



MARIANA DE OLIVEIRA GONÇALVES NOGUEIRA

**ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA
RADICULAR E NO SOLO EM ECOSSISTEMA
FLORESTAL EM PROCESSO DE
RECUPERAÇÃO**

LAVRAS - MG

2013

MARIANA DE OLIVEIRA GONÇALVES NOGUEIRA

**ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA RADICULAR E NO SOLO
EM ECOSISTEMA FLORESTAL EM PROCESSO DE
RECUPERAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração Silvicultura, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientadora

Profa. Dra. Soraya Alvarenga Botelho

Coorientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Silva

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Nogueira, Mariana de Oliveira Gonçalves.

Estoque de carbono na biomassa radicular e no solo em ecossistema florestal em processo de recuperação / Mariana de Oliveira Gonçalves Nogueira. – Lavras : UFLA, 2013.

143 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Soraya Alvarenga Botelho.

Bibliografia.

1. Restauração florestal. 2. Alocação de carbono. 3. Sistema radicular. 4. Áreas degradadas. 5. Espacialização de estoque de carbono.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.956

Aos queridos Marcelo, Cláudia, Carolina e Marcela. Motivos

de tudo o que faço, sempre.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu bom Deus, por toda a oportunidade que me proporciona nesta vida. E ao meu santo protetor, que considero muito forte!

À minha colega, amiga, quase irmã-gêmea e mãe, Cláudia, por tudo, sempre. Pelo companheirismo na pós-graduação, ao meu querido amigo-irmão e pai, Marcelo, a pessoa mais doce que eu conheço. Obrigada por me fazer sempre lembrar que você está presente sempre que eu preciso. Vocês dois são o meu porto seguro!

Às minhas irmãs, Carolina e Marcela – Carolinda e Marceleza – as mulheres mais lindas da minha vida. Que saibamos sempre correr atrás do que a gente quer, fazendo tudo da melhor forma que pudermos. Obrigada pelo companheirismo.

Agradeço à querida Soraya Botelho, pela orientação, pela amizade e por sempre me proporcionar o que precisei na execução deste trabalho e pela confiança. Agradeço, ainda, ao Carlos Alberto, pela coorientação na imensa ajuda nas análises de carbono e de fertilidade de solo e nas demais análises dos resultados.

Agradeço às professoras Bruna Souto e Sabina Cerruto, pela disponibilidade na avaliação deste trabalho, e auxílio quando as procurei.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFLA, por ter me proporcionado a oportunidade de concluir esta etapa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa.

Agradeço à minha animada e divertida equipe de campo e aos amigos que me ajudaram: Fernanda, José Pedro, Gerson, Leandro Carlos, Iberê, Júlia, Helane e Nicelle.

Agradeço, ainda, às estagiárias Joelma e Fernanda; ao professor José Reinaldo; aos funcionários Claret, Wilson (Melão) e Ernani, e ao colega Sérgio, pela ajuda em laboratório, por me cederem algum material emprestado no processamento do meu material e pelo auxílio em mapas, respectivamente.

À CEMIG, por permitir que tais estudos fossem conduzidos em suas áreas, no entorno da UHE de Camargos, em Itutinga.

Regiane, obrigada pela ajuda na análise dos dados e por todo o apoio. Aos amigos do Laboratório de Sistemas Silviculturais e Restauração Florestal, Luciana, Amanda, Álvaro, Elma, Helane, Nicelle, Lucas e Júlia, pela convivência. Dona Regina, obrigada pelo carinho, pelo café e pelas rosquinhas. Desculpe a bagunça que, muitas vezes, deixei, com a triagem do meu material de campo. Agradeço, ainda, a Chica, Meire, Priscila e Thaísa.

Aos meus queridos “ermões” da pós-graduação, Joyce, André, Célio, Marcela, Iberê, Batata, Eva, Ernani, Amanda, Raisia, Carol, Liz, Álvaro, Daniela,

Diana, Zebra, Elias, Ernani, Ygoor, Gleisson, Elliézer, Laurenn, Thaís, Lorena, Isaías, Rachel, João Faustino, Paulo Henrique, Elton, Júnior, Sarita, Tatielle, Isaac e agregados, pelos bons momentos de diversão. Desculpem-me se me esqueci de alguém!

Aos meus avós, que me acham uma pessoa muito melhor do que eu sou. Aos meus tios e primos. Em especial, às minhas amadas tias Elisa e Rogéria, pelo apoio sempre, pelo carinho e pela presença constante. Vocês duas são essenciais!

Aos queridos amigos Desirèe Federighi, Marcelo Pedrosa, Isabela Beretens, Carolzinha Assis, Lígia Azevedo, Adriana Tarone, Thiago Pimenta, Ana Paula Fernandes, Joana Fernandes, Déborah Resende, Leticia Resende, Repúblicas Pelezada e Boas de Canaë aos amigos de Formiga, especialmente Nayan, Ludmilla e Júlia Chicre, Carol Soares, Carol Leite, Dani Maia, Tati Assaf, Raíssa Alves, Lorena Batista e Camila Rezende, que levaram muitos bolos meus nesses últimos anos, mas que souberam compreender o momento.

E por que não agradecer às minhas pequenas, pelo olhar de cumplicidade, pela alegria sempre ao me verem e pelo amor incondicional que só um animal tem pelo seu dono?

Agradeço ao ensino público de qualidade, sem o qual não teria conseguido o que consegui.

“Tudo quanto vive, vive porque muda; muda porque passa; e, porque passa, morre. Tudo quanto vive perpetuamente se torna outra coisa, constantemente se nega, se furta à vida.”

Fernando Pessoa

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus não sou o que eu era antes.”

Martin Luther King

“(…) Eu sou o dono e senhor do meu destino;
Eu sou o mestre da minha alma.”

William Ernest Henley

RESUMO

O estudo da distribuição e do estoque de carbono em sistemas é importante por indicar a qualidade ambiental de ecossistemas. Além disso, existe recente demanda por pesquisas em ciclagem e alocação de carbono em ecossistemas florestais. Buscou-se avaliar a distribuição do carbono estocado em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG. Foram avaliados dois fragmentos florestais, sendo um considerado conservado, onde não houve supressão da vegetação e outro em processo de restauração florestal, com prévia supressão da vegetação, sendo utilizado como área de empréstimo para a construção da barragem da UHE, e há vinte anos foi iniciada a restauração florestal, mediante o plantio de mudas. Em cada fragmento florestal foram abertas cinco trincheiras de 0,5 m x 1,0 m, para a coleta de serapilheira, material radicular e solo, nas profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 60 cm e 60 a 100 cm. Foram coletadas, ainda, amostras de solo para análise de densidade, fertilidade e textura. As amostras foram coletadas, foram determinados os pesos secos e os teores de carbono das amostras e, por fim, determinou-se o estoque de carbono. A biomassa radicular, o teor de carbono radicular e o teor de carbono no solo tenderam a diminuir com aumento da profundidade. A biomassa radicular variou de 5,5 a 31 Mg ha⁻¹ e de 10,5 a 30,9 Mg ha⁻¹, nos fragmentos em restauração e conservado, respectivamente. Os valores de teor de carbono radicular variaram de 30,58% a 43,24%, sendo 36,81% o valor médio. O valor médio de estoque de carbono radicular foi de 8 Mg ha⁻¹, para o fragmento conservado e de 5,6 Mg ha⁻¹, para o fragmento em restauração. A média dos dois fragmentos considerados juntamente foi de 6,79 Mg ha⁻¹. Não houve diferenças entre o estoque de carbono radicular entre os fragmentos. O teor de carbono no solo variou de 3,7% a 0,4%, tendo o fragmento conservado apresentado maiores valores médios do que o fragmento em restauração. O fragmento conservado estocou, em média, mais carbono no solo (24,33 Mg ha⁻¹) do que o fragmento em restauração (19,75 Mg ha⁻¹). Não houve diferença entre o teor e o estoque de carbono da serapilheira entre os fragmentos analisados, apesar de o estoque médio de carbono da serapilheira do fragmento em restauração (5,38 Mg ha⁻¹) ter sido maior do que o do fragmento conservado (3,58 Mg ha⁻¹). Concluiu-se que os vinte anos decorridos da restauração permitiram que o fragmento florestal atingisse valores similares de estoque de carbono radicular do fragmento florestal conservado, entretanto, o mesmo não aconteceu para o estoque de carbono no solo, principalmente devido ao histórico de utilização do solo no fragmento em restauração, durante a construção da barragem e nos anos seguintes.

PALAVRAS-CHAVE: restauração florestal, alocação de carbono, sistema radicular, áreas degradadas.

ABSTRACT

The study of distribution and carbon stock in systems is important for indicating the environmental quality of ecosystems; in addition, there is recent demand on research for cycling and carbon allocation in forest ecosystems. We sought to evaluate the distribution of stored carbon in forest fragments surrounding the HPP Camargos, MG, in Brazil. We evaluated two forest fragments: one considered conserved, where there was no removal of vegetation and another forest fragment in restoration process, where the vegetation was previously suppressed, being used as a borrow area for construction of HPP dam, and twenty years ago was initiated the restoration activities through planting seedlings. In each forest fragment were opened five trenches of 0.5 m x 1.0 m, which were collected: litter, root and soil materials at depths of 0 to 10 cm, 10 to 20 cm, 20 to 40 cm, 40 to 60 cm and 60 to 100 cm. Were also collected soil samples for analysis of density, fertility and texture. The samples were collected, the dry weight and carbon content were determined and finally, the carbon stock was also determined. As a result, it was found that the root biomass, the roots and soil carbon content tended to decrease with increasing depth. The root biomass varied from 5.5 to 31 Mg ha⁻¹ and 10.5 to 30.9 Mg ha⁻¹ in the fragment in restoration and in conserved fragment, respectively. The values of the carbon content ranged from 30.58 to 43.24% and the average value was 36.81%. Relative to the mean stock of root carbon, the values were 8 Mg ha⁻¹ for the conserved fragment and 5.6 Mg ha⁻¹ for the fragment in restoration. The average of the both fragments taken together was 6.79 Mg ha⁻¹. There was no difference between the root carbon stocks between fragments. The soil carbon content ranged from 3.7% to 0.4%, and conserved fragment showed higher average values than the fragment in restoration. The conserved fragment stocked more carbon in the soil (24.33 Mg ha⁻¹) than the fragment in restoration (19.75 Mg ha⁻¹). There was no difference between the litter carbon content and stock between both fragments analyzed, although the average litter carbon stock in the fragment in restoration (5.38 Mg ha⁻¹) was greater than the conserved fragment (3.58 Mg ha⁻¹). The twenty years after forest restoration allowed the forest fragment in restoration to reach similar values of conserved fragment carbon stock. However, the same was not true to the soil carbon stock, mainly due to fragment restoration's historical land use during the construction of the dam and thereafter.

KEYWORDS: restoration forestry, carbon allocation, root system, degraded areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa da área total de estudo, mostrando os fragmentos em restauração (FR) e conservado (FC) e localização dos pontos de amostragem, no entorno da UHE de Camargos, MG.	30
Figura 2.	Áreas de estudo, localizadas na UHE de Camargos, em Itutinga, MG. A) Visão externa das duas áreas contíguas; B) fragmento nativo e C) fragmento recuperado. Maio de 2012.	31
Figura 3.	Esquema dos pontos de coleta sorteados em escritório, sendo as coordenadas do ponto de coleta largura e comprimento, em metros (15,12).	32
Figura 4.	Gabarito disposto no ponto de coleta da serapilheira. Dimensões: 0,5m x 1,0m. A) Serapilheira a ser coletada. B) Serapilheira já coletada.	36
Figura 5.	A) Trincheira sendo aberta, na primeira profundidade de 0 a 10 cm. B) Peneiras utilizadas para separar solo de material radicular. C) Material radicular sendo separado de solo com auxílio de peneiras. D) Material radicular coletado sendo armazenado em sacos plásticos.	35
Figura 6.	A) Material coletado armazenado em saco plástico e identificado. B) Material coletado – serapilheira e raízes sendo lavados. C) Material coletado – raízes e serapilheira sendo secos em estufa. D) Material coletado sendo moído.	37
Figura 7.	Preparo de solo para análise de carbono. A) Solo coletado sendo seco à temperatura ambiente. B) Solo seco sendo macerado em cadinho de porcelana com pistilo. C) Solo sendo peneirado em peneira de 60mesh. D) Material armazenado em frascos plásticos.	38
Figura 8.	A) Trincheira sendo aberta até 100 cm. B) Detalhe superior da trincheira. C) Anel de volume conhecido utilizado para coletas de amostras indeformadas de solo. D) Anel de volume conhecido sendo utilizado.	39
Figura 9.	A) Amostras moídas e secas, prontas para análise de carbono. B) Amostras sendo pesadas. C) Amostra já pesada em cápsula de estanho já fechada. D) Amostra em cápsula de estanho sendo injetada no analisador. E) Detalhe do analisador de carbono orgânico total utilizado neste experimento. F) Software em computador conectado ao analisador.	41
Figura 10.	Representação gráfica dos parâmetros: efeito pepita (C_0 ou τ^2), o patamar (C_0+C ou $\tau^2+\sigma^2$) e o alcance da dependência	47

	especial (a ou \emptyset).	
Figura 11.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na parte aérea, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	93
Figura 12.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na serapilheira, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	94
Figura 13.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na raiz a 0-10 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	95
Figura 14.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na raiz a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	96
Figura 15.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente no solo a 0-10 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	97
Figura 16.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente no solo a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	98
Figura 17.	Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono total, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha ⁻¹ .	99
Figura 18.	Distribuição percentual de estoque de carbono das matrizes analisadas no fragmento conservado, no entorno da UHE de Camargos, MG.	100
Figura 19.	Distribuição percentual de estoque de carbono das matrizes analisadas no fragmento em restauração, no entorno da UHE de Camargos, MG.	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Distribuição da biomassa radicular média dos fragmentos adjacentes à UHE Camargos, com relação à profundidade de coleta e seus respectivos erros padrão da média.	49
Gráfico 2.	Distribuição ponderada do estoque médio de carbono radicular nos fragmentos analisados com relação às profundidades de coleta e seus respectivos erros padrão da média.	58
Gráfico 3.	Gráfico de dispersão do teor de carbono no solo com relação à profundidade de coleta, em fragmento conservado localizado no entorno da UHE de Camargos, MG.	61
Gráfico 4.	Gráfico de dispersão do teor de carbono no solo com relação à profundidade de coleta, em fragmento em restauração localizado no entorno da UHE de Camargos, MG.	61
Gráfico 5.	Distribuição do estoque médio de carbono do solo nos fragmentos analisados com relação às profundidades de coleta e seus respectivos erros padrões da média.	70
Gráfico 6.	Análise de componentes principais (PCA) para parâmetros de solo das profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, dados de fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG. Sendo: soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC à pH 7,0 (T), Al^{3+} teor de C, pH, saturação por bases (V), potássio (K), e saturação por alumínio (m) e teor de argila. (argila).	75
Gráfico 7.	Estoque de Carbono da serapilheira ($Mg\ ha^{-1}$) encontrados em fragmento conservado (FC) e fragmento em restauração (FR), localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Sendo 1,2,3,4 e 5 as parcelas analisadas.	80
Gráfico 8.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na parte aérea, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	89
Gráfico 9.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono total, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	89

