

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária

ISSN 3085-9514

***Eventos Técnicos
& Científicos***



Junho, 2026

**Resumos expandidos
21ª Jornada Acadêmica
da Embrapa Soja**

30 de junho e 1º de julho de 2026
Londrina, PR

Embrapa Soja
Londrina, PR
2026

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral, Caixa postal
4006, CEP 86085-981, Distrito de
Warta, Londrina, PR
(43) 3371 6000
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Roberta Aparecida Carnevali

Secretária-executiva

*Regina Maria Villas Bôas
de Campos Leite*

Membros

*Adonis Moreira, Clara Beatriz
Hoffmann-Campo, Claudine Dinali
Santos Seixas, Claudio Guilherme
Portela de Carvalho, Fernando
Augusto Henning, Leandro Eugênio
Cardamone Diniz, Liliane Márcia
Mertz-Henning, Maria Cristina Neves
de Oliveira*

Organização da publicação

*Regina Maria Villas Bôas
de Campos Leite
Liliane Márcia Mertz-Henning
Kelly Catharin*

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso

Capa

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Diagramação

*Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol e
Marisa Yuri Horikawa*

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 Soja

Jornada Acadêmica da Embrapa Soja (21. : 2026: Londrina, PR).

Resumos expandidos [da] XXI Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, Londrina,
PR, 30 de junho e 1 de julho de 2026 – Londrina : Embrapa Soja, 2026.

PDF (157 p.) - (Eventos técnicos & científicos / Embrapa Soja, ISSN 3085-9514; 8)

1. Soja. 2. Pesquisa agrícola. I. Título. II. Série.

CDD (21. ed.) 630.2515

Calibração local do método de oxidação via úmida com o método de combustão à seca na quantificação de carbono em solos cultivados com soja

Pedro Henrique de Jonge⁽¹⁾, Esmael Lopes dos Santos⁽²⁾, Ana Claudia Arruda Motta Alves⁽³⁾, Maria Júlia Couto⁽⁴⁾, Marcelo Hiroshi Hirakuri⁽⁵⁾, Julio Cezar Franchini⁽⁶⁾, Roberta Aparecida Carnevali⁽⁶⁾, Marco Antonio Nogueira⁽⁶⁾, Henrique Debiasi⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Estudante de Agronomia, Unifil, Bolsista PIBIC/CNPq, Unifil, Londrina, PR. ⁽²⁾ Centro Universitário Assis Gurgacz - FAG, Cascavel, PR. ⁽³⁾ Estudante de mestrado, Esalq/USP, Piracicaba, SP. ⁽⁴⁾ Estudante de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS. ⁽⁵⁾ Analista, Embrapa Soja, Londrina, PR. ⁽⁶⁾ Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina, PR.

Introdução

Programas de certificação associados à redução das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEEs), como o Programa Soja Baixo Carbono - PSBC (Debiasi et al., 2023; Nepomuceno et al., 2023), exigem metodologias robustas e, ao mesmo tempo, técnica e financeiramente viáveis, para quantificação dos estoques de carbono no solo. Diferentes métodos podem ser utilizados para obter o carbono do solo, sendo o método de combustão à seca, de maior precisão analítica, o mais indicado para protocolos de certificação (Fontana et al., 2024). Neste método, uma amostra de solo é submetida ao processo de combustão com temperatura em torno de 1.000 °C em equipamento analisador elementar (Fontana; Bianchi, 2017), com a determinação do carbono total do solo (orgânico e inorgânico). Os métodos de oxidação via úmida (Walkley; Black, 1934) prestam-se à determinação do carbono orgânico do solo, apresentando restrições de uso em protocolos de certificação por serem imprecisos (Fontana et al., 2024) e subestimarem sistematicamente os teores (Fernandes et al., 2015). Porém, os métodos de combustão via úmida são amplamente utilizados em análises químicas de solo de rotina, devido ao custo expressivamente inferior (cerca de cinco vezes menor do que o método da combustão à seca), simplicidade operacional e disponibilidade de uma ampla rede de laboratórios credenciados.

