono do solo é questionada. Isso se deve à imprecisão inerente dos resultados, pois a oxidação do carbono das frações mais transformadas não é completa, e depende da recalcitrância (estabilidade físico-química) do carbono presente na amostra (Fontana; Campos, 2017).

O método da combustão a seco é considerado o padrão internacional, amplamente aceito e reconhecido devido à sua alta precisão e exatidão nos resultados (Nelson; Sommers, 1996; Fontana; Bianchi, 2017). Nesse método, a amostra do solo é incinerada a uma temperatura de, no mínimo, 925 °C, que resulta na oxidação completa de todas as formas de carbono presentes, transformando-as em CO₂. Posteriormente, o C-CO₂ é detectado por sensor de infravermelho. A principal desvantagem desse método é o alto custo da análise, que supera o do método via úmida. Isso ocorre devido à necessidade de equipamentos especializados, consumo de materiais específicos e custos elevados de manutenção, tornando-o acessível apenas a poucos laboratórios comerciais com elevada demanda de análises, limitando sua aplicação em larga escala.

Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas pela Embrapa e seus parceiros tem buscado mé-

todos robustos, acessíveis e com capacidade para atender, em escala adequada, às demandas em nível nacional. Duas tecnologias derivadas dessas iniciativas atualmente disponíveis no setor privado são o AgLIBS (Babos et al., 2024a) e o uso do espectroscopia de reflectância difusa no visível e no infravermelho próximo (Vis-NIRS) (Coelho et al., 2018). Ambas se destacam pelo baixo custo e agilidade na execução da análise, além de já serem aceitas em programas de certificação do mercado voluntário. O uso de tecnologias como Radio Detection And Ranging (RADAR)/Synthetic Aperture Radar (SAR) também se mostra promissor para o monitoramento e a avaliação do carbono no solo e nas raízes (Machado et al., 2025) e já é alvo de investigações através de projetos de pesquisa.

A densidade do solo (Ds) é um fator fundamental para calcular os estoques de carbono, e representa a maior fonte de incerteza nesse processo. Com o aumento do interesse para determinar mudanças no estoque de carbono do solo, devido ao seu papel na redução das emissões de GEE, a avaliação da Ds tornou-se indispensável e passou a ser requerida em uma escala mais ampla. Os métodos disponíveis para a determinação da Ds são trabalhosos e requerem cuidados específicos, além do uso de ferramentas apropriadas, limitando a sua aplicação em grandes extensões de áreas ou em estudos com alto número de repetições, tanto pelo trabalho minucioso quanto pelo elevado custo operacional.

A determinação da Ds pode ser feita diretamente, coletando-se amostras indeformadas e de volume conhecido de solo no campo, ou de maneira indireta, estimando-se com o uso de equações matemáticas. Os métodos padrão para determinar a Ds incluem o uso do anel volumétrico e o método da escavação, ambos reconhecidos por protocolos nacionais (Oliveira, 2014; Zanatta et al., 2015; Fontana et al., 2024) e internacionais (FAO, 2020). Esses métodos exigem a abertura de uma trincheira, manual ou mecanicamente, geralmente de 50 a 100 cm de profundidade, para acesso às camadas de interesse.

No método do anel volumétrico, um cilindro de volume conhecido (anel) é inserido cuidadosamente no solo, de forma a preservar sua estrutura. O solo contido no anel é então retirado, seco e pesado. A DS é calculada como a razão entre a massa seca do solo e o volume do anel. Já o método da escavação é indicado para solos soltos ou com alto teor de cascalhento, quando mais de 15% do volume é composto de materiais grossos. Nesse caso, em cada camada do solo é feito um "buraco", que é preenchido com areia fina de densidade conhecida (densidade da areia = massa da areia ÷ volume da areia). A Ds do solo é calculada com base na razão entre a massa do solo seco extraído e o volume ocupado pela areia utilizada.

As trincheiras abertas para aplicação desses métodos devem ser devidamente fechadas após a coleta, o que demanda tempo e grande esforço, seja manual ou mecânico. Para evitar essa etapa, têm sido propostos métodos automatizados que utilizam sondas para a obtenção de amostras indeformadas. No entanto, essas técnicas ainda precisam ser validadas em comparação aos métodos de referência, como o do anel volumétrico. A coleta por sonda automatizada obtém um monólito de solo (ou testemunho), que pode ser subdividido em camadas de interesse, seguido pela determinação da Ds, conforme os procedimentos tradicionais.

Os métodos mais modernos de determinação da Ds baseiam-se em técnicas nucleares, como a tomografia computadorizada (Timm et al., 2005; Pires et al., 2010) e a utilização de sondas de superfície nêutron-gama (Cássaro et al., 2000a, 2020b, 2020e). Ambas as técnicas adotam equipamentos bastante caros e necessitam de mão de obra altamente qualificada para seu uso, o que implica alto custo da utilização delas.

Alternativamente, as equipes técnicas têm desenvolvido modelos de predição da Ds que utilizam, como preditores, alguns atributos obtidos de amostras deformadas de análises de rotina de solo, como as frações granulométricas (areia, silte e argila), C, pH, soma de bases, entre outros, que

estão correlacionados com a agregação e estrutura do solo. As chamadas equações de pedotransferência têm boa aceitação e podem ser alternativas de custo-benefício interessante. Alguns modelos já disponíveis são descritos no item de soluções de inovação para densidade do solo, junto com adaptações técnicas para o uso de sondas mecânicas automatizadas. Essas soluções atendem ao setor produtivo por serem técnicas baratas, passíveis de serem aplicadas em larga escala e com rendimento operacional adequado. Essa abordagem será detalhada nas soluções tecnológicas, pois há equipes desenvolvendo modelos para predição com resultados muito satisfatórios (Reis et al., 2024; Santos et al., 2025).

O monitoramento dos fluxos de GEE também é uma atividade muito trabalhosa. As metodologias de avaliação *in situ* dos fluxos de GEE no sistema solo-atmosfera geralmente demandam a utilização de câmaras para a coleta de amostras e posterior análise em laboratório. As câmaras estáticas manuais são as ferramentas mais comuns para medição dos fluxos de gases do solo por serem portáteis, de simples funcionamento e, dependendo do método utilizado, de baixo custo (Dalal et al., 2003; Parkin; Venterea, 2010). Quando utilizadas seguindo critérios recomendados, essas câmaras apresentam grande valor e apresentam uma ótima relação custo-benefício (Hutchinson; Rochette, 2003; Parkin; Venterea, 2010).

Apesar de serem amplamente utilizadas em todo o mundo, as câmaras apresentam desafios operacionais significativos. O método demanda um grande esforço de trabalho e possui limitações relacionadas à sensibilidade, à frequência das avaliações e à necessidade de mão de obra especializada para interagir com o sistema e coletar as amostras de ar. Além disso, a eficiência da coleta depende tanto da capacidade do coletor quanto da distância entre as câmaras, restringindo sua aplicação em larga escala. Normalmente, uma pessoa consegue coletar amostras de até 10 câmaras, distribuídas num raio de até 30 m. Essa capacidade limita o número de repetições e de

replicatas a serem monitoradas, dificultando, por conseguinte, as análises comparativas devido ao baixo número de repetições de campo. É importante destacar que os fluxos de GEE do solo são influenciados por diversos fatores (La Scala et al., 2000; Jantalia et al., 2008; Veloso et al., 2019), resultando em uma alta variabilidade espacial e temporal (Deng et al., 2020). Por isso, é necessário aumentar o número de repetições na coleta para obter resultados mais precisos e representativos.

Outra condição limitante é que, em sistemas com coleta manual, é praticamente impossível realizar monitoramentos diários das emissões dos GEE por dias consecutivos. Essas dificuldades limitam sobremaneira o desenvolvimento de estudos mais abrangentes temporalmente e espacialmente. As torres de fluxo fornecem medições indiretas dos fluxos de GEE em uma escala temporal altamente detalhada e representativa para uma área maior, tipicamente entre 2 ha e 10 km², cujo tamanho depende das características da área monitorada e da sua instalação, sendo uma ferramenta valiosa para estudos em larga escala. No entanto, os resultados obtidos por esse método não são diretamente comparáveis com os obtidos com as câmaras instaladas no solo, pois, enquanto as torres de fluxo descrevem o balanço dos GEE no sistema solo-planta-atmosfera, as câmaras representam o fluxo líquido do sistema solo-atmosfera. Devido às características inerentes ao método das torres, sua instalação requer grandes áreas de relevo relativamente plano, além de profissionais qualificados para operação e manutenção.

Uma forma de aumentar a capacidade de coleta utilizando câmaras é por meio de sistemas automáticos para a coleta de ar e análise do fluxo de GEE. Esses sistemas são conectados a um analisador de gases, que pode ser um cromatógrafo gasoso ou espectrômetro a laser. As câmaras, nesse caso, são previamente programadas, e as coletas de amostras de ar e análise podem ocorrer inúmeras vezes ao dia. Apesar da excelente qualidade da informação gerada, o uso desses sistemas fica restrito a campos experimentais com segurança ade-

quada e depende da presença de equipamento de análise no campo, o que, para sistemas cromatográficos, têm limitações de sensibilidade dos equipamentos, pois esses operam em condições controladas de temperatura. O volume de informações obtido com esta técnica é extremamente elevado e pode levar a conclusões bem mais acuradas a respeito dos ciclos diários das emissões, assim como identificar a resposta direta do fluxo de GEE a mudanças nas condições edáficas, principalmente de temperatura e umidade. Atualmente, as câmaras automáticas disponíveis no mercado, que são todas importadas, ainda são de custo relativamente elevado e necessitam de adaptações para serem utilizadas nas condições brasileiras.

Diante dessa dificuldade, a Embrapa, junto com parceiros, desenvolveu um sistema semiautomático de coleta de amostras, no qual o operador do sistema leva o sistema ao campo, inicia o funcionamento e retorna ao final da campanha (geralmente 2 horas), recolhendo as amostras de ar e o aparato de coleta. Neste caso, a capacidade de coleta no campo, considerando um operador, aumenta no mínimo três vezes se comparado ao sistema tradicional de coleta (câmara estática operada manualmente).

Muitas das dificuldades mencionadas para o monitoramento dos fluxos de GEE do solo são também verdadeiras para o monitoramento do metano entérico de animais ruminantes. O monitoramento do metano entérico necessita de métodos não invasivos que sejam suficientemente precisos, o que representa uma dificuldade adicional. A fermentação ruminal é um processo complexo influenciado por diversos fatores, como tipo de dieta, qualidade da forragem, genética do animal e condições ambientais. A generalização dos resultados para diferentes sistemas de produção requer estudos com grande número de animais e em diferentes condições. Métodos para medir o metano entérico incluem câmaras de confinamento, técnicas de traçador, técnicas de "farejamento" e detectores portáteis de metano a laser. Métodos como câmaras de respiração, embora precisos, são invasivos e limitados

a um pequeno número de animais. A busca por métodos portáteis e menos intrusivos, como detectores de metano a laser, está em curso. Mais recentemente, um sistema automatizado de câmara de cabeça, GreenFeed (GF), foi desenvolvido para amostragem pontual de gases exalados e eructados (Zimmerman; Zimmerman, 2012). Comparações com câmaras de respiração ou método SF₆ estabeleceram que, quando usado corretamente, o GF é uma técnica confiável para medir emissões entéricas de metano de animais ruminantes (Dorich et al., 2015; Hammond et al., 2015).

Muitas são as técnicas e o instrumental desenvolvidos para facilitar o monitoramento, a integração multiescalar, e ampliar o acesso aos dados de campo. A evolução dessas técnicas também é impulsionada pela demanda cada vez maior das organizações de gerar informações mais detalhadas sobre as emissões e remoções, seja para melhoria da gestão climática, seja pela perspectiva de investimentos em mecanismos de mitigação. O fato é que, em função das dimensões do país, técnicas de larga escala são imprescindíveis para subsidiar o país com informações que atendam as demandas das regras do Acordo de Paris, assim como para promover ordenamento e controle eficiente sobre as emissões em nível de propriedade rural.

Soluções de inovação para monitoramento do carbono no solo

A obtenção de dados precisos e em larga escala sobre o carbono orgânico do solo (COS) é fundamental para compreender a saúde do solo, o ciclo global do carbono e o potencial de sequestro de carbono em sistemas agrícolas (Minhoni et al., 2021; Lima et al., 2025; Petropoulos et al., 2025). A importância desses dados reside na capacidade de mapear a distribuição do COS em grandes áreas, identificar áreas com maior potencial de sequestro ou risco de perda de carbono, e monitorar as

mudanças ao longo do tempo em resposta a práticas de manejo ou eventos climáticos extremos (Minhoni et al., 2021). Essa informação é crucial para a implementação de práticas de agricultura de baixo carbono e para o desenvolvimento de políticas de adaptação e mitigação da mudança climática no setor agrícola (Petropoulos et al., 2025).

As técnicas inovadoras de análise de solos desenvolvidas pela Embrapa, como a AgLIBS e a SpecSolo, podem contribuir de forma decisiva para o fortalecimento do papel do Brasil na liderança de ações voltadas à sustentabilidade agrícola e ao enfrentamento da mudança climática, em alinhamento direto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e ODS 15 (Vida terrestre). Essas conexões reforçam o papel estratégico das técnicas espectroscópicas como tecnologias habilitadoras de políticas públicas voltadas à transformação ecológica da agricultura e ao monitoramento eficaz dos compromissos ambientais assumidos pelo Brasil em âmbitos nacional e internacional.

Além disso, técnicas potenciais estão sendo aprimoradas no meio científico, principalmente aquelas com elevada capacidade de rendimento e com aplicação remota. Nessa perspectiva há o uso de dados de satélites equipados com sensores SAR, como o Sentinel-1 e o ALOS PALSAR, por meio de duas técnicas principais: 1) de dupla polarização, que pode ser utilizada indiretamente para estimar o COS (El-Jamaoui et al., 2025) por meio do Índice de Vegetação SAR (SARVI); 2) Ground Penetrating Radar (GPR), que complementa as informações obtidas por RADAR/SAR orbital, embora operando em uma escala espacial menor, oferecendo detalhes sobre a estrutura do subsolo, incluindo a distribuição de raízes e a estratificação do solo, que podem influenciar o armazenamento de carbono (Jol, 2009). Ambas as tecnologias serão abordadas na seção Perspectivas Futuras.