Gráfico 10.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na serapilheira, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	90
Gráfico 11.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na raiz a 0-10 cm de profundidade, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	90
Gráfico 12.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na raiz a 10-20 cm de profundidade, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	91
Gráfico 13.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente no solo a 0-10 cm de profundidade, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	91
Gráfico 14.	Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente no solo a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores de teor de carbono radicular (%) encontrados para os fragmentos em estudo, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	52
Tabela 2.	Teste de Scott-Knott (5%) para dados médios de teor de carbono radicular (%) para a profundidade de coleta, encontrados em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG.	54
Tabela 3.	Estatística descritiva para valores de estoque de carbono radicular (Mg ha^{-1}) encontrados para os fragmentos em estudo, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	54
Tabela 4.	Proporção acumulada dos estoques de carbono radicular em cada profundidade de solo analisada nos fragmentos considerados, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	56
Tabela 5.	Teste de média Scott-Knott (5%) para valores ponderados de estoque de carbono radicular (Mg ha^{-1}) obtidos por profundidades, localizados em fragmentos florestais entorno da UHE de Camargos, MG.	57
Tabela 6.	Razão entre biomassa de raiz: biomassa da parte aérea para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE Camargos, MG.	59
Tabela 7.	Estatística descritiva de valores de teor de carbono no solo (%) encontrados para os fragmentos florestais, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	62
Tabela 8.	Teste de média Scott-Knott (5%) para valores de teor de carbono no solo (%) obtidos por profundidades, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	65
Tabela 9.	Estatística descritiva de valores de estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) encontrados para os fragmentos florestais, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	66
Tabela 10.	Teste de média Scott-Knott (5%) para valores ponderados de estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) obtidos por profundidades, em fragmentos avaliados no entorno da UHE Camargos, MG.	69
Tabela 11.	Proporção acumulada estoques de carbono em cada profundidade de solo analisada em fragmentos florestais no	71

	entorno da UHE de Camargos, MG.	
Tabela 12.	Valores de biomassa de serapilheira encontrados para os fragmentos florestais, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	77
Tabela 13.	Valores de biomassa, teor e estoque do carbono de serapilheira encontrados para os fragmentos localizados no entorno da UHE de Camargos, MG	78
Tabela 14.	Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre as variáveis obtidas na análise de rotina de solo (fertilidade) e teor, estoque de carbono no solo e biomassa radicular, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	82
Tabela 15.	Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre os valores médios de estoque de carbono das matrizes analisadas, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	83
Tabela 16.	Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre os valores médios de biomassa das matrizes analisadas, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	85
Tabela 17.	Parâmetros dos modelos ajustados para as semivariâncias em função das distâncias, para valores de estoque de carbono para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.	86
Tabela 18.	Análise de variância dos dados de teor de carbono radicular para os fatores analisados (fragmentos e profundidade de coleta), no entorno da UHE de Camargos, MG.	123
Tabela 19.	Análise de variância dos dados ponderados de estoque de carbono radicular para os fatores analisados (fragmentos ou áreas e profundidade de coleta), localizados em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos.	123
Tabela 20.	Análise de variância dos valores de teor de carbono (%) obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG.	123
Tabela 21.	Análise de variância dos valores ponderados de estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}) obtidos nos diferentes fragmentos avaliados no entorno da UHE Camargos, MG.	1243
Tabela 22.	Análise de variância dos valores de teor de carbono da serapilheira (%) obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG.	124

Tabela 23. Análise de variância dos valores de estoque de carbono da serapilheira (Mg ha^{-1}) obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG.

124

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1 Recuperação de ecossistemas florestais	3
2.2 Indicadores de recuperação de ecossistemas degradados	6
2.3 Florestas e ciclagem de carbono	10
2.4 Serapilheira	14
2.5 Carbono orgânico no solo (SOC)	16
2.6 Fatores edáficos relacionados ao sistema radicular e carbono do solo sob florestas	21
2.7 Biomassa radicular	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Descrição do local de estudo	28
3.2 Amostragem, locação e pontos de coletas	32
3.3 Procedimento de coleta de material e análises	33
3.3.1 Serapilheira	34
3.3.2 Biomassa radicular	35
3.3.3 Amostragem de solo	37
3.4 Determinação dos teores de carbono das matrizes analisadas	40
3.5 Análises estatísticas	43
3.5.1 Comparação dos teores e estoques de carbono nos dois fragmentos florestais	44
3.5.2 Análise multivariada-análise de componentes principais	44
3.5.3 Correlação de Pearson	44
3.5.4 Análise espacial dos dados	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Análises da matriz material radicular	49
4.1.1. Teor de carbono radicular	51
4.1.2 Estoque de carbono radicular	54
4.2 Análises da matriz solo	60
4.2.1 Teor de carbono do solo	60
4.2.2. Estoque de carbono do solo	65
4.2.3 Análises químicas e físicas do solo	72
4.3 Análises da matriz serapilheira	77
4.4 Correlações entre variáveis e matrizes analisadas	81
4.5 Espacializações dos estoques de carbono nas áreas de estudo	85
4.6 Estoques globais dos fragmentos florestais	100
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	102

6. REFERÊNCIAS	106
ANEXOS	119
Anexo I. Resultados das análises de solo para o fragmento conservado	119
Anexo II. Resultados das análises de solo para o fragmento em restauração	121
Anexo III. Tabelas de análises de variância e testes de média dos teores e estoques dos compartimentos analisados	123

1 INTRODUÇÃO GERAL

Um ecossistema é considerado recuperado - e restaurado - quando contém recursos bióticos e abióticos suficientes para continuar seu desenvolvimento sem auxílio ou subsídios adicionais, se tornando autogênico.

No monitoramento de áreas em restauração buscam-se atributos que representem, de forma satisfatória, o seu progresso, como a estrutura do reflorestamento (espécies presentes, área basal, espécies regenerantes), as condições físicas da área (histórico do uso da terra, textura do solo, cobertura do solo, presença de processos erosivos) e o monitoramento da fauna (agentes dispersores, decompositores), entre outros (REIS, 2008). Muitos desses atributos estão relacionados, ainda, ao sequestro de carbono atmosférico por esses ecossistemas.

Nos últimos anos, mediante ameaças de aquecimento global pela intensificação do efeito estufa e das consequências relacionadas às mudanças climáticas, surgiram novas demandas para as pesquisas de restauração de florestas: a quantificação do serviço ambiental prestado pelos reflorestamentos com espécies nativas na fixação de carbono e a discussão da eficácia dessa estratégia na redução dos níveis de CO₂ atmosférico (FOSTER; MELO, 2007).

Existe, ainda, a necessidade da realização de estudos específicos de cálculos de captura de carbono pelas florestas, os quais têm sido feitos com base em dados já existentes de produção de biomassa e que, muitas vezes, não correspondem às formações florestais de diferentes regiões do Brasil (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002).

Dada a conhecida importância dos ecossistemas florestais como sumidouro de CO₂ atmosférico, a quantificação desse serviço ambiental prestado pelos reflorestamentos com espécies nativas é de suma relevância. Além disso, o reservatório de carbono no solo se relaciona com características desejáveis de

um solo ideal que cumpre a demanda atual de alimentos e recursos. É importante, assim, quantificar o carbono estocado no solo e na biomassa arbórea de florestas.

Muitos trabalhos foram realizados para avaliar estoques de carbono de áreas sob cultivo agrícola (BAYER; BERTOL, 1999; BAYER; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2000; LEITE et al., 2003; NEVES et al., 2004; CHAVES; FARIA, 2008; CRUZ et al., 2010), principalmente no solo, e em áreas de cerrado (CORAZZA et al., 1999; ALCÂNTARA, 2002; ADUAN; VILELA; KLINK, 2003; PAIVA; FARIA, 2007; TONUCCI et al., 2011; NAIR et al., 2011; PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011; MORAIS, 2012), pastagens (SALTON, 2005; TONUCCI et al., 2011) e floresta tropical (CAMARGO et al., 1999; NOVAES FILHO et al., 2007; SILVA, 2007; GRIMM et al., 2008; MALHI et al., 2009; NEUMANN-COSEL et al., 2011) Entretanto, não existem muitos estudos em áreas em processo de restauração ou, mesmo, em florestas estacionais, como é o caso das áreas objeto deste estudo. Assim, o papel dessas áreas na ciclagem do carbono permanece incompreendido (CAMARGO et al., 1999; NEUMANN-COSEL et al., 2011).

No presente estudo, buscou-se avaliar o comportamento do estoque de carbono no solo e no sistema radicular em fragmentos florestais no entorno da Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos, em Itutinga, MG. Foram avaliados dois fragmentos florestais, sendo um conservado e um em processo de recuperação há cerca de 20 anos. A comparação entre os estoques dos fragmentos foi feita com o objetivo de verificar se o tempo transcorrido de restauração permitiu que o fragmento em restauração se tornasse similar ao fragmento conservado, com relação à estocagem de carbono. Buscou-se também avaliar a distribuição dos estoques dos compartimentos solo, serapilheira e raízes, nos fragmentos florestais considerados.

As hipóteses consideradas neste trabalho foram:

- 1) O fragmento florestal em restauração apresenta estoque de carbono no solo semelhante ao do fragmento conservado;
- 2) O fragmento florestal em restauração apresenta estoque de carbono radicular semelhante ao do fragmento conservado.

2 ESTADO DA ARTE

A revisão de literatura, ou levantamento estado da arte de determinado assunto, é item relevante no desenvolvimento de todo trabalho científico. Foi realizada revisão de literatura a respeito dos assuntos mais importantes relacionados ao foco deste trabalho, como: recuperação de ecossistemas florestais, floresta e ciclagem de carbono, biomassa radicular, carbono no solo e serrapilheira.

2.1 Recuperação de ecossistemas florestais

A recuperação de ecossistemas degradados é prática bastante antiga, havendo exemplos de sua existência na história de diferentes povos, regiões e épocas. Porém, somente recentemente adquiriu caráter de ciência, incorporando conhecimentos sobre os processos ecológicos envolvidos na dinâmica de formações naturais remanescentes, além de práticas essencialmente agronômicas ou silviculturais (RODRIGUES; BRANCALION; ISERNHAGEN, 2009).

A ecologia da restauração é o campo científico que trata daquilo denominado, na prática, de recuperação ambiental (SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL SCIENCE, SER, 2004; CARPANEZZI, 2005). A restauração é a restituição de um ecossistema

degradado o mais próximo possível de sua condição original, enquanto a recuperação é a restituição de um ecossistema degradado a uma condição não degradada, que pode ser diferente da sua condição original (Decreto-Lei n° 9.985, de 2000, em BRASIL, 2000). A recuperação se dá por meio da definição de um plano que considere os aspectos ambientais, estéticos e sociais, de acordo com a destinação que se pretende dar à área, permitindo um novo equilíbrio ecológico.

Para Corrêa (2009), a conceituação de área degradada é ampla e diversa, e, de forma geral, qualquer alteração do meio natural pode ser considerada uma forma de degradação. Pode ser degradada aquela área que diminuiu sua produtividade por causa de manejos agrícolas inadequados, aquela que teve a cobertura vegetal removida, aquela que recebeu excesso de fertilizantes e agrotóxicos, a que teve seu solo poluído ou a que perdeu seus horizontes superficiais do solo por causa de erosão ou de mineração.

Os termos degradação, perturbação, destruição e transformação representam desvios do estado normal desejado de um ecossistema intacto. Degradação corresponde às sutis ou graduais mudanças que reduzem a integridade e a saúde ecológicas. Dano ou perturbação se referem às mudanças agudas e óbvias em um ecossistema. Um ecossistema é destruído quando a degradação ou dano remove dele toda vida macroscópica e, geralmente, arruína o ambiente físico. Transformação é a conversão de um ecossistema em um tipo diferente de ecossistema ou de uso do solo (SER, 2004).

Um ecossistema pode ser decomposto em estrutura e função. A estrutura do ecossistema é compreendida pelos seres vivos: quem são, como se organizam, como se relacionam, sendo a biodiversidade utilizada como sua medida (CARPANEZZI, 2005). Pode ser definida, ainda, como a fisionomia da comunidade em respeito à densidade, à estratificação horizontal e à frequência

de distribuição de espécies e populações e os tamanhos e as formas de vida dos organismos que compõem estas comunidades (SER, 2004).

