

Rio de Janeiro, RJ / Outubro, 2024

## Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

13 AÇÃO CONTRA A MUDANÇA GLOBAL DO CLIMA



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Solos  
Ministério da Agricultura e Pecuária**

ISSN 1517-2627 / e-ISSN 2966-2443

# **Documentos 243**

Outubro, 2024

**Protocolo para coleta de amostras e quantificação  
do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**

*Ademir Fontana*

*Manuel Claudio Motta Macedo*

*Wenceslau Geraldes Teixeira*

*Fabiano de Carvalho Balieiro*

Editores técnicos

**Embrapa Solos**  
*Rio de Janeiro, RJ*  
2024

**Embrapa Solos**

Rua Jardim Botânico, 1024.  
Jardim Botânico  
Rio de Janeiro, RJ  
22460-000

[www.embrapa.br/solos](http://www.embrapa.br/solos)  
[www.embrapa.br/fale-conosco/](http://www.embrapa.br/fale-conosco/)

Comitê Local de Publicações

Presidente

*Ana Paula Dias Turetta*

Secretário-executivo

*Marcos Antônio Nakayama*

Membros

*Bernadete da Conceição Carvalho*

*Gomes Pedreira*

*David Vilas Boas de Campos, Evaldo*

*de Paiva Lima, Helga Restum Hissa,*

*José Francisco Lumbreras, Joyce Maria*

*Guimarães Monteiro, Lucia Raquel*

*Queiroz Pereira da Luz, Maurício Rizzato*

*Coelho e Wenceslau Geraldes Teixeira*

Edição executiva

*Marcos Antônio Nakayama*

Revisão de texto

*Marcos Antônio Nakayama*

Normalização bibliográfica

*Luciana Sampaio de Araujo*

Projeto gráfico

*Leandro Sousa Fazio*

Diagramação

*Alexandre Abrantes Cotta de Mello*

Foto da capa

*Ademir Fontana*

Publicação digital: PDF

**Todos os direitos reservados**

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

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Solos

---

Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura  
de baixo carbono / Ademir Fontana ... [et al.], editores técnicos. – Rio de Janeiro :  
Embrapa Solos, 2024.

PDF (30 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Solos, e-ISSN 2966-2443 ; 243).

1. Análise do Solo. 2. Método. I. Fontana, Ademir. II. Macedo, Manuel Claudio Motta.  
III. Teixeira, Wenceslau Geraldes. IV. Balieiro, Fabiano de Carvalho. V. Embrapa Solos.  
VI. Série.

CDD (23. ed.) 631.4

---

*Luciana Sampaio de Araujo* (CRB 7/5165)

© 2024 Embrapa

## Editores técnicos e autores

---

### **Ademir Fontana**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

### **Alexandre Romeiro de Araújo**

Zootecnista, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

### **Bruno José Rodrigues Alves**

Agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

### **Fabiano de Carvalho Balieiro**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

### **Felipe Martini Santos**

Engenheiro florestal, doutor em Ciências Ambientais e Florestais, professor da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, MS

### **Henrique Debiasi**

Agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

### **Josiléia Acordi Zanatta**

Agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

### **Júlio César Salton**

Agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS

### **Manuel Claudio Motta Macedo**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

### **Michely Tomazi**

Agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS

### **Patrícia Perondi Anchão Oliveira**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

### **Roberto Giolo de Almeida**

Agrônomo, doutor em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

### **Viviana Meneghini**

Engenheira-agrônoma, estudante de mestrado da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP

### **Wenceslau Geraldes Teixeira**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geocologia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ



## Apresentação

---

A preocupação com as mudanças climáticas globais, influenciadas pelas ações humanas nas emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE), possibilita a exploração de mercados e negócios por diferentes segmentos, como, por exemplo, aqueles que valorizam a produção agropecuária com menor saldo de GEE, definidos como sistemas “climate-smart”.

A “agricultura de baixo carbono (C)”, que preconiza, sobretudo, o incremento do C no solo, esteve e está prevista nas agendas de promoção do desenvolvimento rural sustentável e políticas setoriais, como os planos ABC e ABC+, contemplando tecnologias como estratégias ou práticas de manejo e cultivo. Dentre elas, a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária-floresta, a fixação biológica de nitrogênio, o sistema plantio direto e as florestas plantadas.

Com essas estratégias, além de uma agropecuária mais resistente, resiliente e adaptada às mudanças globais, produtiva e conservacionista, é possível agregar valor pela geração de créditos de C às áreas cultivadas com menor saldo de emissão

dos GEE. No que compete ao C do solo, ele deve ser mensurado e monitorado, sendo, para isso, necessária a definição de um protocolo padrão para a amostragem do solo e quantificação dos estoques, considerando, sobretudo, a diversidade dos sistemas produtivos e dos ambientes de produção.

Esse protocolo tem potencial para ser aplicado ou subsidiar o aperfeiçoamento metodológico para a determinação do estoque de C do solo de diversos programas de certificação já estabelecidos ou em fase de estabelecimento, e das marcas-conceito Carne Carbono Neutro, Carne Baixo Carbono, dentre outras em fase de desenvolvimento, como o Carbono Nativo, Bezerro Baixo Carbono, Leite Baixo Carbono e Soja Baixo Carbono.

Este trabalho atende ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, estipulado pelas Nações Unidas (ONU), mais especificamente à meta 13.2, que pretende integrar a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) às políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

*Daniel Vidal Pérez*

Chefe-Geral da Embrapa Solos



## Sumário

---

<b>1. Coleta de amostras do solo na agricultura de baixo carbono</b>	<b>9</b>
1. Introdução	9
2. Planejamento	9
3. Preparação	12
4. Procedimento	14
5. Considerações finais	19
Referências	19
<b>2. Quantificação do carbono e granulometria do solo na agricultura de baixo carbono</b>	<b>21</b>
1. Introdução	21
2. Desenvolvimento das análises	21
3. Cálculo do estoque de carbono	26
4. Considerações finais	28
Referências	28
Apêndice A	31



# 1. Coleta de amostras do solo na agricultura de baixo carbono

---

Ademir Fontana  
Manuel Claudio Motta Macedo  
Wenceslau Geraldes Teixeira  
Fabiano de Carvalho Balieiro  
Júlio César Salton  
Michely Tomazi  
Roberto Giolo de Almeida  
Alexandre Romeiro de Araújo  
Josiléia Acordi Zanatta  
Patrícia Perondi Anção Oliveira

## 1. Introdução

Para compor este capítulo, tomou-se como base o estudo e a pesquisa com cultivos em monocultivo de pastagens ou culturas anuais, o Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa *Pecus* (Oliveira, 2014) e cultivos consorciados ou integrados com arbustos e/ou árvores, o Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais - Projeto Saltus (Zanatta et al., 2015).

Outros protocolos também foram consultados, como o de medição, monitoramento, relato e verificação (*Measurement, monitoring, reporting and verification - MRV*) da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e a metodologia para sistemas aprimorados de uso agrícola da certificadora Verra (*Verified Carbon Standard - VCS Methodology*) (FAO, 2020; Verra, 2023).

Tanto para o Brasil quanto em nível global, os protocolos são desenvolvidos e aplicados à escala de propriedades rurais, visando à avaliação e certificação de projetos com manejo sustentável do solo (*Sustainable Soil Management - SSM*).

A definição de áreas homogêneas e, dentro destas, a definição de faixas permanentes para avaliação e monitoramento garantem a menor variabilidade e a menor influência de fatores externos às práticas ou tecnologias preconizadas.

A coleta de amostras, considerando os diferentes componentes ou estratos vegetais e também a presença de materiais grossos resistentes ou endurecidos, reforça o cuidado com o isolamento de fatores que podem gerar inconsistências e incertezas.

Ademais, a observação dos cuidados para a coleta de amostras, para a obtenção da densidade do solo, bem como para o C e a granulometria são fundamentais para a garantia de amostras representativas e confiáveis.

## 2. Planejamento

### 2.1 Definição da época para a coleta

Deve-se escolher a época de maior umidade no solo (não encharcado) e, se possível, ao final da estação chuvosa, pois facilita a coleta das amostras, principalmente em regiões com estações secas pronunciadas e bem definidas, como os biomas Cerrado e Caatinga.

A coleta deve ser realizada antes de qualquer operação de aporte de materiais ou resíduos orgânicos na superfície do solo e/ou revolvimento do solo, com ou sem a aplicação de calcário ou outro material que contenha carbono (C). Para uma mesma área, não se deve mudar a época do ano para a amostragem e avaliação.

Quando efetuado o revolvimento do solo, e sem a aplicação de calcário, a coleta deve ser realizada após 90 dias. O revolvimento do solo modifica as condições de transformação da matéria orgânica e, sobretudo, incorpora palha ou resíduos ao solo.

Para a condição com revolvimento do solo e aplicação de calcário, a coleta deve ser realizada após 1 ano. O calcário, seja naturalmente presente no solo, originado da decomposição de rocha, seja incorporado ao solo como condicionador, tem em sua composição C, que pode ser contabilizado conjuntamente ao C de origem orgânica, dependendo do método utilizado para a sua determinação. Saliencia-se que há métodos que possibilitam eliminar o C oriundo de calcários e outras formas minerais, os quais não serão abordados neste trabalho.

Para áreas com aplicação de esterco ou outro material oriundo de compostagem, a coleta deve ser realizada após 1 ano. Esses materiais têm grande quantidade de C, interferindo fortemente no cálculo de seu estoque até a profundidade de 20 cm.

