

JUNIA KARST CAMINHA RUGGIERO

**CARBONO DA BIOMASSA RADICULAR E VARIABILIDADE ESPACIAL DO
CARBONO ORGÂNICO EM SOLO SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO STRICTO
SENSU**

Botucatu

2013

JUNIA KARST CAMINHA RUGGIERO

**CARBONO DA BIOMASSA RADICULAR E VARIABILIDADE ESPACIAL DO
CARBONO ORGÂNICO EM SOLO SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO STRICTO
SENSU**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal.

Orientador(a): Iraê Amaral Guerrini

Coorientador(a): Célia Regina Lopes
Zimback

Botucatu

2013

R931c

Ruggiero, Junia Karst Caminha

Carbono da biomassa radicular e variabilidade espacial do carbono orgânico em solo sob vegetação de cerrado stricto-sensu / Junia Karst Caminha Ruggiero. -- Botucatu, 2013
82 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Iraê Amaral Guerrini

Coorientadora: Célia Regina Lopes Zimback

1. Solos. 2. Krigagem. 3. Raízes. 4. Cerrados. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "CARBONO DA BIOMASSA RADICULAR E VARIABILIDADE
ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO EM SOLO SOB VEGETAÇÃO DE
CERRADO "*STRICTO SENSU*""

ALUNA: JUNIA KARST CAMINHA RUGGIERO

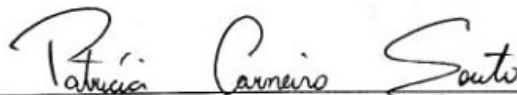
ORIENTADOR: PROF. DR. IRAE AMARAL GUERRINI

COORIENTADORA: PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

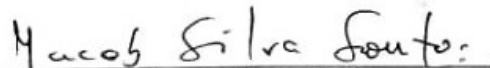
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. IRAE AMARAL GUERRINI



PROFA. DRA. PATRÍCIA CARNEIRO SOUTO



PROF. DR. JACOB SILVA SOUTO

Data da Realização: 06 de Agosto de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Ao Professor Iraê Amaral Guerrini, meu orientador, pelos ensinamentos, confiança e amizade

À Professora Célia Lopes Zimback, minha co-orientadora, por me apresentar o universo da Geoestatística;

À Maria Bertalot, Fernando Soriano e a todo o pessoal do Instituto de Biodinâmica, na estância Demétria, por terem disponibilizado a área, informações e por todo o auxílio fornecido;

Ao pessoal do Departamento de Solos e Recursos Ambientais: Adriana e o Seu Jair; sem ele este projeto não teria sido possível;

À minha família e a todos que contribuíram direta ou indiretamente a esse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O carbono orgânico do solo (COS) e a biomassa radicular são compartimentos fundamentais para compreender a dinâmica do carbono em ecossistemas naturais. Este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade vertical, sazonal e espacial do carbono orgânico do solo e quantificar o carbono radicular em uma área de Cerrado stricto sensu localizada em Botucatu, SP. As amostras de solo foram coletadas em 40 pontos georreferenciados, em cinco profundidades, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, nos períodos de inverno e verão. Foram determinados os teores de carbono orgânico, expressos em g dm^{-3} , para estimativa dos estoques de carbono orgânico do solo, e a densidade do solo para estimativa dos estoques de carbono orgânico do solo e para caracterização física do perfil. A análise incluiu estatística descritiva, análise de variância para medidas repetidas, comparações pareadas, variogramas experimentais e krigagem ordinária. O carbono radicular foi avaliado em cinco trincheiras, nas mesmas profundidades, com separação das raízes por classes de diâmetro. Os estoques de carbono orgânico do solo até 100 cm foram de $135,00 \text{ Mg C ha}^{-1}$ no inverno e $114,66 \text{ Mg C ha}^{-1}$ no verão, com valores aproximadamente 15,1% menores no verão, período correspondente à estação chuvosa. O carbono orgânico apresentou maior concentração nas camadas superficiais e decréscimo progressivo em profundidade. A geoestatística evidenciou dependência espacial detectável na maioria das profundidades, com padrões de dependência moderada a forte, exceto na camada de 20-40 cm, onde ocorreu efeito pepita puro. O estoque de carbono radicular foi estimado em $15,65 \text{ Mg C ha}^{-1}$ com 61,68% concentrados na camada de 0-20 cm, e maior contribuição das raízes de maior diâmetro na camada superficial. O estoque total abaixo do solo foi de $150,65 \text{ Mg C ha}^{-1}$ no inverno e $130,31 \text{ Mg C ha}^{-1}$ no verão, considerando o mesmo estoque radicular medido em campanha única. Conclui-se que a profundidade do solo, o período de coleta e a inclusão do carbono radicular são fatores centrais para a interpretação dos estoques de carbono abaixo do solo em cerrado stricto sensu. A geoestatística contribuiu para caracterizar a heterogeneidade espacial do COS na área fornecendo subsídios para o planejamento de futuras amostragens e para a compreensão da distribuição espacial do carbono em remanescentes de cerrado stricto sensu.

Palavras-chave: efeito pepita; estoque de carbono; índice de dependência espacial.

ABSTRACT

Soil organic carbon and root biomass are fundamental compartments for understanding carbon dynamics in natural ecosystems. This study aimed to evaluate the vertical, seasonal, and spatial variability of soil organic carbon and to quantify root carbon in an area of Cerrado stricto sensu located in Botucatu, São Paulo State, Brazil. Soil samples were collected at 40 georeferenced points, at five depths, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm, during the winter and summer periods. Soil organic carbon contents, expressed in g dm^{-3} , were determined to estimate soil carbon stocks, and soil bulk density were determined to estimate soil carbon stocks and to characterize the physical conditions of the soil profile. The analysis included descriptive statistics, repeated-measures analysis of variance, paired comparisons, experimental variograms, and ordinary kriging. Root carbon was assessed in five trenches, at the same depths, with roots separated by diameter classes. Soil organic carbon stocks down to 100 cm were $135.00 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in winter and $114.66 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in summer, with values approximately 15.1% lower in summer, corresponding to the rainy season. Soil organic carbon showed higher concentrations in the surface layers and a progressive decrease with depth. Geostatistics revealed detectable spatial dependence in most depths, with moderate to strong dependence patterns, except in the 20-40 cm layer, where a pure nugget effect occurred. Root carbon stock was estimated at $15.65 \text{ Mg C ha}^{-1}$, with 61.68% concentrated in the 0-20 cm layer, and a greater contribution from larger-diameter roots in the surface layer. Total belowground carbon stock was $150.65 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in winter and $130.31 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in summer, considering the same root carbon stock measured in a single sampling campaign. It is concluded that soil depth, sampling period, and the inclusion of root carbon are central factors for interpreting belowground carbon stocks in Cerrado stricto sensu. Geostatistics contributed to characterizing the spatial heterogeneity of soil organic carbon in the area, providing support for the planning of future sampling efforts and for understanding the spatial distribution of carbon in Cerrado stricto sensu remnants.

Keywords: nugget effect; carbon stock; spatial dependence index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1A e 1B - Fisionomia da vegetação da área de pesquisa. Botucatu/SP	31
Figura 2 - Dados climáticos dos anos de 2011 e 2012 da região de estudo	32
Figura 3 - Imagem aérea da área de estudo com os pontos amostrais	33
Figura 4 - Malha amostral dos pontos de amostragem	33
Figura 5 - Sonda para Coleta de Solo para estimativa de densidade	34
Figura 6 - Sonda para Coleta de Solo para análise de carbono orgânico	34
Figura 7 - Anéis de Kopecky para coleta de amostras de solo.....	34
Figura 8 - Solo para análise química.....	35
Figura 9A e 9B - Trincheiras para coleta de raízes	36
Figura 10 - Raízes segregadas por diâmetro	37
Figura 11 - Variação na densidade do Solo em relação à sazonalidade.....	45
Figura 12 – Boxplots da distribuição dos teores de COS por profundidade e estação	48
Figura 13 - Perfil médio dos teores de carbono orgânico do solo (COS) por profundidade e estação, a IC95%	49
Figura 14 - Variogramas com os modelos ajustados obtidos para COS nas profundidades e períodos estudados	54
Figura 15. Distribuição espacial do COS na profundidade de 0 - 20 cm, inverno	56
Figura 16. Distribuição espacial do COS na profundidade de 0 - 20 cm, verão	56
Figura 17 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 40 - 60 cm, inverno ..	57
Figura 18 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 40 - 60 cm, verão	57
Figura 19 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 60 - 80 cm, inverno ..	58
Figura 20 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 60 - 80 cm, verão	58
Figura 21 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 80 - 100 cm, inverno	59
Figura 22 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 80 - 100 cm, verão ...	59
Figura 23 - Perfil vertical do carbono radicular	63
Figura 24 - Carbono radicular por classe de diâmetro ao longo do perfil do solo	66
Figura 25 - Composição percentual do carbono radicular por profundidade e classe de diâmetro	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva com 100% dos dados de COS no inverno	46
Tabela 2 - Estatística descritiva com 100% dos dados de COS no verão	47
Tabela 3 - Resultados da ANOVA de medidas repetidas para os efeitos de Estação, Profundidade e da interação Estação × Profundidade sobre os teores de COS	49
Tabela 4 - Comparações pareadas entre inverno e verão por profundidade	50
Tabela 5 - Parâmetros geoestatísticos do COS no inverno	53
Tabela 6 - Parâmetros geoestatísticos do COS no verão	53
Tabela 7 - Estoque de carbono orgânico do solo por profundidade e estação	61
Tabela 8 - Estatística descritiva do carbono radicular total por profundidade	63
Tabela 9 - Resultado do modelo linear misto para o efeito da profundidade sobre o carbono radicular total	64
Tabela 10 - Comparações múltiplas entre profundidades para o carbono radicular total	65
Tabela 11 - Estoque total de carbono radicular por classe de diâmetro	65
Tabela 12 - Carbono radicular médio por profundidade e classe de diâmetro	67
Tabela 13 - Resultado do modelo linear misto para carbono radicular em função da profundidade, classe de diâmetro e interação	67
Tabela 14 - Comparações múltiplas pelo teste de Tukey	68
Tabela 15 - Composição percentual do carbono radicular por classe de diâmetro em cada profundidade	68
Tabela 16 - Carbono total abaixo do solo no inverno	71
Tabela 17 - Carbono total abaixo do solo no verão	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	O BIOMA CERRADO.....	21
2.2	CARBONO ORGÂNICO DO SOLO.....	22
2.3	SERAPILHEIRA NO CERRADO	24
2.4	BIOMASSA DAS RAÍZES	26
2.5	GEOESTATÍSTICA NA ESTIMATIVA DO CARBONO	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA E VEGETAÇÃO.....	31
3.2	DADOS CLIMÁTICOS DA REGIÃO DE ESTUDO	32
3.3	METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM	32
3.4	ANÁLISE DOS DADOS.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	DENSIDADE DO SOLO.....	45
4.2	CARBONO ORGÂNICO DO SOLO.....	46
4.3	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (COS) ..	52
4.4	ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO POR PROFUNDIDADE E ESTAÇÃO	61
4.5	ESTOQUE DE CARBONO RADICULAR POR PROFUNDIDADE E CLASSE DE DIÂMETRO	62
4.6	CARBONO TOTAL (SOLO + RAÍZES)	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Os gases de efeito estufa (GEE) decorrentes das atividades econômicas são considerados causadores do fenômeno do aquecimento global (IPCC, 2007a). O gás que mais se destaca dentre os GEE é o CO₂, proveniente da queima de combustíveis fósseis, desmatamentos e queimadas (IPCC, 2000; IPCC, 2007a). Diversas pesquisas apontam como principal causador a elevação da concentração do CO₂ na atmosfera intensificada após a revolução industrial (Nobre et al., 2012), culminando em ações mitigadoras como o Protocolo de Quioto, no qual os países desenvolvidos com altas taxas de emissões de GEE se comprometeram a reduzi-las até 2012 (UNFCCC, 1998). O resultado, contudo, não foi animador. Dentre todas as estimativas de aumento da temperatura global projetadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) em seu quarto relatório de avaliação, em 2007, a humanidade está caminhando para a pior delas e o desafio agora é manter o aumento da temperatura global abaixo dos 4°C até 2100 (IPCC, 2007b). Assim, para evitar que o globo ficasse sem um acordo climático que limitasse emissões e impusesse obrigações, o Protocolo de Quioto foi estendido até 2020 (UNFCCC, 2012). Para limitar as emissões e GEE o protocolo prevê mecanismos de flexibilização como o mercado de carbono e implementação conjunta, entre os países desenvolvidos, e o MDL (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo) que possibilita que atividades de redução de emissões possam ser feitas em países em desenvolvimento, com financiamento proveniente de países desenvolvidos. Cabe dizer que até o final do protocolo poucos projetos MDL referentes ao uso da terra e florestas foram implementados no Brasil, sendo associados à restauração florestal e substituição de combustíveis fósseis por energia renovável (BRASIL, 2013).

Uma vez que o desmatamento e as queimadas são considerados causadores do aquecimento global, os países que preservam suas áreas florestais estão não só evitando emissões de carbono, mas também atuando como sumidouros. Devido à importância da floresta na dinâmica do carbono, na Conferência das Partes da ONU em 2009 (COP 15) foi definida como urgente a implantação do mecanismo conhecido como REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação). Esse mecanismo propõe a comercialização de créditos de carbono estocado nas florestas valorizando o recurso natural e incentivando a recuperação de áreas degradadas. Atualmente, o mecanismo está sendo trabalhado como REDD+, sendo que o “plus”

se refere à conservação florestal, manejo florestal sustentável e aumento dos estoques de carbono florestais.

Devido a sua ampla área territorial e sua vasta vegetação, o Brasil tem grande potencial para integrar o mecanismo de REDD+ e tem feitos esforços relevantes para regulamentação de instrumentos financeiros nacionais. Os benefícios financeiros destinados ao desenvolvimento de comunidades e produtores rurais que quantifiquem e mantenham os estoques de carbono em suas propriedades garantem que, áreas de reserva legal e as áreas de preservação permanente (APP) não sejam mais consideradas como áreas improdutivas, ou ainda, que áreas de grande pressão de desmatamento na Amazônia e no Cerrado sejam mais interessantes economicamente se preservadas. Mecanismos desse tipo podem ser a chave para a preservação e restauração de ecossistemas que possuem sua vegetação original já bastante reduzida, como é o caso do bioma Cerrado.

A quantificação do carbono é um ponto importante nessa equação. Esses mecanismos de redução de emissões por desmatamento ou degradação ou qualquer outro que enfatize a valoração dos serviços ecossistêmicos demanda estimativas detalhadas dos estoques de carbono existentes no ecossistema, como o carbono da biomassa acima do solo e o carbono subterrâneo. Quantificar as funções substanciais das florestas como reservatórios e sua capacidade de atuar como fontes e sumidouros são hoje a chave para entender e modificar o ciclo mundial de carbono (FAO, 2006).

Em um ecossistema florestal o carbono da biomassa acima do solo, retido por meio da fotossíntese, é liberado na forma de serapilheira, contribuindo para o estoque nos solos, que é o maior reservatório conhecido. Neste reservatório as raízes possuem fundamental importância na manutenção do carbono, uma vez que influenciam diretamente nos processos de decomposição da matéria orgânica e na atividade microbiana. Além disso, uma parcela significativa do carbono é devolvida ao solo pela mortalidade das raízes finas, que apresentam alta produtividade primária. Segundo Fearnside (2010), a estabilidade do carbono do solo é crítica quando a floresta é desmatada ou sofre outras perturbações. O aumento da temperatura do solo faz com que maiores quantidades de carbono sejam emitidas pelo solo à atmosfera.

Apesar da importância deste compartimento na ciclagem de carbono, os estudos sobre biomassa subterrânea e carbono nos solos ainda são escassos. Esta escassez de informação é provavelmente relacionada ao fato das coletas e processamento serem trabalhosos.

Muitos países não possuem informações específicas sobre os parâmetros necessários para o cálculo de todos os compartimentos de carbono em um ecossistema florestal. Em estudo da FAO (2006), de 229 países que disponibilizaram informações, somente 44 possuem inventários de carbono do solo, sendo que o Brasil apresentou 50289 milhões de Mg CO₂ (Sotomayor, 2009).

A escassez de informação é reflexo das poucas metodologias padronizadas para a quantificação dos estoques de carbono abaixo do solo, sendo que a maioria utiliza poucas amostras compostas de solo para a estimativa, quando não fatores defaults aplicados de forma generalizada para tal compartimento. Dentre todas, a metodologia mais reconhecida e utilizada é a metodologia do IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) de 2006, que apresenta um guia baseado em estudos científicos globais para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais. No entanto, essa metodologia não exige quantificação do carbono subterrâneo. Fearnside (2010) afirma que os motivos dessa omissão dentro do IPCC são artificiais e tem como justificativa a ideia de que as incertezas e controvérsias para inserção do carbono do solo são muito altas. O mesmo autor salienta que a maioria dos resultados anômalos é fruto de erros conhecidos em métodos de cálculos e interpretação e deve ser superado uma vez que, a inclusão do solo nas estimativas é fundamental para o êxito no controle do efeito estufa.

Segundo Sombroek et al. (2000), devido à alta incerteza, é necessário informações mais precisas para a obtenção de estimativas confiáveis do estoque regional de carbono no solo. Para tal, ferramentas, como a geoestatística, que apresenta técnicas de análise da distribuição espacial de atributos no solo, podem ser utilizadas disponibilizando informações mais detalhadas sobre a ocorrência de um fenômeno.

A consideração da variabilidade espacial dos atributos do solo, por meio da geoestatística, contribui para gerar estimativas mais consistentes da variação dos estoques de carbono. Métodos baseados apenas em médias pontuais podem mascarar padrões espaciais relevantes, especialmente em ecossistemas heterogêneos como o Cerrado, favorecendo interpretações menos precisas sobre a distribuição do carbono no solo.

Nesse contexto, a geoestatística permite incorporar a estrutura espacial dos dados e representar a distribuição do carbono orgânico do solo (COS) em áreas com dependência espacial detectável, apoiando interpretações mais detalhadas sobre sua

variabilidade dentro de uma área. Dessa forma, sua aplicação fornece subsídios importantes para estudos sobre a dinâmica do carbono em solos de Cerrado e para o planejamento de estratégias de conservação.