A função refere-se apenas aos grandes processos básicos de um ecossistema: ciclo da água, ciclo de nutrientes e fluxo de energia, cada um deles composto de uma infinidade de processos menores. Pode ser avaliada por taxas de processos como acúmulo de biomassa aérea ou subterrânea, dinâmica da serapilheira no piso da floresta, evapotranspiração e escoamento superficial da água (CARPANEZZI, 2005). São atributos dinâmicos, incluindo interações entre organismos e seus ambientes (SER, 2004).

Os processos do ecossistema, ou sua função, fazem com que este seja autogênico, ou seja, possua capacidade de autorrenovação. Assim, recuperar um ecossistema significa recuperar estes processos autogênicos ao ponto em que a assistência do restaurador não seja mais necessária (SER, 2004).

Um ecossistema é considerado restaurado quando tem recursos bióticos e abióticos suficientes para continuar seu desenvolvimento, sem auxílio ou subsídios adicionais, sendo capaz de se manter tanto estrutural quanto funcionalmente, demonstrando resiliência aos limites normais de estresse e distúrbio ambientais e interagindo com ecossistemas contíguos, em termos de fluxos bióticos e abióticos e interações culturais (SER, 2004).

O histórico da recuperação de áreas degradadas no Brasil, em especial em áreas de domínio da Mata Atlântica, encontra-se em estágio mais avançado do que as tecnologias existentes para os demais biomas considerados (como Cerrado e Caatinga). As tecnologias para Mata Atlântica foram construídas gradativamente, passando pelas seguintes fases (RODRIGUES; BRANCALION; ISERNHAGEN, 2009):

a) Restauração fundamentada no plantio de árvores, sem critérios ecológicos para escolha e combinação de espécies;

- b) Plantio de árvores nativas brasileiras, fundamentado na sucessão florestal;
- c) Restauração baseada na sucessão determinística, buscando reproduzir uma floresta definida como modelo;
- d) Abandono da cópia de um modelo de floresta madura e foco na restauração dos processos ecológicos responsáveis pela reconstrução de uma floresta;
- e) Incorporação do conceito de diversidade genética na restauração ecológica;
- f) Inserção de outras formas de vida no processo de restauração;
- g) Inserção do conceito de grupos funcionais na restauração, baseada no conhecimento da biologia das espécies;
- h) Visão ecossistêmica do processo de restauração ecológica.

As últimas fases seriam os próximos desafios a serem empreendidos na recuperação dessas áreas.

2.2 Indicadores de recuperação de ecossistemas degradados

Uma vez definida a recuperação ou a restauração de um ambiente degradado, o projeto exige planejamento cuidadoso e sistemático e posterior monitoramento das etapas e do desenvolvimento da nova cobertura vegetal. A metodologia de monitoramento pode ser realizada por comparação direta com outras áreas não perturbadas, análise de atributos da área em recuperação ou análise da trajetória, mediante um ecossistema de referência (SER, 2004).

A Declaração de Santiago define indicador como sendo “uma das medidas escolhidas pelo critério para se avaliar sustentabilidade e que, ao ser medida periodicamente, demonstra a existência ou não de tendências” (RODRIGUEZ, 1998).

Indicadores ambientais são variáveis referentes a diversos aspectos da morfologia, fisiologia, florística, fenologia, características climáticas e edáficas, entre outros, que, registrados periodicamente e devidamente organizados, fornecem evidências da evolução do comportamento do ecossistema como um todo e de seus componentes (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

O número de variáveis de um ecossistema potencialmente úteis é grande, para que todas sejam efetivamente utilizadas para avaliação num período de tempo razoável. A seleção de quais variáveis medir e quais ignorar exige pragmatismo e julgamento por parte do avaliador. Padrões de desempenho fornecem uma base empírica para determinar se as metas do projeto foram cumpridas (SER, 2004).

A escolha de um determinado conjunto de indicadores é resultado da adoção de um critério para avaliação do desempenho daquilo que se quer observar. Indicadores podem ser comparados a medidores de desempenho (RODRIGUEZ, 1998).

Martins (2007) afirma que é importante considerar que a avaliação da recuperação pelos indicadores é função das metas e dos objetivos pretendidos. Assim, não se deve cobrar uma elevada biodiversidade num projeto muito localizado, cujo objetivo tenha sido proteger o solo e o curso d'água, por exemplo, de efeitos negativos da erosão numa área extremamente degradada. Modelos de recuperação mais complexos, envolvendo uma diversidade inicial maior de espécies, tendem a promover uma recuperação mais rápida da biodiversidade e da funcionalidade do ecossistema.

Propostas de monitoramento de ecossistemas florestais podem se basear na premissa de que o desenvolvimento econômico é necessário para a satisfação das necessidades presentes e futuras da sociedade. Entretanto, para que isso ocorra de forma economicamente eficiente, socialmente justa e ecologicamente adequada, é fundamental o monitoramento constante para que eventuais

correções de eventos que coloquem em risco as necessidades humanas possam ser adotadas em tempo (RODRIGUEZ, 1998).

Os critérios indicadores de sustentabilidade devem ser tomados com relação ao equilíbrio dinâmico da bacia hidrográfica na qual a floresta plantada se localiza, pois entradas e saídas de energia e nutrientes podem ser mais facilmente quantificadas, devendo ser avaliados em suas variáveis ao longo do tempo, de forma repetida (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

Na escolha dos indicadores de sustentabilidade devem ser consideradas as seguintes características desejáveis para um bom indicador: ser simples e de fácil interpretação; ter estabilidade, consistência e relevância; ter capacidade de mostrar tendências; apresentar baixo custo das operações, permitindo que o monitoramento seja realizado de forma contínua; apresentar facilidade de coleta e registro de dados; incorporar bem as informações disponíveis, tendo base científica; ser simples, mas precisamente definido, padronizado, orientado ao manejo; ser objetivo; não ser ambíguo; ser disponível periodicamente e permitir monitoramento contínuo em diversas regiões representativas de toda a área florestada (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998; BAKER; FERREIRA; SAILE, 1997).

Tão importante quanto a escolha dos indicadores é a sua confiabilidade para predizer o seu comportamento em longo prazo, refletindo a evolução da restauração de determinado ecossistema (REIS, 2008). Para Poggiani; Stape; Gonçalves (1998), os indicadores de sustentabilidade, quando bem escolhidos, podem ser utilizados para interpretar fenômenos naturais e permitem estabelecer relações de causa-efeito e fazer previsões sobre o comportamento, em médio e em longo prazo, quanto à sustentabilidade do ecossistema. Os dados, devidamente armazenados e organizados, permitirão detectar pontos críticos de funcionamento do ecossistema florestal, estabelecer correlações entre diferentes

eventos e levantar hipóteses para embasar novas pesquisas com o objetivo final de averiguar a validade dos indicadores escolhidos.

É importante definir indicadores de sustentabilidade que sirvam de referência para avaliar fragmentos e plantações nativas quanto à sua capacidade de manutenção das populações das espécies existentes. Áreas de preservação permanente (APPs) e reservas legais (RL) poderiam ser quantificadas e diferenciadas por parâmetros adequados quanto à sua importância, no sentido de armazenar populações viáveis de espécies de nossas florestas tropicais (GANDARA; KAGEYAMA, 1998).

Os indicadores podem ser relacionados com aspectos climáticos, edáficos, ecológicos, fenológicos e fisiológicos, entre outros. Uma vez registrados e devidamente organizados ao longo do tempo, permitem estabelecer relações claras de causa e efeito entre a produção de fitomassa e os fatores físicos, químicos e bióticos do ambiente circundante. Permitem, ainda, acompanhar diferentes formas de impacto que as plantações florestais causam sobre o ambiente, tomando como referência o ecossistema natural primitivo (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

A complexidade de ecossistemas florestais tropicais traz dificuldades para a obtenção de dados e a elaboração de bons indicadores para o monitoramento de mudanças causadas pela atividade antrópica. Índices relacionados a parâmetros demográficos e genéticos, como riqueza de espécies arbóreas, diversidade genética dentro de populações e espécies indicadoras, podem ser utilizados (GANDARA; KAGEYAMA, 1998).

Existem diversos fatores que podem ser utilizados como indicadores de recuperação ou sustentabilidade. São eles: crescimento das árvores em altura, diâmetro e acúmulo de fitomassa, variações da fitomassa no espaço, características da copa, densidade arbórea do povoamento, evolução da área basal, área foliar, macro e micronutrientes nas folhas, água no solo, matéria

orgânica, fertilidade do solo e grau de compactação, produção de serapilheira e sua velocidade de decomposição, sustentabilidade da produtividade biológica, estimativas do número de espécies de plantas ou animais existentes na área, ataques de pragas, diversidade da vegetação do sub-bosque, produção e qualidade da água na bacia florestada, entre outros (GANDARA; KAGEYAMA, 1998; POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998; MARTINS, 2007; REIS, 2008).

2.3 Florestas e ciclagem de carbono

As florestas, os sistemas agroflorestais e os solos podem funcionar tanto como reservatórios como fontes de carbono, dependendo de como e com que propósito são manejados e como são utilizados os seus produtos. As florestas atuam como reservatórios quando as plantas absorvem carbono pelo processo fotossintético, retendo-o na biomassa, principalmente pela forma de madeira. Ao queimarem-se, o processo é revertido, com consumo ainda de oxigênio do ar no processo de combustão e liberação do carbono retido na madeira (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002).

Globalmente, as fontes de liberação de carbono decorrentes de mudanças no uso da terra têm sempre excedido os usos da terra tidos como reservatórios (HOUGHTON; HALL; GOETZ, 2009).

A capacidade de absorção e fixação de carbono pelas árvores depende da espécie, da taxa de crescimento, da longevidade, do sítio, do clima e do período de rotação, além da textura do solo, entre outros. Em geral, sequestram mais carbono as florestas secundárias e as plantações jovens (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002).

Arevalo, Alegre e Vilcahuaman (2002) afirmam que florestas primárias e plantações maduras atingem um estágio de equilíbrio quanto à absorção de

carbono, já que liberam a mesma quantidade mediante a decomposição da madeira morta e das árvores em senescência. Entretanto, parece não haver consenso com relação a isso. Luysaert et al. (2008), analisando dados de literatura, observaram que florestas de 800 anos ainda têm produtividade primária líquida positiva.

Malhi et al. (2009) afirmam que florestas mais antigas e áreas com solo de baixa fertilidade podem apresentar menor eficiência no uso do carbono do que florestas que sofreram distúrbios recentes e florestas com solos mais férteis. Houghton, Hall e Goetz (2009) afirmam que a biomassa viva varia de menos de 5 Mg C ha⁻¹, em áreas de pastagens sem cobertura arbórea, terras cultivadas e desertos, para mais de 300 Mg C ha⁻¹, em algumas florestas tropicais. Além disso, esses valores variam com o espaço, o tempo, o ecossistema considerado e as condições sazonais de clima e precipitação e presença de distúrbios na área.

Estima-se que um plantio arbóreo pode absorver da atmosfera em torno de 10 Mg de C por ha.ano⁻¹. Estima-se também que 45% da biomassa vegetal seja carbono. Em florestas tropicais, a biomassa seca pode variar entre 150 e 382 Mg ha⁻¹; sendo assim, o carbono armazenado varia de 67,5 a 171 Mg ha⁻¹ (ALEGRE et al., 2000 citados por AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002). Houghton, Hall e Goetz (2009) afirmam que 50% da biomassa vegetal correspondem ao carbono. Ainda segundo os mesmos autores, as florestas contêm de 70% a 90% da biomassa terrestre, tanto aérea quanto subterrânea. Cairns, Brown e Helmer (1997) ainda afirmam que a biomassa aérea florestal corresponde a 70% a 90% de toda a biomassa florestal.

Em solos sob vegetação natural, o balanço entre as adições e perdas de carbono orgânico leva a um estado de equilíbrio dinâmico, em que praticamente não existe variação no teor de carbono orgânico no tempo (BAYER; MIELNICZUK, 1999 citado por OLSZEVISKI et al., 2007). Lal (2007) afirma

que cerca de 120 Pg de C-CO₂ atmosférico é fotossintetizado em carboidratos e outros compostos orgânicos, pelas plantas.

Em estudos sobre estoque de carbono do solo na Flórida, EUA, no Cerrado brasileiro e em regiões da Espanha, numa comparação com outros trabalhos semelhantes, Nair et al. (2011) concluíram que: o montante de carbono estocado depende da qualidade do solo, especialmente da fração argila-silte; sistemas de plantio com espécies arbóreas, comparados com sistemas sem espécies arbóreas, estocam mais carbono nas camadas mais profundas sob mesmas condições e o conteúdo do carbono orgânico no solo está associado com riqueza das espécies e densidade arbórea.

Fujisaka et al. (1999), avaliando o efeito da mudança do uso da terra na emissão de carbono, de florestas para culturas anuais e pastagens, em áreas de floresta amazônica, em Rondônia, verificaram que a floresta armazena cerca de 200 Mg C ha⁻¹, sendo 80% na parte aérea e 16% na forma de carbono orgânico no solo e 4% nas raízes. Os autores observaram considerável redução destes estoques pelo corte e a queima da vegetação.

Malhiet al. (2009), avaliando a produtividade, a alocação e o estoque de carbono em florestas amazônicas situadas em Manaus (AM), Tapajós e Caxiuanã (PA), encontraram valores de produtividade primária líquida de 10,1±1,4 Mg Cha.ano⁻¹, para Manaus; 14,4±1,3 Mg Cha.ano⁻¹, para Tapajós e 10,0±1,2 Mg C ha.ano⁻¹, para Caxiuanã. Os autores afirmam, ainda, que cerca de 20% a 30% do carbono fixado são subterrâneos.