Plataforma IA AgLIBS

A IA AgLIBS é uma plataforma digital para quantificação de carbono, nutrientes e outros parâmetros físico-químicos de solos. A base física dessa plataforma é a Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser (ou em inglês, Laser-induced Breakdown Spectroscopy – LIBS), que é uma técnica amplamente aplicada nas análises de materiais e também de rochas e solos por diversas instituições de pesquisas (Bublitz et al., 2001; Cremers; Radziemski, 2013), incluindo a National Aeronautics and Space Administration (NASA) em suas duas últimas expedições à Marte. Trata-se de um método de análises multielementares que se baseia em emissões atômicas e iônicas dos ele-

mentos químicos a partir de um plasma criado por laser de alta potência. A Figura 4.1 apresenta um esquema dessa técnica, ilustrando um espectro típico de emissão com indicação de uma das linhas de emissão do átomo de carbono em 193 nm e um diagrama com um sistema de medidas típico de LIBS.

A técnica vem sendo estudada na Embrapa desde 2006, como alternativa aos métodos tradicionais de análise da concentração de carbono. Essa tecnologia permite a quantificação de carbono, nutrientes do solo, textura, pH e capacidade de troca catiônica (CTC) de maneira mais rápida e acessível do que os métodos convencionais, além de fornecer dados digitalizados para análise e tomada de decisão.

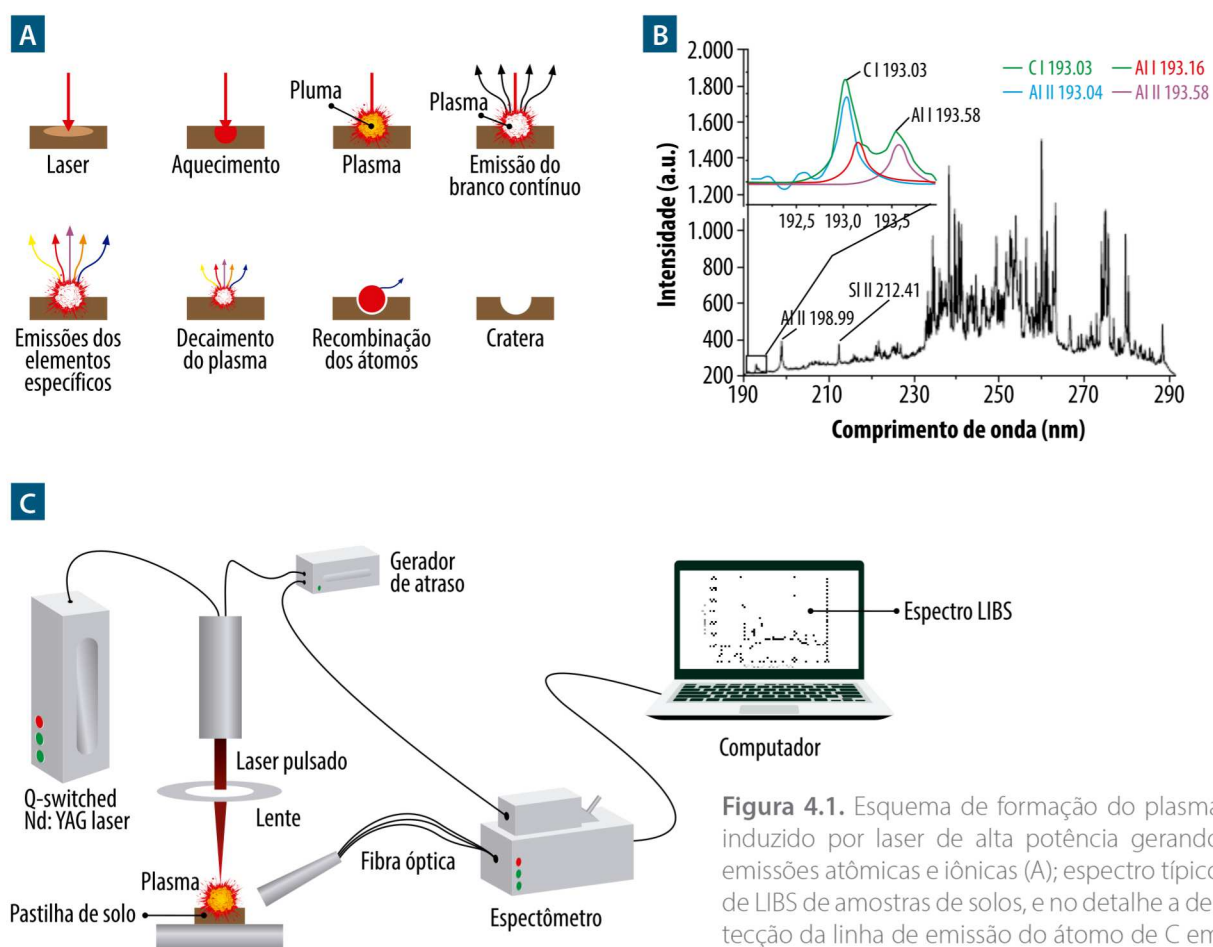


Figura 4.1. Esquema de formação do plasma induzido por laser de alta potência gerando emissões atômicas e iônicas (A); espectro típico de LIBS de amostras de solos, e no detalhe a detecção da linha de emissão do átomo de C em 193,03 nm (B); e diagrama de componentes de um sistema típico de LIBS (C).

Numa parceria público-privada, a técnica evoluiu para uma plataforma. A plataforma IA AgLIBS gera recomendações agronômicas para os produtores, otimizando a gestão do solo. Além disso, ela possibilita a criação de mapas detalhados de estoques de carbono, com maior rapidez e custos menores que o método da combustão seca, auxiliando na viabilização de projetos de créditos de carbono para produtores rurais e empresas do agro. Adicionalmente permite análises e mapas de macro e micronutrientes de plantas presentes nos solos, conforme demanda a agricultura de precisão para um manejo mais eficiente e sustentável dos solos, resultando no aumento da produtividade agrícola e/ou redução de custos de produção. Vale ressaltar que a plataforma IA AgLIBS é um produto com patente compartilhada entre a Embrapa Instrumentação e a Agrorobótica.

Em 2023 a técnica LIBS foi aprovada pela Certificadora Internacional Verra, com sede nos Estados Unidos, para uso na quantificação de carbono no solo, dentro da Metodologia “Verified Carbon Standard- VCS” (Metodologia VM 0042, Versão 2, de 30 de maio de 2023). Da maioria das publicações internacionais utilizadas pela Verra, para aceitação da técnica LIBS para quantificação do carbono no solo na Metodologia VM 0042, cinco delas foram publicadas por pesquisadores da Embrapa Instrumentação, associados ao Laboratório Nacional de Agrofitônica (Milori et al., 2011; Nicolodelli et al., 2014; Segnini et al., 2014; Villas-Boas et al., 2020a, 2020b).

A plataforma IA AgLIBS tem sido aplicada em projetos no Brasil afora (Figura 4.2). Em um dos resultados recentes, Babos et al. (2024a) demonstraram um valor médio do erro quadrático de predição (do inglês RMSEP) para as medidas com LIBS de 0,47% de C. Esse resultado foi obtido comparando medidas de mais de 1.000 amostras de solo de 11 propriedades rurais. Essas propriedades estavam distribuídas nos biomas Cerrados, Mata Atlântica e Pampa, e contavam com variações de conteúdo de carbono de 0,23 a 8,78% de C no solo, determinados por Analisador Elementar



Figura 4.2. Indicações de locais de medidas de carbono em solos usando a técnica LIBS, pela Embrapa Instrumentação, oriundos de experimentos de campo de longa duração em instituições públicas e, principalmente, de propriedades rurais privadas (“on-farm research”), em diferentes polos produtivos e biomas brasileiros.

CHN. Os coeficientes de determinação (R^2) entre as medidas obtidas por LIBS e o Analisador Elemental CHN foram de 0,94 e 0,75, para calibração e validação, respectivamente.

A implementação de tecnologias avançadas, como a plataforma IA AgLIBS, tem contribuído significativamente para a competitividade nacional no setor agropecuário. A adoção de tecnologias como a IA AgLIBS não só melhora a eficiência e sustentabilidade das operações agrícolas, mas também fortalece a posição do Brasil no mercado global, atendendo às demandas por produtos mais sustentáveis e contribuindo para a mitigação da mudança climática. O acesso a ferramentas digitais avançadas também permite um gerenciamento mais eficiente das propriedades rurais, em particular, da capacidade de monitorar e quantificar o aumento da matéria orgânica do solo (MOS), e consequentemente do carbono no solo, com impacto significativo na melhoria da estruturação

do solo, e em ações relevantes de adaptação aos impactos da mudança climática.

Embora os benefícios do manejo adequado dos solos sejam amplamente reconhecidos, a agricultura resiliente e adaptativa exigirá um monitoramento eficiente do sistema solo-planta-atmosfera, associando práticas de manejo à evolução da MOS. O LIBS também pode ser importante aliado para a consolidação e benefícios da adoção da agricultura de precisão, uma vez que propicia redução dos custos das análises de solos e plantas, simplificação nas técnicas de aplicação para ampliar o uso de manejos à taxa variável de insumos e defensivos nos solos e culturas em larga escala.

Além disso, a capacidade de quantificar e monitorar o carbono no solo em larga escala abre oportunidades para os produtores participarem de projetos de crédito de carbono, gerando receitas adicionais e possibilitando a entrada em novos mercados internacionais que valorizam práticas agrícolas sustentáveis. Essas iniciativas estão alinhadas com programas governamentais, como o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável 2020-2030 (Plano ABC+). Adicionalmente a plataforma IA AgLIBS desempenha um papel estratégico na redução de riscos e no aumento da capacidade adaptativa da agricultura brasileira, tornando as propriedades rurais mais resilientes e sustentáveis. Ao liderar investimentos em sustentabilidade, o Brasil não apenas melhora suas práticas agrícolas internas, mas também oferece soluções que podem ser adaptadas globalmente, contribuindo para a sustentabilidade da produção de alimentos em escala mundial.

Plataforma SpecSolo

A Plataforma Digital SpecSolo representa uma das mais significativas inovações em análise de solos das últimas cinco décadas no Brasil, ao incorporar o uso da espectroscopia no infravermelho como base tecnológica. Essa abordagem permite substituir, com rapidez, precisão e confiabilidade,

de, os métodos tradicionais de análise, muitos dos quais são onerosos e potencialmente poluentes ao meio ambiente.

Ao eliminar a necessidade de reagentes químicos e reduzir drasticamente a geração de resíduos, a SpecSolo contribui para a mitigação de impactos ambientais e diminui os custos operacionais dos laboratórios com o tratamento e a destinação adequada desses resíduos. Além disso, a plataforma apresenta um enorme potencial para viabilizar a análise de carbono do solo em larga escala, constituindo-se em uma ferramenta estratégica para o avanço da agricultura de baixo carbono e para o mecanismo de comércio de carbono que vem se consolidando no Brasil.

A plataforma SpecSolo é baseada em técnicas de espectroscopia de infravermelho, que trata da relação entre a radiação eletromagnética e a matéria, amplamente utilizada na caracterização físico-química de solos. Seu princípio fundamental está na absorção seletiva de energia por ligações químicas específicas, promovendo transições vibracionais que refletem a composição molecular do material analisado. Essa capacidade torna a espectroscopia infravermelha uma ferramenta estratégica para a quantificação do carbono orgânico do solo, permitindo a identificação e estimativa de compostos relacionados à matéria orgânica, além de oferecer subsídios importantes para o entendimento da dinâmica do carbono e a avaliação da qualidade e fertilidade dos solos.

As regiões espectrais de maior interesse agrônomo compreendem o infravermelho médio (*Mid Infrared Spectroscopy*, MIR, 4.000–400 cm^{-1}), o infravermelho próximo (*Near Infrared Spectroscopy*, NIR, 12500–4000 cm^{-1}) e o espectro combinado visível-infravermelho próximo (Vis-NIR, 25.000–4.000 cm^{-1}). Cada uma dessas faixas oferece vantagens específicas, sendo utilizadas de forma complementar conforme o objetivo da análise, a logística laboratorial e o grau de robustez exigido para os modelos preditivos.

O NIR tem se consolidado como uma importante alternativa para aplicação em análises de solo em alta escala, devido à sua rapidez, não destrutividade, baixo custo por análise, ausência de reagentes químicos e possibilidade de automação. As bandas espectrais nesta região resultam de sobretons e bandas de combinação de vibrações fundamentais, resultando em bandas largas e sobrepostas. Sendo assim, para interpretação adequada desses espectros, é essencial o uso de técnicas de quimiometria e aprendizado de máquina (*Machine Learning*), como a regressão por quadrados mínimos parciais (*Partial Least Squares*, PLS), máquina de suporte de vetores (*Support Vector Machine*, SVM), Floresta Randômica (*Random Forest*, RF) e Redes Neurais (*Neural Network*, NN), que extraem informações nos dados espectrais e possibilitam a quantificação simultânea de múltiplos atributos do solo a partir de uma única leitura espectral. A Figura 4.3 ilustra um sistema típico de espectroscopia NIR, composto por monocromador e esfera de integração, utilizado para a coleta dos espectros de reflectância difusa em amostras de solo preparadas na condição de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

A técnica Vis-NIR amplia ainda mais esse potencial ao integrar o espectro do visível (400–700 nm), associado à coloração do solo – indicativa de presença de matéria orgânica, óxidos de ferro e características mineralógicas. Essa abordagem tem mostrado alto desempenho na predição de propriedades físicas e químicas em solos tropicais, como os encontrados no Brasil. Essa é a base de tecnologias como a SpecSolo¹, que emprega espectroscopia Vis-NIR integrada a um sistema de hardware, software e algoritmos hospedados em nuvem, oferecendo resultados rápidos e confiáveis para análise de fertilidade do solo em larga escala.