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a variabilidade vertical, sazonal e espacial do carbono orgânico do solo e quantificar o carbono radicular em uma área de cerrado stricto sensu em Botucatu, SP.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- i) descrever a variação dos teores de carbono orgânico do solo ao longo do perfil e entre inverno e verão;
- ii) avaliar a dependência espacial do carbono orgânico do solo em diferentes profundidades;
- iii) estimar a biomassa seca radicular e o estoque de carbono radicular por profundidade e classe de diâmetro; e
- iv) integrar os compartimentos solo e raízes para estimar o carbono total abaixo do solo até 100 cm de profundidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Bioma Cerrado

Considerado um dos hotspots mundiais de biodiversidade (Myers et al., 2000), o Cerrado é conhecido como o segundo maior bioma brasileiro. Em um conceito mais aprofundado, como o trazido por Batalha (2011), o cerrado lato sensu é formado por três biomas: o campo tropical (campo limpo), a savana (campo sujo, campo cerrado e cerrado stricto sensu) e a floresta estacional (cerradão). Por isso, o cerrado brasileiro é conhecido como o bioma mais biodiverso do globo, com alto grau de endemismo, abrangendo uma área de 2 milhões de km² distribuídos em 15 Estados e o Distrito Federal. Mantém apenas 34% da cobertura original sendo que, no Estado de São Paulo, onde antes a vegetação do Cerrado ocupava 14% do território, há atualmente pequenos fragmentos remanescentes isolados que cobrem aproximadamente 1% do Estado (Durigan et al., 2004). Essa redução expressiva se deve principalmente à conversão de vegetação nativa em pastagens e terras agrícolas que, segundo Machado et al. (2004), chega a 1,1% ao ano.

Entre seus dois extremos, o cerradão (arbóreo-arbustivo) e o campo limpo (herbáceo-subarbustivo), encontra-se a savana, caracterizada pelas demais fisionomias encontradas (campo sujo, campo cerrado e cerrado stricto sensu) podendo ser consideradas ecótonos entre o cerradão e campo limpo (Coutinho, 1978). Essas fisionomias são dependentes e adaptadas ao fogo, uma vez que a ocorrência frequente de incêndios no bioma contribui para o equilíbrio entre espécies arbóreas e gramíneas além da germinação e da reciclagem de nutrientes (Kauffman et al., 1994). Também são adaptadas a solos com altos teores de alumínio e distróficos, predominando as classes Argissolos, Latossolos e Neossolos Quartzarênicos (Walter, 2006). O cerrado stricto sensu é a fisionomia mais extensa e se destaca pelo vasto estrato herbáceo que coexiste com um estrato de arbustos e árvores esparsas. A proporção da biomassa das raízes com a parte aérea é muito alta nesse ambiente (Castro e Kauffman, 1998).

O clima é caracterizado pela presença de inverno seco e verão chuvoso (Walter, 2006). Em estudo em uma área de Cerrado denso protegida do fogo, Miranda et al. (1997) constataram que durante a estação chuvosa o Cerrado se comporta como um dreno de carbono, fixando algo em torno de 15 kg C ha⁻¹. Durante a seca, no entanto,

a vegetação se comportou como uma fonte de carbono para a atmosfera, voltando a atuar como dreno com o início das chuvas. No caso dos cerrados paulistas, devido à sua localização, essas áreas estão sujeitas à geadas e à menor duração do período seco sem presença de fogo, tornando-as um ambiente peculiar (Durigan et al., 2004).

A precipitação é um importante fator na quantidade de carbono estocado em solos tropicais e não deve ser ignorado nas quantificações de estoque de carbono. Aduan (2003), trabalhando com os fluxos de carbono em solos sob vegetação de cerrado stricto sensu, constatou uma grande amplitude nos valores de emissão de CO₂ pelo solo nas épocas seca e chuvosa. Os valores encontrados pelo autor oscilaram de 228 mmol.m⁻².h⁻¹ no auge da chuva, e 61 mmol.m⁻².h⁻¹ no final da estiagem o que corresponde a fluxos 3,7 vezes mais altos no período chuvoso.

Os esforços para a preservação do Cerrado são insuficientes e o bioma não está entre as prioridades nacionais de conservação. Somente 2,2% das áreas do bioma são protegidas e se a taxa atual de desmatamento se mantiver, o ecossistema poderá se extinguir até 2030 (Marris, 2005).

O contínuo desaparecimento da vegetação natural, devido à expansão agrícola, associado aos gases de efeito estufa, tem aumentado a preocupação global sobre o significativo papel das savanas no balanço do carbono global (Grace et al., 2006).

2.2 Carbono orgânico do solo

Dentre os reservatórios naturais de carbono, o solo é o principal, armazenando cerca de 1300 a 2000 Pg C (bilhões de toneladas) nos primeiros 100 cm de profundidade (Batjes, 1998), valores que, segundo o mesmo autor, correspondem ao dobro da concentração de carbono atmosférico. Existe certo grau de incerteza sobre a quantidade de carbono estocada como matéria orgânica nos solos. Levantamentos realizados por Aduan (2003) sugerem que estes estoques podem exceder em até três vezes o estoque da vegetação.

A acumulação ou perda de carbono em solos orgânicos é resultado de um balanço entre entradas e saídas de carbono no ambiente. Essa dinâmica está ligada intimamente ao regime hidrológico local, umidade disponível, profundidade do lençol freático, condições de redução e oxidação (Thormann et al., 1999), mas também composição de espécies vegetais e química da serapilheira (Yavitt et al., 1997).

Os solos de regiões tropicais podem desempenhar papel importante como depósito de CO₂ da atmosfera, reduzindo o efeito estufa. No caso de savanas, Scurlock et al. (1998) estimaram que o solo armazena 80% do carbono total do ecossistema. No entanto, a distribuição espacial do carbono nesses ambientes é bastante irregular, com teores mais elevados sob as árvores. Isso se deve ao fato de que a maioria do carbono no solo é associada com a matéria orgânica.

Esse fluxo inicia-se com a queda da serapilheira no solo continuando com a sua desintegração e transformação em húmus que será acumulado e desaparecerá através do consumo pelos organismos presentes no solo (Kölli et al., 2009). Além disso, em torno de 40% do carbono assimilado pelas folhas são transferidos para as raízes e através da deposição de exsudações são incorporados ao solo (Silva et al., 2004). Em uma síntese global clássica de Batjes (1996), estimou-se que que 39% a 70% do carbono orgânico contido nos primeiros 100 cm está concentrado nos primeiros 30 cm. Para o Cerrado, Paiva et al. (2011) encontrou 49% do carbono nos primeiros 20 cm. Outras pesquisas como a de Corazza et al. (1999) e Chapuis-Lardy et al. (2002) sustentam que as camadas superficiais apresentam o maior acúmulo de carbono do perfil do solo.

Essa alta quantidade de fatores que afetam o fluxo de carbono do solo não permite que generalizações na estimativa sejam feitas. Estudos específicos nas áreas de interesse são levando em consideração a escala de tempo de interesse, os métodos de amostragem são essenciais para que as estimativas do carbono do solo sejam confiáveis (Johnson et al., 2001).

Assim, a elevada variabilidade espacial do carbono orgânico do solo pode aumentar a incerteza associada às estimativas obtidas a partir de amostragens reduzidas ou de médias simples, reforçando a importância de abordagens metodológicas que considerem a estrutura espacial dos dados.

Áreas cultivadas e de pastagem possuem menos carbono que solos sob floresta, uma vez que a retirada da vegetação irá diminuir a quantidade de matéria orgânica disponível para a decomposição (Batjes et al., 1997). A degradação de pastagens tropicais tem sido associada à redução dos estoques de carbono orgânico do solo, com perdas médias da ordem de 3% (Ogle et al., 2004) a 9% (Maia et al., 2009), dependendo das condições edáficas, do histórico de uso e do nível de manejo. Sem a proteção da camada orgânica proveniente da vegetação, o solo também passará a emitir o carbono armazenando, diminuindo substancialmente suas reservas, inclusive

em profundidade (Fearnside, 2010). Em contraste, a recuperação e diversificação das pastagens brasileiras e de sistemas de produção agrícola com utilização de manejo adequado mostram ganhos significativos para o carbono orgânico do solo (Leite et al., 2010).

A dinâmica do carbono no solo e seus estoques, tanto em sistemas naturais como na agricultura e pecuária devem ser conhecidos para que seja possível o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, assim como a análise do papel do solo como depósito de carbono da atmosfera (Corazza et al., 1999).

Entre os parâmetros utilizados para determinação do carbono orgânico do solo, a densidade é um atributo que é afetado pela estrutura do solo, grau de compactação, manejo e tipos de vegetação (Leite, 1979). Segundo Lal et al. (2006) a densidade aparente do solo é definida como a razão entre a massa do sólido do solo e o volume total. É uma propriedade altamente dinâmica que varia fortemente através do tempo e do espaço e uma fonte determinadora da qualidade do solo, pois ambientalmente afeta os fluxos da atmosfera no solo.

O conhecimento da densidade aparente é importante para entender o impacto da mudança do uso do solo na determinação dos reservatórios elementares no solo. Ainda, pequenas mudanças na densidade, devido a fatores naturais ou antropogênicos podem causar mudanças drásticas nos reservatórios. Portanto, a falta de conhecimento sobre a densidade aparente pode frequentemente levar a interpretações erradas do manejo e das mudanças induzidas nos reservatórios do carbono orgânico do solo (Lal et al., 2006).

2.3 Serapilheira no Cerrado

A serapilheira é formada por materiais vegetais depositados sobre a superfície do solo, como folhas, ramos, flores, frutos, sementes, cascas e fragmentos vegetais em diferentes estágios de decomposição. Em ecossistemas naturais, sua deposição e decomposição participam diretamente da ciclagem de nutrientes e da formação da matéria orgânica do solo, funcionando como elo entre a biomassa aérea e o compartimento edáfico. Facelli et al. (1991) destacam que a serapilheira influencia a estrutura e a dinâmica das comunidades vegetais, enquanto Swift et al. (1979) tratam a decomposição como processo fundamental na circulação de matéria e energia nos ecossistemas terrestres.

Em formações do Cerrado, a serapilheira adquire importância particular em razão da sazonalidade climática, da variação estrutural entre fitofisionomias e da reconhecida adaptação das espécies às condições edáficas e hídricas do bioma.

Peres et al. (1983), em estudo realizado durante três anos em áreas de Cerrado e cerradão no Planalto Central, registraram produção média anual de serapilheira de 2.100 kg ha⁻¹ no Cerrado e 7.800 kg ha⁻¹ no cerradão, evidenciando o efeito da estrutura fisionômica sobre a magnitude do aporte de material vegetal. A vegetação de cerrado stricto sensu apresenta estrato herbáceo mais contínuo e estrato lenhoso descontínuo, enquanto o cerradão apresenta maior cobertura arbórea e estrutura mais fechada. Essa diferença de perfil da vegetação influencia a quantidade de material vegetal depositado sobre o solo.

A fração foliar é geralmente o principal componente da serapilheira em áreas de Cerrado. No estudo de Peres et al. (1983), as folhas, incluindo gramíneas, representaram 84% da produção total de resíduos vegetais no Cerrado. Os autores também observaram que a decomposição do material depositado sobre a superfície foi lenta nos dois ecossistemas avaliados, indicando que a serapilheira pode permanecer por período relativamente prolongado sobre o solo antes de sua incorporação ou mineralização. Esse comportamento é relevante para a interpretação dos estoques de carbono no solo, pois a serapilheira representa uma fonte de entrada de carbono, mas sua transformação em matéria orgânica depende da velocidade de decomposição e das condições ambientais que regulam esse processo.

Em estudo conduzido em área de cerrado no sudeste do Brasil, Valenti et al. (2008) verificaram padrão sazonal para a produção total de serapilheira e para a fração foliar, sendo a queda de folhas o atributo fenológico com resposta mais forte à sazonalidade e à seca. Esses resultados indicam que a deposição de serapilheira no Cerrado tende a apresentar maior intensidade durante o período seco ou no final desse período. Campos et al. (2008) estudaram o acúmulo de serapilheira em relação a variáveis como umidade do solo, precipitação, vento e temperatura em fragmentos de cerrado stricto sensu em Minas Gerais, e concluíram que a dinâmica de deposição da serapilheira nas áreas avaliadas esteve associada à sazonalidade climática.

O padrão de maior produção de serapilheira durante o período seco também foi observado em estudos realizados em outras áreas do Cerrado. Silva et al. (2007), ao avaliarem a produção de serapilheira no Cerrado, incluindo cerrado stricto sensu e cerradão, e em Floresta de Transição Amazônia-Cerrado no Centro-Oeste brasileiro,

verificaram acentuada sazonalidade, com maiores produções durante a estação seca e menores durante a estação chuvosa. Os autores também registraram maior representatividade da fração folhas em relação a outros fragmentos da vegetação. Esse resultado reforça a importância da fração foliar como principal componente do aporte anual de material vegetal em formações savânicas e florestais associadas ao Cerrado.

Embora esse estudo não tenha considerado a serapilheira como variável analisada, o entendimento de sua dinâmica contribui para explicar os mecanismos de entrada e transformação da matéria orgânica no solo.

2.4 Biomassa das Raízes

As raízes possuem uma importante função no ecossistema. Além de constituírem a principal entrada de água e nutrientes pelas plantas, as raízes representam uma das principais fontes de matéria orgânica para o solo, influenciando simultaneamente a atividade microbiana e os processos de decomposição (Cheng, 1999).

Segundo Malhi (2002), de 30 a 50% do total de carbono absorvido pela vegetação é utilizado para o suporte dos processos metabólicos sendo liberado de volta para a atmosfera como um subproduto da respiração; o restante do carbono absorvido é fixado como matéria orgânica acima e abaixo do solo, denominado de produção primária líquida. Reichle et al. (1973 *apud* Jackson et al. 1997) afirmam que em florestas a produção primária de biomassa é aproximadamente 60 – 80% da produção primária total, sendo que somente as raízes representam 50% dessa produtividade (Vogt et al., 1991). Segundo Malhi (2002), as plantas investem uma porção extra de carbono na produção das raízes e de seus exudatos aumentando assim o suprimento de energia.

No caso do Cerrado, mais de 71% da biomassa se encontra abaixo do solo e, portanto, grande parte do carbono absorvido pela vegetação é alocado para a biomassa subterrânea resultando num alto quociente raiz:parte aérea (Castro e Kauffman., 1998). Isso representa uma estratégia para a conservação de nutrientes diante de distúrbios como o fogo, de ocorrência comum no bioma.

Em um estudo sobre raízes em área de cerrado stricto sensu no estado de Goiás conduzido por Abdala (1998), concluiu-se que 72% das raízes pertencem às classes

“muito finas, finas e médias” e apresentam uma alta homogeneidade nas áreas com predominância na camada superficial. Em 16 trincheiras abertas para coleta em uma área de 20 ha, o mesmo autor encontrou um total de 33,4 t ha⁻¹ de raízes, sendo que 80% dessa quantidade foram encontrados em até 100 cm de profundidade. Castro e Kauffman (1998) coletaram amostras em cinco trincheiras com 2 metros de profundidade, onde foi encontrado um total de 46,6 t ha⁻¹ de raízes no cerrado stricto sensu brasileiro, sendo que desse total, 80% se encontravam nos primeiros 30 cm.

Em outro estudo sobre carbono subterrâneo no Cerrado com frequente ocorrência de fogo, Delitti et al. (2001) coletaram em 15 pontos amostrais o equivalente a um litro de solo em três profundidades e observou que 50 a 60% das biomassas das raízes se encontravam nos primeiros 12 cm de solo.

As raízes possuem alta taxa de renovação, com contribuição para o acúmulo anual de carbono do solo variando entre 25 e 80% (Vogt et al., 1989). Essa grande variação no acúmulo pode estar relacionada a fatores como o tipo de floresta, as espécies encontradas no local, o estágio sucessional, a área basal e as propriedades do solo, podendo ainda variar devido às características ambientais como a temperatura, precipitação e altitude (Cairns et al., 1997).

A variação sazonal da biomassa das raízes também é pouco conhecida. Estudos sugerem que a produção e o tempo de residência das raízes finas são sincronizados com o desenvolvimento do dossel na primavera e senescência das folhas no outono. Segundo Vogt et al. (1986), a biomassa das raízes finas tende a ser menor sob condições climáticas mais frias; já Kummerow et al. (1990) observaram um aumento da biomassa dessas raízes durante a estação chuvosa. Em concordância, Delitti et al. (2001) verificaram que a variação dos valores de biomassa abaixo do solo do Cerrado foi significativa para variação sazonal, sendo maiores durante a estação chuvosa e menores durante o período seco. Contudo, Vogt et al. (1996) salientam que as diferenças entre biomas nem sempre são consistentes.

Devido à extensa área de Cerrado, são necessários dados para estudos de produtividade e contribuição de práticas de manejo para o ciclo global do carbono (Abdala, 1998) de maneira a remover as lacunas existentes na estimativa de biomassa de raízes para diferentes biomas (Finér et al., 2007).

2.5 Geoestatística na estimativa do Carbono

O princípio da geoestatística surgiu quando Krige em 1951 concluiu que a variância entre as amostras não havia sentido se não levasse em consideração a distância entre elas. Baseado nessas observações, Matheron em 1963 criou a teoria das variáveis regionalizadas (Vieira, 2000). Segundo essa teoria, a diferença nos valores de uma variável tomadas em dois pontos no campo depende da distância entre eles (Vieira, 1995). Portanto, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, ilustrando uma continuidade espacial (Isaaks et al., 1989).

A dependência está presente em todas as direções e fica mais fraca à medida que aumenta a dispersão na localização dos dados (Cressie, 1993). A distância máxima ou o limite onde existe a dependência espacial entre duas ou mais observações é chamada de alcance. Após essa distância pode-se assumir que um valor não interfere mais no valor das observações vizinhas.

O estudo da distribuição espacial de atributos do solo, por meio da geoestatística, permite a interpretação e a projeção dos resultados com base na análise da estrutura da sua variabilidade natural (Vieira, 2000). A interpolação pelo método da krigagem é a ferramenta básica dessa técnica, que utiliza a dependência espacial entre as observações para estimar valores em qualquer posição do campo, cujo produto é um mapa de área com estimativas não viciadas e de mínima variância (Lamparelli et al., 2001).

Todos os solos são naturalmente variáveis, suas propriedades mudam horizontalmente na paisagem e verticalmente através dos perfis do solo. No caso da geoestatística a escolha da configuração e do espaçamento mínimo de amostragem para a análise dos variogramas é baseada no conhecimento prévio da variação na área do estudo, dos objetivos do estudo e do custo de amostragem e de mensuração, sendo que o desenho amostral inclui coletas em trajetos, grades equiláteras, grades equilaterais com amostragem curtas e amostragem ao acaso (Trangmar et al., 1985)

Em um estudo realizado sobre a distribuição espacial do carbono em uma floresta primária na Amazônia, foi constatada alta heterogeneidade, mesmo em áreas que pareciam ser homogêneas; concluiu-se então, que as estimativas de atributos do solo podem ser equivocadas quando sua distribuição espacial não é levada em consideração (Novaes et al., 2007). Esse equívoco pode ocorrer por meio de

amostragens insuficientes para descrever um fenômeno. Segundo Founier et al. (1994), em ambientes com alta variabilidade é necessário um elevado número de amostras para que a análise de um atributo do solo seja significativa a um intervalo de confiança de 10% na estimativa da média quando analisada por meio da estatística descritiva.