O carbono orgânico total de um solo é muito influenciado pela composição de espécies presentes. Assim, na maioria das circunstâncias, o potencial de sequestro de carbono no solo deve levar em consideração as características das plantas que se encontram na área (GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004).

A fração da biomassa acima do solo corresponde ao maior contribuinte da produtividade primária líquida (de 70% a 80% do total), em florestas tropicais úmidas na Amazônia (MALHI et al., 2009).

Solos sob florestas ou em processo de recuperação com vegetação arbórea em regiões tropicais podem sequestrar, em média, 50 Mg ha⁻¹, em 30 anos, o que leva a uma estimativa de potencial de acumulação de 70 milhões de Mg de C. ano⁻¹, incluindo-se todas as áreas assim consideradas nos trópicos (BOWUMAN; LEEMANS, 1995, citado por GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004).

Assume-se que a matéria orgânica penetra no solo de forma mensal, gradualmente. Tanto a temperatura do solo (que, convenientemente, pode ser considerada a mesma temperatura média mensal do ar) como a umidade do solo influenciam a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (JENKINSON et al., 1990).

No estudo da biomassa, componentes abaixo do solo, como raízes, rizomas e microrganismos no solo, são, algumas vezes, incluídos na análise da biomassa, mas nem sempre. Nesses estudos é mais comum a análise da biomassa acima do solo. São ainda menos comuns os estudos que incluem a matéria orgânica do solo, ou carbono orgânico do solo, que inclui, por exemplo, partes de plantas que estão em processo de decomposição (HOUGHTON; HALL; GOETZ, 2009).

Florestas secundárias e florestas plantadas - ou recuperadas - não apresentam grandes diferenças quanto à alocação de carbono - se natural ou plantada. Essas florestas têm ganhado importância, recentemente, por funcionarem como sumidouros de carbono, principalmente no solo. Apesar disso, a dinâmica de carbono no solo sob esses ecossistemas é ainda pouco entendida (NEUMANN-COSEL et al., 2011).

Richter et al. (1999), avaliando uma área sob florestas de *Pinus taeda*, implantadas há 40 anos, que previamente foi usada para cultivo agrícola, verificaram que o solo, sob a floresta de pinus, teve um aumento de 3,925 g.m⁻² de carbono no horizonte O, o que, segundo os autores, representa um acúmulo de carbono de cerca de 100 g.m⁻², por 40 anos.

A dinâmica de carbono orgânico no solo em florestas secundárias é ainda bastante obscura e padrões contraditórios têm sido relatados para estoque de carbono em gradientes de cobertura vegetal (NEUMANN-COSEL et al., 2011).

2.4 Serapilheira

O conhecimento do comportamento das espécies num ecossistema estável, devido às variações sazonais de clima, é de primordial importância para se estabelecer planos e programas de recuperação de áreas degradadas. A importância de se avaliar a produção de serapilheira está na compreensão dos reservatórios e dos fluxos de nutrientes nestes ecossistemas, que constituem a principal via de fornecimento de nutrientes, por meio da mineralização dos restos vegetais (SOUZA; DAVIDE, 2001).

A serapilheira é um componente vegetacional que é a principal fonte de adição de matéria-orgânica no solo da floresta, sendo 70% de sua composição tomada por folhas num talhão florestal jovem. A formação de serapilheira segue um padrão sazonal, de acordo com condições climáticas ao longo do ano e o regime de renovação foliar das espécies da área. A decomposição da serapilheira também varia com as condições climáticas do ano, sendo maior em períodos quentes e úmidos, como no verão (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

Compreende material vegetal proveniente da biomassa aérea (folhas, flores, ramos, cascas, frutos e sementes) e, em menor proporção, de origem animal (restos animais e material fecal) depositado na superfície do solo de uma

floresta. É um sistema aberto com entradas pela vegetação e saídas pela decomposição, na qual libera nutrientes e matéria orgânica ao solo (MARTINS, 2007); material que permanece no solo até ser fragmentado e decomposto por processos físico-químicos e bióticos (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003).

Seja qual for o tipo de floresta, a produção de serapilheira representa o primeiro estágio de transferência de nutrientes e energia da vegetação para o solo, pois a maior parte dos nutrientes absorvidos pelas plantas retorna ao piso florestal por meio da queda de serapilheira ou lavagem foliar (CALDEIRA et al., 2008).

Em ecossistemas florestais, a produção e a decomposição de serapilheira constituem os principais meios de aporte de matéria orgânica e transferência de nutrientes, sendo considerados, assim, processos fundamentais do ciclo biogeoquímico nesses sistemas (KONIG et al., 2002 citado por MENEZES et al., 2010).

Aduan, Vilela e Klink (2003) citam valores de estoques de carbono na serapilheira para cerrado *sensu stricto* da ordem de 3,5 Mg ha⁻¹ e estoque de 2,42 Mg ha⁻¹ para cerrado denso, para áreas há mais de 20 anos sem fogo. Em remanescentes florestais montanos de Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa Montana), localizados no Rio de Janeiro, Cunha et al. (2009) encontraram estoques de carbono na serapilheira de cerca de 3,5 e 3,7 Mg ha⁻¹. Em áreas sob plantio de *Pinus taeda*, no Rio Grande do Sul, Balbinot et al. (2003) encontraram estoque de carbono orgânico para a serapilheira de 7,7 Mg ha⁻¹. Tal valor pode ter sido maior devido ao alto volume de acículas em plantios de *Pinus sp* e à baixa taxa de decomposição destas.

A quantificação da serapilheira ao longo do ano permite estimar a produção anual por hectare. Baixa produção de serapilheira pode indicar a ocorrência de problemas, no que se refere à ciclagem de nutrientes, que se inicia

com a deposição da serapilheira, sua posterior decomposição e a liberação dos nutrientes (MARTINS, 2007).

São muitos os fatores que influenciam a decomposição da serapilheira, tais como tipo de vegetação, estágio sucessional da vegetação, deciduidade, grau de herbivoria, latitude, altitude, relevo, temperatura, precipitação, disponibilidade de luz, fotoperíodo, evapotranspiração, disponibilidade hídrica e fertilidade do solo, entre outros (BRUN et al., 2001).

A coleta de serapilheira pode ser feita semestralmente em amostras de 10 parcelas de 0,25m² (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998), com a instalação de coletores (molduras de madeira ou metal) de 0,5 x 0,5 m ou 1,0 x 1,0 m, com laterais de 10 a 20 cm e fundo de tela de náilon de malha fina (1,0 mm) mantida a cerca de 10 cm acima da superfície do solo (MARTINS, 2007). Após a secagem, pode-se quantificar a serapilheira acumulada. A taxa instantânea de decomposição da serapilheira é conseguida pela diferença entre serapilheira depositada e serapilheira acumulada por um intervalo de tempo (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

Autores afirmam que a manutenção dos ecossistemas florestais é dependente da ciclagem de nutrientes, função da produção e da decomposição da serapilheira. Sendo assim, a serapilheira tem sido recomendada como um indicador de áreas degradadas por vários pesquisadores (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998; RODRIGUES; GANDOLFI, 1998; MARTINS, 2007; MENEZES et al., 2010).

2.5 Carbono orgânico no solo (SOC)

A matéria orgânica do solo é o maior estoque de carbono da maioria dos ecossistemas terrestres e, talvez, o mais complexo (MENEZES et al., 2010), além de possuir importante papel no ciclo global do carbono (PAUL;

VELDKAMP; FLESSA, 2008). É constituído por um grande número de moléculas orgânicas diferentes, associadas, de diversas maneiras e intensidades, à matriz do solo (MENEZES et al., 2010).

O sequestro de carbono no solo é a transferência e estocagem segura do CO₂ atmosférico em reservatórios no solo, compreendendo tanto o carbono orgânico do solo (também chamado de SOC), muitas vezes referido como a matéria orgânica do solo ou húmus, quanto o carbono inorgânico, na forma de carbono elementar, carbonatos primários ou secundários (LAL, 2008).

O carbono no solo é o maior reservatório dentre os reservatórios terrestres. É estimado por possuir um dos maiores potenciais para sequestro de carbono no mundo (GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004) e, segundo Lal (2008), corresponde ao terceiro maior reservatório de carbono global, só perdendo para o carbono estocado em oceanos e os reservatórios de combustíveis fósseis.

Os principais drenos de carbono são os oceanos, o solo e a atmosfera, sendo que o solo tem sofrido alterações, como degradação e desertificação, o que diminui sua capacidade de absorção de carbono (LAL, 2008). O potencial global de sequestro de carbono pelo solo é de 0,6 a 1,2 Pg de C.ano⁻¹, que pode compensar em 15% das emissões globais de CO₂ (LAL, 2007).

A transformação de ecossistemas naturais em áreas agrícolas ou outras atividades antrópicas constitui uma importante causa do aumento da concentração de CO₂ atmosférico (HOUGHTON, 2003; OLSZEVISKI et al., 2007). A atividade antrópica é apontada como principal causa do aumento dos níveis de CO₂ atmosférico. Como exemplos dessa atividade citam-se a queima de combustível fóssil e as mudanças no uso da terra (HOUGHTON, 2003; LAL, 2008), que emitiram, respectivamente, 6,5±0,4 e 2,0±0,8 Pg de C por ano, durante a última década (HOUGHTON, 2003).

Alterações no uso da terra de solos nativos para áreas de cultivo liberam de 25% a 30% do carbono orgânico estocado na camada superficial (um metro

superior). Além do uso da terra e das mudanças desse uso, o manejo utilizado também influencia a absorção ou a liberação de carbono (HOUGHTON, 2010).

Neumann-Cosel et al. (2011) afirmam que, de acordo com dados de literatura, solos tropicais estocam de 184,5 a 435 Pg C, na camada de 0 a 1 m de profundidade.

Solos sob vegetação arbórea, em regiões tropicais podem sequestrar, em média, 50 t de C.ha⁻¹, em 30 anos, o que leva a uma estimativa de potencial de acumulação de 70 milhões de t de C.ano⁻¹, considerando-se todas as áreas nos trópicos (BOWUMAN; LEEMANS, 1995, citado por GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004).

Um incremento na capacidade de absorção de carbono do solo pode ser obtido pelo aumento na fertilidade do solo, pela aplicação de N ou P, por exemplo. A finalidade de estratégias de manejo de água e de solo é preencher essa capacidade de absorção de carbono pela conversão para um uso apropriado da terra ou a restauração de um ecossistema. A restauração do reservatório de carbono no solo pelo aumento da sua absorção também leva a um aumento na qualidade do solo e resiliência (LAL, 2008).

A capacidade dos ecossistemas de emitirem ou sequestrarem carbono atmosférico é determinada por grande variedade de processos físico-químicos e bióticos que atuam em direções e em intensidades diferentes (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003). Lal (2008) afirma que atividades como supressão da vegetação, aração, agricultura extensiva, balanço negativo de nutrientes no solo, remoção de resíduos e pastagem excessiva contribuem para o esgotamento do reservatório de carbono orgânico, acelerando processos de degradação do solo. A diminuição do reservatório de carbono orgânico do solo leva a um declínio da qualidade do solo e a emissões de CO₂ e outros gases para a atmosfera.

Um bom sistema de sequestro de carbono deve ter as seguintes características: alta capacidade de absorção de carbono, alta estabilidade na

absorção, baixo custo, impactos ambientais positivos ou impactos negativos mínimos e numerosos benefícios auxiliares (LAL, 2008).

Nos diversos sistemas de uso da terra, o carbono é liberado pela vegetação após sua derrubada e queima, e liberado pelo solo depois das intervenções frequentes no seu preparo. Esta intervenção no solo ocasiona rompimento do estado estável do carbono na biomassa, aumento na velocidade de mineralização da matéria orgânica e, como consequência, liberação do carbono que se encontra no interior de agregados do solo. Entretanto, práticas de manejo e práticas conservacionistas de preparo de solo adequadas podem potencialmente mitigar e reduzir as emissões de carbono, sequestrando-o, capturando-o e mantendo-o pelo maior tempo possível na biomassa, no solo e nos oceanos (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002).

Atividades como reflorestamento, plantio direto, uso de cobertura morta, manejo integrado de nutrientes no solo, pastagem controlada, sistemas agrofloretais, uso de adubação e biofertilizantes contribuem para aumento do reservatório de carbono orgânico no solo. Estas atividades acentuam processos de restauração do solo, formação de húmus, iluviação, deposição e fortalecimento dos ciclos de água e outros elementos, bem como formação de carbonatos secundários (LAL, 2008).

Nair et al. (2011) afirmam que o histórico do uso da terra de um local parece ter um primordial papel na determinação do montante do carbono estocado nos solos, de tal forma que o uso prévio da terra tem maior efeito do que qualquer outro fator na determinação do conteúdo de carbono naquele solo.

Processos erosivos removem o carbono orgânico do solo, uma vez que este possui uma baixa densidade (0,8 a 1,2 Mg m⁻³) e por estar concentrado na camada superior do solo (LAL, 2008). Na maioria dos solos de sistemas agrícolas, já foram perdidos de 50% a 75% do seu reservatório original de carbono, apresentando magnitude de perdas variando de 30 a 60 Mg C ha⁻¹. A

diminuição deste reservatório é agravada por atividades como drenagem do solo, aração, remoção de resíduos agrícolas, queima de biomassa e degradação do solo por processos erosivos, entre outros. A perda de carbono é maior em solos de textura mais grosseira - como os solos arenosos, que possuem drenagem interna excessiva, baixa atividade de argila e baixa agregação de partículas – e solos propensos a processos erosivos e outros processos degradantes (LAL, 2007).

Medições e monitoramento do estoque de carbono no solo são importantes em projetos agrícolas, áreas submetidas a reflorestamentos, a sistemas agroflorestais, bem como a projetos que busquem evitar desmatamento em áreas nativas, mesmo que os custos para tal possam ser um pouco altos (GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004).