A tecnologia contribui para melhorar a competitividade do Brasil frente aos desafios impostos pela mudança do clima. A combinação da espectroscopia NIR com algoritmos de inteligência artificial,

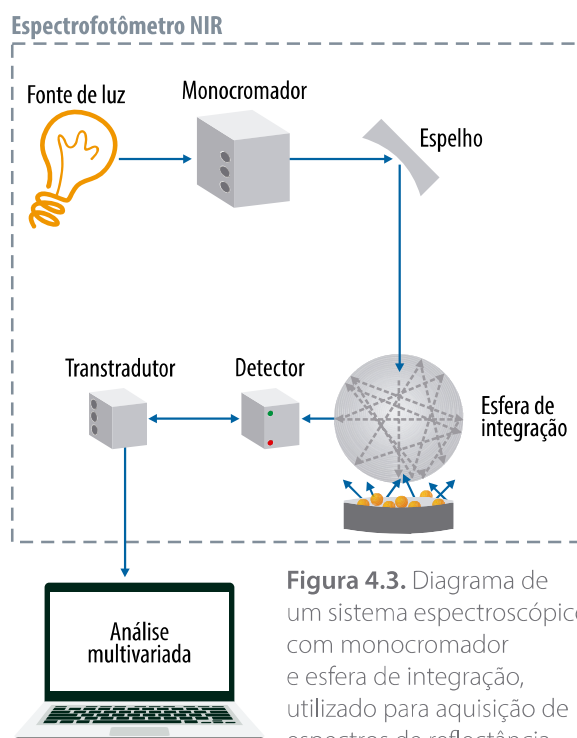


Figura 4.3. Diagrama de um sistema espectroscópico com monocromador e esfera de integração, utilizado para aquisição de espectros de reflectância difusa em amostras de solo.

associada à consolidação de bancos de dados espectrais robustos e ao avanço de dispositivos miniaturizados, tem ampliado significativamente o potencial uso dessa técnica em aplicações de rotina de análise em larga escala. As aplicações da espectroscopia infravermelha têm sido impulsionadas também por projetos nacionais estruturantes como de mapeamento e monitoramento de solos, como o PronaSolos, e por Ensaios de Proficiência, como o Programa de Análise de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade², que a partir de 2024 passou a incluir a medição de carbono por NIR em seus ensaios de proficiência. Esse movimento, coordenado pela Embrapa, visa garantir padronização metodológica, controle de qualidade e validação interlaboratorial do uso da técnica em análises rotineiras.

Ao permitir análises rápidas e não destrutivas do solo, a espectroscopia NIR poderia integrar ferramentas de políticas públicas (como o Zoneamento

¹ Disponível em: www.specsolo.com.br/antiga_pg_specsolo_scan

² Disponível em: www.embrapa.br/solos/paqlf

Agrícola de Risco Climático – Zarc), contribuindo com dados mais exatos sobre o conteúdo de carbono do solo e favorecendo decisões mais seguras e sustentáveis quanto ao uso e manejo das terras agrícolas. Além disso, sua aplicação é altamente estratégica para o monitoramento e a verificação das práticas sustentáveis previstas no Plano ABC+, viabilizando o acompanhamento do potencial de mitigação de CO₂, através do conteúdo da matéria orgânica do solo (MOS) e dos estoques de carbono, indicadores-chave para uma agricultura de baixa emissão de carbono. Enfim, a tecnologia facilita o conhecimento sobre o estoque de carbono no solo e assim pode ser uma ferramenta que contribui para reduzir a exposição ao risco das culturas agrícolas e ajuda a incrementar a capacidade adaptativa e competitividade dos sistemas de produção em um ambiente cada vez mais dinâmico.

Em síntese, a espectroscopia infravermelha através da plataforma SpecSolo, representa uma revolução na forma como se realiza a análise de solos, promovendo uma transição rumo à sustentabilidade, digitalização e valorização do carbono no solo. Sua integração com metodologias modernas e políticas públicas nacionais contribui para posicionar o Brasil como importante ator no uso de tecnologias limpas e inteligentes para o monitoramento ambiental e o fortalecimento dos mercados de carbono, em favor da sociedade brasileira.

Soluções de inovação para monitoramento da densidade do solo

A densidade do solo (Ds) varia devido a diversos fatores, incluindo mineralogia do solo, distribuição e forma das partículas (efeito de empacotamento), além do uso e manejo da terra, topografia, drenagem e condições climáticas, que influenciam a acumulação de matéria orgânica, a distribuição do tamanho de poros, a agregação e a estrutura

do solo. Consequentemente, a Ds apresenta alta variabilidade espacial e temporal na paisagem e nas diferentes profundidades do solo.

Nas últimas duas décadas, tem havido um crescente interesse na predição da Ds, um parâmetro essencial para a quantificação dos estoques de carbono e nutrientes no solo, além de ser fundamental para a modelagem de diversos processos pedológicos. Uma abordagem alternativa, com custo significativamente inferior ao procedimento convencional de determinação da Ds, é o uso de modelos matemáticos de predição. Essa predição tem sido realizada com base em atributos do solo mais facilmente disponíveis. Alguns modelos já estão disponíveis e foram calibrados por ensaios desenvolvidos pela Embrapa e seus parceiros.

Outra abordagem potencial para contornar as dificuldades na coleta de amostras de solo para obter a Ds é o uso de sondas automáticas, sejam elas operadas por máquinas ou manualmente. Essa técnica está em testes em diferentes unidades de pesquisa da Embrapa com resultados promissores. O potencial dessa técnica será abordado na seção de Perspectivas Futuras.

Desenvolvimento de equações de pedotransferência

O conceito de pedotransferência (PTF) remete a métodos que “transferem” dados disponíveis para se estimar propriedades do solo ou outras variáveis difíceis de serem medidas, mas necessárias para modelagens ou avaliações de solos. As PTFs permitem estimar a Ds com base em outros atributos do solo, como granulometria (teores das frações areia, silte e argila), pH, soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC), teores de carbono orgânico, dentre outros. Os valores desses atributos podem ser obtidos por amostragens de solo obtidas por gradagem, dispensando a escavação de trincheiras.

Diversos estudos têm sido conduzidos para o desenvolvimento de PTFs, comumente utilizando como variáveis preditoras os teores de areia, silte, argila e teor de C, empregando distintos métodos de regressão linear e não linear e, mais recentemente, técnicas baseadas em aprendizagem de máquina. A acurácia na estimativa da Ds constitui um aspecto fundamental para a aplicação confiável em diferentes contextos, como a quantificação do estoque de carbono do solo, a avaliação da compactação do solo e na modelagem hidrológica, entre outros. Ao se utilizar estimativas de Ds obtidas por PTFs em substituição aos dados obtidos por métodos diretos, é essencial avaliar a acurácia do modelo preditivo empregado. A Tabela 4.2 apresenta uma síntese da literatura sobre PTFs desenvolvidas para a estimativa da Ds, destacando o alcance ou abrangência (local ou nacional), a acurácia associada, expressa pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *root mean square error*), bem como o tipo de modelo e variáveis preditoras utilizadas.

Modelos com abrangência local têm sido desenvolvidos para microbacias (Souza et al., 2016; Sevastas et al., 2018), classes de solo (Beutler et al., 2017; Cunha et al., 2017), regiões com características climáticas específicas (Al-Quinna; Jaber, 2013), biomas (Bernoux et al., 1998; Tomasella; Hodnet, 1998), e usos e coberturas do solo (Barros; Fearnside, 2015; Choudhury et al., 2023), entre outros. Em geral, os modelos desenvolvidos em escala nacional envolvem maior complexidade de relações entre as propriedades do solo e a Ds, em escalas mais amplas, que envolvem múltiplos usos da terra, diferentes domínios geomorfológicos e biomas. Outro ponto relevante é que métodos baseados em aprendizado de máquina apresentaram desempenho superior em comparação aos métodos convencionais de regressão, como regressão linear múltipla (MLR), regressão não linear múltipla (MNLR) e mínimos quadrados não linear (NLLS).

De modo geral, observa-se que, em solos de regiões temperadas, o carbono é a principal variável explicativa da Ds, sendo muitas vezes a única variável selecionada nas PTFs dessas regiões (Nanko et al., 2014; Abdelbaki, 2018). Por outro lado, em regiões tropicais, caracterizadas por solos muito intemperizados, a textura do solo apresenta maior relevância nos modelos preditivos da Ds, tendo o carbono como a segunda variável mais importante, como demonstrado nos estudos de Benites et al. (2007), Reis et al. (2024) e Santos et al. (2025). A principal limitação das PTFs que utilizam as variáveis granulométricas, COS e outras variáveis físico-químicas do solo é que essas variáveis são expressas em base gravimétrica, e capturam apenas parte dos efeitos sobre a Ds.

Uma abordagem promissora para contornar essa limitação consiste na incorporação de outras variáveis, tanto numéricas quanto categóricas, que agreguem conhecimento ao modelo preditivo por meio de informações relacionadas à estrutura do solo. Dentre as variáveis destacam-se a relação silte/argila, que tende a aumentar com a capacidade de agregação do solo; a relação argila/areia, associada à maior coesão e menor porosidade; e o teor de argila dispersa em água e o índice de floculação, cujos valores elevados indicam baixa estabilidade estrutural. Além disso, variáveis topográficas e relacionadas ao relevo, como declividade, altitude, índice topográfico de umidade, curvatura do terreno e orientação das encostas (aspecto), também influenciam a qualidade estrutural do solo, ao afetarem processos como erosão, redistribuição de partículas, acúmulo de matéria orgânica e variações no regime hídrico ao longo da paisagem.

A abordagem de uso de variáveis numéricas e categóricas em associação tem ganhado destaque nos últimos anos, conforme demonstrado em estudos como os de Santos et al. (2025). No entanto, para sua aplicação efetiva, é essencial dispor das coordenadas geográficas dos dados. Outro aspecto importante no desenvolvimento de modelos

Tabela 4.2. Síntese de trabalhos sobre o desenvolvimento de funções de pedotransferência para a densidade do solo, no Brasil e em outros países.

Trabalho	País	Alcance	Método ⁽¹⁾	RMSE ⁽²⁾	Variável preditora ⁽³⁾
Schillaci et al. (2021)	Itália	Local	ANN	0,07	arg, are, COS, pH, clima, relevo
Obidike-Ugwu et al. (2023)	Nigéria	Local	MLR	0,075	are, COS, q
Zheng et al. (2023)	China	Local	SVMR	0,08	arg, si, are, COS
Botula et al. (2015)	Congo	Local	k-NN	0,09	are, si, arg, COS, Fe, Al
Choudhury et al. (2023)	Índia	Local	ANN	0,09	are, si, COS
Gomes et al. (2017)	Brasil	Local	MLR	0,11	arg, COS, pH, SB, Al
Sevastas et al. (2018)	Grécia	Local	MNLR	0,11	arg, si, are, COS
Al-Qinna e Jaber (2013)	Jordânia	Local	MLR	0,13	are, COS
Botula et al. (2015)	Congo	Local	MLR	0,13	COS, Fe, Al
Souza et al. (2016)	Brasil	Local	RF	0,15	arg, COS, pH, SB, ambiente
Palladino et al. (2022)	Itália	Local	RF	0,16	arg, si, are, COS, pH, CaCO ₃ , relevo
Santos et al. (2025)	Brasil	Nacional	RF	0,12	arg, are, COS, clima, relevo, outras
Han et al. (2012)	China	Nacional	MLR	0,13	arg, COS, N
Ramcharan et al. (2017)	EUA	Nacional	RF	0,13	arg, are, COS, pH, ambiente, outras
Reis et al. (2024)	Brasil	Nacional	MLR	0,14	arg, are-fina, COS
Nanko et al. (2014)	Japão	Nacional	NLLS	0,14	COS
Boschi et al. (2015)	Brasil	Nacional	MLR	0,18	arg, are, COS, pH
Abdelbaki (2018)	EUA	Nacional	MLR	0,18	COS
Benites et al. (2007)	Brasil	Nacional	MLR	0,19	arg, COS, SB
Chen et al. (2024)	Europa	Nacional	RF	0,19	arg, si, COS, pH, N, clima, relevo
Heuscher et al. (2014)	EUA	Nacional	MLR	0,19	arg, si, COS, q
Beutler et al. (2017)	Brasil	Nacional	MLR	0,22	arg, COS

⁽¹⁾ ANN: Redes neurais artificiais; MLR: Regressão linear múltipla; SVMR: Regressão por máquina de vetores de suporte; k-NN: algoritmo de k vizinhos mais próximos; MNLR: Regressão não linear múltipla; RF: Floresta aleatória; NLLS: Mínimos quadrados não-lineares.

⁽²⁾ RMSE: *root mean square error*.

⁽³⁾ arg: argila; si: silte; are: areia; are-fi: areia fina; COS: carbono orgânico do solo; q: umidade do solo; Fe: ferro; Al: alumínio; SB: soma de bases; clima: variáveis climáticas; relevo: variáveis de relevo; ambiente: variáveis ambientais; outras: variáveis numéricas e categóricas adicionais; N: nitrogênio.

com aplicabilidade em escala nacional é a necessidade de um banco de dados amplo e representativo, que contemple a diversidade das principais classes de solo, classes texturais, biomas, zonas cli-

máticas e diferentes formas de uso e cobertura do solo, e, quando possível, o tempo de uso do solo, em especial de solos estruturados argilosos, que tendem a se compactar com o uso agrícola.

Soluções de inovação para monitoramento de fluxos de gases de efeito estufa na agricultura

A quantificação das emissões de GEE na agricultura é essencial para entender os impactos ambientais das atividades agropecuárias e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. No contexto das redes de pesquisa da Embrapa (*Fluxus*, *Saltus* e *Pecus*) e de outras iniciativas de pesquisa, o uso de câmaras estáticas manuais de coleta tem sido a principal solução técnica disponível até o momento para o monitoramento do fluxo de óxido nitroso (N_2O) e da volatilização de amônia (NH_3), seguindo critérios internacionais e garantindo a comparabilidade dos dados obtidos no Brasil com estudos globais.