Rossi et al. (2009), estudando o carbono do solo em diferentes fisionomias florestais na Tanzânia, identificaram que em espécies nativas o alcance da dependência espacial do carbono chegou a 190 metros e, em plantações homogêneas de caju, o alcance chegou a 480 metros. Eles verificaram também que o número de amostras necessárias para uma precisão de 10% na estimativa de carbono foi menor para a análise da densidade do solo devido à maior homogeneidade dessa característica. Wojciechowski (2006) observou que em floresta estacional decídua, os dados referentes a matéria orgânica não se ajustaram em nenhum modelo teórico ao variograma demonstrando alta variabilidade, enquanto Novaes (2005) encontrou alcance de 222 metros para todos os atributos estudados, incluindo a matéria orgânica. Não foram encontrados estudos referentes a distribuição espacial da matéria orgânica e carbono sob vegetação nativa de cerrado brasileiro.

A necessidade da aplicação da geoestatística em estudos do uso do solo e comparação de paisagens de ecossistemas foi evidenciada por Stein et al. (2003), principalmente no caso de interpolação de variáveis espacialmente dependentes. O IPCC (2000 *apud* Rossi et al., 2009) afirma que deveriam ser adotadas amostragens que levem em consideração a variação espacial do carbono do solo.

Embora a geoestatística seja amplamente empregada na avaliação da variabilidade espacial de atributos do solo no Cerrado, especialmente em áreas sob uso agrícola (Bottega et al., 2013), sua aplicação à análise integrada do carbono orgânico do solo (COS) em formações nativas ainda se mostra relativamente limitada.

Apesar dos avanços na quantificação do carbono em ecossistemas de Cerrado, a literatura mostra que muitos estudos abordaram separadamente os compartimentos de carbono, a variação vertical no perfil ou a distribuição espacial dos atributos do solo. Essa fragmentação metodológica pode limitar a compreensão integrada dos estoques de carbono abaixo do solo.

Em áreas de cerrado *stricto sensu*, estudos prévios evidenciam a importância da distribuição vertical do COS e da consideração de camadas subsuperficiais e profundas na estimativa dos estoques (Paiva et al., 2011).

Morais (2013) avançou na modelagem e espacialização dos estoques de carbono em cerrado stricto sensu em Minas Gerais, integrando matriz aérea, serapilheira, raízes e solo em escala regional. Skorupa et al. (2012), por sua vez, demonstraram a viabilidade do uso de geoestatística para mapear carbono orgânico do solo em fragmentos de vegetação nativa, com aplicação de semivariogramas e krigagem ordinária.

No entanto, esses estudos não tiveram como foco a integração simultânea, em uma mesma malha amostral local, da variabilidade espacial, da sazonalidade climática e da distribuição vertical do carbono orgânico do solo até 100 cm de profundidade. Assim, delineamentos que articulem essas dimensões contribuem para refinar a interpretação dos estoques de carbono em áreas remanescentes de cerrado stricto sensu.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área e vegetação

A pesquisa foi conduzida em um remanescente de Cerrado localizado no município de Botucatu, SP, sob administração da Associação Brasileira de Agricultura Biodinâmica, no bairro Estância Demétria.

A área de estudo possui aproximadamente 2 ha e apresenta vegetação predominante classificada como cerrado stricto sensu, segundo Durigan et al. (2004). O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, textura média, ácido e derivado de arenito do Grupo Bauru (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981). Esse solo apresenta baixo teor de argila e matéria orgânica, baixa capacidade de troca catiônica, baixa saturação por bases, deficiência de nutrientes e elevada concentração de alumínio (Oliveira et al., 1982).

A vegetação da área é composta majoritariamente por espécies nativas do Cerrado, entre as quais foram registradas *Solanum lycocarpum*, *Tibouchina moricandiana*, *Bauhinia nitida*, *Smilax japecanga*, *Stryphnodendron adstringens*, *Pouteria torta* e *Campomanesia pubescens*. Em função de interferência antrópica também ocorrem alguns indivíduos exóticos, como *Pinus elliottii*.

O aspecto geral da vegetação pode ser observado nas Figuras 1A e 1B.

Figura 1A e 1B - Fisionomia da vegetação da área de pesquisa. Botucatu/SP



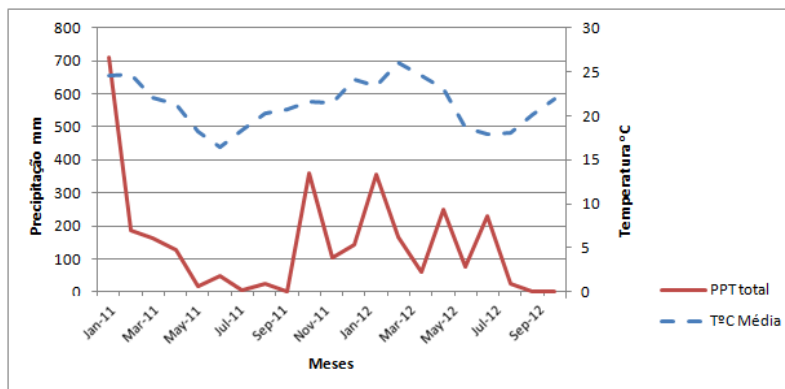
O município de Botucatu possui 15,4% do território ocupado por espécies de Cerrado (SMA, 2010) e pertence à bacia do Sorocaba/Médio Tietê, região Centro-Oeste do Estado de São Paulo. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo

Cwa, caracterizado como clima tropical de altitude com evidente sazonalidade; a temperatura média anual é de 20,6°C e precipitação média de 1388,1 mm (CEPAGRI, 2010).

3.2 Dados climáticos da região de estudo

A figura 2 apresenta a distribuição das chuvas na região de Botucatu/SP. Observa-se que no ano de 2011 houve um alto índice de chuva no mês de janeiro entrando em estiagem durante o inverno e com precipitação praticamente nula no mês de julho, mês em que foi realizada a primeira coleta de solo desse estudo. Verifica-se também que o verão de 2012, período de realização da segunda coleta, apresentou uma queda na média de precipitação quando comparado ao ano anterior. Contudo, não houve alterações no padrão de temperatura entre os anos atingindo 25°C no verão e 15°C no inverno.

Figura 2 - Dados climáticos dos anos de 2011 e 2012 da região de estudo



3.3 Metodologia de amostragem

A amostragem do solo foi realizada em malha amostral irregular georreferenciada, com distâncias entre pontos variando de 7 a 25 m. A definição desse arranjo buscou compatibilizar os objetivos do estudo com a viabilidade operacional da amostragem, em consonância com Trangmar et al. (1985), que destacam a importância de adequar o espaçamento amostral à variabilidade esperada e à escala

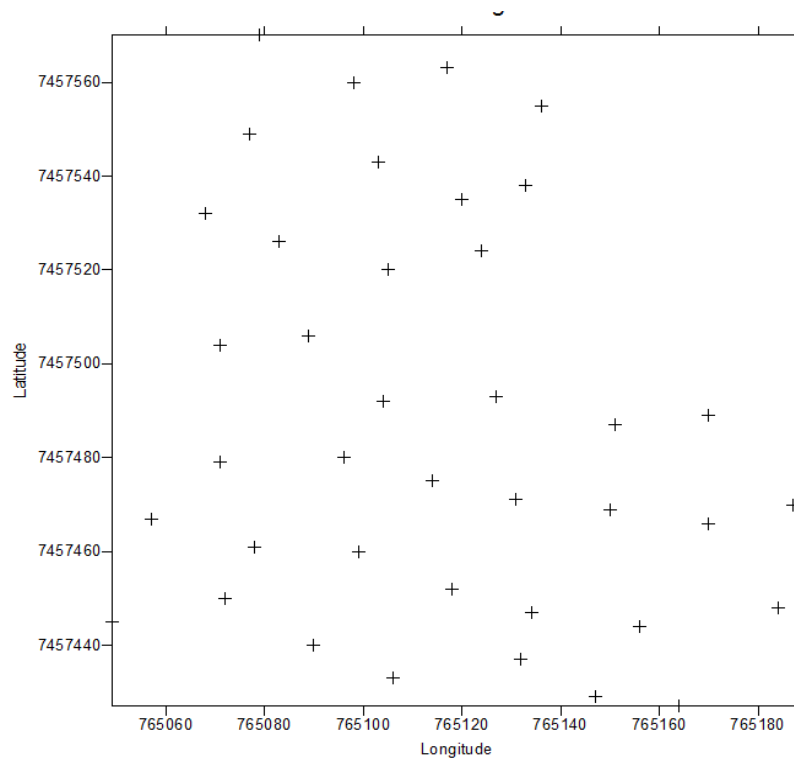
de interesse, com inclusão de pares de pontos em menores distâncias para melhor representação da dependência espacial.

Para o levantamento do estoque de carbono radicular, foram escavadas cinco trincheiras distribuídas aleatoriamente na área. O esquema de amostragem e a malha de pontos encontram-se ilustrados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Imagem aérea da área de estudo com os pontos amostrais



Figura 4 - Malha amostral dos pontos de amostragem



3.3.1 Coleta de solo

As coletas de solo foram realizadas no inverno (julho de 2011) e no verão (janeiro de 2012) em 40 pontos amostrais e nas seguintes profundidades: 0 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 80 e 80 – 100 cm, totalizando 400 amostras para solo e 400 para a densidade. Utilizou-se a sonda de densidade (figura 5 e 6) para a retirada de dois anéis de Kopecky por profundidade. Um dos anéis foi mantido com amostras de solo indeformadas para a determinação da densidade pelo método do anel volumétrico (figura 7), enquanto o outro foi destinado à coleta do material para análise química do carbono orgânico do solo (COS) conforme figura 8 (A e B).

Figura 5 - Sonda para Coleta de Solo para estimativa de densidade



Figura 6 - Sonda para Coleta de Solo para análise de carbono orgânico



Figura 7 - Anéis de Kopecky para coleta de amostras de solo



Figura 8 - Solo para análise química



3.3.1.1 Análise química do solo

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar, e em seguida, submetidas à análise do seu teor de carbono pelo método Walkley e Black adaptado (1934) no Laboratório de Análise Química para fins de Fertilidade do Solo pertencente ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais/ FCA/UNESP.

3.3.1.2 Análise da densidade do solo

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme Embrapa (1997), o qual se fundamenta no uso de um anel de bordas cortantes com capacidade interna conhecida. Determinou-se o volume do anel conforme a equação 1:

$$V_c = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h_c$$

em que:

V_c = volume do anel, dm^3

d = diâmetro do anel, dm

h_c = altura do anel, dm

Posteriormente, removeu-se o excesso de solo, até igualar as bordas do anel, sendo estas revestidas por uma proteção plástica resistente. O solo obtido dentro do

anel foi transferido para um recipiente e levado para secar em uma estufa a 105°C, por 24h, visando obter sua massa. Após esse período, determinou-se a D_s através da equação 2:

$$D_s = \frac{m}{V}$$

D_s = Densidade do solo, g cm⁻³

m = massa de solo seco;

V_c = volume do anel, cm⁻³

3.3.2 Coleta e processamento das raízes

As raízes foram coletadas por meio da abertura de cinco trincheiras com dimensões de 0,5 × 0,5 × 1,0 m, distribuídas aleatoriamente na área de estudo (Figura 9A e 9B). Previamente à escavação, a vegetação rasteira e a serapilheira superficial foram removidas, a fim de evitar a incorporação de material orgânico não radicular às amostras. O material subterrâneo foi coletado por camadas sucessivas de 20 cm, correspondentes às profundidades de 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 e 80–100 cm. Durante a remoção do solo, as raízes remanescentes aderidas às paredes e ao fundo da trincheira foram cuidadosamente retiradas, cortadas e incorporadas à respectiva amostra, com o objetivo de minimizar perdas de biomassa.

Figura 9A e 9B - Trincheiras para coleta de raízes



As raízes foram separadas em quatro classes de diâmetro, ≤ 2 mm, 2,1–5,0 mm, 5,1–10 mm e > 10 mm (figura 10), de acordo com a classificação proposta por Böhm (1979). Para fins deste estudo, a fração subterrânea grossa incluiu não apenas raízes de maior diâmetro, mas também outras estruturas subterrâneas lenhosas ou de reserva, como xilopódios, bulbos, rizomas, tubérculos caulinares e caules subterrâneos, quando presentes no volume amostrado.

A fração de maior diâmetro foi separada manualmente no campo, com auxílio de peneira de malha de 5,0 mm. Em laboratório, esse material foi novamente limpo para remoção do solo aderido. Para as frações mais finas, utilizou-se lavagem em suspensão solo-água e peneiramento sucessivo em malhas de 2,1 e 0,5 mm, de modo a recuperar o material radicular de menor diâmetro.

Após a triagem, o material correspondente a cada combinação trincheira $\times$ profundidade $\times$ classe de diâmetro foi pesado para obtenção da massa úmida, seco em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C até massa constante e novamente pesado para determinação da massa seca. Em seguida, subamostras representativas foram moídas e encaminhadas para análise do teor de carbono no tecido vegetal.

Figura 10 - Raízes segregadas por diâmetro



3.3.2.1 Determinação do teor de carbono radicular

As amostras das raízes foram encaminhadas ao Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da FCA/UNESP para determinação do teor de carbono orgânico no tecido

radicular, expresso em porcentagem da massa seca, por oxidação por via úmida com dicromato de potássio..

3.4 Análise dos Dados

3.4.1 Estatística descritiva e inferência para o carbono orgânico do solo

A estatística descritiva foi empregada com o objetivo de caracterizar o conjunto de observações, sintetizando tendências centrais, dispersão e forma de distribuição, além de subsidiar a identificação de possíveis inconsistências (Landim, 1998). A análise do carbono orgânico do solo (COS) foi iniciada por estatística descritiva para cada combinação profundidade × estação, incluindo média, desvio-padrão, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Essas medidas foram utilizadas para caracterizar a distribuição dos dados e subsidiar a interpretação dos padrões verticais e sazonais observados.

Considerando que o delineamento experimental envolveu medições repetidas nos mesmos pontos amostrais, avaliados em duas estações do ano e em cinco profundidades, a comparação dos teores de COS foi conduzida por análise de variância de medidas repetidas, com dois fatores intra-sujeito: Estação, com dois níveis, e Profundidade, com cinco níveis, incluindo-se o termo de interação entre ambos.

A esfericidade foi avaliada e, quando necessário, aplicou-se a correção de Greenhouse–Geisser, reportando-se os graus de liberdade ajustados. O tamanho de efeito foi expresso por η^2 quadrado generalizado (ges). As análises foram conduzidas no ambiente R, utilizando-se o pacote afex.

Para comparações direcionadas entre estações dentro de cada profundidade, utilizou-se o teste t pareado, preservando o pareamento por ponto amostral, com ajuste de Holm para controle do erro do tipo I associado a múltiplas comparações. Todos os testes foram bilaterais, adotando-se nível de significância de 5%.

As análises inferenciais do COS foram conduzidas no ambiente R, utilizando-se o pacote afex para a análise de variância de medidas repetidas.

3.4.2 Análise geoestatística

A dependência espacial do carbono orgânico do solo (COS) foi avaliada por meio da construção de variogramas experimentais, ajustados no software GS+ Gamma Design (Robertson, 2000). A análise foi realizada separadamente para cada profundidade e estação, de forma a respeitar a estrutura de variação previamente identificada pelas análises descritivas e inferenciais. Essa estratificação foi adotada para evitar a agregação de observações pertencentes a grupos com médias e estruturas de variabilidade distintas, condição que poderia comprometer a interpretação da continuidade espacial do atributo e o ajuste dos modelos variográficos.

Inicialmente, investigou-se a presença de anisotropia por meio de análise direcional dos variogramas. Na ausência de evidências de variação sistemática da estrutura espacial em função da direção, adotou-se a hipótese de isotropia, utilizando-se, portanto, variogramas omnidirecionais nas etapas subsequentes.

Com o objetivo de permitir a comparação entre profundidades e estações, os variogramas foram escalonados pela variância dos dados, conforme proposto por Vieira et al. (1983). O variograma escalonado foi estimado pela seguinte expressão:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Em que,

$\gamma^*(h)$ = semivariância escalonada para o vetor distância ;

$N(h)$ número de pares de observações separados pela distância ;

$z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ = valores observados da variável nas posições x_i e $x_i + h$;

s^2 = variância amostral do conjunto de dados.

O ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, considerando-se, de forma conjunta, a soma de quadrados dos resíduos (SQR ou RSS), o coeficiente de determinação (R^2) e o desempenho obtido na validação cruzada.

Foram priorizados os modelos com menor soma de quadrados dos resíduos, maior coeficiente de determinação e melhor ajuste entre valores observados e

estimados, uma vez que esses critérios permitem avaliar simultaneamente a aderência do modelo ao variograma experimental e sua capacidade preditiva. Conforme destacado por Robertson (2000), a soma de quadrados dos resíduos tende a ser um critério mais sensível para comparação entre modelos concorrentes, enquanto o coeficiente de determinação oferece medida complementar da proporção da variabilidade explicada pelo modelo ajustado.

A estrutura espacial do COS foi caracterizada pelos parâmetros clássicos do variograma: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (α). O efeito pepita representa a fração da variabilidade não explicada pela estrutura espacial detectada, podendo refletir variabilidade em microescala, erros analíticos ou limitações do espaçamento amostral. O patamar corresponde à variância total representada pelo modelo, enquanto o alcance expressa a distância máxima até a qual as observações permanecem espacialmente correlacionadas. Para distâncias superiores ao alcance, assume-se independência espacial entre as observações, o que caracteriza comportamento aleatório na escala considerada (Vieira, 2000).

A magnitude da dependência espacial foi avaliada a partir da razão entre a variância estrutural e a variância total, expressa por $C/(C_0+C)$, interpretada por meio do Índice de Dependência Espacial. Adotou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), segundo a qual a dependência espacial é considerada fraca quando $C/(C_0+C) \leq 0,25$, moderada quando $0,25 < C/(C_0+C) < 0,75$, e forte quando $C/(C_0+C) \geq 0,75$. Essa abordagem permite qualificar o grau de continuidade espacial do atributo e subsidiar a interpretação da robustez dos modelos ajustados.

Uma vez constatada a existência de dependência espacial, procedeu-se à interpolação dos valores de COS por meio de krigagem ordinária, visando estimar o atributo em locais não amostrados e representar sua distribuição contínua na área de estudo. A krigagem ordinária foi adotada por ser amplamente empregada em estudos de variabilidade espacial de atributos do solo e por possibilitar estimativas sem viés e com variância mínima, sob a hipótese de estacionariedade local da média (Vieira, 2000; Yost et al., 1982a,b). Segundo Zimback (2003), a krigagem constitui uma das principais ferramentas da geoestatística aplicada, justamente por permitir a estimativa de valores em posições não amostradas a partir da estrutura de dependência espacial observada entre os pontos conhecidos.