Para Lal (2007), a maioria dos solos em que práticas agrícolas são exercidas tem um reservatório de carbono abaixo do seu potencial ecológico. A adoção de práticas de manejo, bem como sistemas de cobertura perene do solo e restauração de solos degradados, pode aumentar o seu reservatório de carbono. Ainda segundo este autor, a taxa de sequestro de carbono orgânico no solo é de 300 a 500 kg C ha.ano⁻¹, em solos sob práticas agrícolas intensivas e de 0,8-1,0 Mg ha.ano⁻¹, em solos de áreas úmidas em restauração.

Mecanismos principais de sequestro de carbono do solo incluem a agregação das partículas do solo, humificação dos biossólidos aplicados, transferência de carbono orgânico entre as profundidades do solo, formação de carbonatos secundários e lixiviação de bicarbonatos na água do solo. A diminuição do reservatório de carbono orgânico do solo leva ao declínio da qualidade, com balanço negativo de nutrientes e de água, alto índice de erosão e alta evaporação da água no solo, redução da biodiversidade do solo com impacto na atividade da macrofauna. Além disso, a queda da qualidade do solo reduz a sua produtividade primária, diminui a qualidade e a quantidade de biomassa

produzida e retornada ao solo, e também acentua a depleção de carbono no solo (LAL, 2007).

Solos localizados em terrenos não propensos à erosão e que possuem umidade e temperatura mais favoráveis sequestram maior quantidade de carbono orgânico do que aqueles solos altamente susceptíveis à erosão. A manutenção de práticas de restauração e conservação de solo por mais tempo é essencial para a permanência do carbono sequestrado no solo. O tempo de residência desse carbono no solo vai depender de fatores, como retorno de resíduos agrícolas, sendo maior que sua taxa de decomposição; minimização de práticas agrícolas, como aração; incorporação de carbono orgânico a camadas mais profundas do perfil do solo; exigências nutricionais do solo cumpridas (principalmente N, P e S) e boas condições de solo (teor de argila, posição na paisagem), entre outros (LAL, 2007).

A profundidade de análise de estoque de carbono no reservatório do solo pode variar em função do projeto, das condições de sítio, das espécies e da profundidade em que se espera haver maior variação desse estoque. Devido à alta concentração de carbono orgânico no solo nas camadas mais superficiais e sua queda exponencial em camadas mais profundas, as medições devem ser até, no mínimo, 30 cm de profundidade (GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004).

2.6 Fatores edáficos relacionados ao crescimento radicular e estoque de carbono de solo sob florestas

O sistema radicular das plantas depende das características edáficas do local. O volume de solo disponível para as raízes, determinado pela profundidade do solo e impedimento físico, é um dos principais fatores que influenciam o crescimento arbóreo, afetando a disponibilidade de água e de nutrientes. Um melhor conhecimento sobre a densidade e a distribuição em

profundidade das raízes e sua relação com as propriedades edáficas do solo podem constituir uma importante fonte de informações para entender como ocorre o crescimento das plantas em um determinado local (GAITÁN; PENÓN; COSTA, 2005).

Segundo Mello e Gonçalves (2008), o que determina a distribuição das raízes no solo é o genótipo da espécie, mas pode sofrer, ainda, influência de outros fatores inerentes ao solo, como fertilidade, densidade, disponibilidade de oxigênio, textura, temperatura e, também, pelas circunstâncias em que se encontra o meio no qual a espécie se desenvolve, tais como competição e espaçamento entre árvores.

A infiltração de água é um dos fenômenos que melhor refletem as condições físicas internas do solo, pois uma boa qualidade estrutural leva a uma distribuição de tamanho de poros favorável ao crescimento de raízes e à capacidade de infiltração de água no solo. Com relação à densidade do solo, quando ocorre a degradação de sua estrutura, o efeito imediato é no seu aumento, acarretando a redução da macroporosidade (ALVES; CABEDA, 1999 citado por ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007).

Os principais atributos físicos do solo que têm sido utilizados como indicadores de recuperação de uma área degradada são macro e microporosidade, densidade, resistência mecânica à penetração, condutividade hidráulica, estabilidade de agregados, curva de retenção de água no solo, infiltrabilidade e profundidade de crescimento das raízes (ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; LIMA et al., 2007a; ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007), atributos considerados essenciais no estabelecimento de um povoamento florestal.

Lima e Zakia (1998) mostram a importância da cobertura vegetal na infiltração de água no solo, sendo: 59,9 mm/h para piso florestal intacto, 49,3

mm/h para piso removido mecanicamente, 40,1 mm/h para piso queimado anualmente e 24,1 mm/h para pastagem degradada.

A textura do solo é indicada, por muitos autores (GARCÍA-OLIVA; MASERA, 2004; LAL, 2007; PAUL; VELDKAMP; FLESSA, 2008; MALHI et al., 2009), como fator importante na determinação do seu teor de carbono, pois solos argilosos, por terem partículas mais agregadas, têm maior estoque de carbono, quando comparados àqueles com maior teor de areia. Além disso, o material de origem também se mostrou importante fator de controle do carbono orgânico do solo (PAUL; VELDKAMP; FLESSA, 2008).

Botelho et al. (2001) afirmam que, na implantação de florestas de proteção, por se tratarem de espécies de porte arbóreo, e pelo fato de as raízes aprofundarem-se muito além da camada superficial do solo, é recomendável que se realize análise de solo abaixo da camada arável. Assim, devem ser feitas amostragens de 20-40 cm, 40-60 cm ou em maiores profundidades, a fim de detectar barreiras físicas (pedregosidade, compactação) ou químicas (toxidez por alumínio ou deficiência de cálcio) que impeçam o crescimento radicular, limitando a absorção de nutrientes e diminuindo a resistência da planta aos períodos de seca ou veranicos.

Lal (2007) comenta que o uso do solo é importante na determinação dos estoques de carbono, sendo que, de forma geral, um uso perene de solo, que causa menor distúrbio e adiciona maiores montantes de biomassa, aumenta mais o reservatório de carbono do que cultivos sazonais. Ainda segundo o mesmo autor, ecossistemas com maior produtividade primária líquida, contínua cobertura de solo e menores distúrbios têm maiores reservatórios de carbono, e vice-versa.

2.7 Biomassa radicular

A biomassa de origem florestal cumpre papel decisivo no contexto da redução de impactos ambientais negativos do efeito estufa e das suas implicações nas mudanças climáticas, por ser fonte energética mais racional e também por absorver carbono atmosférico – na forma de CO₂ - e acumulá-lo em sua estrutura. Portanto, é crescente o interesse pelos estudos em biomassa e conteúdo de carbono nas florestas (CAIRNS; BROWN; HELMER, 1997; SANQUETTA; BALBINOT; ZILIOTO, 2004).

Uma melhor compreensão da alocação da biomassa florestal, e dos fatores que a regulam, é necessária para muitas aplicações, incluindo mudanças nas avaliações da estrutura da floresta, ciclos biogeoquímicos e vários aspectos de alterações globais (CAIRNS; BROWN; HELMER, 1997).

Um dos aspectos mais relevantes nos estudos de fixação de carbono em florestas é a variável biomassa, que precisa ser determinada e estimada de forma fidedigna, caso contrário não haverá consistência na quantificação do carbono fixado nos ecossistemas florestais (SANQUETTA; BALBINOT; ZILIOTO, 2004).

A biomassa subterrânea de uma vegetação compreende todos os órgãos vivos localizados abaixo da linha do solo, tendo como função fixar a vegetação, captar e transferir recursos, como água e nutrientes, além de estocar reservas. Os órgãos subterrâneos também podem assumir a função de refúgio contra distúrbios que afetam a parte aérea, como fogo e herbivoria foliar (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003).

O sistema radicular é responsável direto pelo crescimento e a sustentação das plantas, em especial das espécies florestais. Ele desempenha funções vitais em uma planta, sendo dividido em raízes finas e raízes grossas, com funções diferenciadas. As primeiras são responsáveis por absorção, enquanto as grossas

são responsáveis, principalmente, pela fixação das plantas no solo. As raízes finas representam entre 90% e 95% do comprimento total do sistema radicular e são as principais estruturas em contato com as frações líquidas e sólidas do solo (GAITÁN; PENÓN; COSTA, 2005).

Vários fatores podem determinar a razão raiz/parte aérea de uma vegetação, bem como a alocação do carbono radicular e do crescimento radicular. Entre esses fatores destacam-se interações do genótipo da espécie e uma série de processos complexos e dinâmicos que incluem o ambiente como um todo, o solo e a planta. Entre os fatores inerentes ao solo destacam-se fertilidade, textura, densidade do solo, disponibilidade de oxigênio e água, temperatura entre outros. Esta biomassa subterrânea pode variar também com a idade e o estágio sucessional da vegetação ou com o grupo funcional das espécies e, além disso, latitude (região tropical ou temperada), tipo de árvore (gimnospermas ou angiospermas), idade, precipitação, temperatura, relação temperatura/precipitação (como um índice de disponibilidade de água) e textura do solo (CAIRNS; BROWN; HELMER, 1997).

Lima et al. (2007b) citaram, como fatores que influenciam a biomassa radicular para o estado do Rio de Janeiro, contrastantes condições de clima e solo, além da composição e da estrutura dos diferentes fragmentos florestais que ocorrem na paisagem e expressiva variação climática. A diminuição da umidade do solo é apontada, em muitos estudos, como fator que força a razão raiz/parte aérea no sentido de maior biomassa radicular (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003).

Em ecossistemas florestais, o retorno da matéria orgânica ao solo e a ciclagem de nutrientes se dão especialmente por deposição da biomassa da parte aérea, sendo também importantes as contribuições da biomassa radicular na dinâmica da matéria orgânica e de nutrientes nesse sistema (MENEZES et al., 2010). Ainda segundo os autores, a importância das raízes finas vai além de suas

funções primárias de absorção de água e nutrientes, pois sua rápida renovação contribui de forma marcante nas adições de matéria orgânica ao solo, tendo importante função reguladora dos ciclos de carbono e nitrogênio. O crescimento de raízes finas pode representar até 50% da produtividade primária líquida, sendo uma das principais vias pela qual o carbono é adicionado ao solo (VOGT, 1991 citado por MENEZES et al., 2010).

Estimativas de biomassa acima do solo baseadas em metodologias bem estabelecidas são abundantes, enquanto estimativas de biomassa radicular baseadas em métodos padronizados são bem menos comuns (CAIRNS; BROWN; HELMER, 1997).

Entretanto, algumas estimativas atuais de biomassa florestal contêm erros não dimensionados pela escassez de dados dos sistemas radiculares. Isto se deve às custosas estratégias de amostragem de raízes, que demandam grande quantidade de trabalho manual. Alguns autores recomendam um valor geral de 20% da parte aérea para quantificar biomassa radicular, apesar de outros já haverem demonstrado que o clima, o solo e a qualidade da serapilheira devem ser levados em conta (LIMA et al., 2007b; FORSTER; MELO, 2007).

De forma similar, em estudo que revisou cerca de 160 trabalhos, distribuídos pelo planeta, sobre biomassa radicular, foi verificado que a relação entre biomassa de raízes e parte aérea tende a ficar entre 0,20 a 0,30, sendo seu valor médio de 0,26 (CAIRNS; BROWN; HELMER, 1997).

Em estudos nos quais foi avaliada a relação biomassa aérea e biomassa radicular para diferentes áreas de domínio do cerrado no Brasil, verificou-se que, nesse bioma, o grande estoque de carbono na biomassa está contido nos órgãos subterrâneos (CASTRO; KAUFFMANN, 1998). Em trabalhos com gramíneas forrageiras no Bioma Cerrado, dados mostraram que, em média, os tecidos subterrâneos respondiam por 60% a 70% da biomassa vegetal total (KANNO et al., 1999 citado por ADUAN; VILELA; KLINK, 2007).

As raízes escavadas devem ser bem limpas, de preferência com água, se possível, para depois serem pesadas. Alguns estudos requerem a separação das raízes por classe dimensional (diâmetro), utilizando classes (raízes grossas, médias e finas, por exemplo). É muito difícil separar raízes mortas de raízes vivas, mas, quando isso for possível, deve ser feito (SANQUETTA; BALBINOT; ZILIOTO, 2004).

Na literatura observa-se que, em geral, a grande parte da biomassa (cerca de 70% ou mais) de raízes fixa-se até 1 m de profundidade, mas isso depende da profundidade do solo e da espécie analisada (SANQUETTA; BALBINOT; ZILIOTO, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste item são descritas as áreas de estudo e as técnicas utilizadas para coleta, processamento e análise dos dados.

3.1 Descrição da área de estudo

As áreas objeto deste estudo, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), localizam-se em área adjacente à Usina Hidrelétrica de Camargos, no curso médio do Rio Grande, entre os municípios de Madre Deus de Minas e Itutinga, a cerca de 40 km de Lavras, Minas Gerais. As áreas estão inseridas na região fisiográfica Campo das Vertentes, entre os paralelos 21°15' e 21°50' de latitude Sul e os meridianos 44°15' e 44°45' de longitude a Oeste de Greenwich, na microrregião Campos da Mantiqueira (FERREIRA et al., 2007).

A altitude local aproximada é de 900 m; a temperatura média anual, 19,4° C e a precipitação média anual, 1.529,7 mm, com um período seco de abril a setembro. O clima é de transição entre Cwa e Cwb, segundo classificação de Köppen (ANTUNES, 1986) e o tipo de solo original das áreas é Latossolo Vermelho típico.