## 2.2 Delimitação de áreas homogêneas

As áreas homogêneas devem ser delimitadas no local de interesse para a avaliação do C e poderão englobar mais de um piquete ou talhão, ou qualquer outra forma de divisão. Esses mesmos critérios são utilizados

nas áreas de “referência” ou “linha de base” (explicado no item 2.4), que são tomadas para comparações.

Uma área homogênea é obtida pela menor variação do relevo (forma, posição na encosta e exposição ao sol) (Figura 1.1), sendo ainda estratificada pela variação da classe de solo e ou grupo textural (Figura 1.2), sistemas de cultivo ou culturas, arranjos de cultivo (anuais, pastagens, árvores ou arbustos, sistemas integrados), histórico de cultivo, estado das culturas e manejo (Figura 1.3). Também são separadas as áreas com irrigação, especialmente aquelas por aspersão ou inundação.

Não há limite de tamanho para estas áreas, desde que sejam tratadas como homogêneas a partir da avaliação e espacialização das características anteriores.

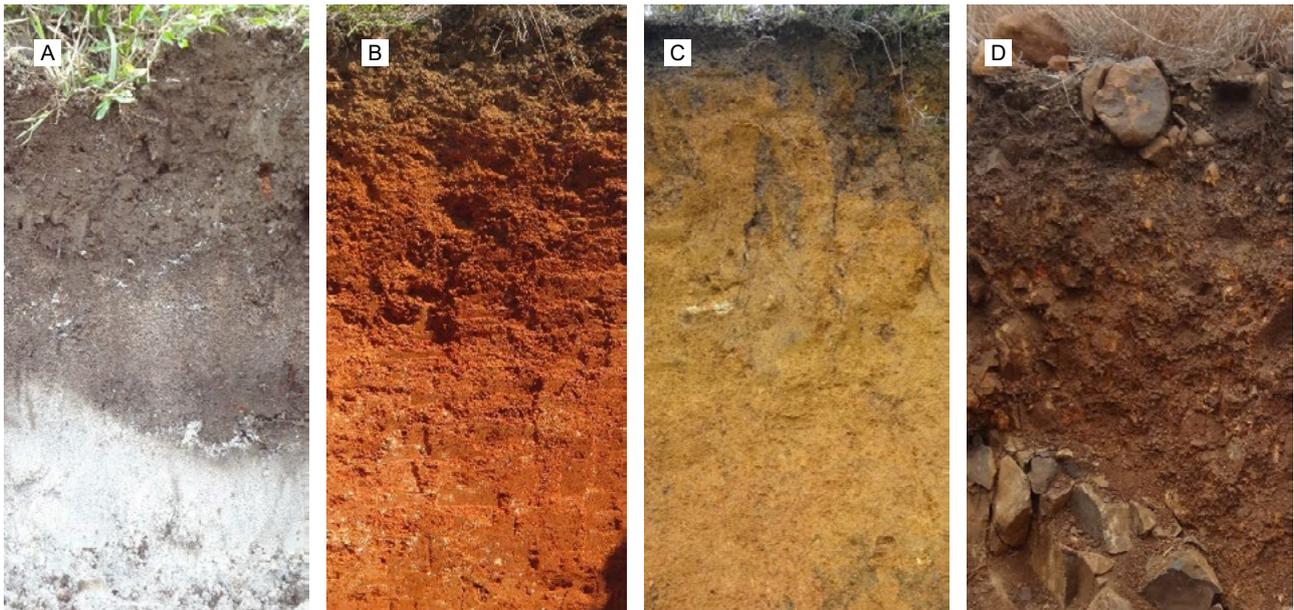
## 2.3 Definição dos componentes ou estratos vegetais

Como há grande influência dos arranjos produtivos no estoque de C no solo, as áreas de intervenção ou interesse (áreas cultivadas) devem ser estratificadas pelos diferentes componentes ou estratos vegetativos.



Foto: Claudio Lucas Capeche.

**Figura 1.1.** Paisagem com diferentes formas de relevo: (A) plano e baixada, (B) colina, (C) morro, (D) montanha.



Fotos: Ademir Fontana.

**Figura 1.2.** Tipos de solo possíveis em cada forma de relevo: (A) plano e baixada, (B) colina, (C) morro, (D) montanha.

### 2.3.1 Único componente ou estrato

São áreas com monocultivos (Figura 1.3A e 1.3C), como as lavouras anuais, pastagens, cana-de-açúcar, frutíferas, cafezal, floresta natural ou plantada (espécies comerciais).

Nesta situação, inclui-se o sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) em suas diferentes fases de cultivo (Figura 1.3C).

### 2.3.2 Diversos componentes ou estratos

São áreas com diferentes componentes ou estratos (Figura 1.3B), como os cultivos consorciados ou integrados. Na condição de renques, linhas ou dispersas com árvores ou arbustos, de espécies nativas ou exóticas, frutíferas.

Incluem-se os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) ou agrossilvipastoril,



**Figura 1.3.** Visão de área experimental avaliada como homogênea em termos de solo e relevo: pastagem contínua (A), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (B) e Integração Lavoura-Pecuária (C).

Fonte: Google Earth (2023).

Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou silvipastoril, ou Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou agroflorestal, bem como aqueles definidos como Sistemas Agroflorestais (SAFs).

## 2.4 Definição das áreas de referência ou linha de base

Os teores e estoques de C destas áreas são utilizados como referência para o monitoramento da evolução após a aplicação de determinada tecnologia ou prática agropecuária em área próxima ou contígua. Essas áreas também podem e devem ser utilizadas para a correção do estoque de C pela equivalência da massa, conforme o item 3.2 do Capítulo 2.

As áreas de referência ou linha de base podem ser: i) áreas com vegetação natural preservada, preferencialmente contíguas às áreas sob cultivo; ou ii) áreas na condição anterior (tempo zero) à aplicação de práticas ou tecnologias que preconizam o aumento do C no solo. Há protocolos ou programas de certificação que aceitam áreas de referência ou linha de base em até certa distância. A certificadora Verra, por exemplo, aceita a distância de até 250 km (Verra, 2023).

Deve-se manter os critérios relacionados à semelhança com a área de interesse agropecuária, conforme critérios das áreas homogêneas definidas anteriormente no item 2.2.

Para cada propósito ou intenção, deve-se observar qual será a base de referência ou linha de base (*baseline scenario - BS ou business-as-usual - BAU*).

## 2.5 Organização dos materiais

Entre os materiais necessários, lista-se: enxada, baldes (7 a 10 L), trados (holandês, rosca), coletor tipo sonda, pás, luvas, cavadeiras, fita métrica ou trena, facas, espátulas, tesouras, martelo ou marreta, castelinho/batedor para coleta de amostras indeformadas, anéis de metal (com volume de 100 cm<sup>3</sup> e/ou 300 cm<sup>3</sup>), sacos plásticos (15 × 20 cm e 20 × 30 cm), canetas, barbante, prancheta, ficha de campo e GPS. O anel de 100 cm<sup>3</sup> deve ter 5 cm de altura e o de 300 cm<sup>3</sup>, entre 5 e 10 cm de altura.

Para se determinar a densidade do solo em solos soltos (arenoso ou recém-revolvido) ou que apresentem materiais grossos, conforme especificado no item 4.4.2, além dos materiais anteriores, acrescenta-se inicialmente 50 kg de areia limpa (lavada) (diâmetro de 0,80 a 0,25 mm), funil e régua (mínimo 30 cm).



Fotos: Ademir Fontana

**Figura 1.4.** Relação de alguns materiais necessários para a coleta. (A) Faca, marreta, castelinho/batedor, anel, fita métrica/trena; (B) Trado holandês, pá, pá reta ou de corte.

## 3. Preparação

### 3.1 Demarcação das faixas representativas nas áreas homogêneas

Em cada área homogênea, conforme definição do item 2.2, marcar faixas georreferenciadas com precisão mínima de 1 m e conforme exemplos a seguir na Figura 1.5.



Fotos: Ademir Fontana (A) e Michely Tomazzi (B).

**Figura 1.5.** Faixas representativas distribuídas nas áreas homogêneas. A) linha pontilhada na área com faixas de árvores demonstra o limite para coleta de cada cultivo com base na projeção da copa; B) distribuição das faixas em área com terraços ou curvas de nível.

As faixas serão permanentes para as coletas em todas as fases de monitoramento, estudo ou qualquer outra avaliação do solo ou vegetação.

Evitar as bordas das áreas em pelo menos 15 metros, pois essa posição tem grande perturbação. Da mesma forma, é importante a alocação aleatória das faixas dentro de cada área.

Para a definição das faixas representativas, tomaram-se os estudos de Bowman et al. (2002) e Stolbovoy et al. (2007), que são a base dos protocolos adotados pela União Europeia e da rede de pesquisa ligada ao Agricultural Research Service, que estuda o efeito estufa na agricultura e na pecuária pela GRACEnet dos Estados Unidos (Estados Unidos, 2024).

De acordo com o tamanho da área homogênea, o número e o tamanho de cada faixa representativa são definidos pelos seguintes critérios:

- a) Área homogênea de até 5 ha: mínimo de 3 faixas de 50 x 50 m.
- b) Área homogênea entre 5 a 10 ha: mínimo de 4 faixas de 50 x 80 m.
- c) Área homogênea entre 10 a 25 ha: mínimo de 5 faixas de 100 x 100 m.
- d) Área homogênea entre 25 a 50 ha: mínimo de 8 faixas de 100 x 100 m.
- e) Área homogênea maior que 50 ha: fracionar para incluir no critério “d”.
- f) Áreas homogêneas menores que 3 ha: tamanho das faixas pode ser reduzido ou ajustado (largura e comprimento), desde que contemple todos os estratos ou componentes.
- g) Áreas com limitação de formato (ex. curvas de nível/terraços, áreas estreitas): delimitar as faixas dentro do espaço possível, desde que contemple todos os estratos ou componentes.