Os mapas de distribuição espacial do COS foram elaborados no software Surfer 8.0, a partir das superfícies interpoladas por krigagem ordinária. Esses produtos

cartográficos foram utilizados para representar a distribuição espacial do atributo em cada profundidade e estação, permitindo identificar padrões de continuidade, zonas de maior e menor acúmulo e possíveis contrastes espaciais entre os períodos avaliados.

3.4.3 Análise estatística do carbono radicular

A unidade amostral para o compartimento radicular foi a trincheira. Em cada uma das cinco trincheiras, as raízes foram avaliadas em cinco profundidades e separadas em quatro classes de diâmetro: <2 mm, 2,1-5,0 mm, 5,1-10 mm e >10 mm. Para cada combinação de trincheira, profundidade e classe de diâmetro, foram obtidas a massa seca das raízes, expressa em gramas, e o teor de carbono no tecido vegetal, expresso em porcentagem.

A biomassa seca radicular foi inicialmente convertida para unidade de área, considerando a área superficial da trincheira, de 0,25 m², correspondente a 0,5 × 0,5 m. Em seguida, o estoque de carbono radicular foi calculado pela multiplicação da biomassa seca, expressa em Mg de matéria seca ha⁻¹, pela fração de carbono determinada no tecido vegetal. Dessa forma, a variável resposta utilizada nas análises estatísticas foi o estoque de carbono radicular, expresso em Mg C ha⁻¹.

As linhas em que a massa seca foi igual a zero foram mantidas na base de dados como ausência de material radicular naquela combinação de trincheira, profundidade e classe de diâmetro. Nesses casos, o carbono radicular foi considerado igual a zero.

Para cada trincheira e profundidade, o carbono radicular total por camada foi obtido pela soma dos valores das quatro classes de diâmetro. Para caracterizar a composição relativa do carbono entre classes de diâmetro dentro de cada profundidade, calculou-se a participação percentual de cada classe em relação ao carbono radicular total da respectiva camada.

Foram calculadas estatísticas descritivas em duas escalas de análise: carbono radicular total por profundidade, obtido pela soma das classes de diâmetro dentro de cada trincheira; e carbono radicular por classe de diâmetro em cada profundidade. Para essas variáveis, foram estimadas média, desvio-padrão, erro-padrão, mínimo e máximo.

Considerando que as observações ao longo do perfil pertencem à mesma trincheira, as inferências para o compartimento radicular foram conduzidas por

modelos lineares mistos, considerando-se a trincheira como intercepto aleatório. Quando constatados efeitos fixos significativos, as comparações múltiplas foram realizadas pelo teste de Tukey, com base nas médias marginais estimadas..

Foram ajustados dois modelos principais: o primeiro para avaliar o efeito da profundidade sobre o carbono radicular total por camada; e o segundo para avaliar os efeitos da profundidade, da classe de diâmetro e da interação profundidade × classe de diâmetro sobre o carbono radicular por classe.

A significância dos efeitos fixos foi avaliada ao nível de 5% de probabilidade. Quando identificados efeitos significativos, foram realizadas comparações múltiplas pelo teste de Tukey, a partir das médias marginais estimadas. As proporções de carbono por classe de diâmetro foram tratadas como análise descritiva complementar, com apresentação gráfica da composição percentual ao longo do perfil.

3.4.4 Cálculo do estoque de carbono abaixo da superfície do solo

Os estoques de carbono abaixo da superfície do solo foram estimados separadamente para os compartimentos solo e raízes. Para o compartimento solo, os estoques foram calculados por profundidade e estação, considerando o teor de carbono orgânico do solo, expresso em g dm^{-3} , e a espessura da camada amostrada. Para o compartimento radicular, os estoques foram calculados a partir da biomassa seca das raízes, convertida para unidade de área, e da fração de carbono determinada no tecido vegetal. Posteriormente, os estoques dos dois compartimentos foram somados para estimar o carbono total abaixo do solo no intervalo de 0 a 100 cm.

O estoque de carbono orgânico do solo foi estimado para cada profundidade e estação do ano a partir dos valores médios de carbono orgânico obtidos pelo método Walkley-Black adaptado. Como os resultados de carbono orgânico foram expressos em g dm^{-3} , isto é, em unidade de massa de carbono por volume de solo, os valores foram convertidos diretamente para Mg C ha^{-1} considerando a espessura da camada amostrada. A densidade do solo foi determinada como atributo físico complementar para caracterização do perfil e interpretação das condições edáficas da área, não sendo utilizada diretamente na equação de estoque adotada para o carbono orgânico do solo. O estoque de carbono orgânico do solo foi estimado conforme a equação:

$$\text{EstCsolo} = C \times e \times 0,1$$

em que:

EstCsolo = estoque de carbono orgânico do solo, em Mg C ha⁻¹;

C = teor de carbono em g dm⁻³;

e = corresponde à espessura da camada amostrada, em cm; e

0,1 = fator de conversão para Mg C ha⁻¹.

O estoque de carbono radicular foi estimado a partir da biomassa seca das raízes coletadas nas trincheiras. Para cada combinação de trincheira, profundidade e classe de diâmetro, a biomassa seca foi inicialmente convertida para unidade de área, expressa em Mg de matéria seca ha⁻¹. Em seguida, o estoque de carbono radicular foi obtido pela multiplicação da biomassa seca pela fração de carbono determinada no tecido vegetal, conforme a expressão adaptada de Rognitz et al. (2009):

$$\text{EstCraiz} = B \times CF$$

em que:

EstCraiz = estoque de carbono radicular, em Mg C ha⁻¹;

B = biomassa seca radicular, em Mg de matéria seca ha⁻¹; e

CF = corresponde à fração de carbono no tecido radicular.

A fração de carbono (CF) foi obtida a partir da determinação do teor de carbono em 52 subamostras de tecido radicular, com teor médio de 51,7% ($\pm 1,5\%$; amplitude de 47,2 a 53,9%). A conversão da biomassa seca coletada em cada camada da trincheira para Mg ha⁻¹ foi realizada considerando a área superficial da trincheira, de 0,25 m². Quando a massa seca foi expressa em gramas, a biomassa seca por hectare foi calculada por:

$$B = (MS / 1000) / A \times 10$$

em que:

B = biomassa seca radicular, em Mg ha⁻¹;

MS = massa seca das raízes coletadas na camada da trincheira, em g;

A = área superficial da trincheira, em m²; e

10 = corresponde ao fator de conversão de kg m⁻² para Mg ha⁻¹.

Como a área da trincheira foi de 0,25 m², a biomassa seca de cada amostra foi extrapolada para hectare pela relação entre a massa seca amostrada e a área da trincheira. O estoque de carbono radicular por profundidade foi obtido pela soma dos valores das classes de diâmetro dentro de cada trincheira e camada.

O estoque total de carbono radicular até 100 cm foi obtido pela soma dos estoques estimados nas cinco profundidades avaliadas.

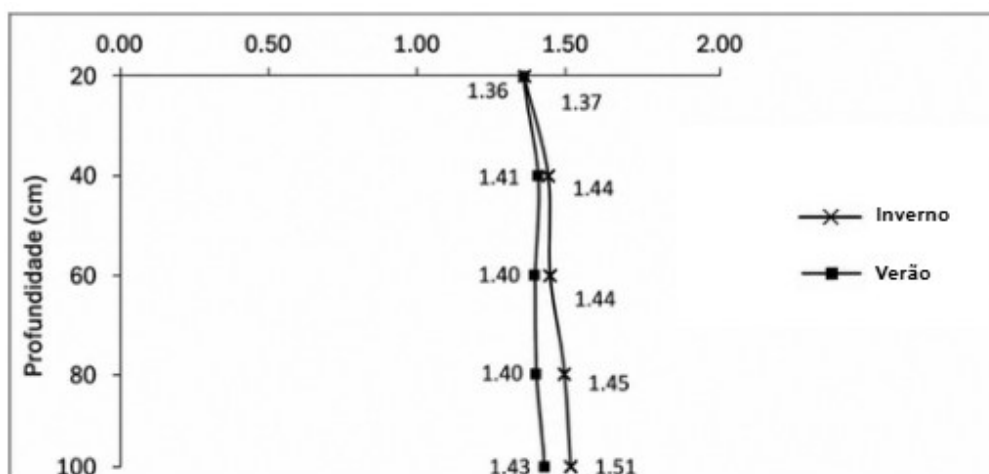
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo

A densidade apresentou maiores valores no inverno (período de seca; julho 2011), com mínimo de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ na camada superficial e máximo de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ na profundidade de 80 a 100 cm, enquanto, no verão (período de maiores precipitações, fevereiro 2012), o valor mínimo foi de $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 0-20 e máximo de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 80 a 100 cm. Rufino (2010), estudando a densidade do solo em áreas de Cerrado “stricto sensu” no Estado de São Paulo, encontrou um padrão semelhante de comportamento da densidade em relação à sazonalidade, com menores valores no período chuvoso, para todas as profundidades, e ligeiro aumento nas camadas mais profundas.

Na Figura 11, estão apresentadas as médias de densidade por profundidade e sazonalidade.

Figura 11 - Variação na densidade do Solo em relação à sazonalidade



Observou-se um aumento na densidade conforme aumenta a profundidade em ambos os períodos sazonais. Como aponta Fonseca et al. (1993), a densidade geralmente aumenta com a profundidade pois as pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as adjacentes favorecem a compactação natural.

O aumento da densidade com a profundidade e os maiores valores no inverno indicam que tanto a posição no perfil quanto a sazonalidade influenciam esse atributo,

o que é coerente com a dinâmica de compactação natural e com variações na umidade do solo.

4.2 Carbono orgânico do solo

Os resultados evidenciam dois padrões centrais na distribuição do carbono orgânico do solo (COS, g dm⁻³), mensurado em 40 pontos amostrais distintos, avaliado em cinco profundidades, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, e em duas estações, inverno e verão. O primeiro padrão corresponde a um gradiente vertical, caracterizado pela redução do teor médio de carbono com o aumento da profundidade em ambas as estações. O segundo corresponde a um efeito sazonal consistente, com teores médios menores no verão em comparação ao inverno em todas as camadas avaliadas. Esses padrões são corroborados pela estatística descritiva e pelas análises inferenciais que respeitam a estrutura de medidas repetidas do desenho amostral.

Os parâmetros da estatística descritiva com 100% dos dados de cada coleta e profundidade são apresentados na tabela 1 para o inverno e na tabela 2 para o verão.

Tabela 1 - Estatística descritiva com 100% dos dados de COS no inverno

Prof.	N	Média (g dm ⁻³)	Desvio Padrão	Variância	CV	Var.	Assimetria	Curtose (fisher)
0-20 cm	40	18.26	5.81	33.72	31.79	Moderada	2.16	5,73
20-40 cm	40	14.88	3.25	10.53	21.81	Moderada	0.38	-0,80
40-60 cm	40	13.00	2.92	8.51	22.45	Moderada	0.69	0,01
60-80 cm	40	11.28	2.15	4.63	19.08	Moderada	0.18	-0,78
80-100 cm	40	10.08	2.45	6.01	24.33	Moderada	0.71	0,57

Nota: Prof. – Profundidade. DP- Desvio Padrão. CV. Coeficiente de Variação. Var. – variabilidade dos atributos de solo; segundo Wilding et al. (1983), é dada por: CV < 15% (baixa), CV 15-35% (moderada) e CV > 35% (alta);

Tabela 2 - Estatística descritiva com 100% dos dados de COS no verão

Prof.	N	Média (g dm ⁻³)	Desvio Padrão	Variância	CV	Var.	Assimetria	Curtose (fisher)
0-20 cm	40	15.67	4.45	19.82	28.41	Moderada	0.70	-0,20
20-40 cm	40	12.89	2.38	5.65	18.44	Moderada	0.24	-0,42
40-60 cm	40	10.62	1.51	2.29	14.24	Baixa	0.08	0,15
60-80 cm	40	9.60	1.65	2.73	17.21	Moderada	2.01	6,64
80-100 cm	40	8.55	1.52	2.32	17.82	Moderada	1.01	1,34

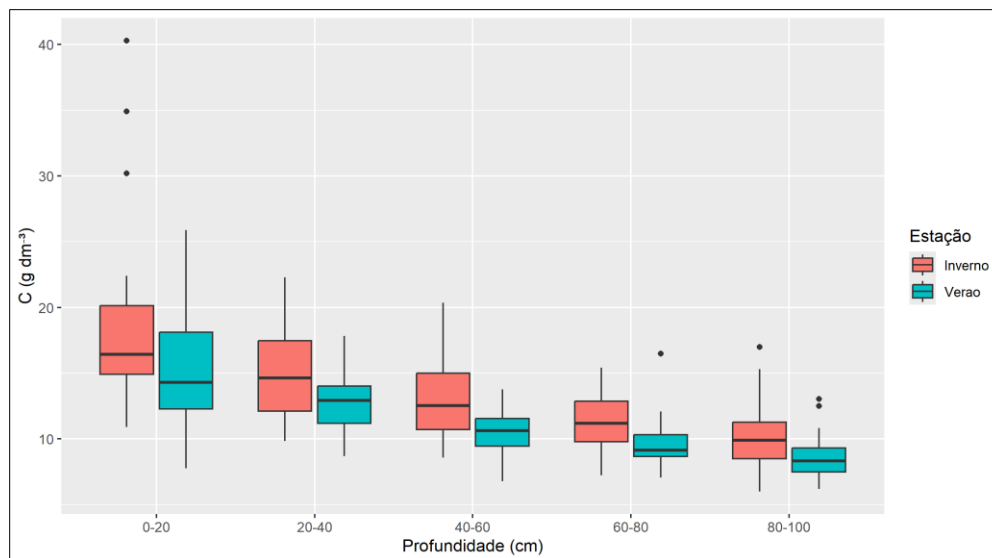
Nota: Prof. – Profundidade. DP- Desvio Padrão. CV. Coeficiente de Variação. Var. – variabilidade dos atributos de solo; segundo Wilding et al. (1983), é dada por: CV < 15% (baixa), CV 15-35% (moderada) e CV > 35% (alta).

A estatística descritiva mostra um decréscimo progressivo das médias ao longo do perfil. No inverno, a média diminuiu de 18,2648 g dm⁻³, na camada de 0-20 cm, para 10,0759 g dm⁻³, na profundidade de 80-100 cm. No verão, o mesmo comportamento foi observado, com redução de 15,6729 g dm⁻³ para 8,5463 g dm⁻³ entre essas mesmas camadas. A média geral do conjunto foi de 12,48348 g dm⁻³, funcionando como referência sintética do nível médio de carbono observado, embora não represente a forte estratificação vertical presente nos dados.

Em termos de dispersão, as camadas superficiais tenderam a apresentar maior amplitude e maior variabilidade em relação às camadas mais profundas, padrão compatível com maior heterogeneidade espacial nos estratos rasos do solo. Os coeficientes de variação foram predominantemente moderados, com um caso de baixa variabilidade no verão, na camada de 40-60 cm. Esse comportamento sugere que, embora o gradiente vertical seja nítido, ele é acompanhado por maior heterogeneidade nas camadas superficiais e por maior homogeneidade relativa em subsuperfície.

A distribuição dos dados por profundidade e estação pode ser visualizada pelos boxplots apresentados na figura 12, os quais evidenciam a redução dos valores centrais ao longo do perfil e o deslocamento geral das distribuições do verão para níveis inferiores aos observados no inverno.

Figura 12 – Boxplots da distribuição dos teores de COS por profundidade e estação



Do ponto de vista inferencial, os padrões observados foram confirmados pela ANOVA de medidas repetidas (tabela 3), ajustada com correção de Greenhouse-Geisser quando aplicável. Observou-se efeito altamente significativo de Profundidade, com $F(1,693; 66,040) = 99,6817$, $p = 3,53 \times 10^{-19}$ e $ges = 0,4395$, indicando que parcela expressiva da variação do COS está associada às diferenças entre profundidades. Também foi observado efeito significativo de Estação, com $F(1,39) = 31,7929$, $p = 1,65 \times 10^{-6}$ e $ges = 0,0993$, evidenciando diferença sistemática entre inverno e verão no conjunto das observações.

Por outro lado, a interação Estação $\times$ Profundidade não foi significativa, com $F(2,153; 83,984) = 0,7481$, $p = 0,4855$ e $ges = 0,0043$, indicando que a diferença sazonal entre as estações se manteve relativamente uniforme ao longo do perfil, sem evidência de modificação relevante da magnitude do efeito sazonal entre as profundidades avaliadas.

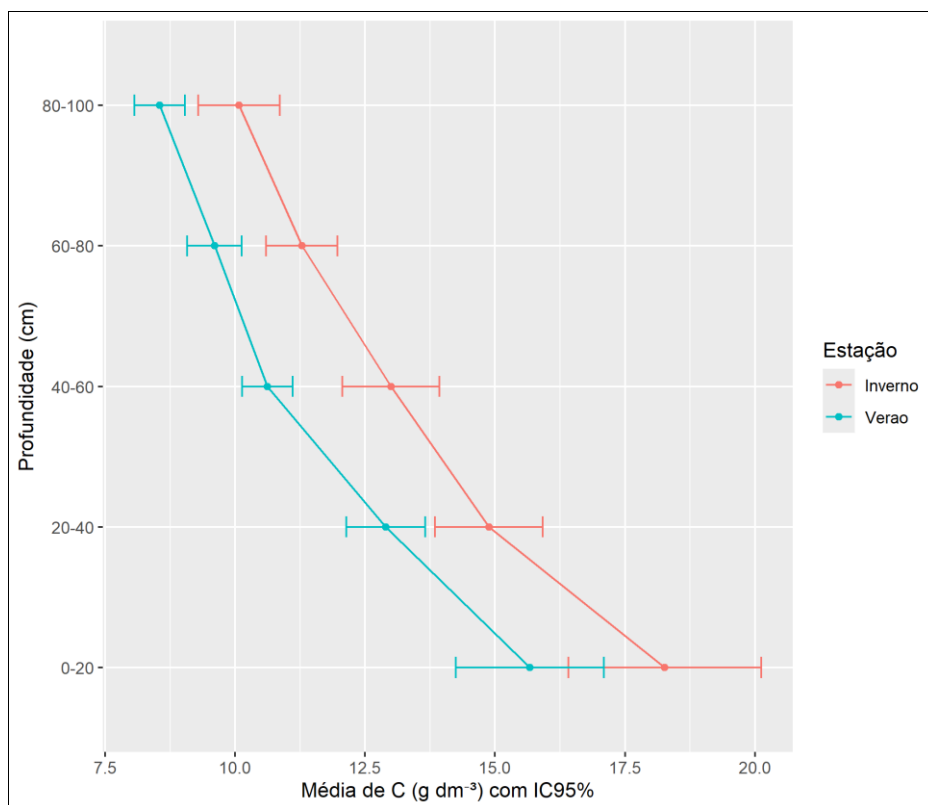
Tabela 3 - Resultados da ANOVA de medidas repetidas para os efeitos de Estação, Profundidade e da interação Estação × Profundidade sobre os teores de COS

Efeito	F	Num DF	Den DF	p	ges
Estação	31,79	1,00	39,00	< 0,001	0,10
Profundidade	99,68	1,69	66,04	< 0,001	0,44
Estação:Profundidade	0,75	2,15	83,98	0,49	0,004

Nota: F = estatística F; Num DF = graus de liberdade do numerador; Den DF = graus de liberdade do denominador; p = valor de probabilidade; ges = eta quadrado generalizado. Graus de liberdade ajustados por Greenhouse–Geisser quando aplicável.