As áreas avaliadas neste estudo compreendem:

- Fragmento conservado: fragmento de vegetação original, coberto com remanescente de floresta estacional semidecidual, com área de 1,23 ha. Neste fragmento, segundo dados de Faria (2012), foram observados 549 indivíduos, distribuídos em 31 famílias botânicas e 64 espécies, resultando em uma densidade média de 1.716 indivíduos ha⁻¹;

- Fragmento em restauração: compreende área de 2,79 ha, sendo utilizado como área de empréstimo na construção da barragem da UHE de Camargos – ou seja, local onde foi retirado grande volume de solo – e que foi recuperado há

cerca de 20 anos, submetido a preparo convencional de solo. Neste fragmento, segundo dados de Faria (2012), foram observados 303 indivíduos, distribuídos em 18 famílias botânicas e 41 espécies, resultando em uma densidade média de 1.515 indivíduos ha⁻¹.

No ano de 1950, o local referido neste estudo como “fragmento em restauração” foi utilizado como área de empréstimo para a construção da barragem, tendo sofrido supressão da vegetação e remoção de até 5 m de perfil do solo. Anteriormente à degradação, a área apresentava declividade em torno de 15% e cobertura vegetal de porte arbóreo. Durante mais de 30 anos, nenhuma medida para a recuperação da área foi tomada, nem mesmo havendo possibilidade de regeneração natural. Em 1991, o local foi novamente utilizado como área de empréstimo, visando à construção de uma ensecadeira para reparos no piso de concreto abaixo dos vertedouros. Nessa operação foram retirados cerca de 40.000 m³ de terra, tornando a área ainda menos favorável aos processos naturais de estabelecimento de cobertura vegetal, gerando, assim, a necessidade de intervenção antrópica para a sua recuperação. Somente em 1992 foram iniciados os procedimentos para a recuperação da área. Foram construídos terraços em nível e a área foi totalmente subsolada a 30-60 cm de profundidade, em linhas em nível a cada 1,5 m. Posteriormente, efetuou-se o sulcamento em nível, a cada 1,5 m, intercalado às linhas de subsolagem. O plantio de mudas de espécies florestais foi realizado no espaçamento de 1,5 x 3,0 m, em quincôncio, alternando linhas de espécies pioneiras com linhas de espécies clímax. A adubação utilizada foi de 250 g/cova de superfosfato simples, tendo sido efetuada uma única adubação em cobertura, aos dois anos, com 150 g/planta de NPK 10:30:10 (DAVIDE; FARIA, 1997). A relação das principais espécies utilizadas na restauração das áreas no entorno dos reservatórios de Camargos e Itutinga é apresentada por Faria (2012).

O mapa representativo e o aspecto visual das áreas em estudo podem ser visualizados nas Figuras 1 e 2.

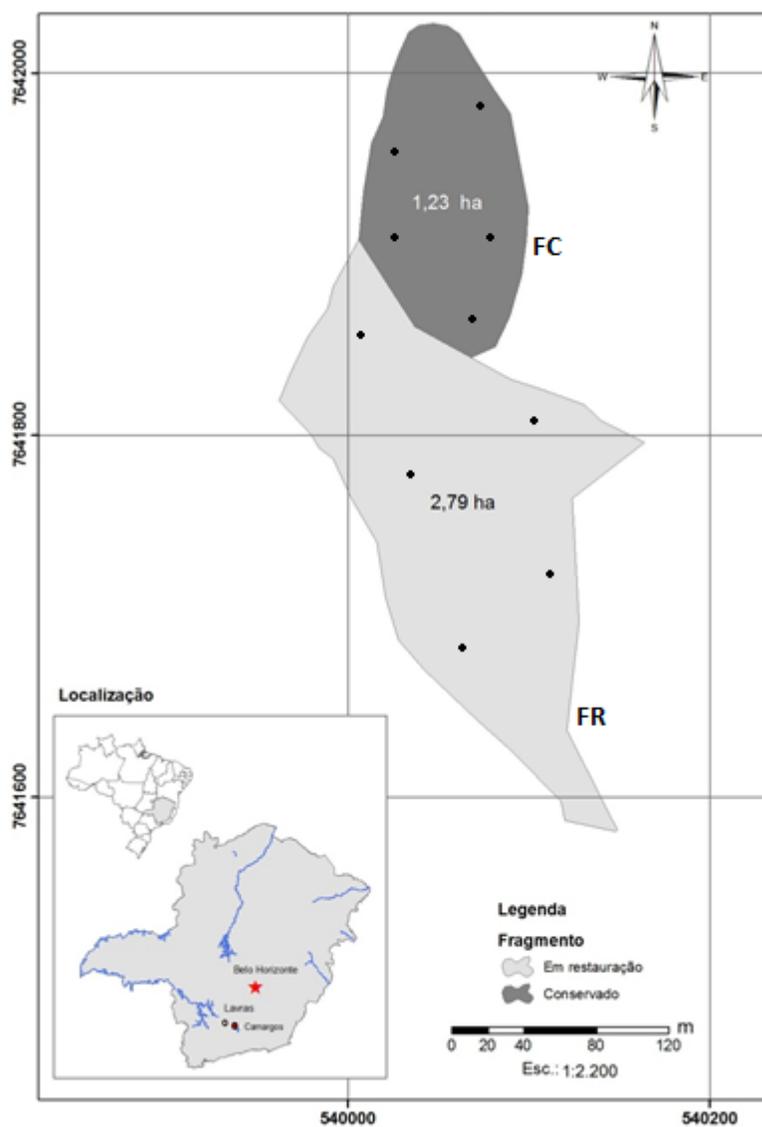


Figura 1. Mapa da área total de estudo, mostrando os fragmentos em restauração (FR) e conservado (FC) e localização dos pontos de amostragem, no entorno da UHE de Camargos, MG.

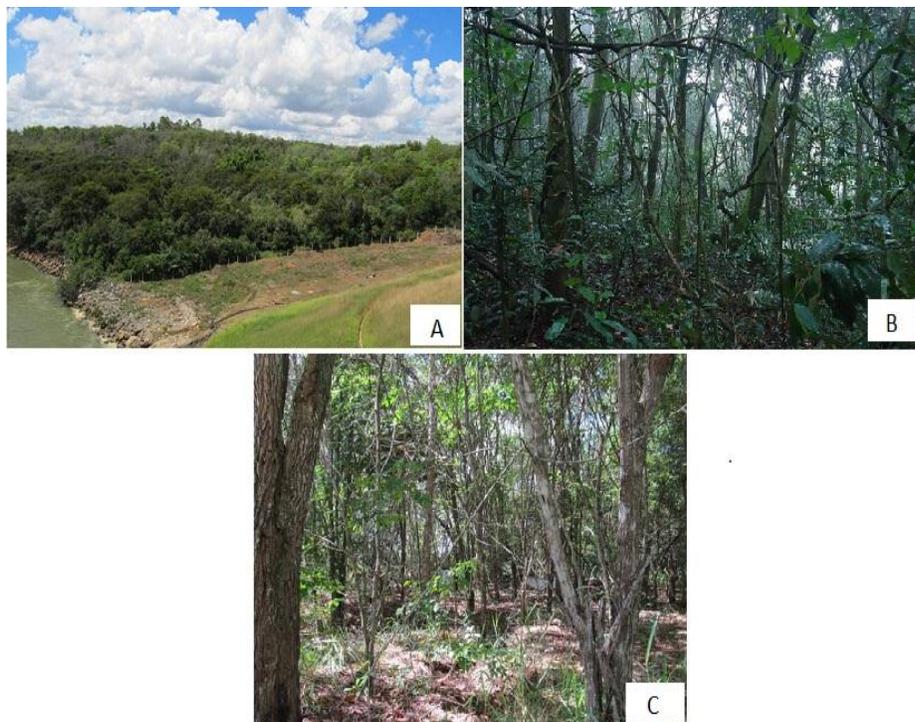


Figura 2. Áreas de estudo localizadas na UHE de Camargos, em Itutinga, MG. A) Visão externa das duas áreas contíguas; B) fragmento nativo e C) fragmento recuperado. Maio de 2012.

Existem ainda outras quatro áreas, no entorno da UHE de Camargos, que estão em processo de restauração. O mapa dessas áreas pode ser visto em Faria (2012). Cada área apresenta históricos de uso e nível de perturbação diferenciado, sendo divididas em categorias degradada e perturbada, segundo o mesmo autor.

Os plantios são experimentais e fazem parte de uma série de estudos desenvolvidos pelo Projeto Mata Ciliar, iniciado em 1990, o qual é fruto de um convênio entre a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Universidade Federal de Lavras (Convênio CEMIG/UFLA/FAEPE).

3.2 Amostragem, locação e pontos de coletas

Nas áreas de estudo, já se encontravam alocadas parcelas de 20 m x 20 m para estudos preliminares (sendo oito parcelas no fragmento conservado e seis no fragmento em restauração). Estas parcelas foram alocadas no campo de forma sistemática, com ajuda do programa ArcMap. Entretanto, foram utilizadas, neste estudo, cinco parcelas em cada área de estudo, totalizando dez parcelas experimentais, tendo sido sorteado um ponto de amostragem em cada parcela.

Em cada parcela foram sorteadas as coordenadas do ponto de coleta, das distâncias horizontal (largura da parcela) e vertical (comprimento da parcela). O sorteio foi realizado a partir do vértice inferior direito da parcela, sendo a junção das coordenadas sorteadas o vértice inferior direito do ponto de coleta (0,5 m x 1,0 m).

O esquema de sorteio dos pontos de coleta na parcela está representado na Figura 3.

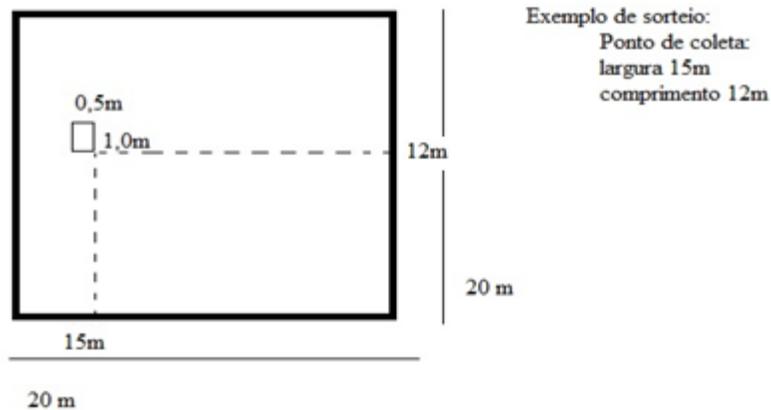


Figura 3. Esquema dos pontos de amostragem sorteados em escritório, sendo as coordenadas do ponto de coleta largura e comprimento, em metros (15,12).

As coletas foram realizadas em época seca, durante os meses de maio e junho de 2012, de modo a viabilizar a separação entre material radicular e solo, uma vez que os mesmos estariam secos.

No ponto de amostragem sorteado, foi disposto um gabarito de ferro para demarcação da área de coleta de serapilheira e para auxílio da abertura da trincheira (0,5 m x 1,0 m x 1,0 m). A trincheira foi aberta e estratificada em cinco profundidades: 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 60 cm e 60 a 100 cm, de forma a verificar a distribuição dos compartimentos solo e das raízes no perfil do solo.

Foram utilizadas peneiras finas (peneira para cal), médias (peneira para areia) e grossas (peneira para café) para auxiliar a separação do solo e do material radicular. No entorno do ponto de coleta, a área foi limpa para facilitar o processo de separação de solo e raízes e foi disposta uma lona ao lado da trincheira. À medida que a trincheira ia sendo aberta, o solo e as raízes iam sendo separados e armazenados. Em cada profundidade eram coletados todo o material radicular separado do solo e amostras de solo para análise de fertilidade e análise do teor de carbono total, além de amostras indeformadas para determinação da densidade do solo.

O procedimento de coleta, armazenamento e processamento das amostras dos compartimentos serapilheira, raízes e solo é mais bem descrito no item a seguir.

3.3 Procedimento de coleta de material e análises

Neste ponto são descritos os métodos de coleta e processamento dos compartimentos coletados e avaliados neste trabalho.

3.3.1 Serapilheira

A serapilheira foi coletada com auxílio de gabarito de 50 cm de largura e 100 cm de comprimento (área total de 0,5 m²). O gabarito foi posicionado no ponto sorteado de amostragem e toda a serapilheira contida dentro da área do gabarito foi coletada (Figura 4).

A serapilheira foi disposta em sacos identificados, armazenada em freezer até ser lavada com água e depois seca em estufa, à temperatura de 65-70 °C, até atingir peso constante. Posteriormente, foi pesada, triturada em moinho e peneirada (peneira de 60 mesh de granulometria), sendo seca novamente à temperatura de 65-70 °C, até atingir peso constante, armazenada devidamente e enviada para análise do teor de carbono, no Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica no Departamento de Ciências do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).



Figura 4. Gabarito disposto no ponto de coleta da serapilheira. Dimensões do gabarito: 0,5 m x 1,0 m. A) Serapilheira a ser coletada. B) Serapilheira já coletada.

3.3.2 Biomassa radicular

Após a coleta da serapilheira, foi aberta uma trincheira de 1,0 m de profundidade e 1,0 m de comprimento e 0,5 m de largura (dimensões do coletor de serapilheira acrescido da profundidade), no ponto de amostragem, em cada parcela de estudo.

Coletaram-se raízes em cinco diferentes profundidades: 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 60 cm e 60 a 100 cm. Não se julgou necessário proceder à separação das raízes quanto ao seu diâmetro, sendo essas separadas somente quanto à sua profundidade de coleta.

As raízes coletadas foram armazenadas em sacos identificados de acordo com o local e a profundidade de coleta, e enviadas ao Laboratório de Silvicultura, no Departamento de Ciências Florestais (DCF) da UFLA, para serem armazenadas em freezer até serem lavadas com água e secas, à temperatura entre 65-70° C, até atingir peso constante.