Diversos trabalhos de pesquisa demonstram forte correlação entre os teores de carbono total (combustão à seca) e carbono orgânico (oxidação via úmida), o que torna possível o estabelecimento de relações quantitativas entre os métodos (Sato et al., 2014; Fernandes et al., 2015) e, assim, de equações para harmonização dos resultados (Shamrikova et al., 2022). Entretanto, fatores como textura do solo, mineralogia, composição da matéria orgânica e histórico de manejo influenciam a relação entre o carbono orgânico e o carbono total (Mersmans et al., 2009; Fernandes et al., 2015; Ćirić et al., 2021), dificultando a utilização de uma única equação universal de harmonização.

Dessa forma, a utilização de calibrações locais surge como alternativa para redução dos custos analíticos mantendo consistência estatística. Para isso, é de fundamental importância definir qual o número mínimo de amostras de solo a serem analisadas pelo método mais preciso e mais caro (combustão à seca), necessário para ajustar equações locais robustas que permitam calibrar os teores de carbono orgânico quantificados pelo método mais barato e impreciso (oxidação via úmida).

O objetivo deste trabalho foi ajustar equações locais que permitam calibrar o método da oxidação via úmida com o método da combustão seca nas condições específicas de talhões agrícolas de produção de soja em diferentes regiões brasileiras, buscando definir o número mínimo de amostras a serem analisadas pelo método de maior precisão e custo (combustão seca).

Material e Métodos

Foram utilizados os teores de carbono do solo determinados em amostras coletadas em 44 talhões comerciais de soja no período de maio a outubro de 2024, distribuídos em todas as cinco macrorregiões sojícolas brasileiras (Tabela 1). Em talhões com calagem programada dentro da janela de tempo disponível para a coleta de solo, a amostragem foi realizada antes da aplicação do calcário. Em cada talhão, foram coletadas 20 amostras de solo em cinco camadas distintas (0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m; 0,3-0,4 m; e 0,4-0,6 m), cada uma composta por oito subamostras, seguindo grade amostral regular com tamanho variável em função da área de cada talhão. Nos talhões 42, 43 e 44, as amostras foram coletadas em três camadas

(0,0-0,1 m; 0,1-0,2 m; e 0,2-0,4 m). Em laboratório, o teor de carbono total foi determinado pelo método da combustão à seca, utilizando analisador elementar de carbono e nitrogênio, conforme descrito em Fontana e Bianchi (2017). Já o carbono orgânico foi determinado por oxidação via úmida e quantificação colorimétrica, conforme descrito em Cantarella et al. (2001).

A comparação entre os métodos de determinação do teor de carbono do solo foi realizada por meio de análise de regressão linear simples, primeiramente considerando o conjunto de todos os pontos e profundidades dos talhões amostrados. Posteriormente, as análises de regressão foram realizadas individualmente por talhão, utilizando todos os pontos e camadas amostradas em cada um deles. Nas análises de regressão, o carbono orgânico por oxidação via úmida foi utilizado como variável independente.

O número mínimo de amostras necessário para a calibração dos teores de carbono do solo foi determinado por meio da geração de subconjuntos de dados com número crescente de pontos completos (2, 4, 6, 8 e 12 pontos), a partir de amostragem aleatória com reposição (*bootstrap*), conforme proposto por Efron e Tibshirani (1993). Cada ponto completo englobou 5 amostras, referentes às camadas amostradas (0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m; 0,3-0,4 m; e 0,4-0,6 m). Para cada subconjunto, foi ajustado um modelo de regressão linear entre os teores de carbono obtidos pelo método de oxidação úmida e aqueles determinados pelo método de referência (combustão seca). O desempenho do modelo foi avaliado por meio do erro quadrático médio (RMSE). Dentro de cada subconjunto, este procedimento foi repetido 40 vezes, englobando diferentes combinações de pontos aleatoriamente escolhidos, permitindo o cálculo do RMSE médio para cada número de amostras testado. O número mínimo de pontos necessários para calibração foi aquele a partir do qual o aumento no tamanho amostral resultou em redução relativa do RMSE médio inferior a 5%, situação que caracteriza estabilidade do erro de estimativa (Moriassi et al., 2007).

Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o auxílio do software R versão 4.6.0 (R Core Team, 2024).

Resultados e Discussão

A análise de regressão demonstrou forte relação linear entre os teores de carbono estimados pelos dois métodos (Figura 1), o que se constitui em premissa para a calibração visando à harmonização dos resultados. A reta que representa a relação observada entre os métodos ficou acima da linha 1:1, indicando que a determinação por combustão à seca resulta em maiores teores de carbono do solo comparativamente à oxidação via úmida. Resultados similares foram obtidos em diversos trabalhos de pesquisa (Meersmans et al., 2009; Sato et al., 2014; Fernandes et al., 2015; Ćirić et al., 2021), e estão associados principalmente à recuperação incompleta do carbono orgânico no método da oxidação via úmida (Walkley; Black, 1934). Além disso, a combustão seca quantifica também o carbono inorgânico, existente do solo principalmente na forma de carbonatos, o que não ocorre no método da oxidação via úmida (Fontana; Bianchi, 2017). Salienta-se que o método de oxidação via úmida com quantificação colorimétrica (Cantarella et al., 2001), utilizado neste trabalho, já incorpora indiretamente um fator de correção multiplicativo de 1,33 para compensar a oxidação parcial da matéria orgânica pelo dicromato, o qual foi estimado considerando que aproximadamente 75% do carbono orgânico é recuperado (Walkley; Black, 1934). Esses resultados evidenciam que o fator de 1,33 foi insuficiente para compensar a recuperação incompleta do carbono orgânico por oxidação via úmida, uma vez que é pouco provável que, em condições de solos tropicais sem aplicação recente de calcário, a presença de carbono inorgânico oriundo de carbonatos explique a totalidade da subestimativa.

Ainda com relação à Figura 1, observa-se que a distância entre a linha resultante da equação que relaciona os dois métodos e a reta 1:1 aumenta com o incremento do teor de carbono no solo. Esse comportamento pode estar relacionado a maior recalcitrância molecular e a maior proteção física e química da matéria orgânica em solos com maior teor de argila e localizados em regiões mais frias (condições em que o teor de carbono é maior), o que, por sua vez, impacta negativamente na proporção de carbono orgânico recuperado pela oxidação via úmida (Díaz-Zorita, 1999; De Vos et al., 2007).

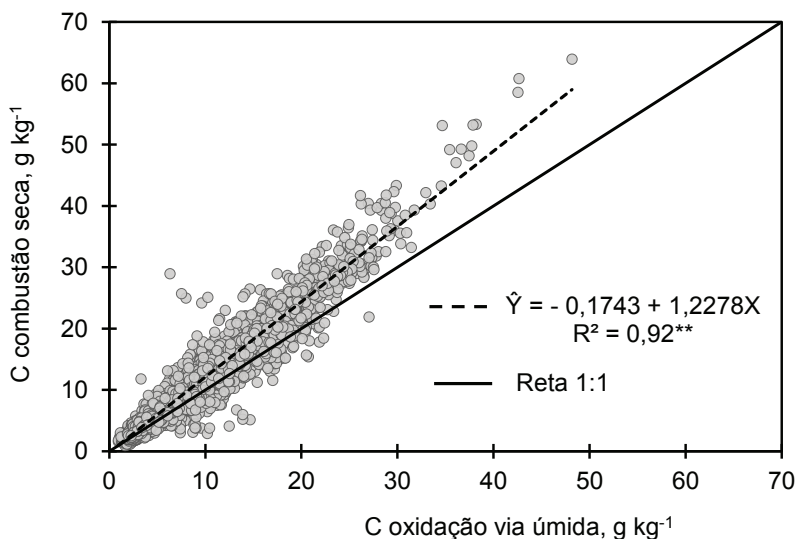


Figura 1. Relação entre os teores de carbono no solo determinados por oxidação via úmida e combustão a seca, em amostras coletadas em 44 talhões de produção de soja em diferentes regiões brasileiras.