Como síntese visual desse comportamento, o perfil médio com intervalos de confiança de 95% permite observar simultaneamente o gradiente vertical do COS e o deslocamento sazonal das médias, com valores mais elevados no inverno e redução progressiva com o aumento da profundidade em ambas as estações (figura 13).

Figura 13 - Perfil médio dos teores de carbono orgânico do solo (COS) por profundidade e estação, a IC95%



Para detalhar a diferença sazonal dentro de cada camada, foram realizadas comparações pareadas entre inverno e verão por profundidade, utilizando o teste *t* pareado com ajuste de Holm para múltiplas comparações (tabela 4). Esse procedimento é coerente com a estrutura amostral, pois preserva o pareamento por ponto amostral e permite avaliar a diferença sazonal em cada camada do perfil.

As comparações mostraram diferenças médias negativas em todas as profundidades, indicando valores menores no verão em relação ao inverno ao longo de todo o perfil. As diferenças médias foram de $-2,592 \text{ g dm}^{-3}$ em 0-20 cm, $-1,987 \text{ g dm}^{-3}$ em 20-40 cm, $-2,378 \text{ g dm}^{-3}$ em 40-60 cm, $-1,681 \text{ g dm}^{-3}$ em 60-80 cm e $-1,530 \text{ g dm}^{-3}$ em 80-100 cm. Após correção de Holm, todas as comparações permaneceram significativas, com $p_{\text{holm}} < 0,01$ em todas as profundidades.

Os tamanhos de efeito estimados por Cohen's *dz* variaram de moderados a moderadamente altos, com maior magnitude nas camadas de 40-60 cm ($dz = -0,750$) e 60-80 cm ($dz = -0,662$). Esses resultados indicam que o efeito sazonal não apenas foi estatisticamente sustentado em todas as camadas, como também apresentou magnitude prática relevante ao longo do perfil.

Tabela 4 - Comparações pareadas entre inverno e verão por profundidade

Profundidade	n	Diferença média	DP das diferenças	t	p	Cohen_dz	p-holm
0-20	40	-2.59	5.67	-2.89	0.01	-0.46	0.01
20-40	40	-1.99	3.68	-3.41	< 0,001	-0.54	< 0,001
40-60	40	-2.38	3.17	-4.75	< 0,001	-0.75	< 0,001
60-80	40	-1.68	2.54	-4.19	< 0,001	-0.66	< 0,001
80-100	40	-1.53	2.67	-3.62	< 0,001	-0.57	< 0,001

Nota: Teste *t* pareado entre inverno e verão em cada profundidade, considerando os mesmos pontos amostrais em ambas as estações. A diferença média foi calculada como verão – inverno; portanto, valores negativos indicam menores teores médios de COS no verão. Dp_diff representa o desvio-padrão das diferenças pareadas; P_holm corresponde ao valor de *p* ajustado pelo método de Holm; e Cohen's *dz* expressa a magnitude do efeito para dados pareados.

Em conjunto, os resultados indicam que a variação do COS no perfil foi controlada principalmente pela profundidade, com redução progressiva dos teores ao longo do solo, enquanto a sazonalidade atuou como fator adicional, promovendo menores valores no verão em todas as camadas avaliadas. A ausência de interação

significativa entre Estação e Profundidade indica que esse efeito sazonal não alterou a forma do gradiente vertical, mas operou de maneira relativamente uniforme ao longo do perfil. Esse padrão sugere que os processos associados à estratificação vertical do carbono permaneceram dominantes nas duas estações, ao passo que a diferença sazonal se expressou como um deslocamento geral dos teores médios, e não como uma reorganização da distribuição vertical do COS.

Esse comportamento é compatível com a literatura que descreve a redução do carbono orgânico com o aumento da profundidade, em razão da maior concentração de resíduos vegetais, serapilheira, raízes finas e atividade biológica nas camadas superficiais. Fonseca et al. (1993) destacam que o carbono orgânico do solo varia conforme a cobertura vegetal e tende a decrescer ao longo do perfil, o que corrobora os resultados observados neste estudo. No Cerrado, esse padrão pode ser ainda reforçado pela dinâmica da serapilheira e pelas características da vegetação, incluindo maior teor de lignina e celulose e decomposição relativamente mais lenta em comparação com outras formações florestais.

A redução dos teores de COS no período chuvoso, observada em todas as profundidades, pode estar associada à intensificação da atividade microbiana e dos processos de mineralização da matéria orgânica sob maior disponibilidade hídrica. Esse mecanismo é compatível com a maior decomposição dos resíduos orgânicos e com o aumento da liberação de CO_2 para a atmosfera. Por outro lado, os maiores teores observados no período seco podem refletir o acúmulo e a incorporação progressiva de fitomassa e resíduos radiculares ao solo, especialmente após o período de maior produção vegetal. Essa interpretação é coerente com estudos que associam a dinâmica de acúmulo de serapilheira à sazonalidade climática em áreas de Cerrado, como observado por Campos et al. (2008), que relacionaram a dinâmica deposicional da serapilheira à alternância entre estação seca e chuvosa e de Rufino (2010), que identificou maiores teores de carbono no inverno em área de Cerrado.

O padrão identificado neste estudo, caracterizado por maiores teores nas camadas superficiais e no período seco, é coerente com a dinâmica esperada para sistemas savânicos, nos quais a distribuição vertical do carbono e sua variação sazonal refletem a interação entre aporte de biomassa, decomposição, atividade biológica e condições ambientais ao longo do ano.

4.3 Distribuição espacial do carbono orgânico do solo (COS)

Com base nos resultados da estatística clássica apresentados anteriormente, a análise geoestatística do COS foi conduzida de forma estratificada por profundidade e por estação, de modo a respeitar a estrutura de variação identificada no conjunto de dados. Essa opção metodológica se justifica pela ocorrência de diferenças sistemáticas entre profundidades e entre estações, bem como pela variação na dispersão, assimetria e curtose entre as combinações avaliadas, atributos que podem influenciar diretamente o ajuste dos variogramas e a qualidade das estimativas obtidas por krigagem.

Em particular, a maior variabilidade observada nas camadas superficiais e os desvios em relação à normalidade em algumas profundidades indicam maior heterogeneidade espacial e maior potencial de aumento do efeito pepita, razão pela qual a modelagem espacial foi realizada separadamente para cada profundidade e estação.

Após a etapa de caracterização estatística, os conjuntos de dados de COS por profundidade e estação foram submetidos à análise variográfica com o objetivo de avaliar a presença de dependência espacial. A inspeção de variogramas direcionais não indicou diferenças sistemáticas entre direções, razão pela qual foi adotada modelagem isotrópica nas etapas subsequentes.

Os modelos teóricos ajustados foram predominantemente esféricos, com ocorrência pontual de modelo exponencial, e os parâmetros variográficos indicaram dependência espacial detectável para a maior parte das camadas avaliadas. As tabelas 5 e 6 apresentam os parâmetros geoestatísticos do carbono orgânico do solo para o inverno e verão, respectivamente.

Tabela 5 - Parâmetros geoestatísticos do COS no inverno

Prof. (cm)	Modelo	Resíduo	R ²	(C/[Co+C])	(Co+C)	(Co)	Alcance (m)	Coef. Reg	IDE*
0-20	Esférico	6,78	0,802	0,703	11,43	3,39	106,3	0,802	Moderada
20-40	Efeito Pepita Puro	-	-	-	-	-	-	-	Sem Ajuste
40-60	Esférico	0,578	0,961	0,527	9,37	4,43	144,5	0,954	Moderada
60-80	Exponencial	0,229	0,83	0,997	3,33	0,01	35,7	0,901	Forte
80-100	Esférico	0,698	0,963	0,99	5,82	0,06	73,8	0,829	Forte

Nota: $C/(C_0+C)$ = proporção estruturada da variância; C_0+C = patamar; C_0 = efeito pepita; IDE = Índice de Dependência Espacial. A dependência espacial foi classificada como fraca quando $C/(C_0+C) \leq 0,25$, moderada quando $0,25 < C/(C_0+C) < 0,75$, e forte quando $C/(C_0+C) \geq 0,75$. Coef, Reg = Coeficiente de Regressão. Nos casos de efeito pepita não houve ajuste de modelo variográfico estruturado.

Tabela 6 - Parâmetros geoestatísticos do COS no verão

Prof. (cm)	Modelo	Resíduo	R ²	(C/[Co+C])	(Co+C)	(Co)	Alcance (m)	Coef. Reg	IDE*
0-20	Esférico	13,3	0,959	0,847	23,98	3,67	99,2	0,846	Forte
20-40	Efeito Pepita Puro	-	-	-	-	-	-	-	Sem ajuste
40-60	Esférico	0,028	0,933	0,517	1,12	1,02	82,9	0,933	Moderada
60-80	Esférico	0,116	0,919	0,702	2,10	0,62	62,2	0,724	Moderada
80-100	Esférico	0,132	0,866	0,753	1,86	0,46	62,1	0,724	Forte

Nota: $C/(C_0+C)$ = proporção estruturada da variância; C_0+C = patamar; C_0 = efeito pepita; IDE = Índice de Dependência Espacial. A dependência espacial foi classificada como fraca quando $C/(C_0+C) \leq 0,25$, moderada quando $0,25 < C/(C_0+C) < 0,75$, e forte quando $C/(C_0+C) \geq 0,75$. Coef, Reg = Coeficiente de Regressão. Nos casos de efeito pepita não houve ajuste de modelo variográfico estruturado.

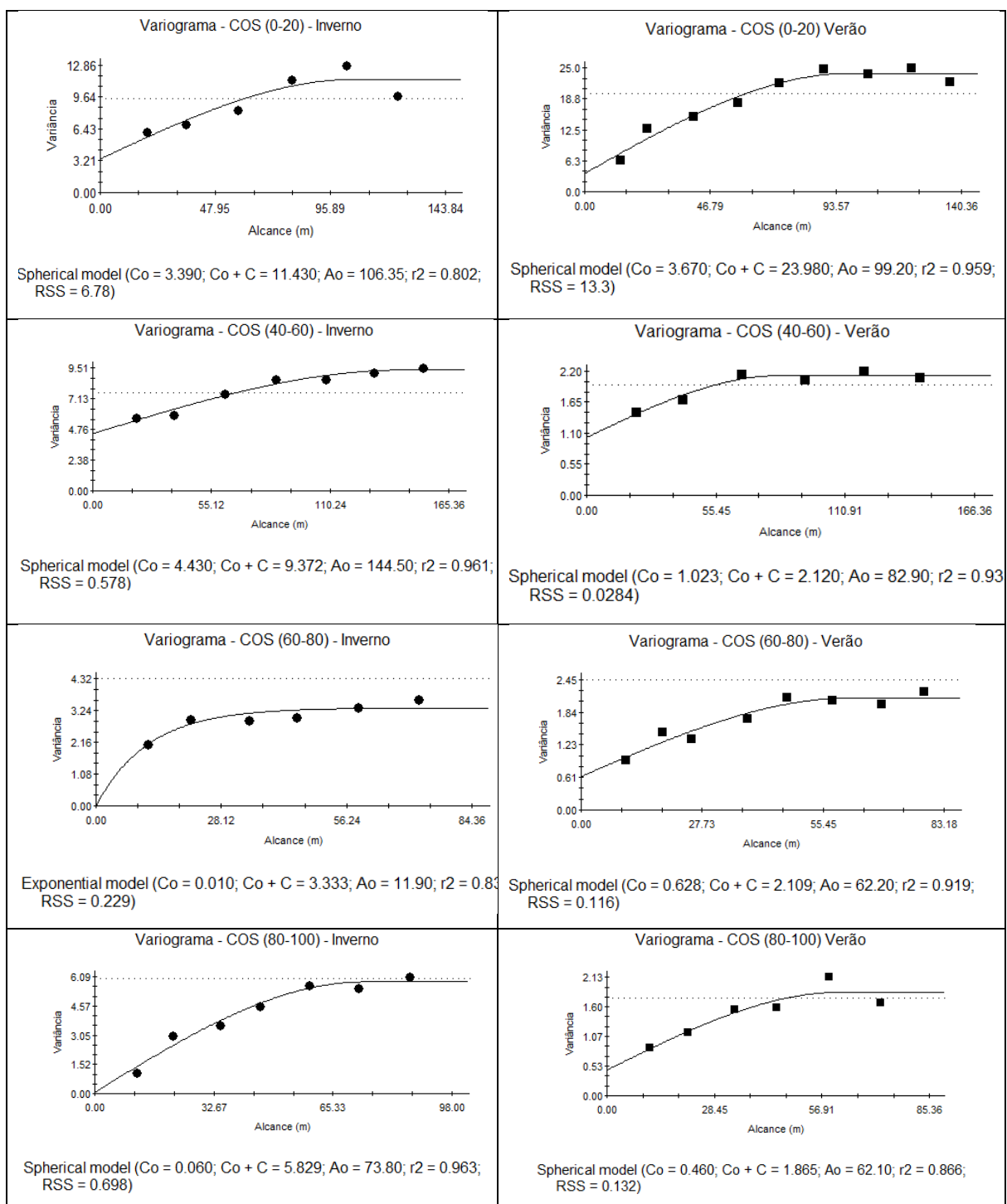
Os alcances variaram aproximadamente entre 35,7 e 144,5 m no inverno e entre 62,1 e 99,2 m no verão. No inverno, o Índice de Dependência Espacial indicou dependência moderada nas camadas de 0-20 e 40-60 cm, dependência forte nas camadas de 60-80 e 80-100 cm, e efeito pepita puro na camada de 20-40 cm. No verão, a dependência espacial foi forte nas camadas de 0-20 e 80-100 cm, moderada nas camadas de 40-60 e 60-80 cm, e houve efeito pepita puro na camada de 20-40 cm.

Em profundidades intermediárias, especialmente na camada de 40–60 cm, observou-se maior variação do alcance entre estações, com 144,5 m no inverno e 82,9 m no verão, o que pode refletir alterações no contraste espacial sob diferentes

condições hídricas e biológicas. Além disso, os valores relativamente elevados de efeito pepita em algumas camadas sugerem a presença de variabilidade em microescala não capturada pelo espaçamento amostral, comportamento esperado em ambientes naturais heterogêneos como o Cerrado.

Os variogramas gerados podem ser vistos na figura 14, a seguir.

Figura 14 - Variogramas com os modelos ajustados obtidos para COS nas profundidades e períodos estudados



Na camada de 20–40 cm foi observado efeito pepita puro em ambas as estações, inviabilizando o ajuste de um modelo variográfico estruturado. Esse resultado indica ausência de estrutura espacial detectável na escala adotada, sem implicar ausência de variabilidade do COS. Uma interpretação plausível é que a estrutura espacial nessa profundidade ocorra em escalas menores que o menor espaçamento entre pontos e, portanto, não tenha sido capturada pela malha amostral. Também é possível que parte expressiva da variabilidade esteja associada a componentes não estruturados, como heterogeneidade local e variabilidade integrada dentro do próprio intervalo de profundidade.

Em estudos futuros, o adensamento amostral e a adoção de intervalos verticais menores podem ampliar a capacidade de detecção de continuidade espacial nessa camada.

Com base nos modelos variográficos ajustados, procedeu-se à interpolação espacial por krigagem ordinária para as camadas em que houve dependência espacial detectável. Essa etapa permitiu estimar a distribuição contínua do COS ao longo da área de estudo, respeitando os parâmetros de dependência espacial previamente identificados. Como a camada de 20–40 cm apresentou efeito pepita puro em ambas as estações, não foi possível gerar mapas krigados para essa profundidade.

Os mapas de krigagem (figuras 15 a 20) evidenciaram padrões espaciais consistentes entre as estações, com áreas de maior acúmulo de carbono concentradas principalmente nas porções nordeste e sudeste da área de estudo. Esses padrões podem estar associados a controles locais, como variações de vegetação, deposição de serapilheira, micro relevo e distribuição radicular. Embora os valores médios de COS variem entre as estações, a organização espacial relativa tende a se manter, sugerindo estabilidade dos controles espaciais dominantes. Esse resultado reforça a importância da abordagem geoestatística para a caracterização do COS, uma vez que médias globais não capturam adequadamente a heterogeneidade intra-área nem a continuidade espacial do atributo.