No processo de determinação direta dos fluxos de GEE, a amostragem é realizada por meio de câmaras estáticas fechadas, um método aceito pela comunidade científica internacional desde que sejam observados critérios técnicos. Essas câmaras são instaladas no solo e capturam os gases emitidos ao longo do tempo. A coleta de amostras das câmaras ocorre em intervalos regulares, permitindo a análise da variação de concentração dos gases. As amostras de GEE coletadas normalmente são analisadas por cromatografia gasosa, utilizando detectores específicos para cada gás.

Mais recentemente, técnicas de medida de concentração de GEE por espectroscopia a laser têm sido aplicadas para mensurar dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). A técnica tem como princípio geral a espectroscopia de absorção, ou seja, a interação entre a luz laser e as moléculas de gás, tendo em conta que os diferentes gases absorvem radiação em comprimentos de onda específicos. A técnica em si é comercial. A abordagem aqui se dará na adaptação dessas técnicas para o monitoramento contínuo do fluxo de GEE na agricultura.

Adaptação de câmaras estáticas para monitoramento da emissão direta em condições nacionais

Os principais aspectos do projeto das câmaras estáticas já foram detalhados em protocolos nacionais (Zanatta et al., 2014; Alves et al., 2017) e internacionais (Parkin; Venterea, 2010; Zaman et al., 2021). Os principais modelos de câmaras estáticas adaptados para uso em estudos no Brasil para medição direta de GEE podem ser observados na Figura 4.4.

A definição do formato da câmara e do material a ser utilizado na sua confecção geralmente está associada, pois procura-se adaptar materiais industrializados para facilitar a confecção, o manuseio no campo, baratear os custos, e, ao mesmo tempo, atender as especificações técnicas de confecção da câmara e da cultura a ser monitorada. Materiais baratos possibilitam aumentar o número de repetições no campo. Por outro lado, câmaras muito pesadas dificultam o manuseio no campo e, considerando a frequência de amostragem, necessitam de equipes com grande número de pessoas na execução das amostragens.

Os critérios a serem observados no desenvolvimento de projetos com câmaras estáticas são:

Dimensões e materiais: Devem ser construídas com materiais inertes aos gases medidos, como PVC ou alumínio, para evitar reações que alterem os resultados. A altura e o volume interno são otimizados para minimizar alterações ambientais dentro da câmara.

Ventilação controlada: Pequenos respiros (vents) garantem o equilíbrio de pressão interna sem alterar a concentração de gases.

Selamento adequado: A vedação entre base e topo pode ser feita com canaletas preenchidas com água ou borracha inerte, prevenindo vazamentos.



Figura 4.4. Tipos de câmaras e materiais disponíveis para a confecção: formato cilíndrico, com base em aço galvanizado e topo de PVC (A); formato cilíndrico, com base em aço galvanizado e topo de poliuretano recoberto com manta térmica (B); formato cilíndrico, com base e topo de PVC (C); formato retangular base em aço galvanizado e topo em polietileno (D); formato quadrado com base (E) e topo em aço galvanizado (F); formato retangular com base e topo em alumínio (G); formato retangular base em aço galvanizado (H); interior da câmara tipo retangular, ilustrando o posicionamento dos ventiladores na parte interna do topo (I); formato retangular base em aço galvanizado e topo em polietileno (J); formato retangular base (K) e topo em aço galvanizado (L).

Fotos: Josiléia Acordi Zanatta (A, B, J e L), Falberni De Souza Costa (C), Bruno José Rodrigues Alves (D, E, F e K), Cimélio Bayer (G) e Michely Tomazi (H e I).

Fonte: Adaptado de Zanatta et al. (2014)

Sistema de amostragem: Inclui portas de coleta conectadas a seringas ou frascos selados para posterior análise laboratorial.

Embora esse método seja amplamente utilizado, ele apresenta limitações, como a necessidade de amostragem manual e a possibilidade de distorções devido à influência das condições ambientais dentro da câmara. Partindo dessa dificuldade, pesquisadores da Embrapa Florestas em parceria com Universidade Tecnológica do Paraná desenvolveram um protótipo de equipamento semiautomático (Figura 4.5) capaz de realizar a obtenção das amostras diretamente em frascos evacuados após o fechamento das câmaras. O protótipo foi desenvolvido com base em um sistema embarcado controlando bombas e válvulas pneumáticas para a realização das coletas, controlado através de uma interface remota, em um aplicativo, para interações a distância via Bluetooth e facilidade no compartilhamento de dados obtidos. O sistema completo teve suas funcionalidades técnicas testadas em bancada e em campo (Figura 4.5), com resultados exitosos descritos em Libel et al. (2021).

As câmaras de coleta foram, até o momento, a principal solução técnica disponível para a mensuração dos fluxos de GEE na agricultura, garantin-

do a padronização e a comparabilidade dos resultados obtidos. Apesar das limitações operacionais e metodológicas, seu uso tem seguido protocolos científicos estabelecidos internacionalmente, assegurando a confiabilidade dos dados gerados. Avanços tecnológicos recentes já apontam para soluções mais automatizadas e eficientes, trazendo novas possibilidades para a inovação no monitoramento de GEE na agricultura.

Adaptação da técnica de espectroscopia a laser na medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo

Existem diferentes técnicas embarcadas nos equipamentos de medição, baseadas na espectroscopia de absorção direta, que é a quantificação da atenuação de um feixe laser com comprimento de onda específico do gás a ser monitorado. Existem algumas variações de configuração como Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS), Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy (CAPS) e Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS), em que a detecção da taxa de atenuação ocorre com a perda de energia de um pulso de laser con-

Fotos: Josiléia Zanatta

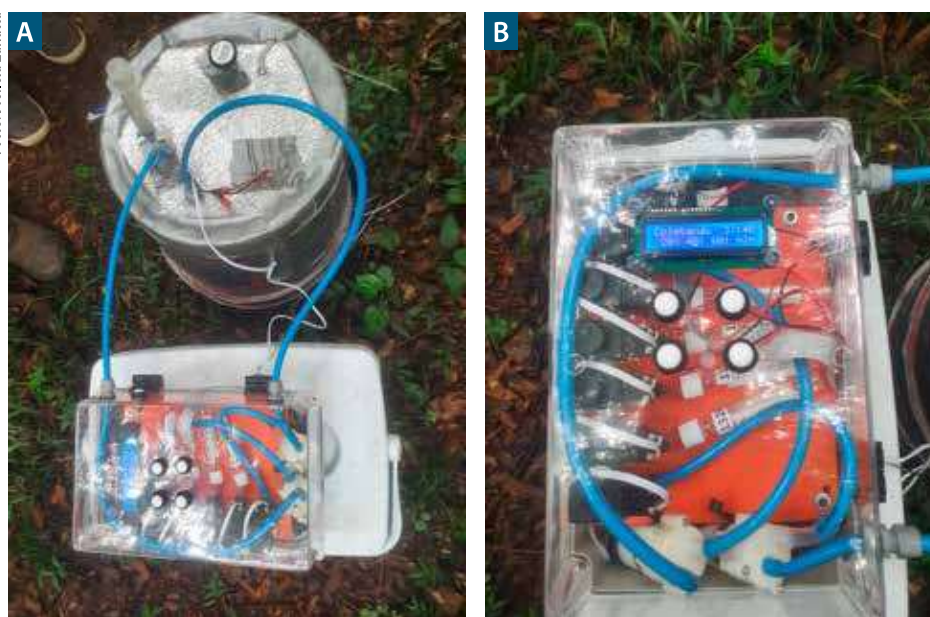


Figura 4.5. Protótipo de sistema semiautomático de coleta de amostras de ar via câmaras estáticas, para monitoramento de fluxo de gases de efeito estufa.

finado em uma cavidade óptica de alta refletividade, por onde o gás aspirado do ambiente está presente. O equipamento registra a intensidade da luz antes e depois de passar pelo gás. A diferença de intensidade (atenuação) é proporcional à concentração do gás no caminho óptico.

Uma grande vantagem da espectroscopia laser em relação à cromatografia gasosa é a alta precisão, mesmo em concentrações muito baixas do GEE, como no caso do óxido nitroso (N_2O). Além da alta precisão nas medidas, o tempo de resposta é rápido e a capacidade de operação no modo portátil é especialmente útil para estudos em áreas distantes, pois dispensa o armazenamento e transporte de amostras (Figura 4.6) ou mesmo em ensaios que requerem medidas muito frequentes (Figura 4.7). Nesse caso, a câmara de incubação funciona no modo dinâmico fechado, ou seja, o ar circula pela câmara passando pelo equipamento, que registra o aumento de concentração dos GEE com o tempo. O coeficiente angular da reta, ajustada aos dados de tempo e concentração, resulta no fluxo do gás emitido para a atmosfera.

Os modelos com múltiplos canais podem ser empregados para o monitoramento de um grande

número de tratamentos ao mesmo tempo. No caso do sistema destacado na Figura 4.7, 15 pontos de amostragem são monitorados a cada 2 horas (Ibarr et al., 2021). Além da abrangência espacial, a robustez dos valores de concentração obtidos é sem dúvida a maior vantagem desses sistemas a laser, pois, a cada 2 segundos, é realizada uma medida da concentração do gás. A concentração média do gás de interesse é o resultado de no mínimo 30 medidas. Essa robustez permite estimar o fluxo com menor número de tempos de coleta (Ibarr et al., 2021).

Em geral, os equipamentos com essa técnica são operados em sistemas dinâmicos. No modo estático, o volume de câmara deve ser superior a 50 L para evitar efeitos significativos de pressão negativa, pois uma desvantagem da técnica é a necessidade de amostras com maior volume para análise, até 50 vezes maior do que os utilizados em cromatografia gasosa. A sensibilidade a elevadas temperaturas é um problema para ambientes tropicais, que, em rotinas longas no campo, especialmente no verão, pode implicar interrupções frequentes por sobreaquecimento e necessidade de desligamento. A umidade do ar também pode representar um problema, porém é contornável

Fotos: Bruno Alves



Figura 4.6. Analisador do tipo Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS) em monitoramentos de fluxos de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) do solo plantado com soja, em casa de vegetação (A) e no campo (B), ambos na Embrapa Agrobiologia.



Figura 4.7. Analisador do tipo Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS), em monitoramentos de fluxos de gases de efeito estufa (GEE) do solo com espécies florestais em casa de vegetação (A) e no campo (B), ambos na Embrapa Florestas.

com a utilização de filtros na entrada do ar aspirado do ambiente externo. Os equipamentos têm custo elevado (> US\$ 180.000,00), sendo talvez o que mais limite sua ampla utilização no País. Por outro lado, a robustez dos equipamentos, que praticamente não demandam manutenção, além de dispensar o uso de gases de calibração, reduz bastante os custos de operação das pesquisas. A assistência técnica ainda é muito incipiente no País.

O modo de bancada é uma opção interessante que permite operar o equipamento de forma semelhante a um cromatógrafo de gases, evitando expor a poeiras, alta umidade e temperaturas. Tem sido usado na Embrapa Agrobiologia para estudos de fluxos de N_2O e CH_4 do solo pela técnica de câmaras estáticas fechadas. Neste caso, a amostra do interior da câmara é retirada a cada tempo de incubação, o que é feito com uma seringa de 200 mL acoplada a uma sacola do tipo Tedlar (sacolas de material plástico altamente impermeável para amostras ambientais), sendo um volume suficiente para o analisador laser do tipo AO-ICOS (Figura 4.8). As sacolas substituem as seringas e frascos de cromatografia (vials ou headspace) frequentemente usados na coleta e armazenamento dos gases para análise. O custo das sacolas, no entanto, é elevado (~US\$ 50,00 por unidade), embora sejam reutilizáveis.

A experiência com o uso dos equipamentos baseados na espectroscopia a laser mostra que se ganha muito em sensibilidade e precisão, sendo possível medir facilmente os fluxos de gases do solo, mesmo que muito pequenos. Essa condição permite reduzir o número de amostragens durante a incubação, e até mesmo o tempo entre amostragens, agregando eficiência na experimentação.

Soluções de inovação para monitoramento da emissão de gases de efeito estufa de animais

A pecuária tem sido associada a elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ocasionalmente, em discussões realizadas em torno da temática sobre mitigação de GEE em sistemas de produção de ruminantes, parece incompatível a relação entre eficiência alimentar, adequado desempenho animal e emissões de GEE. Sob diferentes formas, no entanto, é possível desenvolver sistemas de produção sustentáveis e, ao mesmo tempo, ter lucro e produção de carne e leite que atendam às exigências do consumidor e que



Fotos: Bruno Alves

Figura 4.8. Sistema de transferência de ar da câmara para sacola Tedlar, utilizando uma seringa de 200 mL.

Nota: Realiza-se uma aspiração inicial de 10 mL para lavagem, seguida de aspiração e transferência de 200 mL do ar da câmara para a sacola. A sacola é levada ao laboratório e uma a uma são conectadas ao analisador laser, sendo a análise das concentrações de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) realizadas em aproximadamente 1,5 minutos.



garantam a lucratividade ao produtor rural, conforme espécie e categoria animal.

Nessa perspectiva, duas tecnologias são especialmente importantes: a prova de proficiência de emissão de CH_4 em bovinos e os serviços de mensuração de GEE em pequenos ruminantes através de câmaras respirométricas.

Prova de proficiência de emissão de metano entérico de bovinos

A tecnologia, denominada Prova de Emissão de Gases (PEG), foi lançada pela Embrapa Pecuária Sul e visa medir a emissão do gás metano emitido pelos bovinos de raças europeias. O intuito é que

a pecuária possa utilizar essas informações para ajudar na seleção de reprodutores, unindo ganho de peso a produção com menor emissão de GEE. A PEG é uma ferramenta para melhorar a eficiência da pecuária e reduzir as emissões de GEE, e faz parte de um esforço maior para entender e reduzir o impacto da pecuária para o clima, contribuindo para solucionar um dos desafios da pecuária em termos de sustentabilidade. A ferramenta serve para identificar animais com menor emissão de metano, o que pode ser um fator importante na seleção genética, contribuindo indiretamente para a criação de rebanhos com maior eficiência na produção e menor impacto ambiental.