Não obstante a existência de relação linear consistente entre os métodos quando todo o conjunto de dados é utilizado na análise de regressão, a equação apresentada na Figura 1 não pode ser universalmente aplicada para calibração dos teores de carbono estimados por oxidação via úmida nas situações específicas de cada talhão. Essa afirmação é justificada pela ampla variação dos coeficientes de regressão das equações lineares entre os talhões (Tabela 1). Neste sentido, o coeficiente angular variou de 0,4298 a 1,2907, enquanto que intercepto apresentou valores entre -1,924 e 5,379. As equações de regressão linear apresentaram ajuste significativo em todos os talhões, embora em alguns deles (8 talhões) os valores do coeficiente de determinação (R^2) tenham sido baixos, inferiores a 0,70. Essa variabilidade na qualidade do ajuste é outro fator que demonstra a dificuldade em se utilizar uma equação única para harmonizar os teores de carbono quantificados pelo método de oxidação via úmida com os obtidos por combustão à seca. A obtenção de diferentes equações de regressão para os talhões estudados indica que fatores como textura do solo, mineralogia, composição da matéria orgânica e histórico

de uso e manejo afetam a relação entre os teores de carbono estimados pelos dois métodos (Díaz-Zorita, 1999; De Vos et al., 2007; Meer-smans et al., 2009; Fernandes et al., 2015; Ćirić et al., 2021), tornando evidente a necessidade de calibração específica para cada local.

Tabela 1. Localização e área dos talhões estudados, com os respectivos coeficientes de regressão e de determinação (R^2) das equações lineares que relacionam os teores de carbono do solo determinados por combustão à seca com os quantificados por oxidação via úmida.

Talhão	Área (ha)	Município/Estado	Coefficiente angular	Intercepto	R^2
T1	96	Mangueirinha/PR	1,2905	1,958	0,95**
T2	134	Santo Augusto/RS	1,1712	1,508	0,98**
T3	71	Luziânia/PR	1,1704	0,769	0,98**
T4	134	Farol/PR	1,1638	0,767	0,92**
T5	81	Farol/PR	1,2056	1,228	0,96**
T6	102	Araruna/PR	1,2610	0,725	0,94**
T7	148	Mamborê/PR	1,2175	- 0,356	0,96**
T8	95	Presidente Castelo Branco/PR	0,9644	0,137	0,67**
T9	30	Umuarama/PR	0,9142	1,019	0,81**
T10	87	Xambrê/PR	0,8984	0,428	0,91**
T11	28	Arapongas/PR	1,2329	1,912	0,96**
T12	247	Cambira/PR	1,0127	5,379	0,49**
T13	62	Ourizona/PR	1,1598	1,680	0,98**
T14	29	Rolândia/PR	1,2064	1,237	0,97**
T15	83	Londrina/PR	1,1942	1,453	0,97**
T16	68	Primeiro de Maio/PR	1,2907	1,769	0,94**
T17	135	Ponta Porã/MS	1,0709	0,393	0,80**
T18	45	São Gabriel do Oeste/MS	1,0724	1,148	0,90**
T19	26	Bandeirantes/MS	0,9379	- 0,461	0,91**
T20	311	Rio Verde/GO	1,1070	0,983	0,94**
T21	107	Hidrolândia/GO	0,8795	3,224	0,93**
T22	82	Silvânia/GO	1,1250	2,077	0,95**
T23	157	Tupaciguara/MG	0,9259	1,247	0,66**
T24	177	Querência/MT	0,8927	0,316	0,94**
T25	208	Nova Mutum/MT	0,9682	1,333	0,93**