Figura 15. Distribuição espacial do COS na profundidade de 0 - 20 cm, inverno

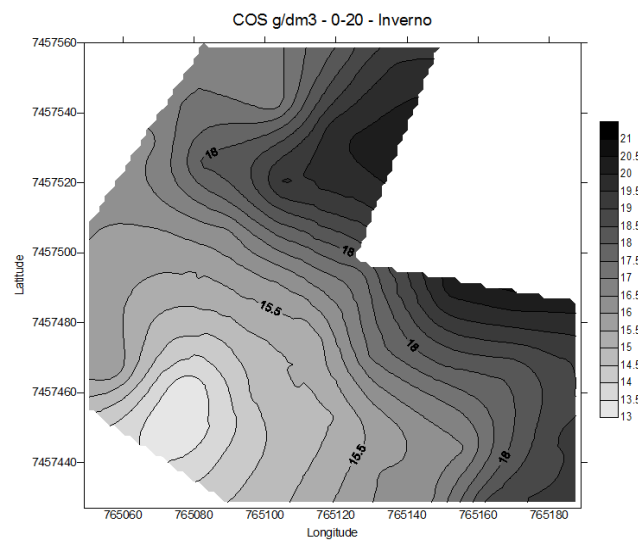


Figura 16. Distribuição espacial do COS na profundidade de 0 - 20 cm, verão

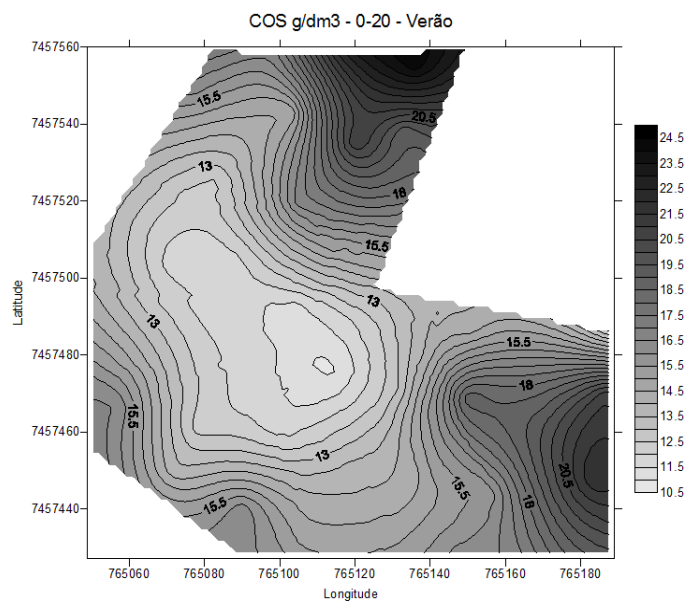


Figura 17 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 40 - 60 cm, inverno

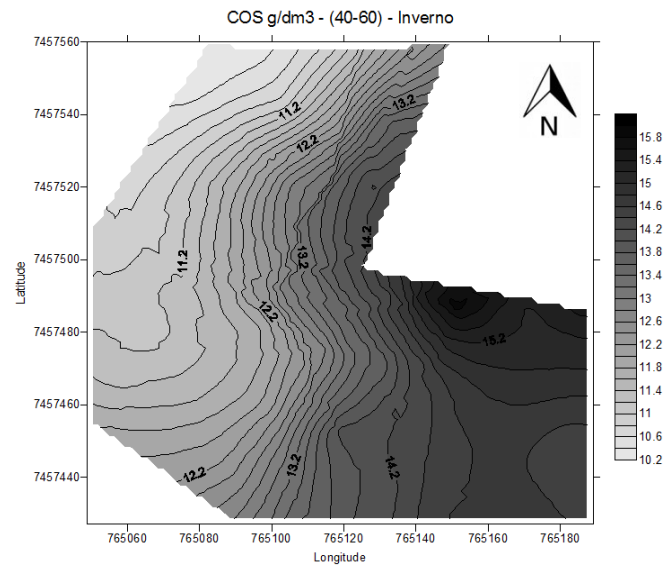


Figura 18 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 40 - 60 cm, verão

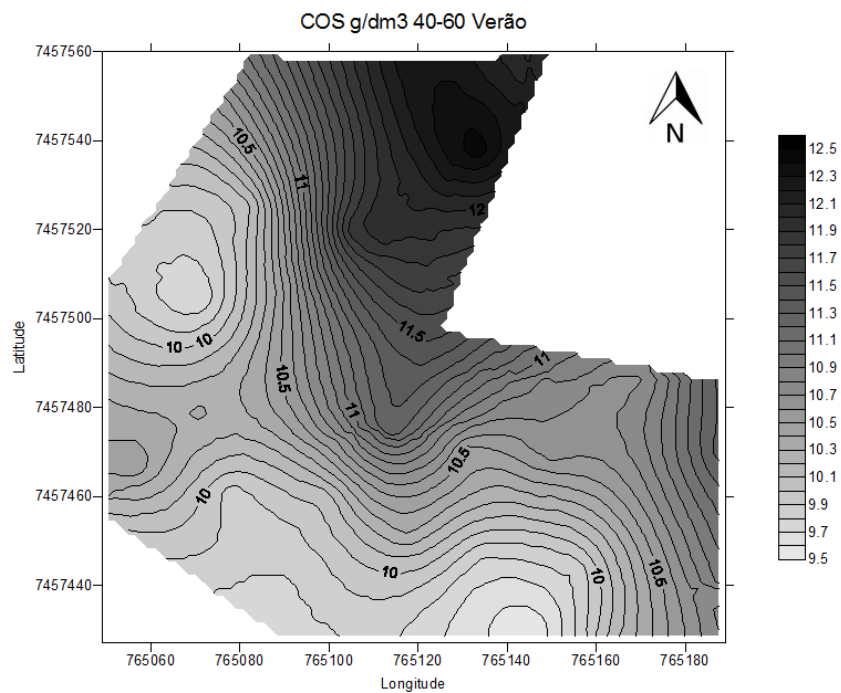


Figura 19 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 60 - 80 cm, inverno

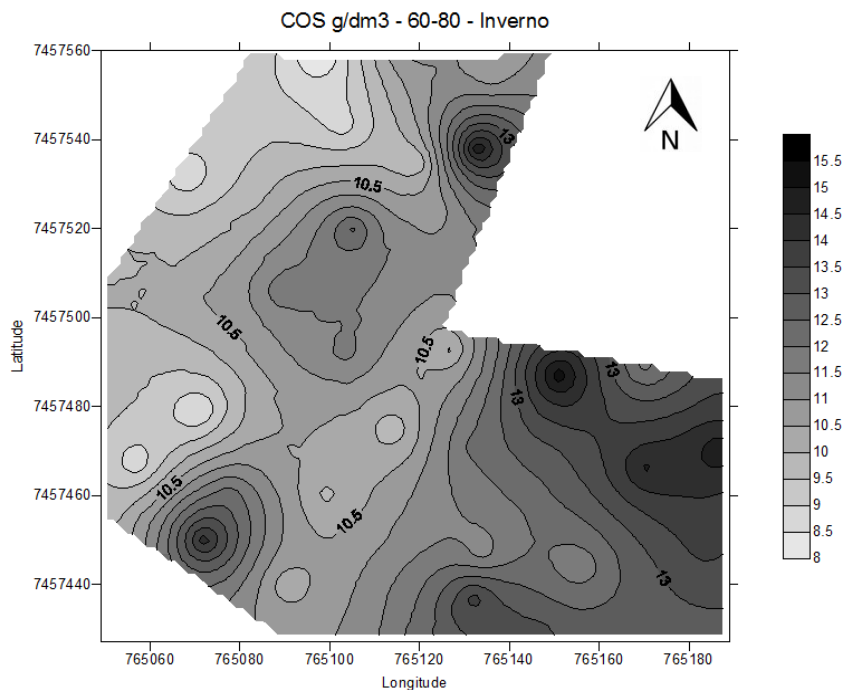


Figura 20 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 60 - 80 cm, verão

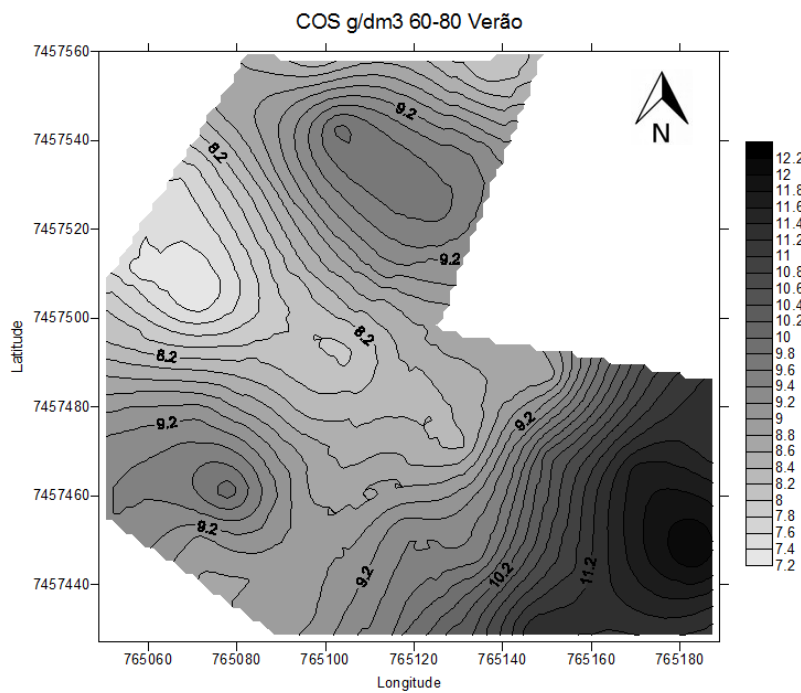


Figura 21 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 80 - 100 cm, inverno

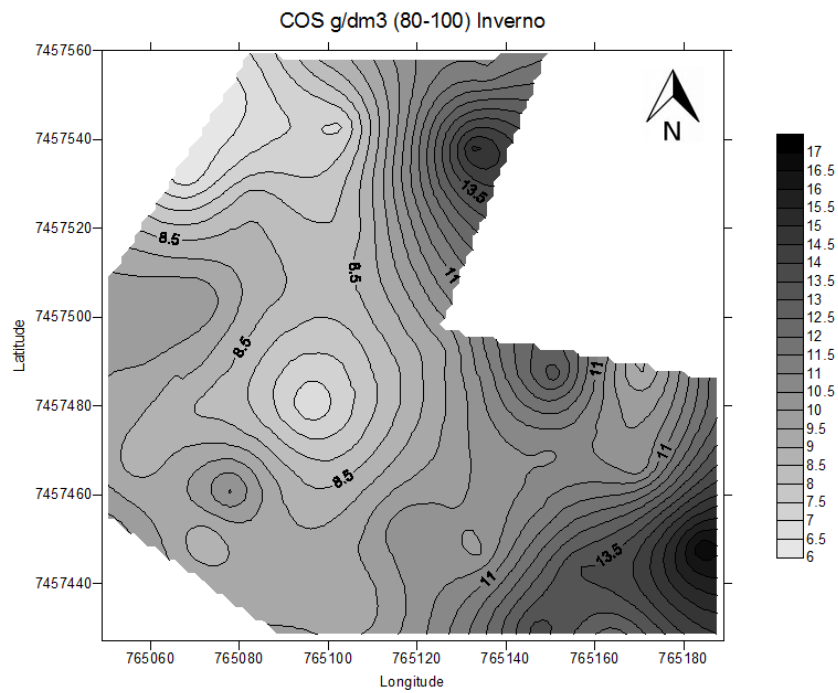
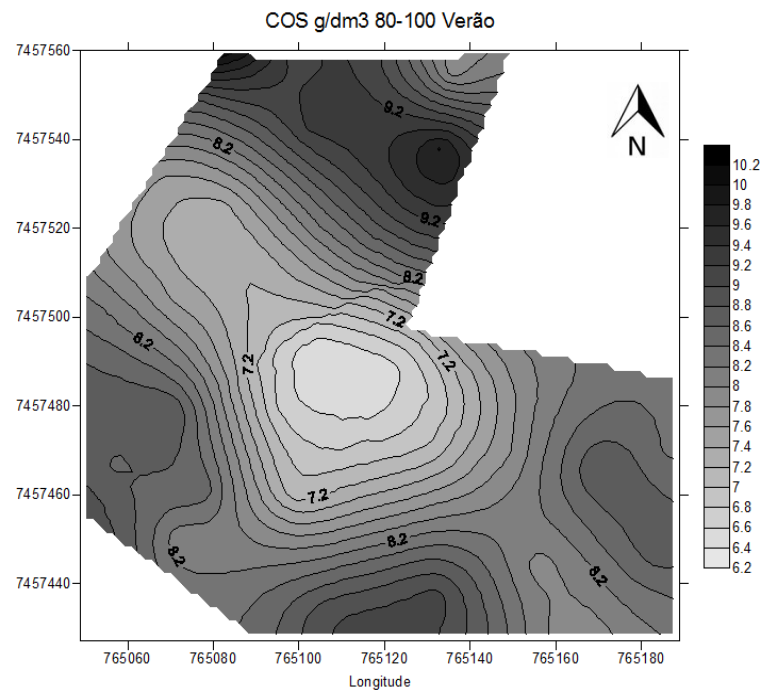


Figura 22 - Distribuição espacial do COS na profundidade de 80 - 100 cm, verão



Nas camadas em que houve dependência espacial detectável, a distribuição do COS não ocorre de forma completamente aleatória, mas apresenta padrões de continuidade espacial com intensidade variável entre as profundidades. Nas camadas superficiais, a heterogeneidade espacial tende a ser mais evidente, o que é coerente com a maior influência de processos biológicos, deposição de serapilheira, distribuição radicular e variações locais nas condições do solo.

Por sua vez, nas camadas mais profundas, os padrões espaciais tendem a apresentar menor contraste relativo, embora ainda indiquem estrutura espacial passível de modelagem em grande parte das profundidades avaliadas. Assim, a geoestatística complementa a análise estatística clássica ao demonstrar não apenas que o COS varia em função da profundidade e da estação, mas também que parte dessa variação apresenta organização espacial mensurável e passível de interpolação.

A variabilidade espacial moderada a elevada observada neste estudo é coerente com a heterogeneidade estrutural típica de áreas de cerrado stricto sensu, nas quais a distribuição descontínua da vegetação lenhosa, a presença de estratos herbáceos e arbustivo-arbóreos e as variações locais das condições edáficas podem influenciar a distribuição dos atributos do solo. Nesse contexto, os padrões espaciais do COS observados nos mapas de krigagem podem refletir a combinação entre aportes orgânicos localizados, distribuição radicular, microvariações do relevo e diferenças na cobertura vegetal.

Os valores de alcance obtidos indicam que, nas camadas com dependência espacial detectável, os processos associados à distribuição do carbono orgânico do solo atuam em escalas espaciais distintas, variando conforme a profundidade e a estação avaliadas.

Ressalta-se que as comparações com outros ambientes devem ser interpretadas com cautela, uma vez que os resultados obtidos neste estudo se referem a uma área específica de cerrado stricto sensu. Diferenças metodológicas, escalas de amostragem, densidade de pontos, profundidades avaliadas, condições edafoclimáticas e estrutura da vegetação podem influenciar significativamente as estimativas de estoque e a caracterização da variabilidade espacial do carbono orgânico do solo. Dessa forma, os resultados aqui apresentados devem ser interpretados como representativos da área estudada, contribuindo para ampliar a compreensão da dinâmica espacial do COS nessa fitofisionomia.

4.4 Estimativa do estoque de carbono orgânico do solo por profundidade e estação

A estimativa do estoque de carbono orgânico do solo até 1,0 m de profundidade resultou em valores totais de 135,00 Mg C ha⁻¹ no inverno e 114,66 Mg C ha⁻¹ no verão (Tabela 7). Em ambas as estações, a maior contribuição absoluta ocorreu nas camadas superficiais, especialmente em 0–20 cm, refletindo os maiores teores de carbono orgânico observados nessa porção do perfil.

Tabela 7 - Estoque de carbono orgânico do solo por profundidade e estação

	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	60-80 (cm)	80-100 (cm)	0-100 (cm)
Inverno	36,52	29,76	26,00	22,56	20,16	135,00
Verão	31,34	25,78	21,24	19,20	17,10	114,66

Nota: Valores expressos em Mg C ha⁻¹. Estoques calculados a partir dos teores de COS em g dm⁻³, considerando camadas de 20 cm e o fator de conversão 0,1.

As diferenças observadas nos estoques refletem o padrão já identificado nas análises estatísticas dos teores de carbono orgânico do solo, nas quais foram verificados efeitos significativos da profundidade e da estação. Assim, nesta seção, os estoques são apresentados de forma descritiva, com o objetivo de quantificar a magnitude do carbono acumulado ao longo do perfil e comparar os valores obtidos com aqueles relatados na literatura para áreas de cerrado stricto sensu.

A maior contribuição das camadas superficiais para o estoque total evidencia a importância da porção superior do perfil na acumulação de carbono orgânico do solo. No inverno, a camada de 0–20 cm representou aproximadamente 25,8% do estoque total estimado, enquanto no verão essa participação foi de cerca de 26,6%. Esse padrão é coerente com os maiores teores de carbono observados nas camadas superficiais, onde tendem a se concentrar os principais aportes de matéria orgânica provenientes da serapilheira e da atividade radicular.

A redução do estoque de carbono orgânico do solo no verão, de 135,00 para 114,66 Mg C ha⁻¹, corresponde a uma diminuição aproximada de 15,1% em relação ao inverno. Essa diferença acompanha o comportamento dos teores de carbono orgânico já discutidos anteriormente, indicando que a diferença observada entre os períodos de coleta também se refletiu nas estimativas de estoque ao longo do perfil. Ainda assim, a distribuição relativa entre as camadas manteve o padrão geral, com maior acúmulo nas camadas superiores e redução progressiva em profundidade.

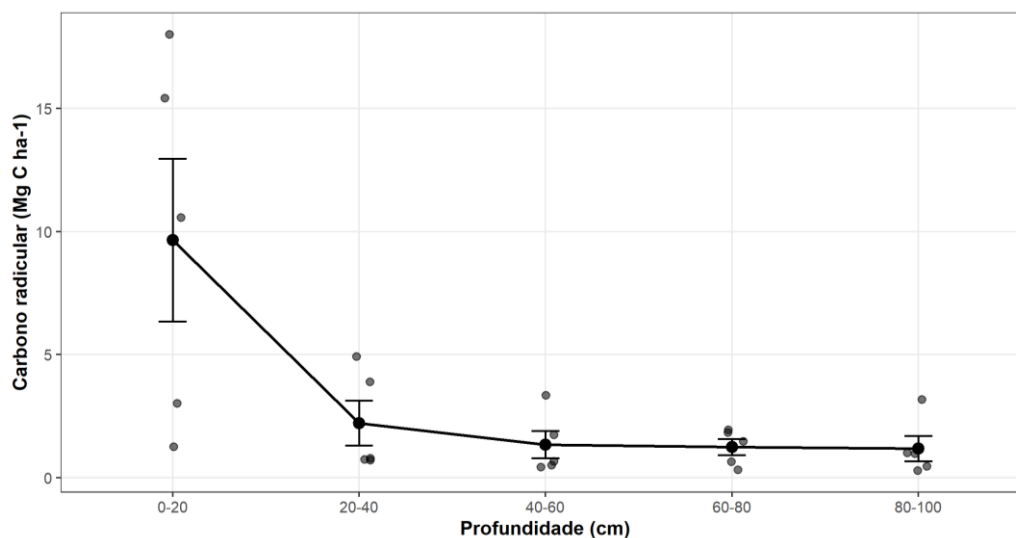
Os menores estoques observados neste estudo, em comparação aos valores relatados por Brossard et al. (1997), Chapuis-Lardy et al. (2002) e Bustamante et al. (2006), podem refletir diferenças de profundidade efetivamente considerada, densidade do solo, textura, condição de conservação da área, estrutura da vegetação e método de cálculo. Essa comparação deve ser interpretada como contextualização, e não como equivalência direta entre áreas, uma vez que os estudos diferem em escala amostral, condições edafoclimáticas e procedimentos analíticos.

Embora a estatística descritiva permita sintetizar os estoques médios por profundidade e estação, ela não incorpora explicitamente a estrutura espacial dos dados. Dessa forma, em ambientes heterogêneos como o Cerrado, estimativas baseadas apenas em valores médios podem mascarar variações intra-área relevantes. A integração com a análise geoestatística, apresentada anteriormente, contribui para uma interpretação mais completa, ao demonstrar que parte da variação do COS apresenta organização espacial mensurável e passível de interpolação.

4.5 Estoque de carbono radicular por profundidade e classe de diâmetro

O carbono associado às raízes foi avaliado a partir de cinco trincheiras, considerando cinco profundidades do perfil do solo e quatro classes de diâmetro radicular: <2 mm, 2,1-5,0 mm, 5,1-10 mm e >10 mm. Como a amostragem de raízes foi realizada em uma única campanha, os resultados são discutidos em função da profundidade e da classe de diâmetro, sem comparação entre períodos sazonais.