A metodologia de avaliação da emissão de metano entérico passou a integrar o serviço que é oferecido pela Embrapa Pecuária Sul na avaliação de desempenho e eficiência alimentar. A avaliação é realizada com reprodutores das raças europeias como Angus, Charolês, Braford e Hereford, que todos os anos são enviados à Unidade de Pesquisa. O serviço usa a técnica do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6) conforme descrito em protocolo estabelecido pela Embrapa em anos anteriores (Berndt et al., 2014). O teste busca identificar

os animais com menor emissão de metano para cada quilo de alimento consumido e por quilo de peso vivo produzido. O metano entérico é um dos principais GEE emitidos pela pecuária, e a pesquisa visa à redução desse impacto ambiental (Genro et al., 2023).

Além de aliar a emissão de metano com as provas de avaliação a campo de eficiência alimentar, a Embrapa Pecuária Sul pretende realizar uma validação genética desta característica, contribuindo com o maior entendimento da produção de metano pelos animais. A produção pecuária é a principal fonte de emissão de metano no Brasil, dessa forma, do ponto de vista da competitividade nacional, reduzir a emissão de metano na produção pecuária e melhorar os índices de eficiência alimentar implicam diretamente melhoria da imagem do País. Os resultados preliminares indicam menor emissão por animal por ano em relação ao preconizado pelos guias do IPCC (Genro et al., 2023), gerando uma qualificação dos animais e contribuição direta à descarbonização da pecuária brasileira.

Serviço de mensuração de gases de efeito estufa em pequenos ruminantes no Laboratório de Respirometria do Semiárido (Laresa)

No contexto da mudança climática, os ensaios de avaliação de metabolismo de ruminantes, através da respirometria, contribuem também para a mensuração da emissão de GEE, permitindo o desenvolvimento de técnicas de manejo alimentares eficientes para mitigação desses gases em sistemas de produção pecuários, subsidiando o desenvolvimento de rações e suplementos que propiciem a máxima eficiência alimentar.

A mensuração dessas emissões, utilizando câmaras respirométricas, ocorre em períodos de 21–24 horas por animal, constituindo o padrão ouro que permite, inclusive, calibrar outros equipamentos, visando ao uso de outras técnicas também aces-

síveis e escaláveis para a coleta de dados de campo. Na Embrapa Caprinos e Ovinos, essa técnica vem sendo estudada e aprimorada há pelo menos 16 anos. Inicialmente, os esforços foram direcionados para a calibração dos equipamentos garantindo medições adequadas, especialmente de metano entérico e dióxido de carbono. Modelos apropriados vêm sendo desenvolvidos continuamente, permitindo a avaliação de pequenos ruminantes a pasto. Outra abordagem inclui o uso de câmaras respirométricas portáteis, que podem ser transportadas para o campo, além da estratégia de deslocamento dos animais em horários específicos do dia até os locais onde estão instaladas as câmaras respirométricas, permitindo medições em períodos curtos de tempo (30 a 60 minutos).

Sob a perspectiva econômica, essa tecnologia tem o potencial de transformar o setor ao viabilizar novas práticas de alimentação, proporcionando benefícios financeiros aos produtores por meio da redução de custos e do aumento da eficiência produtiva. Dietas mitigadoras de GEE em associação a raças selecionadas para eficiência alimentar e menor emissão de GEE, por exemplo, podem ser aplicadas, na prática, por produtores de pequenos ruminantes, técnicos de campo e nutricionistas. Em ensaio experimental realizado na Embrapa Caprinos e Ovinos, foi possível mensurar que, a partir do uso de dietas com bioaditivos que manipulam a fermentação ruminal, houve a redução de 52% na emissão de CH_4 em relação a dietas tradicionais. É possível, portanto, a partir das avaliações feitas com essa metodologia, o desenvolvimento de sistemas pecuários mais produtivos e sustentáveis, que ajudem a manter os ecossistemas de forma adaptável à mudança do clima e que melhoraram progressivamente a eficiência de uso da terra e do solo. As pesquisas realizadas no Laresa resultaram em publicações inéditas, na tramitação de patente específica sobre utilização de bioaditivos mitigadores de GEE, oportunizando a interação com empresas nacionais e internacionais produtoras de insumos alimentares e bioaditivos mitigadores de GEE para ruminantes (Rogério et al.,

2019a, 2019b, 2022; Costa et al., 2020, 2021; Oliveira et al., 2020; Alves et al., 2024).

A instrumentação e os métodos desenvolvidos foram aplicados em experimentos de campo de longa duração da Embrapa e em áreas da iniciativa privada, gerando resultados altamente promissores. Os avanços da pesquisa e a crescente demanda do mercado por análises de GEE (metano entérico e CO₂) impulsionaram o lançamento do serviço oficialmente, que será realizado na *VICTAM LATAM 2025*³, maior evento (feira e congresso internacional) de tecnologia, equipamentos, ingredientes e aditivos para a cadeia produtiva com foco nas indústrias de nutrição animal e de processamento de grãos. Algumas limitações do uso da técnica podem ocorrer relativas às variações individuais, mas que são contornáveis pela necessidade de repetições mais numerosas, dependendo da variabilidade entre leituras.

O serviço de mensuração de GEE em pequenos ruminantes tem contribuído significativamente para a competitividade nacional no setor agropecuário. No Brasil, são reduzidas as estruturas e serviços que realizam esse tipo de mensuração. Ao ofertar o serviço, a Embrapa disponibiliza o seu ambiente de pesquisa qualificado, para que, de fato, sejamos meio para mensurar as reais emissões da pecuária, a adoção de práticas sustentáveis de produção, a máxima eficiência alimentar e produtiva, e reduzindo os riscos para o produtor e para a indústria.

O desenvolvimento de modelos matemáticos específicos para quantificação de emissões traz mais segurança e reduz riscos para a atividade, resultando em agregação de valor e incremento da competitividade. Para a indústria, é a garantia de que os produtos apresentam mais sustentabilidade. Aos produtores, permite que tenham maior conhecimento sobre sua produção, gerando receitas adicionais e possibilitando a entrada em novos mercados que valorizam práticas agrícolas

sustentáveis, fortalecendo a posição do Brasil no mercado global.

O serviço pode ser percebido pelos atores envolvidos como inovação, capaz de fornecer informações robustas, subsidiadas pela pesquisa qualificada, e que possam esclarecer que os sistemas pecuários brasileiros trazem consigo a característica da sustentabilidade ambiental, a partir de estratégias de manejo voltadas para a máxima eficiência e mitigação de GEE. Isso se traduz, notadamente, pela geração de índices específicos de mitigação de GEE por produto animal produzido (quilo de carcaça, litro de leite, por exemplo), permitindo a rastreabilidade das iniciativas de produção sustentável.

Soluções de inovação para monitoramento do carbono do componente arbóreo

Os inventários florestais tradicionais envolvem a medição de parâmetros biofísicos das árvores em parcelas amostrais, como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total (Corte et al., 2020). Esses dados são então utilizados em equações alométricas específicas para espécies ou grupos de espécies para estimar a biomassa de cada árvore, que é posteriormente extrapolada para a área total (Machado et al., 2025). Embora os inventários de campo possam fornecer estimativas altamente precisas em escalas locais, eles são dispendiosos, demandam muito tempo e são trabalhosos, especialmente para estudos que abrangem grandes áreas ou regiões de difícil acesso (Corte et al., 2020; Costa et al., 2021). No Brasil, o Inventário Florestal Nacional (IFN) utiliza essa metodologia para obter informações sobre os recursos florestais em nível nacional. Estudos como o de Machado et al. (2025) estabeleceram equações de biomassa e quantificaram os estoques de biomassa e carbono em florestas subtropicais no Paraná, utilizando

³ Disponível em: www.embrapa.br/caprinos-e-ovinos/sead.

dados alométricos coletados em campo e equações preexistentes para árvores maiores.

A quantificação dos estoques de carbono deriva muitas vezes das estimativas de biomassa. Assim, a biomassa aérea (Aboveground Biomass – AGB) em ecossistemas florestais e sistemas agroflorestais é fundamental para a compreensão do ciclo global do carbono, a avaliação da saúde dos ecossistemas, a determinação da produtividade primária e o monitoramento da biodiversidade (Sinha et al., 2016; Machado et al., 2025).

Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa

A dinâmica de crescimento e mortalidade, assim como perdas de biomassa por incêndios ou desmatamento, diretamente influenciam as concentrações de GEE na atmosfera (Costa et al., 2021; Machado et al., 2025). A estimativa da biomassa aérea, especialmente em larga escala e de forma repetida, é crucial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação à mudança climática no setor agrícola e florestal, como o manejo florestal sustentável, o reflorestamento e a implementação de sistemas de integração como o lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Corte et al., 2020; Lima et al., 2022).

O sensoriamento remoto possibilita adquirir dados sobre a vegetação em escalas espaciais e temporais muito maiores, superando algumas das limitações dos inventários de campo (Costa et al., 2021; Lima et al., 2022). Diferentes tipos de sensores e plataformas podem ser utilizados para estimar a biomassa aérea, incluindo sensores ópticos passivos, como os presentes nos satélites das séries Landsat e Sentinel-2, e sensores ativos, como o Light Detection and Ranging (LiDAR) e o Radio Detection and Ranging – RADAR. Dados ópticos multiespectrais permitem o cálculo de índices de vegetação (como o NDVI, SAVI e EVI) que estão relacionados à densidade da vegetação, à cobertura do dossel e à biomassa (Ceddia et al., 2017;

Zhou et al., 2022; Bartsch et al., 2025). Minhoni et al. (2021), em um estudo realizado em áreas agrícolas no sudeste do Brasil, demonstraram que a análise multitemporal de índices espectrais derivados de imagens Sentinel-2 pode ser utilizada para avaliar o carbono orgânico do solo e, indiretamente, fornecer informações sobre a biomassa da vegetação. No entanto, a estimativa direta da biomassa aérea utilizando apenas dados ópticos pode ser limitada pela saturação do sinal em áreas de alta biomassa e pela sensibilidade às condições atmosféricas (Corte et al., 2020). Embora LiDAR e RADAR sejam semelhantes no princípio básico (envio e recepção de pulsos de energia), elas utilizam tecnologias distintas e possuem características diferentes.

O LiDAR pode fornecer informações detalhadas sobre a altura das árvores, a estrutura do dossel, a densidade da vegetação e o volume da madeira, parâmetros que estão fortemente correlacionados com a biomassa (Costa et al., 2021). Estudos conduzidos no Brasil, como o de D'Oliveira et al. (2020) na Amazônia e o de Machado et al. (2025) em florestas subtropicais, evidenciam o potencial do LiDAR aerotransportado e embarcado em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou popularmente conhecidos como drones) para estimar a biomassa aérea com alta precisão. Machado et al. (2025) utilizaram equações alométricas e dados de inventário florestal para validar estimativas de biomassa obtidas com LiDAR. Em ecossistemas de savana tropical (Cerrado), Costa et al. (2021) e Machado et al. (2025) demonstraram a capacidade do LiDAR embarcado em VANTs para estimar a biomassa aérea total (incluindo árvores, arbustos e vegetação rasteira), destacando a importância dessa tecnologia para o monitoramento do carbono.

A combinação de dados de sensoriamento remoto óptico e LiDAR pode superar as limitações de cada técnica individualmente, fornecendo estimativas de biomassa aérea mais precisas e robustas (Zhang et al., 2019; Petropoulos et al., 2025). A integração de informações sobre a superfície do dossel, obtidas por sensores ópticos, com da-

dos estruturais da vegetação, fornecidos pelo LiDAR, permite uma caracterização mais completa da biomassa (Zhang et al., 2019). Kulawardhana et al. (2014) e Zhang et al. (2019) demonstraram que modelos de regressão múltipla que utilizam variáveis combinadas de LiDAR e índices de vegetação multiespectrais apresentam melhor desempenho na predição da biomassa vegetal do que modelos baseados em apenas uma das fontes de dados.

A Embrapa tem contribuições consistentes para a estimativa de biomassa aérea em florestas tropicais amazônicas utilizando dados de LiDAR aéreo e de VANT, com contribuições que abrangeram metodologias inovadoras para inventário florestal na Amazônia (D'Oliveira et al., 2020) e também em outros biomas (Dalla Corte et al., 2022). Um exemplo disso é o Netflora, desenvolvido pela Embrapa, que utiliza algoritmos de IA treinados em um banco de dados de 40 mil hectares mapeados por drones para semiautomatizar o planejamento e a execução de inventários florestais de precisão e espacializar emissões de carbono em diferentes usos da terra na Amazônia. O Netflora fornece um protocolo para a aquisição de dados de drone para a detecção de espécies florestais e treinamento de algoritmos de IA de acordo com calendário fenológico para o reconhecimento de espécies florestais por meio de ortofotos. Dessa forma, fortalece a automação nos inventários iniciais e amplia as capacidades de monitoramento de biomassa aérea e estoques de carbono (Cunha et al., 2019; Queiroz et al., 2023) em sistemas de manejo florestal de precisão.

Para converter a biomassa aérea em estoques de carbono, geralmente se assume que uma proporção fixa da biomassa seca, tipicamente em torno de 50%, é composta por carbono (Machado et al., 2025). Assim, as estimativas de AGB (em toneladas por hectare ou gigagramas) podem ser multiplicadas por um fator de conversão para obter os estoques de carbono equivalentes. Machado et al. (2025) estimaram os estoques de carbono em florestas subtropicais do Paraná utilizando essa abordagem.