... Continua

Tabela 1. Continuação

Talhão	Área (ha)	Município/Estado	Coefficiente angular	Intercepto	R ²
T26	177	Santa Rita do Trivelato/MT	1,0991	1,328	0,94**
T27	221	Campo Novo do Parecis/MT	1,1643	- 0,342	0,94**
T28	198	Novo São Joaquim/MT	1,3690	- 1,924	0,93**
T29	210	Primavera do Leste/MT	0,8639	0,865	0,92**
T30	40	Juscimeira/MT	0,9526	1,188	0,83**
T31	88	Pedra Preta/MT	1,1203	1,965	0,98**
T32	224	Sapezal/MT	0,4298	4,042	0,13**
T33	149	Ipiranga do Norte/MT	1,1194	1,070	0,95**
T34	557	Santa Rita do Trivelato/MT	0,8599	1,618	0,93**
T35	434	Santa Rita do Trivelato/MT	0,8541	1,326	0,78**
T36	400	Campo Novo do Parecis/MT	1,1757	0,128	0,93**
T37	155	Palmeirante/TO	1,0721	0,677	0,73**
T38	180	Bom Jesus/PI	0,9490	1,032	0,93**
T39	408	Currais/PI	0,9412	0,680	0,81**
T40	254	Palmeira do Piauí/PI	1,0629	- 0,074	0,85**
T41	589	Ribeiro Gonçalves/PI	0,8952	0,790	0,90**
T42	46	Brejo/MA	0,9504	1,143	0,91**
T43	322	Parnarama/MA	0,8561	4,976	0,50**
T44	213	Magalhães de Almeida/MA	0,7447	1,345	0,78**

** Equação estatisticamente significativa (teste F, $p < 0,01$).

Visando reduzir os custos associados à calibração local entre os métodos, buscou-se definir o número mínimo de pontos completos com determinação do carbono por combustão à seca, necessário para estabilizar o erro (RMSE) da estimativa por regressão linear (Figura 2). A estabilização do RMSE ocorreu em 37 (84%) dos 44 talhões avaliados. Para 24 talhões, faz-se necessária a quantificação do carbono por combustão à seca em 4, 6 ou 8 pontos completos, o que representa intensidade amostral variável entre 20 e 40% dos pontos coletados. Para 13 (35%) dos 37 talhões em que houve estabilização do RMSE, o carbono deve ser quantificado pelo método de referência em pelo menos 12 pontos, representando uma intensidade amostral de 60% dos pontos.

Em geral, os resultados mostraram a necessidade de aprimoramento dos métodos de amostragem e de distribuição espacial dos pontos em que o carbono deve ser determinado pelos dois métodos, visando à calibração local. É possível que, com a alocação dos pontos de calibração em regiões do talhão delimitadas em função de características como o teor de argila e posição na paisagem (amostragem estratificada), o número necessário de amostras analisadas por combustão à seca seja significativamente reduzido, com a consequente diminuição dos custos de análise.

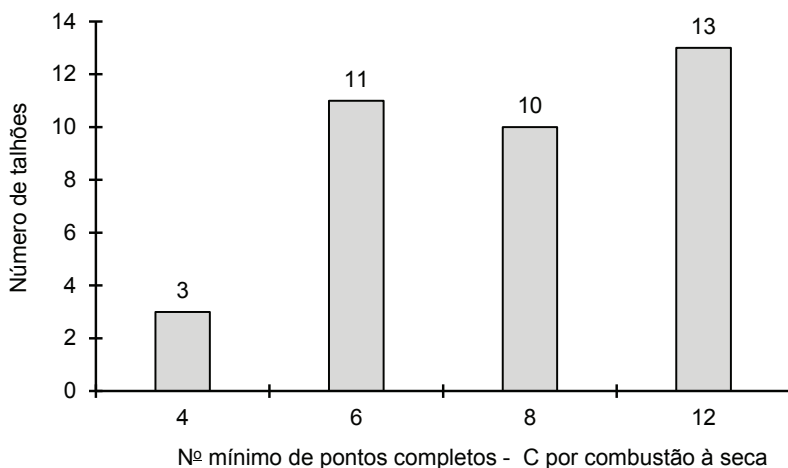


Figura 2. Frequência de talhões em função do número mínimo de pontos completos com determinação do teor de carbono pelo método de referência (combustão à seca) necessário para estabilização dos valores da **raiz do erro quadrático médio (RMSE)** da equação de regressão entre os métodos de quantificação de carbono no solo.