### 3.1.1 Georreferenciamento da área de interesse, faixas e pontos de coleta

A marcação de coordenadas geográficas e a obtenção de polígonos das áreas homogêneas, assim como das faixas representativas, contribuem para o reconhecimento ao longo do tempo.

Também é possível marcar cada ponto de coleta para obtenção da densidade do solo e amostras para C e granulometria, visando a coleta na mesma posição ao longo do tempo.

### 3.2 Ficha de descrição geral

Como itens para descrição de cada área homogênea, sugere-se:

- a) Nome do proprietário.
- b) Número ou código da área.
- c) Data.
- d) Localização: município, estado e coordenadas geográficas.
- e) Histórico de cultivo na linha do tempo.
- f) Cultura anterior e tempo de cultivo.
- g) Cultura atual e tempo de cultivo.
- h) Práticas de adubação e calagem: tipo, frequência e quantidade.
- i) Sistema de manejo: sistema de plantio direto, cultivo convencional, cultivo mínimo (semeadura direta - pousio).
- j) Arranjo produtivo agrícola: anual, perene ou integrado.
- k) Sistema de pastejo: contínuo, rotacionado ou alternado.
- l) Pastagem: implantada, recuperada ou degradada
- m) Resíduo vegetal: mantido ou removido.
- n) Espécie e raça animal.
- o) Tipo de exploração animal: corte: cria, recria, engorda ou recria e engorda; leiteira.
- p) Irrigação: tipo e quantidade.
- q) Outras informações relevantes, conforme o objetivo ou necessidade.

Para o caso de projetos que serão certificados, recomenda-se observar junto às certificadoras a lista completa de itens necessários, uma vez que pode haver a necessidade de detalhamento de alguns itens, como: histórico de uso e/ou cultivo/práticas, classes do relevo e solo, tipo de vegetação natural, clima (chuva e temperatura), dentre outros, pois algumas dessas informações requerem a linha de base na condição mínima de anos antes da intervenção (série temporal anterior ao início do projeto e das avaliações).

### 3.3 Cálculo da proporção dos componentes ou estratos

Nas áreas consorciadas ou integradas, como definido no item 2.3.2, deve-se determinar ou estimar em cada faixa representativa a proporção ocupada por cada componente ou estrato.

O valor proporcional de cada componente ou estrato será utilizado no cálculo final do estoque total de C (item 3.3 do Capítulo 2).

### 3.3.1 Cultivos com linhas ou renques de árvores ou arbustos

Delimitar pelo limite da projeção da copa e obter a área total das linhas ou renques de árvores ou arbustos. Na sequência, calcular a proporção ocupada pela linha ou renque de árvores ou arbustos em relação à área total da faixa representativa.

$$PEA = (\text{área total} - \text{área de árvores}) / \text{área total}$$

$$PENA = 1 - PEA$$

em que:

*PEA* = proporção do estrato arbóreo

*PENA* = proporção do estrato não arbóreo

### 3.3.2 Árvores ou arbustos isoladas

Determinar pelo limite da projeção da copa a área de cada árvore e obter a área total de árvores ou arbustos. Na sequência, calcular a proporção ocupada pelas árvores ou arbustos em relação à área total da faixa representativa.

$$PEA = (\text{área total} - \text{área de árvores}) / \text{área total}$$

$$PENA = 1 - PEA$$

em que:

*PEA* = proporção do estrato arbóreo

*PENA* = proporção do estrato não arbóreo

## 3.4 Definição da espessura das camadas do solo

São camadas padrões as profundidades de 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm. É opcional a divisão da camada 0–10 cm nas camadas de 0–5 e 5–10 cm, ou de outras camadas. Também é opcional coletar até 100 cm de profundidade, com as camadas de 40–60, 60–80 e 80–100 cm.

No caso das marcas conceito carne carbono neutro (CCN) e carne baixo carbono (CBC), coleta-se nas camadas 0–20 e 20–40 cm, as quais são aplicadas para fins de análise da fertilidade do solo.

A divisão da camada de 0–10 cm nas camadas de 0–5 cm e 5–10 cm aumenta a sensibilidade nas comparações do estoque de C no solo entre diferentes usos, coberturas ou manejos. A coleta em maior profundidade permite ampliar a avaliação da capacidade do solo em estocar carbono.

Para qualquer intenção ou propósito das avaliações, as camadas de solo devem atender às exigências dos programas. Vários programas aplicam bônus nas pontuações para projetos de baixa emissão de C que efetuam avaliações de camadas mais profundas ou a subdivisão.

## 4. Procedimento

### 4.1 Marcação das minitrincheiras

Em todas as faixas representativas, são demarcados locais para a abertura das minitrincheiras para a coleta de amostras da densidade do solo (Ds) (amostras indeformadas), as quais são pontos de referência para a coleta, no entorno, de amostras para determinação de C total, C org e granulometria (amostras deformadas).

O local a ser demarcado em cada faixa representativa é definido a seguir, conforme cada tipo de cultivo.

#### 4.1.1 Monocultivos

##### a) Culturas anuais ou pastagens

Marcar a minitrincheira no ponto central da faixa representativa. Esta situação se aplica também para áreas de vegetação campestre, pastagem natural ou campo limpo.

##### b) Árvores

Marcar a minitrincheira na parte central da faixa representativa e entre as linhas de árvores ou arbustos. Na área de vegetação natural florestal ou arbustiva, escolher uma posição representativa, evitando posicionar embaixo de copas isoladas.

#### 4.1.2 Cultivos consorciados ou integrados

Na parte com culturas anuais ou pastagens, seguir o item 4.1.1a. Na parte com árvores em linhas duplas ou mais linhas, marcar a minitrincheira na parte central entre as linhas de árvores. Se for linha simples, marcar a minitrincheira entre as árvores.

## 4.2 Cuidados e observações

Os cuidados e observações devem ser seguidos tanto para a marcação e abertura das minitrincheiras quanto para a coleta de amostras para a análise de C e granulometria.

#### 4.2.1 Áreas perturbadas

Evitar proximidades de cercas, bebedouros, cochos, manobras de equipamentos e máquinas, deposição e carregamento de fertilizantes, formigueiros, cupinzeiros e outras situações ou condições que não fazem parte do cultivo ou manejo.

Evitar as faixas de enleiramento ou montes de destoca ou arranquio de pedras, uma vez que há acúmulo de diversos materiais.

Caso tenha ocorrido incêndio ou queimadas, avaliar a amostra de solo quanto à presença de carvão anotando o volume (%) após a separação manual. O C presente neste componente será quantificado, sobretudo, no método do C total.

#### 4.2.2 Presença de materiais grossos resistentes ou endurecidos

Anotar a quantidade, bem como a profundidade de ocorrência de materiais grossos resistentes ou endurecidos, como cascalhos e calhaus de diferentes naturezas, tais como quartzo, fragmentos de rocha e petroplintita (nomes comuns: canga, laterita, piçarra, couraça ou carapaça) (Figura 1.6).

Na sequência, determinar o volume ocupado por esses materiais para a ponderação no cálculo do estoque de C (itens 3.1 e 3.2 do Capítulo 2).

A obtenção do volume é descrita nos itens 4.3.2 (Capítulo 1), 2.1.1b (Capítulo 2) e 2.2.1b (Capítulo 2).



**Figura 1.6.** Diferentes tipos e posição de ocorrência de materiais grossos resistentes ou endurecidos na minitrincheira. (A) Fragmentos de rocha de diversos tamanhos (cascalhos e calhaus); (B) nódulos de petroplintita.

#### 4.2.3 Locais com grande quantidade de serapilheira

A serapilheira inclui material orgânico (folhas, flores, sementes, frutos, galhos, restos de insetos) presente na superfície do solo em diferentes graus de decomposição (Figura 1.7).

Para a coleta de amostras de solo para determinar a Ds, C e granulometria, esta camada deve ser removida manualmente de forma cuidadosa.



**Figura 1.7.** Disposição de serapilheira na superfície do solo. A) Área com árvores em floresta, B) Área com pastagem.

#### 4.3 Coleta de amostras para análise da densidade do solo

Após a demarcação, são abertas as minitrincheiras conforme orientações constantes nos itens 4.1.1 e 4.1.2 em cada faixa representativa.

Suas dimensões variam em função das camadas definidas no item 3.4. A dimensão da minitrincheira será de 30 cm x 50 cm para coleta de amostras de solo até a camada de 40 cm de profundidade e de 50 cm x 110 cm para a coleta de solo até 100 cm de profundidade.

Deve-se manter limpos pelo menos 3 lados ou paredes desde a superfície (Figura 1.8). Caso o solo esteja muito seco e duro, umedecer a área de 1 m<sup>2</sup>, aguardar a percolação por aproximadamente 24 horas e, posteriormente, abrir a minitrincheira.



**Figura 1.8.** Limpeza das paredes da minitrincheira para a coleta das amostras de solo.

### 4.3.1 Solo sem material grosso ou solto

Delimitar as camadas de acordo com as espessuras definidas no item 3.4. Retirar a camada de serapilheira (folhas, galhos e matéria orgânica em decomposição) da superfície com cuidado para não revolver o solo (Figura 1.9).