A estimativa da biomassa de raízes (BGB) é mais desafiadora devido à dificuldade de observação direta do subsolo. Tradicionalmente, a BGB é estimada utilizando fatores de proporção raiz-parte aérea (R), que são multiplicados pela AGB para obter uma estimativa da biomassa subterrânea (Costa et al., 2021). Os fatores R podem variar amplamente dependendo da espécie, da idade da planta, das condições ambientais e do tipo de ecossistema (Costa et al., 2021). A precisão das estimativas de BGB baseadas em fatores R é, portanto, altamente dependente da disponibilidade de fatores específicos e representativos para a área de estudo. Alguns estudos têm buscado estabelecer relações empíricas entre parâmetros da parte aérea, como DAP, altura, área de copa, e a biomassa de raízes utilizando métodos destrutivos ou técnicas como o GPR (Adão et al., 2025), mas a generalização dessas relações ainda é um desafio. Basuki et al. (2009) e Machado et al. (2025) desenvolveram equações alométricas para estimar a biomassa acima e abaixo do solo em florestas tropicais de baixa altitude, demonstrando a complexidade da relação entre os componentes aéreo e subterrâneo.

Em relação às vantagens do sensoriamento remoto e das abordagens combinadas (óptico e LiDAR) sobre os inventários florestais tradicionais, destacam-se:

Cobertura espacial extensiva: Contribui para a avaliação da biomassa em grandes áreas, incluindo regiões remotas e de difícil acesso.

Repetibilidade e monitoramento temporal: Possibilita o acompanhamento das mudanças na biomassa ao longo do tempo em resposta a eventos naturais (crescimento, incêndios, tempestades) ou atividades humanas (manejo, desmatamento).

Redução de custos e tempo: Pode ser mais eficiente em termos de tempo e custo em comparação com a coleta intensiva de dados de campo em grandes áreas.

Informações estruturais detalhadas (LiDAR):

Fornece dados sobre a altura e a estrutura vertical da vegetação, que estão fortemente relacionadas à biomassa.

Também existem limitações e dificuldades associadas ao uso do sensoriamento remoto na estimativa da biomassa aérea, que serão tratadas na perspectiva futura.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto, especialmente o LiDAR e a combinação de dados ópticos e LiDAR, representa um avanço significativo na coleta de dados para a estimativa da biomassa aérea e, conseqüentemente, dos estoques de carbono em componentes arbóreos. Essas abordagens oferecem a escalabilidade e a repetibilidade necessárias para o monitoramento do carbono em larga escala, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação e mitigação da mudança climática na agricultura e em ecossistemas florestais, incluindo o contexto brasileiro (Costa et al., 2021; Minihoni et al., 2021; Machado et al., 2025). No entanto, é fundamental reconhecer as limitações e investir no desenvolvimento de metodologias robustas para a calibração, validação e integração dessas técnicas com dados de campo para obter estimativas cada vez mais precisas e confiáveis da biomassa aérea e subterrânea.

Família SIS

A família SIS é um conjunto de softwares de apoio ao manejo florestal de espécies introduzidas ou exóticas. Os softwares de manejo florestal são desenvolvidos desde 1988 pela Embrapa, inicialmente para monocultivos e, desde 2016, também para ILPF. Atualmente, são 25 softwares amplamente utilizados pelo setor florestal brasileiro. Com os programas é possível fazer prognoses de produção de madeira no presente e em condições futuras, para cada condição de clima e solo, efetuar análises econômicas e, depois, levar ao campo a melhor alternativa de plantio. Os programas possibilitam simular como o plantio florestal

cresce e produz, conforme os regimes de manejo que o próprio usuário indica, bem como calcular o carbono capturado pelas árvores.

Os modelos foram criados a partir de dados de inventários contínuos e experimentos desenvolvidos pela própria Embrapa e por empresas florestais, que disponibilizaram as bases de dados de inventários do crescimento e produção de suas florestas e testaram os softwares gerados. Programados na linguagem Delphi, os softwares são denominados por “SIS” seguido pelo nome popular do gênero ou espécie contemplada. Os softwares contemplam espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, além de acácia-negra, araucária, bracinga, cedro-australiano, mogno-africano e teca. Eles fornecem informações que permitem otimizar a produção e aumentar a renda do produtor.

Diferentemente de culturas agrícolas, cada povoamento exige um manejo específico para otimizar a produção da floresta. As práticas de desbastes de diferentes tipos, intensidades e épocas, e variações na idade do corte final podem afetar a produção. O efeito da prática também pode variar em função de fatores como o objetivo industrial da produção, a qualidade do local (solo, clima), o material genético, o espaçamento e a densidade de plantas. Se um destes fatores for alterado, o regime ideal de manejo muda e, assim, o potencial produtivo da floresta. O desbaste é uma das práticas mais importantes na produção florestal. A sua importância decorre da relação direta com o crescimento das árvores. À medida que as árvores crescem em um reflorestamento, aumenta a competição entre elas por água, luz e nutrientes. Por isso, são realizados desbastes que visam reduzir o excesso de competição. Os programas SIS permitem simular os efeitos dos desbastes e testar qualquer regime de manejo que se deseja aplicar nos povoamentos. Para operacionalizar os simuladores “SIS”, o usuário fornece os dados de inventário da floresta e os softwares preveem o crescimento e produção, indicando o quanto de madeira a floresta produz, em qualquer idade.

A tecnologia apresentada auxilia na definição de tratamentos silviculturais do tipo poda, desbaste imediato ou futuro, ou permanência até a colheita final da floresta, considerando fatores e parâmetros que levam a otimização da produção florestal e da renda dependendo do objetivo. Dessa forma, fica evidente que a tecnologia impulsiona a eficiência da produção florestal, assegurando a competitividade na geração de produtos madeireiros provenientes da floresta. A utilização dos softwares para otimizar o manejo florestal contribui para a sustentabilidade do setor, evitando o desperdício de recursos e promovendo a gestão eficiente dos recursos naturais.

Outro aspecto importante é que a tecnologia auxilia na redução do risco agrícola, pois a simulação permite criar cenários considerando o tipo de solo e clima. Nessa condição, é possível relacionar a produção da floresta, os investimentos em técnicas e tratamentos silviculturais de acordo com a capacidade de suporte do ambiente. Essa silvicultura de precisão possibilita conduzir a floresta com bases científicas visando o aproveitamento adequado do sítio e maximização da renda.

A sociedade enxerga os programas SIS de forma positiva, principalmente no que se refere à sua utilidade para o planejamento estratégico e manejo florestal. Os softwares SIS auxiliam os produtores a tomarem decisões sobre plantios, desbastes e colheitas, otimizando a produção e aumentando a renda. Anualmente são 4 mil downloads dos softwares da família SIS. A Embrapa, responsável por esses softwares, enfatiza a importância da sua facilidade de uso e a capacidade de simular diversos cenários, permitindo que os produtores analisem diferentes estratégias de manejo florestal.

Perspectivas futuras

Diante dos desafios impostos pelas mudanças do clima, intensificadas pela emissão de GEE, é crucial para o Brasil e para o setor produtivo monitorar e

quantificar essas emissões e também o carbono armazenado em diferentes compartimentos do ambiente. O Brasil, com seu vasto território e forte setor agropecuário, tem um papel importante tanto na emissão quanto na mitigação dos GEE. Para cumprir seus compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, e para que empresas e produtores rurais possam melhorar suas práticas e até serem recompensados por ações sustentáveis, é fundamental conseguir medir e monitorar o armazenamento de carbono no solo e nas florestas, e o quantitativo da emissão e da remoção de GEE, especialmente na agricultura.

A coleta de dados de campo para isso, em um país do tamanho do Brasil, é uma tarefa enorme. Para enfrentar esse desafio, a Embrapa e seus parceiros têm trabalhado no desenvolvimento e adaptação de técnicas e instrumental que sejam mais acessíveis e possam ser aplicados em larga escala. O objetivo é coletar dados de maneira mais eficiente e a um custo reduzido em comparação aos métodos tradicionais, que frequentemente exigem grande esforço, alta qualificação e podem ser invasivos. Embora os avanços tenham sido significativos, ainda há desafios a serem superados e áreas que precisam de melhorias.

Embora essas novas técnicas tenham avançado significativamente, ainda há aspectos que devem ser refinados ou aprimorados para que o monitoramento dos estoques de carbono e fluxos de GEE no campo, juntamente com outras variáveis essenciais, se torne completamente escalável, eficiente e reprodutível, permitindo a geração de métricas precisas em todo o País.

No que diz respeito ao monitoramento do carbono no solo, que é um componente tão importante quanto o carbono na vegetação, técnicas inovadoras como a plataforma digital AgLIBS e a plataforma SpecSolo representam um grande passo. Elas prometem análises mais rápidas e baratas, sem o uso de reagentes químicos e com menor geração de resíduos, facilitando a criação de mapas de carbono e nutrientes. A aceitação

dessas técnicas para certificar créditos de carbono em mercados voluntários é um passo importante, mas a padronização e validação em larga escala continuam sendo um trabalho contínuo. A integração com outros sistemas para gerar informações em tempo real, principalmente no caso da AgLIBS, como o conceito de um “rover agrícola” autônomo, ainda é uma perspectiva futura a ser consolidada. O “rover agrícola” seria capaz de transitar pelo campo monitorando o solo em tempo real e conectando essas informações diretamente com as operações agrícolas. Isso ajudaria a usar os insumos de forma mais inteligente, trazendo benefícios econômicos e ambientais.

Uma das principais perspectivas futuras para o monitoramento do carbono no solo e da biomassa de raízes é a integração de dados de sensoramento remoto, como RADAR/SAR e GPR, com modelos de aprendizado de máquina para melhorar a precisão da estimativa. O desafio é refinar os modelos para superar as complexas interações entre o sinal e outros fatores, como umidade do solo, e validar a precisão do GPR para estimar a biomassa de raízes. O GPR tem limitações de profundidade de penetração em solos argilosos ou úmidos, e a interpretação dos dados requer conhecimento especializado. A estimativa da biomassa de raízes com GPR ainda está em desenvolvimento. A integração desses dados com outras informações, usando aprendizado de máquina, é vista como um caminho para melhorar a precisão.

Outro ponto crucial para a quantificação do estoque de carbono no solo é a determinação da sua densidade. Os métodos tradicionais para medir a densidade são trabalhosos, limitando sua aplicação em grandes áreas. Uma alternativa promissora são as equações de pedotransferência (PTFs), que permitem estimar a densidade a partir de outras características do solo mais fáceis de obter, como granulometria (areia, silte, argila) e teor de carbono. Embora modelos baseados em aprendizado de máquina mostrem bom desempenho, um aspecto a ser aprimorado é a incorporação de va-

riáveis que capturam melhor os efeitos da estrutura do solo e das condições da paisagem (como relevo e clima), que também influenciam a densidade. Além disso, o desenvolvimento de PTFs que sejam precisas em nível nacional, considerando a enorme diversidade de solos do Brasil, é um desafio complexo que exige grandes bancos de dados e métodos avançados de processamento. Sondas automatizadas para a coleta de amostras de solo indeformadas também estão sendo testadas como uma forma de agilizar a determinação da densidade do solo, evitando a necessidade de cavar trincheiras. Embora essas sondas tenham grande potencial para substituir métodos tradicionais e permitir a coleta em larga escala, ainda são necessários estudos sistemáticos para validar sua precisão e correspondência com os métodos padrão em diferentes tipos de solo, condições de umidade e usos agrícolas.

Para o monitoramento dos fluxos de GEE liberados pelo solo na agricultura, as câmaras estáticas são a técnica mais utilizada globalmente. Contudo, com elas a coleta em campo é bastante complexa, exige muita mão de obra e limita o número de medições e a frequência de monitoramento, o que dificulta estudos mais abrangentes no tempo e no espaço. Sistemas semiautomáticos para coleta de amostras foram desenvolvidos para aumentar a capacidade de coleta no campo. A técnica de espectroscopia a laser para medição de GEE no solo permite respostas rápidas e operação portátil, mas é sensível a altas temperaturas e necessita de volumes de amostra maiores que a cromatografia gasosa. Além disso, a assistência técnica para equipamentos baseados em espectroscopia a laser ainda é incipiente no Brasil.

A mensuração de emissões de GEE de animais, como o metano entérico de bovinos e pequenos ruminantes, também apresenta desafios em termos de escala. Embora as câmaras respirométricas sejam consideradas o “padrão ouro” para medições precisas, elas são trabalhosas e restritas à pequena escala. Tornar essa mensuração acessível

e escalável para um grande número de animais e para uso direto nas propriedades rurais ainda é um obstáculo. A disponibilidade de serviços qualificados para essa mensuração já começa a ser possível no país, por meio da técnica do gás traçador SF₆. É preciso ampliar esse tipo de serviço e os ambientes em que esse seja ofertado, buscando abranger todas as principais condições de sistemas de produção presentes no país e de categorias de animais, raças, idade, entre outros.

Por fim, a quantificação do carbono armazenado em componentes arbóreos, essencial para entender o ciclo do carbono, também enfrenta desafios de escala. Os inventários florestais tradicionais, embora precisos localmente, são caros e lentos para grandes áreas. O sensoriamento remoto, incluindo LiDAR e imagens de satélite, oferece uma alternativa mais eficiente em termos de tempo e custo para monitorar biomassa em larga escala. No entanto, há limitações como a saturação de sinal em áreas densas (em dados ópticos) e o custo da aquisição e processamento de dados LiDAR. A criação de técnicas baseadas em inteligência artificial e sensores, como o Netflora, para apoiar inventários florestais e mapear emissões, requer coleta de dados específicos, como imagens capturadas por drones. Além disso, é fundamental o treinamento de modelos utilizando bancos de dados representativos e robustos para garantir a precisão das análises.