Posteriormente, o material foi pesado (obtenção de sua massa seca), triturado em moinho (Unidade Experimental de Painéis de Madeira-UEPAM/DCF/UFLA), peneirado (peneira de 60 mesh de granulometria), seco novamente, à temperatura entre 65-70° C, até peso constante, armazenado devidamente e enviado para análise do teor de carbono (Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica/DCS/UFLA).

As etapas descritas na coleta e no preparo do material radicular podem ser observadas nas Figuras 5 e 6.



Figura 5. A) Trincheira sendo aberta, na primeira profundidade de 0 a 10 cm. B) Peneiras utilizadas para separar solo de material radicular. C) Material radicular sendo separado de solo, com auxílio de peneiras. D) Material radicular coletado sendo armazenado em sacos plásticos.



Figura 6. A) Material coletado armazenado e identificado. B) Material coletado – serapilheira e raízes - sendo lavado. C) Material coletado – raízes e serapilheira - sendo seco em estufa. D) Material coletado sendo moído.

3.3.3 Amostragem de solo

Para amostragem de solo, foram coletados três tipos de amostras, em todas as profundidades consideradas e em todas as trincheiras abertas, sendo amostras de solo para análise do teor de carbono, amostras para análise de fertilidade e amostras para a determinação da densidade de solo.

As amostras de solo para análise de teor de carbono e fertilidade foram coletadas após a retirada do solo na trincheira em cada profundidade e separação do material radicular, por meio do uso de peneiras em campo, conforme citado no item 3.2. Após a coleta, as amostras de solos foram armazenadas em embalagens devidamente identificadas, com relação às parcelas analisadas e

profundidades de coletas e enviadas para o Laboratório de Silvicultura, DCF/UFLA, para serem secas à temperatura ambiente.

A amostra de solo destinada à análise do teor de carbono, que foi seca à temperatura ambiente, foi ainda macerada em cadinho de porcelana, com ajuda de um pistilo e, posteriormente, peneirada (peneira de 60 mesh de granulometria) (Figura 7). O material foi armazenado e permaneceu em estufa de circulação forçada, a 65-70° C, de forma a evitar que possível absorção de água nesse processo pudesse interferir nas futuras análises, até ser enviado para análise do teor de carbono, no Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica, DCS/UFLA.



Figura 7. Preparo de solo para análise de carbono. A) Solo coletado sendo seco à temperatura ambiente. B) Solo seco sendo macerado em cadinho de porcelana com pistilo. C) Solo sendo peneirado em peneira de 60 mesh. D) Material armazenado em frascos plásticos.

Com relação às amostras de solo para a determinação da densidade do solo, estas foram coletadas com anel de metal de volume conhecido (cilindro de Uhland), sendo, portanto, amostras indeformadas. Este material foi armazenado em embalagens identificadas com local de coleta e enviado para o Laboratório de Silvicultura, DCF/UFLA. As amostras foram secas em estufa, a 105° C, até peso constante, sendo obtida, assim, sua massa seca (g). Conhecendo-se o volume do anel de metal, pôde-se encontrar a densidade do solo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) para todas as profundidades analisadas, em todas as parcelas amostradas (Figura 8).



Figura 8. A) Trincheira sendo aberta até 100 cm. B) Detalhe superior da trincheira. C) Anel de volume conhecido utilizado para coletas de amostras indeformadas de solo. D) Anel de volume conhecido sendo utilizado.

3.4 Determinação dos teores de carbono das matrizes analisadas

Com as amostras previamente processadas, a próxima etapa foi a determinação dos teores de carbono das matrizes analisadas.

A determinação do teor de carbono de cada material amostrado foi realizada utilizando-se o analisador do tipo TOC, modelo Vario TOC Cube, da marca Elementar. Foram utilizadas quantidades de solo, raiz e serapilheira de acordo com especificações do aparelho, sendo, para solo, de 12 a 15 mg de cada amostra e, para serapilheira e material radicular, cerca de 3 a 5 mg de material.

As etapas envolvidas na preparação e na análise do material (solo, raízes e serapilheira) para a determinação do teor e estoque de carbono podem ser vistas na Figura 9.

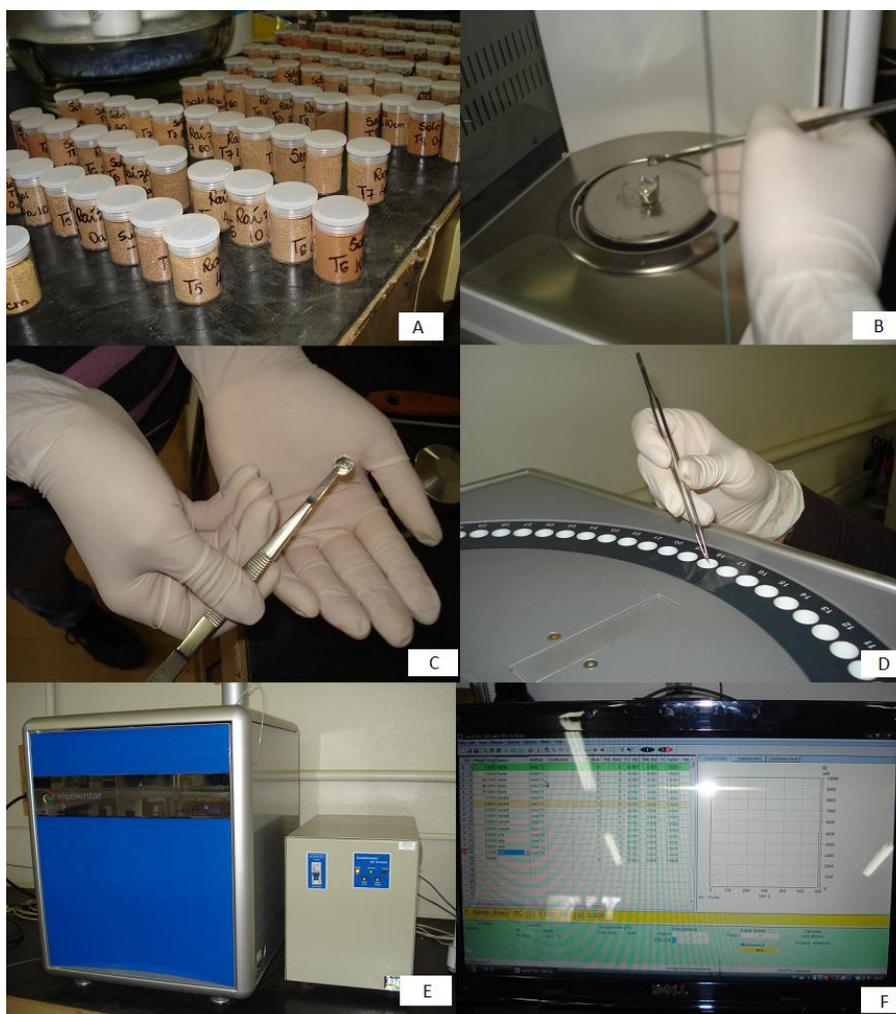


Figura 9. A) Amostras moídas e secas, prontas para análise de carbono. B) Amostras sendo pesadas. C) Amostra já pesada em cápsula de estanho já fechada. D) Amostra em cápsula de estanho sendo injetada no analisador. E) Detalhe do analisador de carbono orgânico total utilizado neste experimento. F) Software em computador conectado ao analisador.

As amostras foram acondicionadas em cápsulas de estanho e injetadas em forno, a 950 ° C, para combustão a seco. O gás CO₂ liberado de cada amostra foi quantificado por detector infravermelho NDIR, sendo o carbono evoluído relacionado à massa da amostra avaliada.

Com os teores de carbono já obtidos, foram determinados os estoques de carbono das matrizes. O estoque de carbono orgânico do solo foi quantificado para cada camada ou profundidade amostrada, segundo metodologia adaptada de Batjes (1996),

$$\text{Est C} = (\text{CO} \cdot \text{D}_s \cdot \text{E}) \quad (\text{equação 1})$$

em que

Est C = estoque de carbono em determinada profundidade ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

CO = teor de carbono total na profundidade amostrada (%), valor obtido em análise laboratorial;

D_s = densidade do solo na profundidade ou camada ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$);

E = espessura da camada considerada (m).

O somatório do estoque em cada camada ou profundidade fornece uma estimativa de carbono orgânico total na área.

O estoque de carbono presente na serapilheira e nas raízes foi quantificado em $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, em função da quantidade de biomassa seca e do teor de carbono determinado para cada amostra.

$$\text{Est C} = \text{Biomassa} \cdot (\text{Teor C}/100) \quad (\text{equação 2})$$

em que

Est C = estoque de carbono em determinada matriz ($\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Teor = teor de carbono orgânico total na matriz amostrada (%) valor obtido em análise laboratorial;

Biomassa = peso seco da amostra (Mg ha^{-1}).

3.5 Análises estatísticas

A seguir descrevem-se os métodos de análises estatísticas aplicados nos dados obtidos.

3.5.1 Comparação dos teores e estoques de carbono dos compartimentos nos fragmentos florestais

Os dados foram analisados, quanto à sua distribuição, pelo teste de Shapiro Wilk. Quando não foram considerados normais, foram transformados, de forma a atenderem às pressuposições da análise de variância, como, por exemplo, transformação para raiz quadrada para valores de estoque de carbono radicular. Quando considerados normais, foram analisados por análise de variância (ANOVA), considerando-se, como fontes de variação, a profundidade de coleta, o fragmento analisado e a interação entre eles. As parcelas foram consideradas como repetições.

Após a análise de variância, quando estas foram significativas ($p \leq 0,05$), foram, ainda, realizados testes de médias - Scott-Knott, a 5% de significância - para comparações de valores médios.

Para a comparação de valores de estoques de carbono radicular e de solo, foram realizadas ponderações devido às diferentes espessuras das camadas avaliadas. Assim, cada camada representada teve seus valores ponderados para uma espessura de 10 cm.

3.5.2 Análise multivariada- Análise de componentes principais

A análise multivariada foi escolhida para avaliar o conjunto de dados referente às análises de solo – fertilidade e carbono. A técnica de ordenação escolhida foi análise de componentes principais, ou PCA.

Os dados de fertilidade e carbono no solo foram submetidos à PCA, para uma análise exploratória, de forma a visualizar gradientes nas amostras de solo, quando analisados frente às variáveis resultantes da fertilidade de solo. Para isso foi utilizado o software PcOrd. Com esta análise pretendeu-se avaliar relações entre as parcelas avaliadas, profundidades de coleta e variáveis de solo.

3.5.3 Correlação de Pearson

Os resultados obtidos das variáveis de solo (análises de rotina), teores e estoques de carbono radicular e de solo e serapilheira foram submetidos à análise de correlação de Pearson, considerando o nível de 5% de significância. A correlação foi realizada no software Excel. O objetivo foi avaliar a existência de correlação entre atributos de fertilidade do solo com teores e estoques de carbono no solo, bem como a correlação entre os estoques dos diferentes compartimentos analisados no presente trabalho.

Este coeficiente, normalmente representado por “ ρ ”, assume apenas valores entre -1 e 1, sendo que:

$\rho = 1$ significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis;

$\rho = -1$ significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis.

Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui;

$\rho = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

3.5.4 Análise espacial dos dados

A geostatística calcula estimativas dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. Tem tido grande aplicação, principalmente para efetuar estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não amostrados (LANDIN; STURARO, 2002).

A variável de estudo foi o estoque de carbono nas diferentes matrizes das áreas em processo de restauração e do fragmento considerado conservado, a saber: serapilheira; solo de 0 a 10 cm e solo de 10 a 20 cm; raízes de 0 a 10 cm e raízes de 10 a 20 cm; parte aérea e estoque global (soma de todas as matrizes avaliadas, sendo solo e raízes de 0 a 100 cm).

Para cada parcela dentro dos respectivos fragmentos, foram coletadas em campo as coordenadas UTM e estimado o estoque de carbono para as diferentes matrizes, conforme já mencionado nesta seção (os dados de estoque de parte aérea foram retirados de Faria, 2012, sendo estimados por equações de carbono para a fisionomia Floresta Estacional Semidecidual).

Para a efetivação da análise espacial dos dados, existem dois passos fundamentais: a análise da continuidade espacial e a estimação geoestatística. Inicialmente, foi verificada a existência de tendência nos dados em relação às suas respectivas coordenadas. Como estes não apresentaram tendência, trabalhou-se com os valores mensurados e não com seus resíduos para o ajuste do semivariograma. Por meio dos cálculos das semivariâncias ajustou-se o semivariograma experimental (equação 3) para o estoque de carbono nas diferentes frações consideradas no estudo.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_1 + h)]^2 \quad (\text{equação 3})$$

Em que:

$\gamma(h)$ é a semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$;

h é a distância entre os pontos amostrais;

$N(h)$ é o número total de pares de pontos possíveis, a uma distância h considerada.

Estimaram-se os valores de número de indivíduos esperados, pelo método da krigagem ordinária, para a área nos diversos cenários. Os mapas de distribuição espacial foram gerados em software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (ArcGis/ArcMap).

A krigagem ordinária, que é um método de interpolação de dados, utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do espaço analisado, ao qual o modelo do semivariograma foi ajustado, sem tendência e com variância mínima. Esse estimador é uma média ponderada dos valores observados (MOTOMIYA et al., 2006).

Modelos teóricos, como o esférico, o exponencial, o gaussiano e o wave, foram avaliados. Estes definem os parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance da dependência espacial (a), conforme exibido na Figura 10.

