

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).

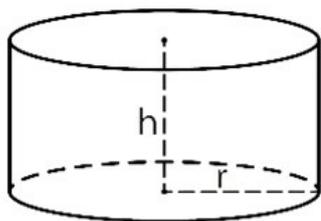


Figura 2.1. Componentes do anel volumétrico para coleta da densidade do solo.

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⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³);
vta: volume total da amostra obtida no item 4.3.2 (Capítulo 1), em cm³.

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⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); msf : massa do solo fino (g); vsf : volume do solo fino (cm³; 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 cm³; vsf: volume de solo fino (cm³; 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⁻³ (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 cm³ (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)analizador 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⁻¹; (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⁻³), 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 cm³). Determinar a massa do solo seco e, posteriormente, a 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 (cm³; 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⁻³; exp: exponencial; At: areia total em g kg⁻¹ (valor obtido em % multiplicado por 10); Ar: argila em g kg⁻¹ (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⁻¹, 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 ⁻¹	
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⁻¹); *Dsf*: densidade do solo fino da camada (Mg m⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); *PMG*: proporção dos materiais grossos (decimal); *E*: espessura da camada (cm).

b) Estoque total de C

Estoque total C (t ha⁻¹ ou Mg ha⁻¹) = 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⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); *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⁻¹); *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_{cor}: estoque de carbono corrigido; *Est C_{ai}*: estoque total de carbono da área de interferência ou interesse; *MTS_{lb}*: massa total de solo de cada área de linha de base (referência); *MTS_{ai}*: 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⁻¹); *D_s*: densidade do solo da área de intervenção (interesse) (Mg m⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); *D_{sRef}*: densidade do solo da linha de base ou referência (Mg m⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); *PMG*: proporção dos materiais grossos (decimal) de intervenção (interesse); *E*: espessura da camada (cm).

b) *Estoque total de C*

Estoque total C (t ha⁻¹ ou Mg ha⁻¹) = 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⁻¹ ou Mg ha⁻¹); *C*: teor de C da camada (g kg⁻¹); *D_s*: densidade do solo da camada (Mg m⁻³ ou g cm⁻³ ou kg dm⁻³); *PMG*:

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

b) *Estoque total de C*

Estoque total C (t ha⁻¹ ou Mg ha⁻¹) = 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_{cor}: 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⁻¹); *MSC_{uc}*: massa do solo da última camada da área de intervenção (interesse) (Mg ha⁻¹); *MTS_{ai}*: massa total do solo da área de intervenção (interesse) (Mg ha⁻¹); *MTS_{lb}*: massa total do solo na área de linha de base ou referência (Mg ha⁻¹); *C_{uc}*: teor de C do solo na última camada da área de intervenção (interesse) (Mg Mg⁻¹).

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. 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 ⁻¹ (% × 10)	%
Área	ha (corresponde a 10.000 m ²)	m ²
C org	g kg ⁻¹ (% × 10)	%
C total	g kg ⁻¹ (% × 10)	%
Ds	Mg m ⁻³ ; kg dm ⁻³ ; g cm ⁻³ ;	kg L ⁻¹ ; g mL ⁻¹
Estoque de C	t ha ⁻¹ ou Mg ha ⁻¹	kg m ⁻² (t ha ⁻¹ ou Mg ha ⁻¹ / 10)
Profundidade ou espessura	cm	m (cm/100)