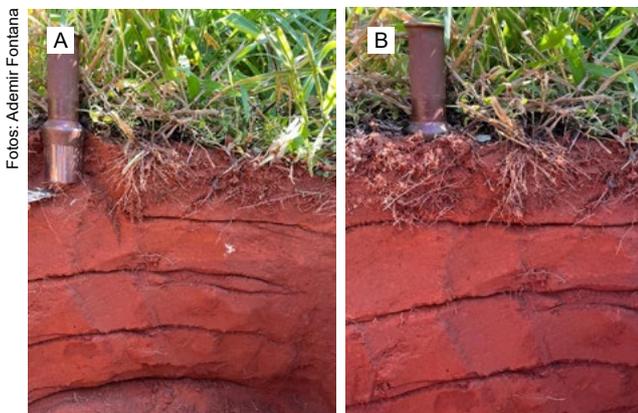


Foto: Ademir Fontana

**Figura 1.9.** Marcação das camadas com trena ou fita métrica na minitrincheira para a coleta da densidade do solo.

O volume mínimo de solo por camada deve ser próximo de 300 cm<sup>3</sup>. Para obter esse volume com anéis de 100 cm<sup>3</sup>, coletar três anéis para cada camada, sendo 1 anel para cada uma das três paredes da minitrincheira, enquanto que, para o anel de 300 cm<sup>3</sup>, coletar 1 anel de cada camada na parede mais representativa do perfil.

Para a coleta, colocar o anel volumétrico acoplado ao castelinho/batedor, preferencialmente na posição vertical, e introduzir ao solo com o auxílio de uma marreta, batendo suavemente com golpes paralelos à direção da inserção dos cilindros. O anel deve ser inserido até que o meio do cilindro fique centralizado em cada camada (Figura 1.10).



Fotos: Ademir Fontana

**Figura 1.10.** Coleta de amostra com anel volumétrico para a densidade do solo. (A) Inserção do anel até o centro da camada selecionada (0–10 cm), (B) Retirada do anel com castelinho.

Na sequência, escavar no entorno do anel sem perturbar o solo que já está dentro do cilindro (Figura 1.10). Em seguida, retirar o excesso de solo da parte externa do anel, com o auxílio de uma faca e espátula.

A faca é utilizada para cortar o solo ao redor do anel e a espátula para colocar na parte inferior do anel, evitando perdas de parte da amostra. No caso da existência de raízes no cilindro, não puxar, mas usar uma tesoura afiada para cortar as raízes.

Após a retirada do anel, realizar a limpeza de todos os lados com auxílio de faca e pano úmido, retirando o excesso de solo das extremidades do anel. Também as raízes devem ser aparadas rente ao anel com uma tesoura. Após a limpeza de todos os lados do anel, deve-se garantir que o anel esteja completamente cheio (Figuras 1.11A e 1.11B).

Posteriormente, transferir todo o solo contido no anel para um saco plástico, identificando o ponto (piquete, gleba ou faixa) e a camada na parte externa do saco com fita (caneta permanente) e colocando dentro do saco etiqueta de papel grosso (Figura 1.11C e 1.11D).



Fotos: Ademir Fontana

**Figura 1.11.** Amostra de solo no anel para a densidade do solo. (A) Limpeza do anel, (B) Anel pronto, (C) Retirada da amostra de solo, (D) Sacos com as amostras de solo de cada camada.

A presença de raízes grossas e/ou outros materiais grossos endurecidos na amostra deve ser avaliada considerando a sua ocorrência na área.

Em geral, as amostras com raízes grossas são descartadas, buscando outro local para inserir o anel, enquanto, os demais materiais serão separados e determinado o volume por eles ocupado conforme orientações a seguir no item 2.1.1 b (Capítulo 2).

#### 4.3.2 Solo com material grosso ou solto

O método da escavação é recomendado para solos com grande quantidade de materiais grossos, conforme definido no item 4.2.2, ou solos soltos (arenosos ou recém-revolvidos) de acordo com o item A3.7 da FAO (2019, 2020). Este método pode ser visualizado no vídeo do canal LabGeo UFSCar no YouTube. No caso de solos com materiais grossos, uniformizar o solo de forma plana em cada camada definida no item 3.4.

Quando o volume de materiais grossos estiver entre 15% e 30%, abrir um buraco com volume mínimo de 400 cm<sup>3</sup>, para solo com 30% a 50% de materiais grossos, o volume deve ser de 700 cm<sup>3</sup>, e para solos com mais de 50% de materiais grossos, o volume deve ser de 1.000 cm<sup>3</sup>.

Para solos soltos, após a alocação das minitrincheiras, uniformizar o solo de forma plana em cada camada definida no item 3.4 e abrir um buraco de no mínimo 400 cm<sup>3</sup> de volume.

Em ambas as condições descritas acima, retirar o solo escavado e colocá-lo em um saco plástico para determinar a massa seca, conforme item 2.1.1b (Capítulo 2).

Pesar até 2 kg de areia limpa, seca e fluida (areia padrão com tamanho de partícula uniforme e diâmetro entre 0,80 mm e 0,25 mm) em uma balança semianalítica com duas casas de precisão.

Na sequência, colocar a areia em uma proveta volumétrica, anotar o volume e obter a densidade da areia:

$$\text{Densidade da areia (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa da areia (g)}}{\text{volume da areia (cm}^3\text{)}}$$

Diante do buraco aberto, completar a areia já pesada anteriormente até o limite superior, utilizando uma régua, gabarito de madeira ou outro material resistente.

Após completar o buraco com a areia, pesar a areia não utilizada e calcular a massa de areia utilizada para encher o buraco:

$$\text{Areia utilizada (g)} = \text{massa areia total (g)} - \text{massa areia não utilizada (g)}$$

Na sequência, calcular o volume da amostra de solo, que será utilizado no cálculo da densidade do solo (Ds) no item 2.1.1b (Capítulo 2):

$$\text{Volume total da amostra (cm}^3\text{)} = \frac{\text{areia utilizada (g)}}{\text{densidade da areia (g cm}^{-3}\text{)}}$$

## 4.4 Coleta de amostras para análise de carbono e granulometria

A coleta das amostras de solo será realizada em todas as faixas representativas, tanto nas camadas já delimitadas na minitrincheira utilizada para a coleta da Ds (visa aproveitar este ponto que já está aberto e é central na área), quanto no seu entorno.

### 4.4.1 Coleta das amostras na minitrincheira

Em cada minitrincheira demarcada para a amostragem da Ds, conforme especificado no item 4.1, e em todas as camadas definidas no item 3.4, retirar uma amostra de solo deformada nas mesmas paredes que foram coletadas amostras para a Ds, utilizando-se uma faca ou espátula.

Colocar em um balde identificado com a espessura de cada camada. Iniciar a coleta do solo das camadas inferiores para o topo, evitando assim a contaminação das amostras.

### 4.4.2 Coleta das amostras no entorno da minitrincheira

No entorno de cada minitrincheira, a uma distância entre 15 m e 30 m, nas mesmas camadas em que foram coletadas amostras para a Ds, coletar no mínimo 5 amostras simples por camada em diferentes locais, utilizando trado, enxadão ou pá.

Para cada amostra, coletar um volume similar ao coletado em cada camada da minitrincheira, inserindo-a no balde especificado no item 4.4.1, obtendo-se uma amostra composta por camada.

Local de coleta em função do tipo de cultivo:

- Monocultivo de culturas anuais ou pastagem: coletar de forma radial à minitrincheira. Em monocultivo de árvores, coletar de forma radial à minitrincheira, entre as árvores na linha e no ponto central entre linhas.
- Cultivos consorciados ou integrados: coletar separadamente em cada componente ou estrato, seguindo a orientação definida no item 4.4.2 a.

Antes de efetuar a coleta do solo, remover manualmente a camada de serapilheira (folhas, galhos e matéria orgânica em decomposição) da superfície com cuidado para não revolver o solo (Figura 1.12A), seguido da coleta da amostra de solo (Figura 1.12B).



**Figura 1.12.** Etapas da coleta da amostra simples e composta (ambas deformadas) do solo com trado. (A) retirada manual da serapilheira (palhada e outros materiais orgânicos) (B) coleta da camada; (C) despejo da amostra no balde para compor uma amostra composta.

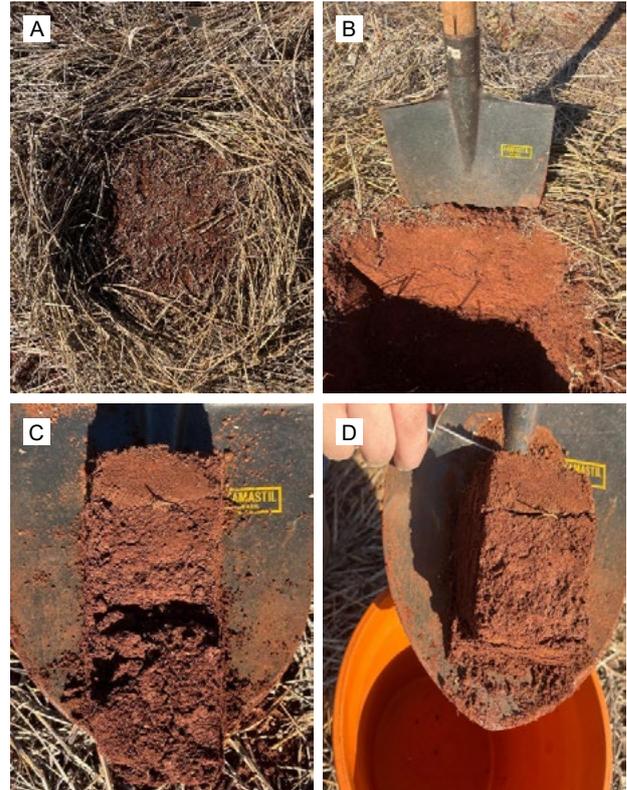
Utilizar trados com caçamba de 10 cm para a coleta das amostras nas camadas com espessura de 10 cm. No caso de subdivisão da camada de 0–10 cm em 0–5 cm e 5–10 cm, as amostras devem ser coletadas com pá reta, sonda ou enxadão.