Os valores de biomassa seca foram convertidos para estoque de carbono radicular em Mg C ha^{-1} a partir da extrapolação da biomassa seca pela área superficial da trincheira e da fração de carbono determinada no tecido vegetal. A figura 21 apresenta de forma visual, o perfil vertical do carbono radicular.

Figura 23 - Perfil vertical do carbono radicular

Nota: Os pontos representam os valores observados por trincheira, a linha indica a média por profundidade e as barras verticais representam o erro-padrão.

Os resultados evidenciaram maior concentração de carbono radicular na camada superficial, com redução nas camadas subsequentes. A biomassa seca radicular total estimada até 100 cm foi de 30,40 Mg MS ha⁻¹, enquanto o estoque total de carbono radicular correspondente foi de 15,65 Mg C ha⁻¹.

A camada de 0-20 cm apresentou média de 9,66 Mg C ha⁻¹, correspondendo a 61,68% do carbono radicular total avaliado. Em 20-40 cm, a média foi reduzida para 2,22 Mg C ha⁻¹, equivalente a 14,17% do total. Nas camadas de 40-60, 60-80 e 80-100 cm, os valores permaneceram em patamares inferiores, com médias de 1,34, 1,25 e 1,19 Mg C ha⁻¹, respectivamente (Tabela 8).

Tabela 8 - Estatística descritiva do carbono radicular total por profundidade

Profundidade	N	Bs		Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
		média	Média C radicular				
0-20 cm	5	18,83	9,66	7,39	3,30	1,27	18,01
20-40 cm	5	4,31	2,22	2,04	0,91	0,71	4,93
40-60 cm	5	2,58	1,34	1,24	0,56	0,44	3,35
60-80 cm	5	2,42	1,25	0,73	0,32	0,32	1,95
80-100 cm	5	2,27	1,19	1,16	0,52	0,30	3,18
0-100 cm		30,40	15,65				

Nota: Biomassa seca média expressa em Mg MS ha⁻¹. Carbono radicular, desvio-padrão, erro-padrão, mínimo e máximo expressos em Mg C ha⁻¹.

A elevada dispersão observada na camada de 0-20 cm, com desvio-padrão de 7,39 Mg C ha⁻¹ e valor máximo de 18,01 Mg C ha⁻¹, indica heterogeneidade entre

trincheiras na porção superficial do solo. Essa variabilidade deve ser considerada na interpretação dos resultados, pois a presença localizada de raízes de maior diâmetro pode influenciar as médias obtidas em amostragens por trincheiras.

Esse comportamento é compatível com a distribuição localizada das raízes, com a variação dos aportes de serapilheira e com diferenças microambientais associadas à estrutura da vegetação e às condições edáficas locais. Em áreas de cerrado stricto sensu, a distribuição descontínua de indivíduos lenhosos, as diferenças entre indivíduos e as variações locais das condições do solo podem gerar padrões agregados de raízes, resultando em elevada variabilidade espacial da biomassa subterrânea.

Do ponto de vista inferencial, o modelo linear misto indicou efeito significativo da profundidade sobre o carbono radicular total, considerando a trincheira como intercepto aleatório (tabela 9). Esse resultado indica que a distribuição do carbono radicular variou ao longo do perfil avaliado.

Tabela 9 - Resultado do modelo linear misto para o efeito da profundidade sobre o carbono radicular total

Efeito	GL numerador	GL denominador	F	p-valor
Profundidade	4	20,00	7,4313	0,0008

As comparações múltiplas pelo teste de Tukey (tabela 10) indicaram que a camada de 0-20 cm apresentou valores significativamente superior aos das demais profundidades avaliadas. Foram observadas diferenças significativas entre 0-20 e 20-40 cm ($p = 0,0141$), 0-20 e 40-60 cm ($p = 0,0052$), 0-20 e 60-80 cm ($p = 0,0047$) e 0-20 e 80-100 cm ($p = 0,0044$). Entre as camadas abaixo de 20 cm, não foram observadas diferenças significativas.

Tabela 10 - Comparações múltiplas entre profundidades para o carbono radicular total

Comparação	Estimativa	Erro-padrão	GL	t	p-valor
0-20 - 20-40	7,44	2,13	25,00	3,49	0,0141
0-20 - 40-60	8,31	2,13	25,00	3,90	0,0052
0-20 - 60-80	8,41	2,13	25,00	3,95	0,0047
0-20 - 80-100	8,47	2,13	25,00	3,98	0,0044
20-40 - 40-60	0,87	2,13	25,00	0,41	0,9936
20-40 - 60-80	0,97	2,13	25,00	0,46	0,9905
20-40 - 80-100	1,03	2,13	25,00	0,48	0,9882
40-60 - 60-80	0,10	2,13	25,00	0,05	1,0000
40-60 - 80-100	0,16	2,13	25,00	0,07	1,0000
60-80 - 80-100	0,06	2,13	25,00	0,03	1,0000

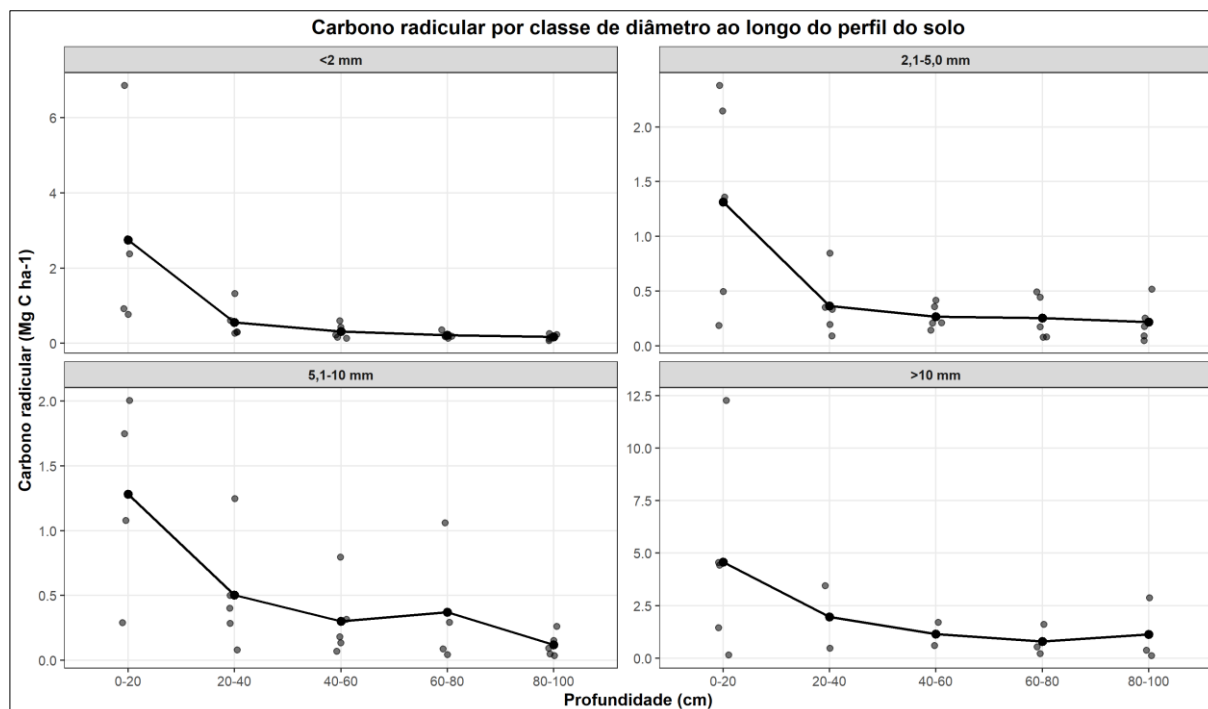
A análise por classe de diâmetro (tabela 11) mostrou que as raízes e estruturas subterrâneas de reserva >10 mm apresentaram a maior contribuição para o estoque total de carbono radicular, com média acumulada de 6,98 Mg C ha⁻¹, correspondente a 44,60% do total. As raízes <2 mm contribuíram com 4,01 Mg C ha⁻¹, equivalentes a 25,61% do total. As classes intermediárias, 2,1-5,0 mm e 5,1-10 mm, apresentaram contribuições de 2,42 e 2,24 Mg C ha⁻¹, correspondendo a 15,45% e 14,34% do total, respectivamente.

Tabela 11 - Estoque total de carbono radicular por classe de diâmetro

Classe de diâmetro	n	Carbono Médio	Desvio-padrão	Erro-padrão	Mínimo	Máximo	Participação no total (%)
<2 mm	5	4,01	3,14	1,40	1,57	9,23	25,61
2,1-5,0 mm	5	2,42	1,62	0,72	0,69	4,55	15,45
5,1-10 mm	5	2,24	1,52	0,68	0,80	4,50	14,34
>10 mm	5	6,98	5,25	2,35	1,46	14,01	44,60

Nota: Valores expressos em Mg C ha⁻¹.

A figura 24 apresenta o comportamento do carbono radicular por classe de diâmetro ao longo do perfil do solo.

Figura 24 - Carbono radicular por classe de diâmetro ao longo do perfil do solo

Nota: Os pontos cinza representam os valores observados por trincheira e as linhas indicam a média por profundidade.

A decomposição do carbono radicular por profundidade e classe de diâmetro mostrou que, na camada superficial, a classe >10 mm apresentou a maior média de carbono, com 4,57 Mg C ha⁻¹, seguida pelas classes <2 mm, 2,1-5,0 mm e 5,1-10 mm, com médias de 2,74, 1,31 e 1,28 Mg C ha⁻¹, respectivamente (tabela 12). Nas camadas abaixo de 20 cm, os valores médios foram menores em todas as classes de diâmetro, embora a classe >10 mm tenha mantido contribuição expressiva em parte do perfil.

Esse padrão indica que raízes de maior diâmetro exercem contribuição expressiva para o carbono radicular total, em razão de sua maior biomassa individual. Ao mesmo tempo, a contribuição das raízes finas também foi relevante na camada superficial, especialmente por sua associação com processos de absorção, renovação e ciclagem de matéria orgânica no solo.

Tabela 12 - Carbono radicular médio por profundidade e classe de diâmetro

Profundidade	<2 mm	2,1-5,0 mm	5,1-10 mm	>10 mm
0-20 cm	2,74 ± 2,46	1,31 ± 0,97	1,28 ± 0,77	4,57 ± 4,70
20-40 cm	0,56 ± 0,45	0,36 ± 0,29	0,50 ± 0,44	1,97 ± 2,10
40-60 cm	0,31 ± 0,20	0,27 ± 0,11	0,30 ± 0,29	1,16 ± 0,78
60-80 cm	0,22 ± 0,08	0,25 ± 0,20	0,37 ± 0,47	0,80 ± 0,73
80-100 cm	0,17 ± 0,08	0,22 ± 0,19	0,12 ± 0,09	1,13 ± 1,52

Nota: Valores expressos em média ± desvio-padrão, em Mg C ha⁻¹.

A predominância da classe >10 mm indica que raízes de maior diâmetro contribuíram de forma expressiva para o estoque de carbono radicular. Essa interpretação deve considerar que essa classe inclui estruturas subterrâneas lenhosas ou de reserva presentes no volume amostrado, além de raízes grossas propriamente ditas. As raízes finas, embora tenham apresentado menor participação em termos de estoque absoluto, também contribuíram para o carbono radicular total, especialmente na camada superficial.

O modelo linear misto considerando profundidade, classe de diâmetro e a interação entre esses fatores indicou efeito significativo da profundidade e da classe de diâmetro sobre o carbono radicular. A interação profundidade × classe de diâmetro não foi significativa, indicando que, embora tenham sido observadas diferenças gerais entre profundidades e entre classes de raízes, não houve evidência estatística de que o padrão relativo das classes varie sistematicamente ao longo do perfil (tabela 13).

Tabela 13 - Resultado do modelo linear misto para carbono radicular em função da profundidade, classe de diâmetro e interação

Efeito	GL numerador	GL denominador	F	p-valor
Profundidade	4	83,09	9,8744	0,000001
Classe de diâmetro	3	83,95	4,3082	0,0071
Profundidade × diâmetro	12	83,10	0,9521	0,5005

As comparações múltiplas pelo teste de Tukey (tabela 14) entre classes de diâmetro dentro de cada profundidade indicaram diferenças significativas apenas na camada de 0-20 cm. Nessa profundidade, a classe >10 mm apresentou valores significativamente superiores às classes 2,1-5,0 mm ($p = 0,0015$) e 5,1-10 mm ($p = 0,0024$). A diferença entre >10 mm e <2 mm não foi significativa pelo ajuste de Tukey

($p = 0,1534$). Nas demais profundidades, não foram observadas diferenças significativas entre classes de diâmetro.

Tabela 14 - Comparações múltiplas pelo teste de Tukey

Comparação	Estimativa	Erro-padrão	GL	t	p-valor
2,1-5,0 mm - >10 mm	-3,26	0,86	107,43	-3,77	0,0015
5,1-10 mm - >10 mm	-3,34	0,92	108,23	-3,63	0,0024

Nota: Apenas as comparações significativas na camada de 0-20 cm são apresentadas.

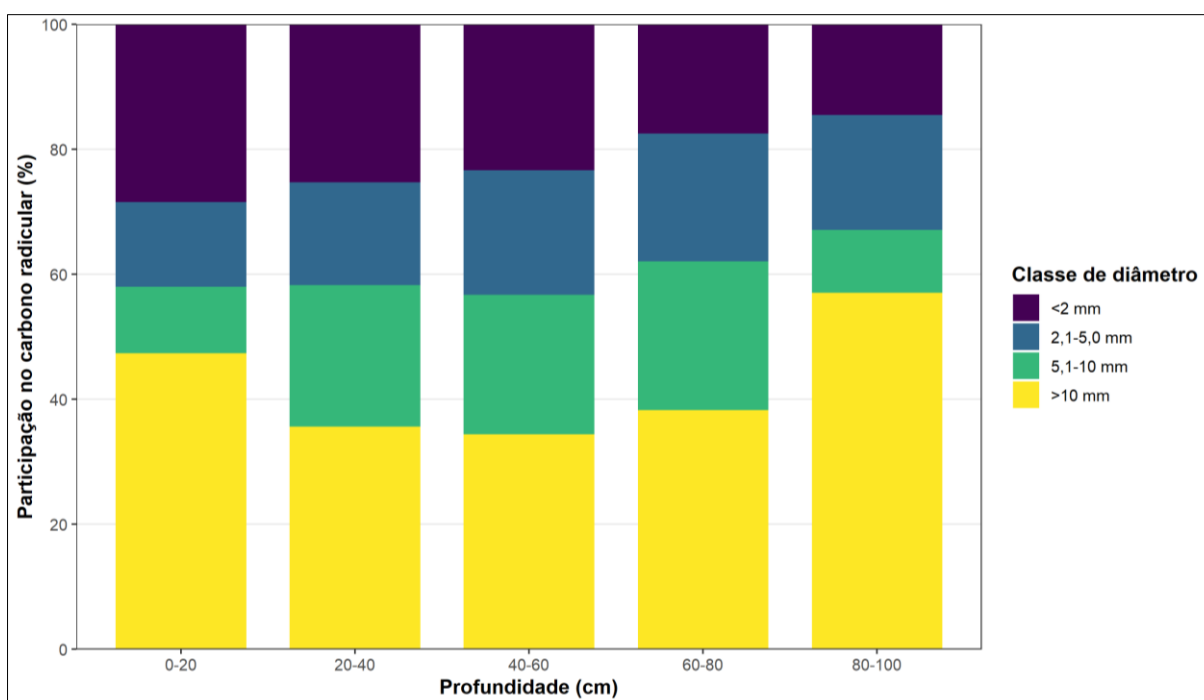
A composição percentual por profundidade mostrou que, na camada de 0-20 cm, a classe >10 mm representou 47,37% do carbono radicular da camada. As raízes <2 mm corresponderam a 28,41%, enquanto as classes 2,1-5,0 mm e 5,1-10 mm representaram 13,61% e 10,61%, respectivamente. Nas demais profundidades, a classe >10 mm também manteve participação expressiva, variando de 34,39% em 40-60 cm a 57,06% em 80-100 cm (tabela 15, figura 23).

Tabela 15 - Composição percentual do carbono radicular por classe de diâmetro em cada profundidade

Profundidade	<2 mm	2,1-5,0 mm	5.1-10 mm	> 10 mm
0-20 cm	28,41	13,61	10,61	47,37
20-40 cm	25,28	16,43	22,69	35,60
40-60 cm	23,36	19,91	22,34	34,39
60-80 cm	17,48	20,44	23,83	38,24
80-100 cm	14,53	18,38	10,03	57,06

Nota: Valores expressos em porcentagem do carbono radicular total de cada profundidade. Para a classe >10 mm na profundidade 80–100 cm, $n = 4$.

Figura 25 - Composição percentual do carbono radicular por profundidade e classe de diâmetro



Nota: Cada barra representa a participação relativa das classes de diâmetro no carbono radicular total de cada profundidade.

Nas profundidades intermediárias, especialmente entre 20-40 e 60-80 cm, a distribuição percentual tornou-se mais equilibrada entre as classes de diâmetro, embora a classe >10 tenha mantido participação expressiva. Na camada de 80-100 cm, essa classe voltou a apresentar proporção elevada, correspondendo a 57% do carbono radicular nessa profundidade.

A elevada variabilidade observada, especialmente na camada de 0–20 cm e na classe de raízes >10 mm, deve ser considerada na interpretação dos resultados. Como a análise foi baseada em cinco trincheiras, a presença localizada de raízes grossas e outras estruturas pode influenciar fortemente as médias e aumentar a dispersão dos dados. Ainda assim, o uso de modelos lineares mistos foi adequado ao desenho amostral, pois considera a estrutura de medidas repetidas dentro das mesmas trincheiras e evita tratar observações relacionadas como independentes.

De modo geral, os resultados indicam que o carbono radicular apresentou maior concentração na camada superficial do solo, com redução nas camadas mais profundas, e contribuição expressiva das raízes de maior diâmetro para o estoque

total. O estoque radicular total de 15,65 Mg C ha⁻¹ até 100 cm indica que o compartimento radicular compõe parte relevante do carbono abaixo da superfície na área estudada, embora sua magnitude deva ser interpretada dentro dos limites do método utilizado, considerando o número de trincheiras, a extrapolação da biomassa seca para hectare e a ausência de amostragem sazonal específica para raízes.

A biomassa seca radicular estimada neste estudo, de 30,40 Mg MS ha⁻¹ até 100 cm, encontra-se próxima ao valor relatado por Abdala (1998), que observou 33,4 t ha⁻¹ de raízes em área de cerrado stricto sensu, com 80% desse total concentrado até 100 cm. Por outro lado, foi inferior ao valor de 46,6 t ha⁻¹ registrado por Castro e Kauffman (1998), cuja amostragem considerou trincheiras de até 2 m de profundidade. Essas diferenças indicam a importância da profundidade de amostragem e do método de coleta na comparação entre estudos de biomassa subterrânea.