Em suma, enquanto o Brasil avança no desenvolvimento e adaptação de técnicas e ferramentas inovadoras para coletar e monitorar dados de campo para a gestão climática e ambiental na agricultura e floresta, ainda há um caminho a percorrer para tornar essas soluções totalmente acessíveis, escaláveis e validadas em todas as diversas condições do País. O aprimoramento da acurácia das previsões, a validação de novas metodologias, como sondas automatizadas, e a superação das limitações de escala dos métodos, incluindo câmaras de GEE e respirometria animal, são desafios persistentes. Além disso, é essencial refinar o uso

de dados de sensoriamento remoto e integrá-los a outras informações. Para enfrentar essas questões, é necessário um investimento contínuo em pesquisa e infraestrutura. Superar essas barreiras é fundamental para que o Brasil possa monitorar eficazmente seus estoques de carbono e emissões de GEE em larga escala, apoiando tanto os compromissos nacionais quanto as necessidades do setor produtivo para uma produção cada vez mais sustentável e competitiva. O objetivo é ter ferramentas de monitoramento acessíveis, precisas e confiáveis, que apoiem as metas climáticas do País, o setor produtivo e a gestão sustentável dos recursos naturais.

Referências

- ABDELBAKI, A. M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 1611-1619, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.008>.
- ADÃO, F.; PÁDUA, L.; SOUSA, J. J. Evaluating Soil Degradation in Agricultural Soil with Ground-Penetrating Radar: A Systematic Review of Applications and Challenges. **Agriculture**, v. 15, n. 8, p. 852, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture15080852>.
- AL-QINNA, M. I.; JABER, S. M. Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 3, p. 963-976, 2013. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.56.9922>.
- ALVES, B. J. R.; SCIVITTARO, W. B.; JANTALIA, C. P.; SOUSA, R. O. de; BAYER, C.; RODRIGUES, R. de A. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; MADARI, B. E. **Protocolo para medições de fluxos de gases de efeito estufa em sistemas aeróbicos e alagados de produção de grãos - Rede Fluxus**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2017. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 306). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161925/1/DOC306-PROTOCOLO-MEDICOES-DE-FLUXOS-DE-GASES.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.
- ALVES, F. G. da S.; CARNEIRO, M. S. de S.; COSTA, C. dos S.; GUEDES, L. F.; OLIVEIRA, D. de S.; MARTINS, E. C.; POMPEU, R. C. F. F.; ROGERIO, M. C. P. Economic and financial viability of the production of Brazilian somalis sheep fed with different nutritional plans. **Tropical Animal Health and Production**, v. 56, p. 231, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11250-024-04014-w>.
- BABOS, D. V.; GUEDES, W. N.; FREITAS, V. S.; SILVA, F. S.; TOZO, M. L. L.; VILLAS-BOAS, P.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy as an analytical tool

for total carbon quantification in tropical and subtropical soils: evaluation of calibration algorithms. **Frontiers in Soil Science**, v. 3 (1242647), p. 1-14, 2024a. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2023.1242647>.

BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 39, p. 397-407, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20140358>.

BARTSCH, B. D. A.; ROSIN, N. A.; ROSAS, J. T. F.; POPPIEL, R. R.; MAKINO, F. Y.; VOGEL, L. G.; NOVAIS, J. J. M.; FALCIONI, R.; ALVES, M. R.; DEMATTÉ, J. A. M. Space-time mapping of soil organic carbon through remote sensing and machine learning. **Soil and Tillage Research**, v. 248, art. 106428, p. 1-14, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106295>.

BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684-1694, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1-2, p. 90-97, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>.

BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; PEREIRA, L. G. R.; RODRIGUES, P. H. M.; ALMEIDA, R. G. de; GUIMARAES JUNIOR, R.; FRIGHETTO, R. T. S.; OLIVEIRA, P. P. A. **Diretrizes para avaliação da emissão de metano entérico com a técnica do gás traçador SF₆**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 19 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 117). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1024608/1/Diretrizesparaavaliacaodaemissaoemetano.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

BERNOUX, M.; CERRI, C.; ARROUAYS, D.; JOLIVET, C.; VOLKOFF, B. Bulk densities of Brazilian Amazon Soils related to other soil properties. **Soil Science Society American Journal**, v. 62, n. 3, p. 743-9, 1998. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030029x>.

BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. D. S.; MENEZES, M. D.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. Bulk density prediction for histosols and soil horizons with high organic matter content. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 41, e0160158, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160158>.

BOSCHI, R. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; SOUZA, G. P. S.; CIDIN, A. C. M.; ASSAD, E. D. Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 8-16, 2015.

BOTULA, Y. D.; NEMES, A.; VAN RANST, E.; MAFUKA, P.; PUE, J.; CORNELIS, W. M. Hierarchical pedotransfer functions to predict bulk density of highly weathered soils in Central Africa. **Soil Science Society American Journal**, v. 79, n. 2, p. 476-86, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0238>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases efeito estufa da pecuária brasileira**. In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; COSTA, M. S. N. (org.). Brasília, DF: Mapa/Senar, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/coletanea-gee-pecuaria_web.pdf/view. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Brazil's national inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases: Brazil's National Inventory Report 1990-2022**. Brasília, DF: MCTI, 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/BRA_NIR_2024_ENG.pdf. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: MCTI, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4_com_nac_brasil_web.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE)**. Brasília, DF: MCTI, 2024b. Disponível em: <https://sirene.mcti.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BUBLITZ, J.; DÖLLE, C.; SCHADE, W.; HARTMANN, A.; HORN, R. Laser-induced breakdown spectroscopy for soil diagnostics. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 2, p. 305-312, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00375.x>.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; TIMM, L. C. Improved laboratory calibration of a single-probe surface gamma-neutron gauge. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, n. 5, p. 937-946, 2000a.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; TIMM, L. C. The use of a surface gamma-neutron gauge to explore compacted layers. **Soil Science**, v. 165, n. 8, p. 665-676, 2000b. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-200008000-00008>.

CEDDIA, M.; GOMES, A.; VASQUES, G.; PINHEIRO, É. Soil Carbon Stock and Particle Size Fractions in the Central Amazon Predicted from Remotely Sensed Relief, Multispectral and Radar Data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 1-19, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020124>.

CHEN, S.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; LUO, Z.; SCHILLACI, C.; ARROUAYS, D.; RICHER-DE-FORGES, A. N.; SHI, Z. European topsoil bulk density and organic carbon stock database (0-20 cm) using machine-learning-based pedotransfer functions. **Earth System Science Data**, v. 16, n. 5, p. 2367-2383, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-16-2367-2024>.

CHOUDHURY, B. U.; SANTRA, P.; SINGH, N.; CHAKRABORTY, P. Development of land-use-specific pedotransfer functions for predicting bulk density of acidic topsoil in eastern Himalayas

- (India). **Geoderma Regional**, v. 34, e00671, p. 1-13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2023.E00671>.
- COELHO, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; PEREIRA, G. E.; LIESENBERG, V. Espectroscopia de Visível e Infravermelho Próximo (Vis-NIR) para predição de atributos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170068, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500038>.
- CORTE, A. P. D.; SOUZA, D. V.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; MOHAN, M.; SILVA, C. A.; ZAMBRANO, A. M. A.; PRATA, G.; ALVES DE ALMEIDA, D. R.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; KLAUBERG, C.; MORAES, A. de; SANQUETTA, M. N.; WILKINSON, B.; BROADBENT, E. N. Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, 105815, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
- COSTA, C. dos S.; ROGÉRIO, M. C. P.; ALVES, F. G. da S.; GUEDES, L. F.; POMPEU, R. C. F. F.; FERREIRA, A. L.; VASCONCELOS, A. M. de; MUIR, J. P.; NEIVA, J. J. M. Dietary nutrient restrictions in the post-weaning period change feed efficiency and productivity of Santa Inês ewe lambs. **Animal Production Science**, v. 60, n. 17, p. 1978-1986, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN19300>.
- COSTA, C. dos S.; ROGÉRIO, M. C. P.; FERREIRA, A. L.; MACHADO, F. S.; POMPEU, R. C. F. F.; ALVES, F. G. da S.; RÉGO, J. P. A. do; PIMENTEL, P. G.; MUIR, J. P.; NEIVA, J. J. M. Dietary nutrient restrictions in the post-weaning period change Santa Inês ewe lamb nutritional metabolic profile. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, n. 3, article number 359, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02767-3>.
- COSTA, M. B. T. da; SILVA, C. A.; BROADBENT, E. N.; LEITE, R. V.; MOHAN, M.; LIESENBERG, V.; STODDART, J.; AMARAL, C. H. de; ALMEIDA, D. R. A. de; SILVA, A. L. da; RÉ Y. GOYA, L. R.; CORDEIRO, V. A.; REX, F.; HIRSCH, A.; MARCATTI, G. E.; CARDIL, A.; MENDONÇA, B. A. F. de; HAMAMURA, C.; CORTE, A. P. D.; KLAUBERG, C. Beyond trees: Mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data. **Forest Ecology and Management**, v. 491, 1151195, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119155>.
- COSTA, M. G.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MELO, L. C.; ROCHA, M. P.; ALMEIDA, J. R. V. de. Mapeamento de biomassa florestal utilizando LiDAR embarcado em VANT: estudo de caso em plantio de *Pinus*. **Revista Árvore**, v. 47, e470404, 2023.
- CREMERS, D. A.; RADZIEMSKI, L. J. **Handbook of laser induced breakdown spectroscopy**. Oxford, England: John Wiley & Sons, 2013. 418 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118567371>.
- CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de terra preta arqueológica da Amazônia. **Revista. Ambiente e Água**, v. 12, n. 2, p. 263-281, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1890>.
- CUNHA, R. M. da; ORFANÓ, E. F.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; PAPA, D. de A. Estimativa da perda de biomassa em área de manejo florestal sustentável na Amazônia por meio da combinação de dados lidar e câmeras RGB a bordo de aeronave remotamente pilotada (ARP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., Santos. **Anais [...]** Santos: Galoá Proceedings, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/198851/1/26805.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.
- DALAL, R. C.; WANG W.; ROBERTSON G. P.; PARTON W. J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options, a review. **Australian Journal Soil Research**, v. 41, n. 2, p.165-195, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR02064>.
- DALLA CORTE, A. P. SANQUETTA, C. R.; MENDONÇA, A. R. Tecnologia LiDAR aplicada a inventários florestais: métodos e estudos de caso. In: SILVA, J. R. M.; MARTINS, F. B. (org.). **Inovações em Inventário e Manejo Florestal**. Curitiba: Ed da UFPR, 2022. p. 45-78.
- DENG, O.; LI, X.; DENG, L.; ZHANG, S.; GAO, X.; LAN, T.; ZHOU, W.; TIAN, D.; XIAO, Y.; YANG, J.; OU, D.; LUO, L. Emission of CO₂ and CH₄ from a multi-ditches system in rice cultivation region: Flux, temporal-spatial variation and effect factors. **Journal of Environmental Management**, v. 270, 110918, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110918>.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M. E.; ZAMBRANO, A. M. A.; SILVA, C. A.; AVINO, F. S.; PRATA, G. A.; MELLO, R. A.; FIGUEIREDO, E. O.; JORGE, L. A. de C.; LEOMAR JUNIOR; ALBUQUERQUE, R.; BRANCALION, P. H. S.; WILKINSON, B.; OLIVEIRA-DA-COSTA, M. Aboveground Biomass Estimation in Amazonian Tropical Forests: A Comparison of Aircraft- and GatorEye UAV-borne LIDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, n. 11, p. 754, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12111754>.
- DORICH, C. D.; VARADARAJAN, S.; PANTOJA, J. L.; HRISTOV, A. N. Short communication: Use of a portable automated open-circuit gas quantification system and the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions in Holstein cows fed ad libitum or restricted. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 4, p. 2676-2681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8468>.
- EL-JAMAOU, I.; DELGADO-INIESTA, M. J.; MARTÍNEZ SÁNCHEZ, M. J.; PÉREZ SIRVENT, C.; MARTÍNEZ LÓPEZ, S. Assessing Soil Organic Carbon in Semi-Arid Agricultural Soils Using UAVs and Machine Learning: A Pathway to Sustainable Water and Soil Resource Management. **Sustainability**, v. 17, n. 8, p. 3440, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083440>.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes**: GSOC-MRV protocol. Rome, 2020. 140 p. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- FERREIRA, F. A. GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. Aplicação de VANTs e LiDAR para a caracterização da estrutura de florestas nativas

no Cerrado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, n. 172, e202202214, 2022.

FONTANA, A.; BIANCHI, S. R. Carbono e nitrogênio total: analisador elemental. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 393-396. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107200/1/Pt3Cap4Carbonoenitrogeniototal.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. de. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 360-367. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107196/1/Pt3Cap1Carbonoorganico.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C. (ed.). **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 30 p. (Embrapa Solos. Documentos, 243). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169442/1/CNPS-DOC-243-2024.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

GENRO, T. C. M.; LARA, D. M. de; LAMPERT, V. do N. **Análise das emissões de metano entérico do rebanho de bovinos de corte do Rio Grande do Sul**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2023. 12 p. (Embrapa Pecuária Sul. Comunicado técnico, 109). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158126/1/CT-109-Online.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

GOMES, A. S.; FERREIRA, A. C. S.; PINHEIRO, E. F. M.; MENEZES, M. D.; CEDDIA, M. B. The use of Pedotransfer functions and the estimation of carbon stock in the Central Amazon region. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 6, p. 450-460, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0310>.

HAMMOND, K. J.; BURKE, J. L.; KOOLAARD, J. P.; MUETZEL, S.; PINARES-PATÍÑO, C. S.; WAGHORN, G. C. The GreenFeed system for measurement of enteric methane emissions from cattle. **Animal Production Science**, v. 56, n. 3, p. 181-189, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN15631>.

HAN, G. Z.; ZHANG, G. L.; GONG, Z. T.; WANG, G. F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. **Soil Science**, v. 177, n. 3, p. 158-164, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31823fd493>.

HAYNES, R. J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. **Advances in Agronomy**, v. 85, p. 221-268, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)85005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)85005-3).

HEUSCHER, S. A.; BRANDT, C. C.; JARDINE, P. M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. **Soil Science Society American Journal**, v. 69, n. 1, p. 51-56, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051a>.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00084-2).

HUTCHINSON, G. L.; ROCHETTE, P. Non-flow-through steady-state chambers for measuring soil respiration. numerical evaluation of their performance. **Soil Science Society American Journal**, v. 67, n. 1, p. 166-180, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1660>.