Conclusão

Há forte relação linear global entre os teores de carbono determinados por oxidação via úmida e por combustão à seca, porém as equações variam expressivamente entre os talhões, o que requer calibração local entre os métodos. A calibração local entre os métodos, utilizando menor número de amostras de solo para quantificação do carbono por combustão seca, é possível na maioria das situações. Na maioria dos casos, a proporção de amostras com quantificação

do carbono pelo método de referência foi de 40 ou 60% do total, indicando a necessidade de aperfeiçoamento da metodologia, com foco na distribuição dos pontos de calibração considerando a variabilidade da área.

Referências

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p. 173-180.

ĆIRIĆ, V.; MANOJLOVIĆ, M. S.; ŠVARC-GAJIĆ, J. Comparison, limitations and uncertainty of wet chemistry techniques, loss on ignition and dry combustion in soil organic carbon analysis. **Agrochimica**, v. 65, p. 295-314, 2021.

DE VOS, B.; LETTENS, S.; MUYS, B.; DECKERS, J. A. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. **Soil Use and Management**, v. 23, p. 221-229, 2007.

DEBIASI, H.; NOGUEIRA, M. A.; CARNEVALLI, R. A.; HIRAKURI, M. H.; RUFINO, C. F. G.; NEPOMUCENO, A. L. **Diretrizes técnicas para certificação Soja Baixo Carbono - primeira aproximação**. Londrina: Embrapa Soja, 2023. 58 p. (Embrapa Soja. Documentos, 457).

DÍAZ-ZORITA, M. Soil organic carbon recovery by the Walkley-Black method in a typic hapludoll. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 30, p. 739-745, 1999.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. **An introduction to the bootstrap**. New York: Chapman & Hall, 1993. 436 p.

FERNANDES, R. B. A.; CARVALHO JUNIOR, I. A.; RIBEIRO JUNIOR, E. S.; MENDONÇA, E. S. Comparison of different methods for the determination of total organic carbon and humic substances in Brazilian soils. **Revista Ceres**, v. 62, p. 496-501, 2015.

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.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C. **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 31 p. (Embrapa Solos. Documentos, 243).

MEERSMANS, J.; WESEMAEL, B. van; MOLLE, M. van. Determining soil organic carbon for agricultural soils: a comparison between the Walkley & Black and the dry combustion methods (north Belgium). **Soil Use and Management**, v. 25, p. 346-353, 2009.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, p. 885-900, 2007.

NEPOMUCENO, A. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; RUFINO, C. F. G.; DEBIASI, H.; NOGUEIRA, M. A.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, F. V.; MONTEIRO, R. A. C.; ALMEIDA, R. G. de; BUNGENSTAB, D. J.; DALL'AGNOL, V. F. D. **Soja Baixo Carbono**: um novo conceito de soja sustentável. 2. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2023. 11 p. (Embrapa Soja. Comunicado Técnico, 100).

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 21 maio 2026.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHÃO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 302-308, 2014.

SHAMRIKOVA, E. V.; KONDRATENOK, B. M.; TUMANOVA, E. A.; VANCHIKOVA, E. V.; LAPTEVA, E. M.; ZONOVA, T. V.; LU-LYAN-MIN, E. I.; DAVYDOVA, A. P.; LIBOHOVA, Z.; SUVANNANG, N. Transferability between soil organic matter measurement methods for database harmonization. **Geoderma**, v. 412, article 115547, 2022. 11 p. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115547.

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, p. 29-38, 1934.