Quando se coleta com o trado nas camadas subsuperficiais (a partir da camada de 0–10 cm), observar a parte superior do trado ( $\frac{1}{4}$  superior) para garantir que a amostra corresponda à camada em operação (uma condição que garante a qualidade da amostra de interesse e evita inclusão de parte da camada superior). Caso se observe contaminação da camada superior, deve-se realizar uma nova amostragem em outro local.

Após obter as amostras em cada camada, juntar no mesmo balde a amostra obtida na minitrincheira para formar a amostra composta (Figura 1.12C).

Em solos secos e soltos ou arenosos, deve-se utilizar pá reta ou enxadão para a coleta de amostras, especialmente nas camadas até a profundidade de 20 cm (Figuras 1.13A, 1.13B, 1.13C e 1.13D).

Para esses solos, também é recomendado cavar minitrincheiras com tamanho mínimo para a coleta de amostras diretamente nas paredes, iniciando pelas camadas inferiores.



**Figura 1.13.** Etapas da coleta da amostra simples e composta (ambas deformadas) do solo com pá reta. (A) retirada da serapilheira (palhada e outros materiais orgânicos) (B) coleta da camada; (C) recorte das laterais e divisão das camadas; (D) deposição da amostra de cada camada no balde.

#### 4.3.3 Obtenção de amostra composta

Após a coleta de todas as amostras de cada camada acondicionadas no balde, homogeneizar o solo e separar pelo menos 600 g em um saco plástico (Figura 1.14).

Identificar o ponto (piquete, gleba ou faixa) e a profundidade da coleta na parte externa do saco com fita (caneta permanente), acrescentando dentro do saco uma etiqueta de papel grosso com a mesma identificação. Os baldes e ferramentas devem estar limpos a cada coleta de amostras de solo.



**Figura 1.14.** Baldes e sacos com as amostras compostas de cada camada.

## 4.5 Armazenamento das amostras

Para organizar todas as amostras de cada faixa representativa, acondicione as amostras de todas as camadas em um mesmo recipiente (saco grande ou caixa).

Na sequência, juntar as amostras das faixas representativas conforme cada área homogênea, identificando e mantendo em local seco.

## Considerações finais

Os procedimentos de coleta de amostras de solo visando a determinação da densidade do solo, do carbono e das frações granulométricas se aplicam às diferentes condições de cultivo e manejo, atendendo especialmente aos projetos que preconizam a agricultura de baixo carbono, ou seja, daquelas áreas que adotam práticas que favorecem a manutenção e, principalmente, o aumento de matéria orgânica no solo.

## Referências

- BOWMAN, R. A.; REEDER, J. D.; WIENHOLD, B. J. Quantifying laboratory and field variability to assess potential for carbon sequestration. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 9/10, p. 1629-1642, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-120004304>.
- ESTADOS UNIDOS. Agricultural Research Service. **GRACEnet**. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/anrds/gracenet/>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes**: GSOC-MRV protocol. Rome, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- FAO. **Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems**: guidelines for assessment. Version 1. Rome, 2019. 170 p. Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3573cc7c-f8b0-42cc-bead-ea56c502647e/content>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- GOOGLE EARTH. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- 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. Série Documento, 116). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/117416/1/Documentos116.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- STOLBOVOY, V.; MONTANARELLA, L.; FILIPPI, N.; JONES, A.; GALLEGOS, J.; GRASSI, G. **Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union**. Version 2. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. 50 p. EUR 21576 EN/2. Disponível em: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/eusoils\\_docs/other/EUR21576\\_2.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR21576_2.pdf). Acesso em: 16 ago. 2024.
- VERRA. **VM0042**: methodology for improved agricultural land management. Version 2.0. 2023. Disponível em: <https://verra.org/wp-content/uploads/2023/05/VM0042-Improved-ALM-v2.0.pdf>. Acesso em: 19 ago. 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: 19 ago. 2024.



## 2. Quantificação do carbono e granulometria do solo na agricultura de baixo carbono

Ademir Fontana  
Manuel Claudio Motta Macedo  
Wenceslau Geraldes Teixeira  
Fabiano de Carvalho Balieiro  
Júlio César Salton  
Michely Tomazi  
Viviana Meneghini  
Felipe Martini Santos  
Henrique Debiasi  
Bruno José Rodrigues Alves

### 1. Introdução

Assim como o Capítulo 1, que aborda os procedimentos de coleta de amostras de solo, este protocolo baseou-se no estudo e pesquisa com cultivos em monocultivo de pastagens ou culturas anuais, no *Protocolo* para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa *Pecus* (Oliveira, 2014) e em cultivos consorciados ou integrados com arbustos e/ou árvores, conforme o *Protocolo* para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais - Projeto Saltus (Zanatta et al., 2015).

Foram consultados outros protocolos, como o de medição, monitoramento, relato e verificação (*Measurement, monitoring, reporting and verification - MRV*) (FAO, 2020) e a metodologia para sistemas aprimorados de uso agrícola da certificadora Verra (2023). Assim como os protocolos desenvolvidos no Brasil, a FAO e a Verra têm protocolos globais aplicáveis à escala de propriedades rurais para avaliação e certificação de projetos de manejo sustentável do solo (*Sustainable Soil Management - SSM*).

O método de referência para determinação do C do solo é aquele que obtém a sua forma total (C total). As modificações proporcionadas pelas práticas agrícolas que preconizam o aumento do C são avaliadas pela evolução dos teores e estoques de

C, os quais podem ser feitos com maior detalhe considerando os grupamentos texturais.

A quantificação das frações grossas, resistentes ou endurecidas de cada camada do solo é preponderante considerando o volume ocupado no solo. A proporção obtida é aplicada no cálculo do estoque de C de cada camada para a correção, uma vez que esses componentes não acumulam C.

O cálculo do estoque de C pode ser obtido considerando a correção em função da equivalência em massa de solo das áreas e, ao final, ponderado pela proporção de cada componente ou estrato, como nos cultivos consorciados ou integrados, ou no componente vegetal.

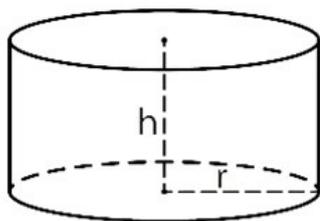
## 2. Desenvolvimento das análises

### 2.1 Densidade do solo

#### 2.1.1 Determinação

##### a) Solo sem material grosso ou solto

Inicialmente, medir com um paquímetro as dimensões da altura (h) e do diâmetro interno do anel volumétrico, ambos em centímetros (cm). O raio (r) é obtido pela divisão do diâmetro por 2 (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Componentes do anel volumétrico para coleta da densidade do solo.

Obter o volume exato do anel ou cilindro metálico utilizado na coleta das amostras de solo. Repetir ao menos 3 vezes este procedimento, medindo em cm.

$$\text{Volume do anel (cm}^3\text{)} = 3,1416 \times (r)^2 \times h$$

Transferir a(s) amostra(s) de solo de cada camada obtida no item 4.3.1 (Capítulo 1) para um recipiente metálico numerado e com massa conhecida (Figura 2.2A). Levar o recipiente metálico contendo o solo para secar em estufa a 105 °C por 24 horas (Figura 2.2B).

Após o período de secagem, retirar o recipiente da estufa e esperar esfriar à temperatura ambiente. Em seguida, pesar em uma balança semianalítica (precisão de duas casas decimais), obtendo a massa do solo seco + recipiente, todos na unidade “g” (Figura 2.2C). Na sequência, determinar a massa de solo seco e a densidade do solo ( $D_s$ ).

$$\text{Massa Solo Seco (g)} = (\text{massa do solo seco} + \text{recipiente}) - \text{massa do recipiente}$$

$$D_s \text{ (Mg m}^{-3}\text{ ou g cm}^{-3}\text{ ou kg dm}^{-3}\text{)} = \text{massa solo seco (g)} / \text{volume do anel (cm}^3\text{)}$$

Mais detalhes sobre esta determinação podem ser obtidos no Manual de Métodos de Análise de Solo (Almeida et al., 2017).

#### b) Solo com material grosso ou solto

Para solo solto, transferir a amostra de cada camada obtida no item 4.3.2 (Capítulo 1) para um recipiente metálico numerado e com massa conhecida (Figura 2.2A). Levar o recipiente metálico contendo o solo para secar em estufa a 105 °C por 24 horas (Figura 2.2B).

Após a secagem, retirar o recipiente, esperar esfriar e pesar em uma balança semianalítica (precisão de duas casas decimais) para obter a massa do solo seco + recipiente, todos na unidade “g” (Figura 2.2C). Na sequência, determinar a massa de solo seco:

$$\text{Massa Solo Seco} = (\text{massa do solo seco} + \text{recipiente}) - \text{massa do recipiente.}$$



**Figura 2.2.** Etapas para a determinação da densidade do solo. (A) Amostras transferidas para recipientes metálicos, (B) Secagem, (C) Pesagem.