4.6 Carbono total (Solo + Raízes)

A quantificação do carbono total abaixo do solo permite integrar os compartimentos de carbono orgânico do solo e carbono radicular, fornecendo uma estimativa mais abrangente do carbono armazenado no sistema solo-raízes até 100 cm de profundidade. Essa abordagem é particularmente relevante em áreas de cerrado stricto sensu, nas quais a dinâmica do carbono é influenciada tanto pela distribuição vertical da matéria orgânica no solo quanto pela estrutura do sistema radicular.

Neste estudo, os estoques de carbono orgânico do solo foram estimados separadamente para os períodos de inverno e verão, enquanto o carbono radicular foi quantificado a partir de uma única campanha de amostragem. Dessa forma, a estimativa do carbono total abaixo do solo foi obtida pela soma do estoque de carbono orgânico do solo de cada estação com o estoque de carbono radicular medido no intervalo de 0-100 cm. Como a amostragem de raízes foi realizada apenas em uma estação, os valores de carbono total no verão devem ser interpretados sob o pressuposto de constância do compartimento radicular entre os períodos avaliados.

Os estoques de carbono orgânico do solo foram de 135,00 Mg C ha⁻¹ no inverno e 114,66 Mg C ha⁻¹ no verão, enquanto o estoque de carbono radicular foi estimado em 15,65 Mg C ha⁻¹ até 100 cm de profundidade. Com a integração desses

compartimentos, o carbono total abaixo do solo foi estimado em 150,65 Mg C ha⁻¹ no inverno (Tabela 16) e 130,31 Mg C ha⁻¹ no verão (Tabela 17).

Tabela 16 - Carbono total abaixo do solo no inverno

Profundidade	Solo	Raízes	Total
0-20 cm	36,52	9,66	46,18
20-40 cm	29,76	2,22	31,98
40-60 cm	26,00	1,34	27,34
60-80 cm	22,56	1,25	23,81
80-100 cm	20,16	1,19	21,35
0-100 cm	135,00	15,65	150,65

Nota: Valores expressos em Mg C ha⁻¹.

Tabela 17 - Carbono total abaixo do solo no verão

Profundidade	Solo	Raízes*	Total
0-20 cm	31,34	9,66	41,00
20-40 cm	25,78	2,22	28,00
40-60 cm	21,24	1,34	22,58
60-80 cm	19,20	1,25	20,45
80-100 cm	17,10	1,19	18,29
0-100 cm	114,66	15,65	130,31

Nota: Valores expressos em Mg C ha⁻¹. *Valores de carbono total no verão calculados sob o pressuposto de constância do estoque radicular, uma vez que a amostragem de raízes foi realizada em uma única campanha.

No inverno, o carbono orgânico do solo representou aproximadamente 89,61% do carbono total abaixo do solo, enquanto o carbono radicular correspondeu a 10,39%. No verão, considerando a mesma estimativa radicular, a participação relativa do solo foi de aproximadamente 87,99%, enquanto as raízes representaram 12,01% do total. A maior participação relativa das raízes no verão decorre da menor estimativa de carbono orgânico do solo nesse período, uma vez que o estoque radicular foi mantido constante na comparação entre estações.

A diferença entre o carbono total abaixo do solo no inverno e no verão foi de aproximadamente 20,34 Mg C ha⁻¹. Esse padrão acompanhou principalmente a variação observada no carbono orgânico do solo, pois o compartimento radicular foi considerado constante na estimativa comparativa entre as estações.

A distribuição vertical do carbono total manteve o padrão observado nos compartimentos analisados separadamente, com maior concentração nas camadas superficiais e redução em profundidade. No inverno, a camada de 0-20 cm apresentou o maior valor de carbono total, com 46,18 Mg C ha⁻¹. No verão, essa mesma camada também apresentou o maior valor, com 41,00 Mg C ha⁻¹.

As estimativas aqui apresentadas representam o carbono total abaixo do solo no intervalo de 0-100 cm e não devem ser interpretadas como estoque total do ecossistema, uma vez que não incluem biomassa aérea, serapilheira, nem camadas de solo ou raízes abaixo de 1 m.

De modo geral, a integração entre os resultados de solo e raízes indica que o carbono orgânico do solo constituiu o principal compartimento do carbono abaixo da superfície no intervalo de 0-100 cm, enquanto o compartimento radicular apresentou contribuição relevante para o estoque total abaixo do solo. Esses resultados reforçam a importância de considerar separadamente os compartimentos solo e raízes na quantificação do carbono abaixo do solo em áreas de cerrado stricto sensu.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciam que o compartimento abaixo do solo representa um reservatório expressivo de carbono em área de cerrado stricto sensu, com predomínio do carbono orgânico do solo em relação ao carbono radicular.

A distribuição vertical foi o padrão mais consistente observado, com maiores teores e estoques nas camadas superficiais e redução progressiva em profundidade.

A diferença entre os períodos de coleta indicou maiores estoques no inverno em comparação ao verão, reforçando a importância de explicitar o momento da amostragem em estimativas de carbono do solo.

O carbono radicular, embora menor que o compartimento solo, apresentou contribuição relevante na camada de 0-20 cm, especialmente pelas raízes de maior diâmetro e estruturas subterrâneas associadas.

A análise geoestatística complementou a interpretação dos resultados ao indicar que parte da variabilidade do COS apresentou estrutura espacial detectável na escala amostral adotada, fornecendo subsídios para a avaliação da heterogeneidade intra-área e para o planejamento de amostragens futuras.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para o carbono orgânico do solo, carbono radicular e carbono total abaixo do solo em área de cerrado stricto sensu, conclui-se que:

1. O carbono orgânico do solo apresentou claro gradiente vertical, com maiores teores e estoques na camada superficial e redução progressiva até 100 cm de profundidade.
2. Os estoques de carbono orgânico do solo foram maiores no inverno do que no verão, totalizando 135,00 Mg C ha⁻¹ e 114,66 Mg C ha⁻¹, respectivamente, até 100 cm de profundidade.
3. O estoque de carbono radicular foi estimado em 15,65 Mg C ha⁻¹, com maior concentração na camada de 0-20 cm, que respondeu por 61,68% do total de carbono radicular.
4. A contribuição das raízes de maior diâmetro e de estruturas subterrâneas associadas foi mais expressiva na camada superficial, indicando a importância desse compartimento na composição do carbono abaixo do solo em cerrado stricto sensu.
5. O carbono total abaixo do solo foi estimado em 150,65 Mg C ha⁻¹ no inverno e 130,31 Mg C ha⁻¹ no verão, considerando o mesmo estoque radicular medido em campanha única. O carbono orgânico do solo foi o principal componente desse estoque, representando 89,61% do total no inverno e 87,99% no verão.
6. A análise geoestatística indicou dependência espacial detectável em parte das profundidades avaliadas, demonstrando que a variabilidade do COS na área não deve ser assumida previamente como homogênea ou aleatória. Essa informação contribui para orientar o espaçamento amostral e a representatividade dos pontos em estudos futuros.
7. De forma geral, os resultados reforçam que estimativas de carbono abaixo do solo em cerrado stricto sensu devem explicitar a profundidade amostrada, o período de coleta, a unidade analítica utilizada para o COS e a inclusão ou não do compartimento radicular, pois esses fatores influenciam diretamente a interpretação dos estoques.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, G. C. *et al.* Above and belowground organic matter and root:shoot ratio in a cerrado in central Brazil. **Brazilian Journal of Ecology**, Rio Claro, v. 2, n. 1, p. 11-23, 1998.
- ADUAN, R. E. **Respiração de solos e ciclagem de carbono em Cerrado nativo e pastagem no Brasil central**. 2003. 116 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
- BATALHA, M. A. The Brazilian cerrado is not a biome. **Biota Neotropica**, São Paulo, v. 11, n. 1, 2011.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 151-163, 1996.
- BATJES, N. H.; SOMBROEK, W. G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. **Global Change Biology**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 161-173, 1997.
- BATJES, N. H. Mitigation of atmospheric CO₂ concentrations by increased carbon sequestration in the soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 27, n. 3, p. 230-235, 1998.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188 p. (Ecological Studies, v. 33).
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C.; SOUZA, C. M. A. de. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima. **Análise de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): status das atividades de projetos do MDL no Brasil e no mundo**. Brasília, DF: MCTI, 2013.
- BROSSARD, M. *et al.* Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de cerrado. *In*: LEITE, L. L.; SAITO, C. H. (org.). **Contribuição ao conhecimento ecológico do cerrado: trabalhos selecionados do 3º Congresso de Ecologia do Brasil**. Brasília, DF: UnB, 1997. p. 272-277.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; MEDINA, E.; ASNER, G. P.; NARDOTO, G. B.; GARCIA-MONTIEL, D. C. Nitrogen cycling in tropical and temperate savannas. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 79, n. 1-2, p. 209-237, 2006.
- CAIRNS, M. A.; BROWN, S.; HELMER, E. H.; BAUMGARDNER, G. A. Root biomass allocation in the world's upland forests. **Oecologia**, Berlin, v. 111, n. 1, p. 1-11, 1997.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, E. H. *et al.* Acúmulo de serrapilheira em fragmentos de mata mesofítica e cerrado stricto sensu em Uberlândia, MG. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 189-203, jun. 2008.

CASTRO, E. A. de; KAUFFMAN, J. B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 14, n. 3, p. 263-283, 1998.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Campinas: Unicamp, 2010. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_463.html. Acesso em: 15 mar. 2011.

CHAPUIS-LARDY, L. *et al.* Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 147-158, 2002.

CHENG, W. Rhizosphere feedbacks in elevated CO₂. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, n. 4-5, p. 313-320, 1999.

CORAZZA, E. J. *et al.* Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 425-432, 1999.

COUTINHO, L. M. O conceito de Cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 1, p. 17-23, 1978.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley & Sons, 1993. 900 p.

DELITTI, W. B. C.; PAUSAS, J. G.; BURGER, D. M. Belowground biomass seasonal variation in two Neotropical savannahs (Brazilian Cerrados) with different fire histories. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 58, n. 7, p. 713-721, 2001.

DURIGAN, G.; FRANCO, G.; SIQUEIRA, M. A vegetação dos remanescentes de cerrado no estado de São Paulo. *In*: BITENCOURT, M. D.; MENDONÇA, R. R. (org.). **Viabilidade de conservação dos remanescentes de cerrado no Estado de São Paulo**. São Paulo: Annablume; FAPESP, 2004. p. 29-56.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FACELLI, J. M.; PICKETT, S. T. A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. **The Botanical Review**, New York, v. 57, n. 1, p. 1-32, 1991.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2005: progress towards sustainable forest management**. Rome: FAO, 2006. (FAO Forestry Paper, 147).

FEARNSIDE, P. M. Estoque e estabilidade do carbono nos solos da Amazônia brasileira. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (org.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Ed. da UFAM; Embrapa Amazônia Ocidental, 2010. p. 259-263.

FINÉR, L. *et al.* Variation in fine root biomass of three European tree species: beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Plant Biosystems**, London, v. 141, n. 3, p. 394-405, 2007.

FONSECA, S. *et al.* Alterações em um Latossolo sob eucalipto, mata natural e pastagem. I. Propriedades físico-químicas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 17, p. 271-288, 1993.

FOURNIER, R. E.; MORRISON, I. K.; HOPKIN, A. A. Short range variability of soil chemistry in three acidic soils in Ontario, Canada. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 3069-3082, 1994.

GRACE, J.; SAN JOSÉ, J.; MEIR, P.; MIRANDA, H. S.; MONTES, R. A. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 387-400, 2006.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special report on land use, land-use change and forestry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 375 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2001: synthesis report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 397 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. EGGLESTON, H. S. *et al.* (ed.). Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: synthesis report**. Geneva: IPCC, 2007a. 104 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT/Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981. v. 1.

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E. D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National**

Academy of Sciences of the United States of America, Washington, DC, v. 94, n. 14, p. 7362-7366, 1997.

JOHNSON, D. W.; CURTIS, P. S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 140, n. 2-3, p. 227-238, 2001.

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 82, p. 519-531, 1994.

KÕLLI, R. *et al.* Stocks of organic carbon in Estonian soils. **Estonian Journal of Earth Sciences**, Tallinn, v. 58, n. 2, p. 95-108, 2009.

KUMMEROW, J.; CASTELLANOS, J.; MAASS, M.; LARIGAUDERIE, A. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a Mexican deciduous dry forest. **Vegetatio**, Dordrecht, v. 90, n. 1, p. 73-80, 1990.

LAL, R. *et al.* (ed.). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Food Products Press, 2006. 554 p.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 181 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Ed. UNESP, 1998. 226 p.

LEITE, J. A. **Características físicas e fator de erodibilidade de quatro solos representativos do município de São Mamede, Paraíba**. 1979. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1979.

LEITE, L. F. C. *et al.* Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1273-1280, 2010.

MACHADO, R. B. *et al.* **Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro**. Brasília, DF: Conservação Internacional, 2004. Relatório técnico não publicado.

MAIA, S. M. F. *et al.* Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 1-2, p. 84-91, 15 fev. 2009.

MALHI, Y. Carbon in the atmosphere and terrestrial biosphere in the 21st century. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 360, n. 1801, p. 2925-2945, 2002.

MARRIS, E. Conservation in Brazil: the forgotten ecosystem. **Nature**, London, v. 437, n. 7061, p. 944-945, 2005.

MIRANDA, A. C. *et al.* Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 20, n. 3, p. 315-328, 1997.

MORAIS, V. A. *et al.* Modelagem do teor de carbono orgânico em solos de fragmentos de Cerrado de Januária e Bonito de Minas, Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 76, p. 343-354, 2013.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. da; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

NOVAES, J. P. F. **Variabilidade espacial de atributos de solo em microbacias sob vegetação de floresta na Amazônia meridional**. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

NOVAES FILHO, J. P. *et al.* Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia meridional. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 83-92, 2007.

OGLE, S. M.; CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Environmental Management**, New York, v. 33, n. 4, p. 474-484, abr. 2004.

OLIVEIRA, J. B. *et al.* Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Araras. **Boletim Técnico do Instituto Agrônômico**, Campinas, n. 71, p. 88-94, 1982.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado sensu stricto do Distrito Federal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 527-538, 2011.

PERES, J. R. R.; SUHET, A. R.; VARGAS, M. A. T.; DROZDOWICZ, A. Litter production in areas of Brazilian Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, n. 9, p. 1037-1043, set. 1983.

REICHLE, D. E. *et al.* In carbon and the biosphere. *In*: WOODWELL, G. M.; PECAN, E. V. (ed.). **Carbon and the biosphere**. Brookhaven: U.S. Atomic Energy Commission, 1973. p. 345-365.

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Version 5.1. Plainwell: Gamma Design Software, 2000.

ROSSI, J. *et al.* Spatial structures of soil carbon in tropical forests: a case study of southeastern Tanzania. **Catena**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 19-27, 2009.

RUFINO, A. M. M. **Estoque de carbono em solos sob plantios de eucalipto e fragmento em Cerrado**. 2009. x, 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

RUGNITZ, M.; CHACÓN, M.; PORRO, R. **Guia para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais**. 1. ed. Belém: Centro Mundial Agroflorestal; Consórcio Iniciativa Amazônica, 2009. 81 p.

SCURLOCK, J. M. O.; HALL, D. O. The global carbon sink: a grassland perspective. **Global Change Biology**, Oxford, v. 4, n. 2, p. 229-233, 1998.

SILVA, C. J. *et al.* Produção de serrapilheira no Cerrado e Floresta de Transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste brasileiro. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 4, p. 543-548, 2007.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 357-363, 2004.

SKORUPA, A. L. A. *et al.* Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 11-22, 2012.

SMA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Quantificação da vegetação natural remanescente para os municípios do Estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2010. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/uploads/arquivos/inventarioFlorestal/municipio_maior_por.pdf. Acesso em: 28 jul. 2011.

SOMBROEK, W. G.; FEARNSIDE, P. M.; CRAVO, M. Geographic assessment of carbon stored in Amazonian terrestrial ecosystems and their soils in particular. *In*: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; STEWART, B. A. (ed.). **Global climate change and tropical ecosystems**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 375-389. (Advances in Soil Science).

SOTOMAYOR, J. F. M. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

STEIN, A.; ETTEMA, C. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 94, p. 31-47, 2003.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Berkeley: University of California Press, 1979. 372 p. (Studies in Ecology, v. 5).

THORMANN, M. N.; SZUMIGALSKI, A. R.; BAYLEY, S. E. Aboveground peat and carbon accumulation potentials along a bog-fen-marsh wetland gradient in southern boreal Alberta, Canada. **Wetlands**, Dordrecht, v. 19, p. 305-317, 1999.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1986.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. New York: United Nations, 1998.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Amendment to the Kyoto Protocol pursuant to Article 3, paragraph 9: the Doha Amendment**. Doha: UNFCCC, 2012.

VALENTI, M. W.; CIANCIARUSO, M. V.; BATALHA, M. A. Seasonality of litterfall and leaf decomposition in a cerrado site. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 68, n. 3, p. 459-465, ago. 2008.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. **Curso de atualização em conservação do solo: uso de geoestatística**. Campinas: IAC, 1995. v. 2.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *In*: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VOGT, K. A. *et al.* Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. **Advances in Ecological Research**, London, v. 15, p. 303-377, 1986.

VOGT, K. A. *et al.* Methodological considerations in measuring biomass, production, respiration and nutrient resorption for tree roots in natural ecosystems. *In*: TORREY, J. G.; WINSHIP, L. J. (ed.). **Applications of continuous and steady-state methods in root biology**. Dordrecht: Kluwer, 1989. p. 217-232.

VOGT, K. A.; BLOOMFIELD, J. Tree root turnover and senescence. *In*: LASSOIE, J. P.; HINCKLEY, T. M. (ed.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 287-305.

VOGT, K. A. *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 187, p. 159-219, 1996.

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**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.

WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado: síntese terminológica e relações florísticas**. 2006. 389 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. *In*: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (ed.). **Pedogenesis and soil taxonomy I: concepts and interactions**. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 83-116.

WOJCIECHOWSKI, J. C. **Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

YAVITT, J. B.; WILLIAMS, J. X.; WIEDER, R. K. Production, decomposition, and net microbial nitrification and nitrogen mineralization in early successional and mid-successional tropical forests, Panama. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 37, n. 3, p. 251-277, 1997.

YOST, R. S.; UEHARA, G.; FOX, R. L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 1028-1032, 1982a.

YOST, R. S.; UEHARA, G.; FOX, R. L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 1033-1037, 1982b.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística aplicada ao planejamento agrícola**. 2003. 114 f. Tese (Livre-docência em Levantamento de Solos e Fotogrametria) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.