IBARR, M. A.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; RIBEIRO, R. H.; RACHWAL, M. F. G.; STAHL, J. Nitrous oxide and methane emissions from soil and nitrogen uptake by eucalyptus fertilized with enhanced efficiency fertilizers. **Plant and Soil**, v. 463, n. 1-2, p. 615-630, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04938-5>.

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 2, p. 161-173, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9178-y>.

JOL, H. M. **Ground penetrating radar: Theory and applications**. [S.l.]: Elsevier Science, 2009. 524 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>.

KULAWARDHANA, R. W.; POPESCU, S. C.; FEAGIN, R. A. Fusion of lidar and multispectral data to quantify salt marsh carbon stocks. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 345-357, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.036>.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 10, p. 1537-1542, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00051-1).

LIBEL, G.; LATINI, I. P.; HERCULES, M. C. **Sistema de coleta automatizada de amostras de ar para análise da concentração de gases de efeito estufa do solo**. 2021. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

LIMA, A. A. J.; LOPES, J. C.; LOPES, R. P.; DE FIGUEIREDO, T.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; HERNÁNDEZ, Z. Soil Organic Carbon Assessment Using Remote-Sensing Data and Machine Learning: A Systematic Literature Review. **Remote Sensing**, v. 17, n. 5, 882, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17050882>.

LIMA, G. S. A. de; FERREIRA, M. E.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M. Carbon estimation in an integrated crop-livestock system with imaging sensors aboard unmanned aerial platforms. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 28, e100867, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100867>.

MACHADO, H. A.; MALLMANN, A. A.; ENGEL, K.; FAVARIN, J. A. S.; MODESTO, J. L. C.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; KOEHLER, H. S.; PÉLICO NETTO, S.; BEHLING, A.;

TRAUTENMÜLLER, J. W. Aboveground biomass and carbon stocks in subtropical forests. **Ecological Indicators**, v. 172, 113294, p. 1-14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113294>.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 do MapBiomas da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>. Acesso em: 6 maio 2025.

MILORI, D. M. B. P.; SEGNINI, A.; SILVA, W. T. L. da; POSADAS, A.; MARES, V.; QUIROZ, R.; MARTIN-NETO, L. **Emerging techniques for soil carbon measurements**. Copenhagen, Denmark: CCAFS, 2011. 30 p. DOI: <http://hdl.handle.net/10568/10279>.

MINHONI, R. T. D. A.; SCUDIERO, E.; ZACCARIA, D.; SAAD, J. C. C. Multitemporal satellite imagery analysis for soil organic carbon assessment in an agricultural farm in southeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 784, 147216, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147216>.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.025>.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (ed.). **Methods of soil analysis: part 3 chemical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010.

NICOLODELLI, G.; MARANGONI, B. S.; CABRAL, J. S.; VILLAS-BOAS, P. R.; SENESI, G. S.; SANTOS, C. H.; ROMANO, R. A.; SEGNINI, A.; LUCAS, Y.; MONTES, C. R.; MILORI, D. M. B. P. Quantification of total carbon in soil using laser-induced breakdown spectroscopy: a method to correct interference lines. **Applied Optics**, v. 53, n. 10, p. 2170-2176, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.53.002170>.

OBIDIKE-UGWU, E. O.; OGUNWOLE, J. O.; EZE, P. N. Derivation and validation of a pedotransfer function for estimating the bulk density of tropical forest soils. Modeling **Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 801-809, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01531-2>.

OLIVEIRA, D. S.; ALVES, A. A.; ROGÉRIO, M. C. P.; POMPEU, R. C. F. F.; PEREIRA, E. S.; AZEVEDO, D. M. M. R.; GUEDES, L. F.; COSTA, C. dos S.; MUIR, J. P. Influence of nutrient restriction on finishing Morada Nova lambs. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, n. 6, p. 3509-3518, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02385-5>.

OLIVEIRA, P. P. A. (ed.). **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa Pecuária**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 20 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documento, 116). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/>

bitstream/item/117416/1/Documentos116.pdf. Acesso em: 25 fev. 2025.

PALLADINO, M.; ROMANO, M.; PASOLLI, E.; NASTA, P. Developing pedotransfer functions for predicting soil bulk density in Campania. **Geoderma**, v. 412, 115726, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115726>.

PARKIN, T. B.; VENTEREA, R. T. Chamber-based Trace Gas Flux Measurements. In: FOLLETT, R. F. (ed.). **Sampling Protocols**. USDA, 2010. p. 3-39. Disponível em: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Program/212/Chapter%203.%20GRACEnet%20Trace%20Gas%20Sampling%20Protocols.pdf>. Acesso em: 21 maio 2015.

PETROPOULOS, T.; BENOS, L.; BUSATO, P.; KYRIAKARAKOS, G.; KATERIS, D.; AIDONIS, D.; BOCHTIS, D. Soil Organic Carbon Assessment for Carbon Farming: A Review. **Agriculture**, v. 15, n. 5, 567, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15050567>.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.013>.

QUEIROZ, R. F. P. de; D'OLIVEIRA, M. V. N.; REZENDE, A. V.; ALENCAR, P. A. L. de. Estimation of Aboveground Biomass Stock in Tropical Savannas Using Photogrammetric Imaging. **Drones**, v. 7, n. 8, 423, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7080493>.

RAMCHARAN, A.; HENGL, T.; BEAUDETTE, D.; WILLS, S. A soil bulk density pedotransfer function based on machine learning: A case study with the NCSS Soil characterization database. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 1279-1287, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0421>.

REIS, A. M. H.; TEIXEIRA, W. G. T.; FONTANA, A.; BARROS, A. H. C.; VICTORIA, D. C.; VASQUES, G. M.; SAMUEL-ROSA, A.; OTTONI, M. V.; MONTEIRO, J. E. B. A. Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian. **Scientia Agricola**, v. 81, e20220255, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0255>.

ROGÉRIO, M. C. P.; BORGES, I.; FERREIRA, A. L.; MACHADO, F. S.; POMPEU, R. C. F. F.; GUEDES, L. F.; COSTA, C. dos S.; GUEDES, F. L.; GALVANI, D. B. **Especificações padrões para mensurações de gases de efeito estufa e metabolismo de pequenos ruminantes no bioma Caatinga**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2019a. 24 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).

ROGÉRIO, M. C. P.; GUEDES, L. F.; ALVES, A. A.; POMPEU, R. C. F. F.; FERREIRA, M. I. C.; ALVES, F. G. da S.; COSTA, C. dos S.; BOMFIM, M. A. D.; GUEDES, F. L. **Estratégias nutricionais para grupos genéticos localmente adaptados ao Semiárido brasileiro visando a mitigação de gases de efeito estufa**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2019b. 18 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Comunicado técnico, 196). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa>

[br/infoteca/bitstream/doc/1117108/1/CNPC2019Cot196.pdf](https://infoteca.bitstream/doc/1117108/1/CNPC2019Cot196.pdf). Acesso em: 22 fev. 2025.

ROGÉRIO, M. C. P.; SOUSA, M. G. C. de; PIMENTEL, P. G.; POMPEU, R. C. F. F.; TEIXEIRA, M.; OLIVEIRA, D. de S.; BARROSO, M. R. C.; VIEIRA, L. da S. **Dietas para incremento da resiliência à verminose e mitigação de gases do efeito estufa**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2022. 17 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 19). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1148937/1/CNPC-2022-Art45.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SANTOS, L. S.; SOUZA, A. P. D.; LIMA, R. C. S.; NEVES, J. C. L.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; LEITE, V. G.; GOMES. Estimativa de altura e volume de árvores em floresta de Mata Atlântica utilizando dados LiDAR de drone. **Cerne**, v. 27, n. 4, e104990, 2021.

SANTOS, W. P.; VAZ, C. M. P.; MARTIN-NETO, L.; ANSELM, A.; TOMASELLA, J.; COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; VAN LIER, Q. J.; GALBIERI, R.; PERINA, F. J. Predicting bulk density in Brazilian soils for carbon stocks calculation: a comparative study of multiple linear regression and Random Forest models using continuous and categorical variables. **Discover Soil**, v. 2, n. 7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00035-6>.

SCHILLACI, C.; PEREGO, A.; VALKAMA, E.; MÄRKER, M.; SAIA, S.; VERONESI, F.; LIPANI, A.; LOMBARDO, L.; TADIELLO, T.; GAMPER, H.A.; TEDONE, L.; MOSS, C.; PAREJA-SERRANO, E.; AMATO, G.; KÜHL, K.; DĂMĂȚIRĂ, C.; COGATO, A.; MZID, N.; EESWARAN, R.; RABELO, M.; SPERANDIO, G.; BOSINO, A.; BUFALINI, M.; TUNÇAY, T.; DING, J.; FIORENTINI, M.; TISCORNIA, G.; CONRADT, S.; BOTTA, M.; ACUTIS, M. New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 780, 146609, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146609>.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; FERREIRA, E. C.; WATANABE, SPERANÇA, M. A.; NICOLODELLI, G.; VILLAS-BOAS, P. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; MILORI, D. M. B. P. Physical and chemical matrix effects in soil carbon quantification using laser-induced breakdown spectroscopy. **American Journal of Analytical Chemistry**, v. 5, n. 11, p. 722-729, 2014.

SEVASTAS, S.; GASPARATOS, D.; BOTSIS, D.; SIARKOS, I.; DIAMANTARAS, K. I.; BILAS, G. Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. **Geoderma Regional**, v. 14, e00169, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00169>.

SINHA, S.; JEGANATHAN, C.; SHARMA, L. K.; NATHAWAT, M. S.; DAS, A. K.; MOHAN, S. Developing synergy regression models with space-borne ALOS PALSAR and Landsat TM sensors for retrieving tropical forest biomass. **Earth System Science**, v. 125, n. 4, p. 725-735, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0692-z>.

SOUZA, K. A.; OLIVEIRA, A. L. de; CARVALHO, L. M. T. de; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; LEITE, V. G.; NEVES, J. C. L. Desempenho de dados LiDAR aerotransportados no inventário florestal de

áreas de plantio de eucalipto. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1928-1936, 2020.

SOUZA, B. Q.; BRITO, L. R.; CARVALHO, H. P.; PINHEIRO, R. M.; FERREIRA, E. J. L.; SILVA, V. E. P. Utilização de drones estudos florestais: uma revisão sistemática. **Diversitas Journal**, v. 9, n. 3, p. 1091-1104, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v9i3.2887>.

SOUZA, E.; FERNANDES-FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R.; PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0485>.

TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR04054>.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190-202, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-199803000-00003>.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; MANSILLA BACA, J. F.; SANTOS, M. de L. M. **Mapas de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil na resolução espacial de 1 km - Versão 2021 [CNPS]**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. Disponível em: https://geoinfo.dados.embrapa.br/maps/4735/metadata_detail. Acesso em: 3 jun. 2025.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide. **Annals of Forest Science**, v. 7, n. 3, article number 86, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0869-0>.

VILLAS-BOAS, P. R.; FRANCO, M. A.; MARTIN-NETO, L.; GOLLANY, H. T.; MILORI, D. M. B. P. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil analysis, part I: Review of fundamentals and chemical and physical properties. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 5, p. 789-804, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12888>.

VILLAS-BOAS, P. R.; FRANCO, M. A.; MARTIN-NETO, L.; GOLLANY, H. T.; MILORI, D. M. B. P. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil characterization, part II: Review of elemental analysis and soil classification. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 5, p. 805-818, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12889>.

ZAMAN, M.; KLEINEIDAM, K.; BAKKEN, L.; BERENDT, J.; BRACKEN, C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; CAI, Z.; CHANG, S. X.; CLOUGH, T.; DAWAR, K.; DING, W. X.; DÖRSCH, P.; REIS MARTINS, M. dos; ECKHARDT, C.; FIEDLER, S.; FROSCH, T.; GOOPY, J.; GÖRRES, C. M.; GUPTA, A.; HENJES, S.; HOFMANN, M. E. G.; HORN, M. A.; JAHANGIR, M. M. R.; JANSEN-WILLEMS, A.; LENHART, K.; HENG, L.; LEWICKA-SZCZEBAK, D.; LUCIC, G.; MERBOLD, L.; MOHN, J.; MOLSTAD, L.; MOSER, G.; MURPHY,

P.; SANZ-COBENA, A.; ŠIMEK, M.; URQUIAGA, S.; WELL, R.; WRAGE-MÖNNIG, N.; ZAMAN, S.; ZHANG, J.; MÜLLER, C. Methodology for Measuring Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils Using Non-isotopic Techniques. In: ZAMAN, M.; HENG, L.; MÜLLER, C. (ed.). **Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques**. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8_2.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. de S.; CARVALHO, A. M. de. **Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 53 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 265). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123470/1/Doc.-265-Protocolo-Josileia.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ZANATTA, J. A.; PULROLNIK, K.; VIANA, J. H. M. **Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais - Projeto Saltus**. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 31 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 277). Disponível em: <https://ainfo.cnptia>.

embrapa.br/digital/bitstream/item/129380/1/Doc.-277-Projeto-Saltus-2.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

ZHANG, L.; SHAO, Z.; LIU, J.; CHENG, Q. Deep Learning Based Retrieval of Forest Aboveground Biomass from Combined LIDAR and Landsat 8 Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/436537>.

ZHENG, G.; JIAO, C.; XIE, X.; CUI, X.; SHANG, G.; ZHAO, C.; ZENG, R. Pedotransfer functions for predicting bulk density of coastal soils in East China. **Pedosphere**, v. 33, n. 6, p. 849-856, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.014>.

ZHOU, Y.; ZHAO, X.; GUO, X.; LI, Y. Mapping of soil organic carbon using machine learning models: Combination of optical and radar remote sensing data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 2, p. 293-310, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20371>.

ZIMMERMAN, P. R.; ZIMMERMAN, R. S. **Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production**. US Patents 2011/0192213. 2012. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/5c/08/1b72aaab6616b4/US20090288606A1.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.