Em seguida, buscar o volume ocupado pelo solo, conforme determinado na equação do item 4.3.2 (Capítulo 1) e obter a densidade do solo ( $D_s$ ).

$$D_s = \text{massa solo seco} / \text{vta}$$

em que:

$D_s$ : Densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>);  
vta: volume total da amostra obtida no item 4.3.2 (Capítulo 1), em cm<sup>3</sup>.

Para solos com materiais grossos, na amostra obtida conforme item 4.3.2, separar manualmente e de forma suave o solo fino dos materiais grossos. Em seguida, colocar o solo fino em uma proveta com marcação volumétrica, ajustando com batidas suaves no recipiente e obter o volume do solo fino ( $vsf$ ).

Do solo fino na proveta, obter a massa do solo fino ( $msf$ ) em balança semianalítica (precisão de duas casas decimais) e obter a densidade do solo fino ( $D_{sf}$ ).

$$D_{sf} = \text{msf} / \text{vsf}$$

em que:

$D_{sf}$ : Densidade do solo fino (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>);  $msf$ : massa do solo fino (g);  $vsf$ : volume do solo fino (cm<sup>3</sup>; mL)

Na sequência, calcular a proporção dos materiais grossos.

$$PMG = (vta - vsf) / vta$$

em que:

PMG: proporção de materiais grossos (decimal);  
vta: volume total da amostra obtida no item 4.3.2 (Capítulo 1) em cm<sup>3</sup>; vsf: volume de solo fino (cm<sup>3</sup>; mL).

### 2.1.2 Estimativa por funções matemáticas - Funções de Pedotransferência

O uso de funções para estimar ou prever a Ds é uma opção diante da coleta de amostras (item 4.3.1 do Capítulo 1) e determinação (item 2.1.1a do Capítulo 2).

Em geral, os protocolos de avaliação e/ou certificação que aceitam a estimativa ou predição da Ds aplicam bônus para projetos que efetuam a determinação da Ds por coleta de amostra de solo indeformada.

No caso da predição, deve-se avaliar os documentos orientadores quanto ao aceite dessa metodologia.

Como funções, estão aquelas propostas no trabalho de Reis et al. (2024):

$$Ds = 1,286 + 3,208 \times (0,001 \times At) - 2,013 \times (0,001 \times Ar)$$

$$Ds = 1,358 + 2,79 \times (0,001 \times A) - 2,328 \times (0,001 \times Ar) - 0,052 \times (C \text{ org})$$

$$Ds = 1,198 + 2,971 \times (0,001 \times Af) + 4,472 \times (0,001 \times Ag) - 8,706 \times (0,0001 \times Ar)$$

$$Ds = 1,243 + 2,983 \times (0,001 \times Af) + 4,187 \times (0,001 \times Ag) - 5,793 \times (0,0001 \times Ar) - 6,208 \times (0,01 \times C \text{ org}).$$

em que:

At: areia total em %; Ar: argila em %; C org: carbono orgânico %; Af: areia fina em %; Ag: areia grossa em %.

Outras funções avaliadas têm bons resultados, como a de Tomasella e Hodnett (1998), a função B de Benites et al. (2007) e de Cidin (2016). Para tanto, é recomendado que se busquem funções já desenvolvidas ou calibrar funções regionalizadas ou locais.

Na escolha de uma função, deve-se observar o domínio de cada variável ou atributo utilizado na calibração. O domínio de cada variável ou atributo é representado pelo valor mínimo e máximo, podendo ser encontrado no trabalho de origem da função ou equação em uma tabela de estatística descritiva.

As funções que visam prever a Ds têm uma imprecisão, indicada nos trabalhos pelos valores da raiz quadrática média dos erros (*Root Mean Square Error* - RMSE), e esta varia na ordem de 0,14 – 0,20 g cm<sup>-3</sup> (Tomasella; Hodnett, 1998; Benites et al., 2007; Reis et al., 2024).

### 2.1.3 Variabilidade e incertezas na determinação da densidade do solo pelo anel volumétrico

A variabilidade e as incertezas nas avaliações da Ds são influenciadas pela heterogeneidade do solo, pelo volume amostrado e pela presença de materiais grossos, raízes ou outros materiais. Em geral, os valores apresentam variabilidade de baixa a moderada, com coeficiente de variação entre 6% e 25% (Warrick, 2001).

É possível, com o conhecimento prévio ou estimativas feitas em solos similares, acrescidos do valor da variabilidade espacial da Ds (p.ex. coeficientes de variação), estimar o número de amostras a ser coletado, considerando determinado intervalo de confiança (normalmente estabelecido em 95%) e o percentual admitido de variação em torno da média (5% – 20%).

O detalhamento estatístico da estimativa do número de amostras a serem coletadas para uma determinada área é apresentado por Gilbert (1987). Os estudos de Teixeira e Villani (1996) e Troyack et al. (2021) exemplificam como fazer a estimativa do número de amostras para diferentes atributos do solo.

Uma alternativa para aumentar a precisão nas estimativas da Ds, sem aumentar muito o número de amostras coletadas, é aumentar o volume de cada amostra. Isso ocorre porque o volume representativo da Ds em muitos solos necessita de um volume amostral maior que 100 cm<sup>3</sup> (Bear, 2013; Iwata et al., 2020).

## 2.2 Carbono total, carbono orgânico e granulometria

### 2.2.1 Preparo das amostras deformadas

#### a) Amostra sem materiais grossos

A amostra composta obtida no item 4.5 (Capítulo 1) de cada camada deve ser destorroada com fragmentação manual, seguida de secagem completa ao ar ou em estufa a 40 °C.

Em seguida, esperar esfriar, macerar todo o solo (pode-se utilizar um rolo de madeira) e peneirar em malha de 2,00 mm para obter o solo fino. O material

orgânico (folhas, galhos, raízes, carvão) retido na peneira pode ser descartado.

Colocar o solo fino em proveta com marcação volumétrica, ajustar com batidas suaves no recipiente e obter o volume do solo fino (*vsf*).

Do solo fino da proveta obter a massa do solo fino (*msf*) em balança semianalítica (precisão de duas casas decimais) e a densidade do solo fino (*Dsf*).

$$Dsf = msf / vsf$$

em que:

*Dsf*: Densidade do solo fino ( $Mg\ m^{-3}$  ou  $g\ cm^{-3}$  ou  $kg\ dm^{-3}$ ); *msf*: massa do solo fino (g); *vsf*: volume do solo fino ( $cm^3$ ; mL)

#### b) Amostra com materiais grossos

A amostra obtida no item 4.5 (Capítulo 1) de cada camada é destorroada com fragmentação manual, com secagem ao ar ou em estufa a 40 °C.

Em seguida, esperar esfriar e obter o volume total da amostra (*vta*) em proveta com marcação volumétrica. Ajustar a amostra de solo e materiais grossos com batidas suaves no recipiente.

Separar manualmente, de forma suave, os materiais grossos endurecidos e resistentes, folhas, galhos, raízes e carvão.

Em seguida, macerar todo o material fino (pode-se utilizar um rolo de madeira) e peneirar em malha de 2,00 mm para obter o solo fino.

Colocar o solo fino em proveta com marcação volumétrica, ajustar o solo fino com batidas suaves no recipiente e obter o volume do solo fino (*vsf*).

Do solo fino da proveta, obter a massa do solo fino (*msf*) em balança semianalítica (precisão de duas casas decimais) e a densidade do solo fino (*Dsf*).

$$Dsf = msf / vsf$$

em que:

*Dsf*: Densidade do solo fino ( $Mg\ m^{-3}$  ou  $g\ cm^{-3}$  ou  $kg\ dm^{-3}$ ); *msf*: massa do solo fino (g); *vsf*: volume do solo fino ( $cm^3$ ; mL)

Na sequência, calcular a proporção dos materiais grossos que foram separados manualmente.

$$PMG = (vta - vsf) / vta$$

em que:

*PMG*: proporção de materiais grossos (decimal); *vta*: volume total da amostra obtida item 4.3.2 (Capítulo 1) em  $cm^3$ ; *vsf*: volume de solo fino ( $cm^3$ ; mL).

## 2.2.2 Determinação do carbono

### a) Carbono total (C total)

Diferentes métodos podem ser utilizados para obter o C do solo, sendo recomendado o método de combustão à seca - via seca (Método Dumas). Neste método, uma amostra de solo é submetida ao processo de combustão com temperatura em torno de 1.000 °C em equipamento (auto)analisador elementar (Fontana; Bianchi, 2017).

O teor de C total é obtido de forma automática em %, sendo necessário multiplicar por 10 para obter o resultado em  $g\ kg^{-1}$ .

Mais detalhes desta determinação podem ser obtidos no Manual de Métodos de Análise de Solo (Fontana; Bianchi, 2017); especialmente para solos com carbonatos, os quais devem ser eliminados previamente à análise.

É possível utilizar também os métodos que aplicam técnicas de detecção proximal, como: espectroscopia de infravermelho, incluindo infravermelho próximo (NIR), infravermelho visível-próximo (Vis-NIR) e infravermelho médio (MIR); espectroscopia de quebra induzida por laser (LIBS); e espalhamento inelástico de nêutron (INS), também conhecido como análise de raios gama estimulada por nêutrons ou espectroscopia (FAO, 2020; Verra, 2023). Para estes métodos, os critérios de avaliação quanto ao uso devem ser observados a priori (Verra, 2023).

### b) Carbono orgânico (C org)

Os métodos de oxidação via úmida (Walkley-Black) e perda por ignição ou mufla (LOI) não são recomendados devido a serem imprecisos, mas podem ser utilizados quando nenhum outro método estiver disponível (Verra, 2023).

Uma amostra de solo é submetida a oxidação por uma solução com uma mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico, associado a uma fonte de calor externa. Este método é definido como Walkley & Black modificado, em função da adição da fonte de calor externa ao método originalmente proposto por Walkley e Black (1934) (Fontana; Campos, 2017).

O teor do C org é obtido em  $g\ kg^{-1}$ . Caso tenha o valor em %, deve ser multiplicado por 10 para se obter em  $g\ kg^{-1}$ .

Este método não é recomendado para solos com teor de C superior a 80,0  $g\ kg^{-1}$  ou 8,0%.

Mais detalhes desta determinação podem ser obtidos no Manual de Métodos de Análise de Solo (Fontana; Campos, 2017).

### c) Estimativa do carbono total

Como uma forma alternativa, é possível estimar ou prever o C total a partir do teor de C org. Contudo, recomenda-se avaliar os programas e mesmo as certificadoras sobre a aplicação deste método.

Pode-se estimar o C total a partir dos resultados obtidos do C org pelo método do Walkley & Black ou Walkley & Black modificado, considerando-se que, em média, o método oxida cerca de 76% do C presente na matéria orgânica. Assim, é necessário aplicar o fator 1,32 para obter o C total a partir dos resultados obtidos do C org (Walkley; Black, 1934).

Funções regionais ou locais podem ser obtidas para estimar ou prever o C total. Como exemplo de funções obtidas de solo com o cultivo de eucalipto da região centro-leste do estado de Minas Gerais, desenvolvidas por Gatto et al. (2009):

Superficial (0 a 20 cm):  $C_{total} = (1,1982 \times C_{org}) + 0,0051$

Intermediária (20 a 80 cm):  $C_{total} = (1,2664 \times C_{org}) + 0,1256$

Inferior (80 a 130 cm):  $C_{total} = (1,1016 \times C_{org}) + 0,1075$

C total e C org: em g kg<sup>-1</sup>; (valor obtido em % multiplicado por 10).

### d) Estimativa do carbono orgânico

No caso de análises em laboratórios que obtêm a matéria orgânica (MO), basta dividir o valor da MO por 1,724 para obter o valor do C org. Este fator advém da composição da MO, a qual tem, em média, 58% de C ( $100/58 = 1,724$ ).

Em alguns laboratórios que obtêm a MO determinada por colorimetria pelo método Dakota do Sul Modificado, o teor de C org é multiplicado pelo fator de conversão de 1,724 e, posteriormente, também pelo fator de 1,32 (correção da oxidação parcial da MO) (Walkley; Black, 1934). Dessa forma, a divisão do teor de MO por 1,724 se aproxima ao teor do C total, e não ao C org (Quaggio; Raij, 1979).

Conforme variações possíveis nas calibrações das funções pelos diferentes laboratórios, recomenda-se solicitar ao laboratório que se enviou as amostras para análise a forma de obtenção da MO, tanto da determinação por titulometria quanto por colorimetria.

Diante disso, a utilização das conversões supracitadas é uma possibilidade de aproveitamento de dados. Contudo, recomenda-se aqui que seja obtido o teor de C total ou mesmo do C org, conforme métodos especificados nos itens 2.2.2a e 2.2.2b do Capítulo 2.

### e) Harmonização dos teores de carbono orgânico

Quando os laboratórios realizam a determinação do C org em base volumétrica (g dm<sup>-3</sup>), é necessário a transformação para a base gravimétrica (massa). Esta transformação é obtida pela divisão do teor de C org pela densidade do solo fino (Dsf). O valor da Dsf é aquele obtido nos itens 2.2.1a e 2.2.1b do Capítulo 2.

Caso não tenha obtido a Dsf pelos procedimentos anteriores, separar uma amostra do solo fino seco e obter um volume conhecido (10 cm<sup>3</sup>). Determinar a massa do solo seco e, posteriormente, a Dsf.

$$Dsf = msf / vsf$$

em que:

Dsf: Densidade do solo fino (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); msf: massa do solo fino (g); vsf: volume do solo fino (cm<sup>3</sup>; mL)

Caso não seja possível determinar a Dsf, pode-se estimar ou prever os teores de C org obtidos em base volumétrica por meio de uma função que utiliza os teores de areia total ou de argila do solo de cada camada, como proposto no trabalho de Cordeiro et al. (2020).

$Dsf = 0,9594781 + (0,0229629 \times \exp(0,0033731 \times At))$ , ou,

$Dsf = 1,000383 + (0,545928 \times \exp(-0,005821 \times Ar))$

em que:

Dsf: densidade do solo fino em g dm<sup>-3</sup>; exp: exponencial; At: areia total em g kg<sup>-1</sup> (valor obtido em % multiplicado por 10); Ar: argila em g kg<sup>-1</sup> (valor obtido em % multiplicado por 10).

### 2.2.3 Determinação das frações granulométricas e obtenção do grupamento textural

A análise granulométrica deve ser realizada uma única vez, no início das avaliações, já que a proporção das frações pouco ou nada é modificada pelo cultivo e manejo.

Nesta análise, são obtidos os teores de areia total (2 - 0,053 mm), silte (0,053 a 0,002 mm) e argila total (< 0,002 mm). A areia total pode ser fracionada em areia grossa e areia fina, caso seja de interesse usar esses parâmetros em equações de estimativa de Ds, conforme item 2.1.2.

Assim como para o C, os teores são expressos em g kg<sup>-1</sup>, sendo o valor em % multiplicado por 10.

Mais detalhes desta determinação podem ser obtidos no Manual de métodos de análise de solo (Donagemma et al., 2017).

A partir dos teores das frações granulométricas, é obtido o grupamento textural (Tabela 2.1), conforme descrito no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018).

**Tabela 2.1.** Teores das frações granulométricas para obtenção dos grupamentos texturais.

Grupamento textural	Areia Total	Argila	Areia Total - Argila
		g kg <sup>-1</sup>	
Arenosa	–	–	> 700
Média	> 150	< 350	–
Argilosa	–	≥ 350 ≤ 600	–
Muito Argilosa	–	> 600	–
Siltosa	≤ 150	< 350	–

Fonte: Santos et al. (2018).

### 3. Cálculo do estoque de carbono

A escolha do método de cálculo deve ser observada nas diretrizes de cada programa ou certificadora, considerando as diferenças na quantificação e na necessidade de correção por equivalência de massa.

No caso da correção por equivalência de massa, o Est C será harmonizado entre todas as áreas para uma mesma massa de solo, tendo como base a área de referência ou linha de base.

Há fórmulas para cálculo do Est C, com inclusão da correção para equivalência da massa de solo e outras com cálculo adicional.

O Est C deve ser obtido para cada camada, cada componente ou estrato e cada faixa representativa, tanto nas áreas de referência ou linha de base, quanto para as áreas de interesse, com aplicação de práticas de manejo ou cultivo.

#### 3.1 Estoque do carbono utilizando a densidade do solo fino, proporção de materiais grossos e sem correção da equivalência da massa de solo

Nesta forma de determinação, há inclusão da densidade do solo fino, conforme recomendado pelo IPCC (Penman et al., 2003) e da adaptação conforme a equação A4.1 da FAO (2020), além da equação 5 da Verra (2023).

##### a) Estoque do C de cada camada

$$Est\ C\ (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = C \times Dsf \times (1 - PMG) \times E \times 0,1$$

em que:

*Est C*: estoque de C da camada; *C*: teor de C da camada (g kg<sup>-1</sup>); *Dsf*: densidade do solo fino da camada (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); *PMG*: proporção dos materiais grossos (decimal); *E*: espessura da camada (cm).

##### b) Estoque total de C

*Estoque total C* (t ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>) = soma do *Est C* de cada camada.

### 3.2 Estoque do carbono utilizando a densidade do solo, proporção de materiais grossos e correção da equivalência da massa de solo

#### 3.2.1 Equação da FAO A4.2

A aplicação da correção da equivalência de massa é realizada conforme o item A4.2 da FAO (2020). A equação foi modificada com a inclusão da proporção de materiais grossos.

##### a) Massa de solo de cada camada (MSC)

$$MSC\ (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = 10.000 \times Ds \times E \times 0,1$$

em que:

*Ds*: densidade do solo da camada (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); *E*: espessura da camada (cm).

##### b) Massa total de solo (MTS)

$$MTS\ (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = MSCn1 + MSCn$$

em que:

*MSCn1*: massa de solo da camada 1; *MSCn*: massa de solo da camada n.

##### c) Estoque total de C (Est C)

$$Est\ C\ (Mg\ m^{-3}) = [(Cn1 \times MSCn1) \times (1 - PMG) + (Cn \times MSCn) \times (1 - PMG)] / 1000$$

em que:

*Cn1*: carbono da camada 1 (g kg<sup>-1</sup>); *MSCn1*: massa de solo da camada n1; *Cn*: carbono da camada n; *MSCn*: massa de solo da camada n; *PMG*: proporção de materiais grossos (decimal). Caso os resultados de C estejam em %, utilizar na equação o divisor 100.

d) *Correção do estoque total de C – áreas de intervenção ou interesse*

$$Est\ C_{cor} (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = (Est\ C_{ai} \times MTS_{lb}) / MTS_{ai}$$

em que:

*Est C<sub>cor</sub>*: estoque de carbono corrigido; *Est C<sub>ai</sub>*: estoque total de carbono da área de interferência ou interesse; *MTS<sub>lb</sub>*: massa total de solo de cada área de linha de base (referência); *MTS<sub>ai</sub>*: massa total de solo da área de interferência ou interesse.

### 3.2.2 Equação de Carvalho

Outra opção é utilizar a equação de Carvalho et al. (2009), tendo como base os trabalhos de Veldkamp (1994) e Moraes et al. (1996). A equação foi modificada com a inclusão da proporção de materiais grossos.

a) *Estoque de C de cada camada*

$$Est\ C (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = C \times D_s \times (D_{sRef} / D_s) \times (1 - PMG) \times E \times 0,1$$

em que:

*Est C*: estoque de C da camada da área de intervenção (interesse); *C*: teor de C da camada (g kg<sup>-1</sup>); *D<sub>s</sub>*: densidade do solo da área de intervenção (interesse) (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); *D<sub>sRef</sub>*: densidade do solo da linha de base ou referência (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); *PMG*: proporção dos materiais grossos (decimal) de intervenção (interesse); *E*: espessura da camada (cm).

b) *Estoque total de C*

*Estoque total C* (t ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>) = soma dos *Est C* de cada camada.

### 3.2.3 Equação de Veldkamp

A equação proposta por Veldkamp (1994) foi modificada com a inclusão da proporção de materiais grossos. A correção de massa será apresentada posteriormente no item “c”.

a) *Estoque de C de cada camada*

$$Est\ C = C \times D_s \times (1 - PMG) \times E \times 0,1$$

em que:

*Est C*: estoque de C da camada (t ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>); *C*: teor de C da camada (g kg<sup>-1</sup>); *D<sub>s</sub>*: densidade do solo da camada (Mg m<sup>-3</sup> ou g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>); *PMG*:

proporção dos materiais grossos (decimal); *E*: espessura da camada (cm)

b) *Estoque total de C*

*Estoque total C* (t ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>) = soma dos *Est C* de cada camada.

c) *Estoque total de C e correção da equivalência da massa de solo*

Aplica-se a equação proposta no trabalho de Sisti et al. (2004), tendo como base os trabalhos de Vallis (1972), Ellert e Bettany (1995) e Neill et al. (1997). A massa de solo da área de intervenção é corrigida pela massa da última camada (maior profundidade) em relação à área de referência ou linha de base.

Como exige amostragens mais profundas, geralmente se aplica para avaliações de até 100 cm de profundidade (neste caso, presume-se que a classe textural é a mesma ao longo do perfil do solo).

$$Est\ C_{cor} (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = Est\ C + [MSC_{uc} - (MTS_{ai} - MTS_{lb})] \times C_{uc}$$

em que:

*Est C<sub>cor</sub>*: estoque total de C corrigido; *Est C*: soma do estoque de C da primeira até a penúltima camada da área de intervenção (interesse) (Mg ha<sup>-1</sup>); *MSC<sub>uc</sub>*: massa do solo da última camada da área de intervenção (interesse) (Mg ha<sup>-1</sup>); *MTS<sub>ai</sub>*: massa total do solo da área de intervenção (interesse) (Mg ha<sup>-1</sup>); *MTS<sub>lb</sub>*: massa total do solo na área de linha de base ou referência (Mg ha<sup>-1</sup>); *C<sub>uc</sub>*: teor de C do solo na última camada da área de intervenção (interesse) (Mg Mg<sup>-1</sup>).

## 3.3 Estoque total do carbono em cultivos consorciados ou integrados

O estoque total de C deve ser obtido considerando a proporção ocupada por cada componente ou estrato. Para isso, multiplicar o valor do estoque total de C de cada componente ou estrato pela proporção ocupada (decimal) por cada um deles, como definida no item 3.4 (Capítulo 1).

$$Est\ total\ C (t\ ha^{-1}\ ou\ Mg\ ha^{-1}) = Est\ total\ CE1 \times PE1 + Est\ total\ CEn \times PEn$$

em que:

*Est total CE1*: estoque carbono do estrato 1; *PE1*: proporção do estrato 1 (decimal); *Est total CEn*: estoque carbono do estrato n; *PEn*: proporção do estrato n (decimal).

### 3.4 Formas para expressar ou representar o estoque total do carbono

O estoque total de C é obtido em  $t\ ha^{-1}$  ou  $Mg\ ha^{-1}$ . Para obter em  $kg\ m^{-2}$ , dividir o estoque total do C por 10.

## 4. Considerações finais

Os procedimentos de análise da densidade do solo, carbono e frações granulométricas se aplicam a diferentes condições de coleta e atendem aos aspectos relacionados à garantia para os cálculos do estoque de carbono em áreas que preconizam práticas que favorecem a manutenção ou aumento de matéria orgânica no solo.

## Referências

- ALMEIDA, B. G. de; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. 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. pt. 1, cap. 7, p. 65-75. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172272/1/Pt-1-Cap-7-Densidade-do-solo.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. Chelmsford: Courier Corporation, 2013.
- BENITES, V. de M.; MACHADO, P. L. O. de 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, Apr. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>.
- CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. P.; PÍCCOLO, M. C.; GODINHO, V. de P. C.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 342-349, May 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>.
- CIDIN, A. C. M. **Estoque de carbono em solos brasileiros e potencial de contribuição para mitigação de emissões de gases de efeito estufa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8586>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- CORDEIRO, F. R.; CESÁRIO, F. V.; FONTANA, A.; ANJOS, L. H. C. dos; CANTO, A. C. B. do; TEIXEIRA, W. G. Pedotransfer functions: the role of soil chemical properties units conversion for soil classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190086, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190086>.
- DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G. de; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. Análise granulométrica. 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. pt. 1, cap. 10, p. 95-116. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172279/1/Pt-1-Cap-10-Analise-granulometrica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, Nov. 1995. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes: GSOC-MRV protocol**. Rome, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- FONTANA, A.; BIANCHI, S. R. Carbono e nitrogênio total: analisador elementar. 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. pt. 3, cap. 4, p. 393-396. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194460/1/Pt-3-Cap-4-Carbono-e-nitrogenio-total.pdf>. Acesso em: 16 ago. 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. pt. 3, cap. 1, p. 360-367. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194453/1/Pt-3-Cap-1-Carbono-organico.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S.; VILLANI, E. M. de A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 735-740, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300026>.
- GILBERT, R. O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 336 p.
- IWATA, S.; TABUCHI, T.; WARKENTIN, B. P. **Soil-water interactions: mechanisms applications**. Rev. and expanded. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. E-Book. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003067320>.
- MORAES, J. F. L. de; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63-81, Mar. 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0).

NEILL, C.; MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L. de; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, v. 7, n. 4, p. 1216-1225, Nov. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[1216:SCANS F\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[1216:SCANS F]2.0.CO;2).

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. Série Documento, 116). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/117416/1/Documentos116.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAIISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.; WAGNER, F. (ed.). **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. IPCC good practice guidance for LULUCF. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG\\_LULUCF\\_FULLEN.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf). Acesso em: 16 ago. 2024.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 184-187, 1979.

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

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2024.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. dos; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 76, p. 39-58, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.

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, Mar. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-199803000-00003>.

TEIXEIRA, W. G.; VILLANI, E. M. Variabilidade espacial de características químicas do solo em um latossolo amarelo, com utilização agrícola anterior. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 22., 1996, Manaus. **Resumos expandidos**. Manaus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 132-133. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181692/1/XXII-RB2-132-133.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

TROYACK, I. B.; VÖN MUHLEN, C.; VASQUES, G. de M.; TEIXEIRA, W. G. Estimativa do número de amostras de solo para caracterizar elementos químicos utilizando fluorescência de raios X portátil em áreas contaminadas: estudo de caso em Resende. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 893-901, set./out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200158>.

VALLIS, I. Soil nitrogen changes under continuously grazed legume-grass pastures in subtropical coastal Queensland. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, v. 12, n. 58, p. 495-501, 1972. DOI: <https://doi.org/10.1071/EA9720495>.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, Jan./Feb. 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>.

VERRA. **VM0042**: methodology for improved agricultural land management. Version 2.0. 2023. Disponível em: <https://verra.org/wp-content/uploads/2023/05/VM0042-Improved-ALM-v2.0.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, Jan. 1934. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.

WARRICK, A. W. (ed.). **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 400 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420041651>.

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: 19 ago. 2024.



## Apêndice A

**Tabela A1.** Unidades dos atributos obtidos pelas análises do solo, camadas e áreas.

Atributo	Unidade	Unidade (possível)
Areia, silte e argila	g kg <sup>-1</sup> (% × 10)	%
Área	ha (corresponde a 10.000 m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>
C org	g kg <sup>-1</sup> (% × 10)	%
C total	g kg <sup>-1</sup> (% × 10)	%
Ds	Mg m <sup>-3</sup> ; kg dm <sup>-3</sup> ; g cm <sup>-3</sup> ;	kg L <sup>-1</sup> ; g mL <sup>-1</sup>
Estoque de C	t ha <sup>-1</sup> ou Mg ha <sup>-1</sup>	kg m <sup>-2</sup> (t ha <sup>-1</sup> ou Mg ha <sup>-1</sup> / 10)
Profundidade ou espessura	cm	m (cm/100)