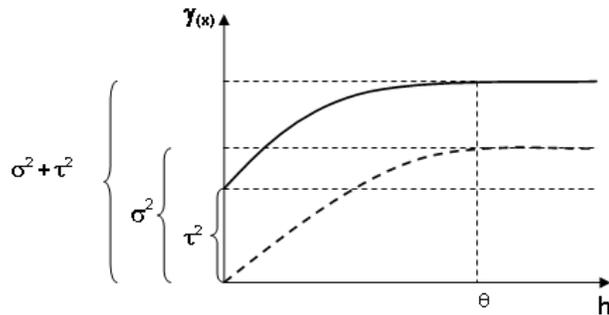


Figura 10. Representação gráfica dos parâmetros: efeito pepita (C_0 ou τ^2), patamar ($C_0 + C$ ou $\tau^2 + \sigma^2$) e alcance da dependência espacial (a ou θ).

A seguir, a definição dos parâmetros, segundo Landin e Sturaro (2002):

- Amplitude ou alcance da dependência espacial: indica a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória. Toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual à amplitude fornece informações sobre o ponto;

- Patamar: indica o valor segundo o qual a função estabiliza-se no campo aleatório. É correspondente à distância do alcance, e mostra a variabilidade máxima entre pares de valores, isto é, a variância nos dados e, conseqüentemente, a covariância nula;

- Continuidade ou efeito pepita: indica valor de $h \approx 0$ em que o valor de $\gamma(h) \neq 0$. Pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo, isto é, não é capturado um fenômeno numa escala maior.

A krigagem ordinária é um processo de estimativa por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes por uma função denominada *variograma*. Como, no cálculo dessa função, a somatória de diferenças ao

quadrado é dividida por “2 x número de pares de valores”, o termo correto seria *semivariograma*, porém, é usual o emprego do termo *variograma*. A krigagem utiliza informações a partir do *variograma* para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos (LANDIN; STURARO, 2002).

Com as informações do estoque de carbono por parcela de cada compartimento, adicionada ao modelo espacial ajustado, foram efetuadas as estimativas em cada ponto não amostrado. A estimativa dos pontos não amostrados (Z) foi realizada com base na krigagem pontual (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; JOURNAL; RAO, 1996), sendo obtida como uma combinação linear dos vizinhos próximos. O número de classes adotado foi igual a três.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{equação 4})$$

em que

$Z(X_0)$ = estimativa no ponto não amostrado;

λ_i = peso que cada valor mensurado recebe em função do modelo espacial.

Os *semivariogramas* e as *krigagens* foram ajustados e construídos utilizando-se o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), o pacote *geoR* (2001) e o software *ArcGis/ArcMap*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os principais resultados alcançados, os quais também são discutidos com base na literatura disponível sobre o tema em questão.

4.1 Análises da matriz material radicular

Com relação às raízes, houve tendência de diminuição dos valores de biomassa com o aumento da profundidade (Gráfico1). Tal fato também foi verificado por Fonseca et al. (2005), em povoamentos de *Castanea sativa* e *Pseudotsuga menziesii*, em Portugal; por Lima et al. (2007b), em fragmentos florestais no Rio de Janeiro; por Menezes et al. (2010), em florestas em diferentes estágios de sucessão; por Selle et al. (2010), em povoamentos de pinus; por Valcarcel et al. (2007), em áreas de empréstimo reflorestadas e por Paiva, Rezende e Pereira (2011), para cerrado *sensu stricto*, no Distrito Federal.

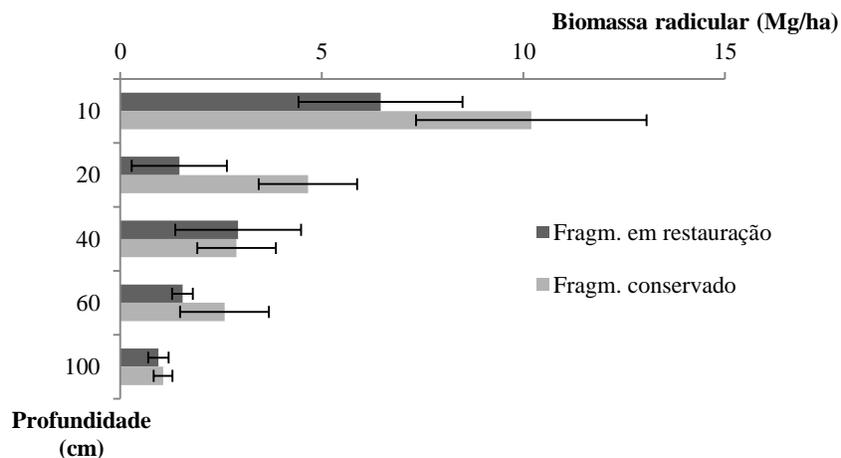


Gráfico1. Distribuição da biomassa radicular média dos fragmentos adjacentes à UHE Camargos, com relação à profundidade de coleta e seus respectivos erros padrão da média.

Entretanto, para cerrado *sensu stricto*, parece não haver consenso, pois, em alguns estudos, é mostrada essa tendência de diminuição dos valores de biomassa com o aumento da profundidade (PAIVA; FARIA, 2007; PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011), enquanto em outros não, como no de MORAIS (2012). Este último autor acredita não ter encontrado tendência de diminuição de biomassa radicular com a profundidade em decorrência da escassez de água nestes solos, que estimula um crescimento mais profundo das raízes, além da heterogeneidade de fragmentos de cerrado.

A maior concentração de raízes, superficialmente, pode ser explicada pela concentração de folhas e galhos em decomposição na superfície do solo, disponibilizando nutrientes minerais e orgânicos, permitindo um ambiente favorável para o desenvolvimento das raízes nesta camada (SELLE et al., 2010). Camargo et al. (1999) afirmam que cerca de 80% a 95% da biomassa radicular se encontra no primeiro metro no perfil do solo.

Os valores de biomassa radicular, neste estudo, variaram de 5,5 a 31 Mg ha⁻¹ e de 10,5 a 30,9 Mg ha⁻¹, nos fragmentos em restauração e conservado, respectivamente, considerando a camada de 0 a 100 cm. Para fragmentos de cerrado *sensu stricto*, os valores relatados variaram de 16 a 39,6 Mg ha⁻¹ (MORAIS, 2012) e de 37,5 Mg ha⁻¹ (RIBEIRO et al., 2011), todos considerando a profundidade de 100 cm, até mesmo valores maiores, como 33,11 Mg ha⁻¹ (PAIVA; FARIA, 2007), para apenas 30 cm de profundidade. Em Floresta Ombrófila Mista Montana, no Paraná, a biomassa radicular média encontrada foi de 40,44 Mg ha⁻¹, considerando a profundidade de 60 cm (WATZLAWICK et al., 2012).

Acredita-se que o fragmento conservado tenha apresentado maior valor de biomassa radicular na camada de 0 a 20 cm (Gráfico 1), em função da maior densidade de plantas (1.716 ind.ha⁻¹ contra 1.515 ind.ha⁻¹, no fragmento em restauração), que poderiam apresentar maiores raízes finas superficiais, além de

apresentar árvores em estágio mais avançado de desenvolvimento e do fato de possuir uma cobertura maior da regeneração natural, segundo estudos ainda não finalizados que estão sendo conduzidos nas áreas aqui consideradas.

Cairns; Brown; Helmer (1997) afirmam que, em ecossistemas florestais, a biomassa subterrânea pode variar em função de vários fatores, incluindo idade do povoamento e estágio sucessional da vegetação – o que foi confirmado por Wang et al. (2008) e Menezes et al. (2010) -, ou com o grupo funcional a que pertencem as espécies presentes. Menezes et al. (2010) ainda afirmam que diferentes resultados para biomassa radicular florestal têm sido encontrados, o que pode ser atribuído à diversidade de condições ambientais dos locais avaliados.

Considerando apenas a camada de 0 a 10 cm, os resultados obtidos de biomassa radicular foram condizentes com os encontrados em literatura, de 5,91 a 7,25 Mg ha⁻¹, para floresta ombrófila densa (LIMA et al., 2011) e de 6,84 a 8,43 Mg ha⁻¹, para floresta estacional semidecidual (KINDEL; GARAY, 2001), ambas em área de mata atlântica. Mas, foram maiores que os encontrados por Menezes et al. (2010), para fragmento florestais em estágios inicial, médio e avançado de sucessão (de 2,14 a 3,69 Mg ha⁻¹).

4.1.1. Teor de carbono radicular

Dentre todas as profundidades avaliadas, a camada de 40 a 60 cm foi a que apresentou maior variação dos teores de carbono radicular (CV=9,82%), seguida pela profundidade de 20 a 40 cm (CV=9,66%). Uma menor variação nos resultados foi encontrada para o teor de carbono, considerando-se a camada superficial (0 a 10 cm), sendo esta variação de apenas 6,0%.

Os valores de teor de carbono encontrados variaram de 30,58% a 43,24%, tendo o valor médio sido de 36,81%. Estes valores se encontram um pouco

abaixo das estimativas encontradas em outros trabalhos, de que 45% a 50% da biomassa vegetal seja correspondente ao teor de carbono (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC, 2007; ALEGRE et al., 2000 citados por AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002; RODIN, 2004; PAIVA; FARIA, 2007; SILVA, 2007; HOUGHTON; HALL; GOETZ, 2009), 37% a 45%, para fragmentos de cerrado sensu stricto em Minas Gerais (MORAIS, 2012). Os valores de teor de carbono na biomassa radicular podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de teor de carbono radicular (%) encontrados para os fragmentos em estudo, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Teor de carbono nas raízes					
	Profundidade				
Parcelas	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 100
FC1	36,88	36,16	41,47	43,24	35,38
FC2	34,64	34,50	34,53	34,45	39,23
FC3	37,36	33,67	36,02	38,74	36,77
FC4	38,10	37,29	37,06	40,82	40,08
FC5	37,15	32,04	32,07	33,22	42,34
FR1	34,59	35,98	39,26	37,46	35,29
FR2	32,46	35,04	37,64	42,26	39,79
FR3	33,69	38,49	40,14	41,83	39,41
FR4	32,03	35,40	30,58	42,11	36,00
FR5	35,70	38,49	34,23	33,99	35,65
Mínimo	32,03	32,04	30,58	33,22	35,29
Máximo	38,1	38,48	41,47	43,24	42,34
Desvio Padrão	2,11	2,05	3,51	3,81	2,47
Média	35,25	35,71	36,30	38,81	37,99
CV (%)	6,00	5,74	9,66	9,82	6,52

*Sendo FC fragmento conservado e FR fragmento em restauração e 1, 2, 3, 4 e 5 as parcelas analisadas.

Entretanto, o teor médio de carbono radicular encontrado neste estudo (36,81%) foi próximo do teor médio encontrado por Watzlawick et al. (2012) para floresta ombrófila mista Montana, no Paraná (37,67%). A diferença entre o teor médio de carbono obtido neste trabalho e o encontrado em literatura pode ser devido à composição química do material radicular, como ser mais lignificado ou não, por exemplo. Por esta lógica, raízes mais finas deveriam ter menores teores de carbono do que raízes mais lignificadas, que teriam maiores cadeias de fenilpropano (C_3C_6 , componente da estrutura da lignina). Em literatura, por exemplo, encontramos valores de teor de carbono de 31,6%, para milho, cujas raízes não são lignificadas (JANS et al., 2010) e de 35%-37%, para raízes de *Kobrezia pygmaea*, uma ciperácea presente em campos degradados na China (QIJI et al., 2008). Assim, as menores médias de teor de carbono radicular encontradas neste trabalho podem ter sido em decorrência da presença de raízes finas em nossas amostras, sendo estas menos lignificadas.

Para a comparação dos valores encontrados nos fragmentos e nas profundidades considerados, os dados obtidos de teor de carbono radicular foram submetidos à análise de variância, ensaio fatorial e teste de Scott-Knott ($\alpha = 5\%$), considerando como fontes de variação a profundidade de coleta, os fragmentos e as interações. Houve efeito significativo apenas para a profundidade ($p = 0,0375$) nos dados de teor de carbono radicular, não havendo para fragmentos ($p = 0,78$) e interação ($p = 0,2711$).

Quando se comparam as profundidades de coleta, se observa diferença apenas entre os teores de carbono radicular das profundidades 40 a 60 cm e 60 a 100 cm, sendo estes maiores que os demais (Tabela 2).

Tabela 2. Teste de Scott-Knott (5%) para dados médios de teor de carbono radicular (%) para a profundidade de coleta, encontrados em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG.

Profundidade	Média (%)
10	35,25a
20	35,70a
40	36,29a
60	38,81 b
100	37,99 b

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre Si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

Paiva, Rezende e Pereira (2011) também encontraram diferença entre os teores de carbono radicular nas profundidades analisadas por eles, tendo a camada de 20 a 40 cm apresentado os maiores teores de carbono médio, em áreas de cerrado *sensu stricto*. Entretanto, Morais (2012), avaliando também teor de carbono radicular em áreas de cerrado *sensu stricto*, não encontrou diferença entre os teores de carbono entre as mesmas profundidades de coleta avaliadas neste estudo.

4.1.2 Estoque de carbono radicular

Os valores de estoque de carbono radicular podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Estatística descritiva para valores de estoque de carbono radicular (Mg ha^{-1}) encontrados para os fragmentos em estudo, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Estoque de carbono nas raízes (Mg ha^{-1})						
	Profundidade					Total
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 100	
Mínimo	0,68	0,56	0,11	0,10	0,18	1,98
Máximo	6,26	3,26	3,52	3,02	0,76	11,76
Desvio Padrão	2,08	0,93	1,12	0,98	0,21	4,00
Média	2,98	1,51	1,10	0,82	0,38	6,79
CV (%)	69,82	61,54	101,52	119,78	53,93	58,88

Os dados encontrados para estoque de carbono no sistema radicular foram variáveis, como pode ser observado nos altos coeficientes de variação. A camada de 40 a 60 cm foi a que apresentou maior variação dos dados (119%), seguida por 20 a 40 cm (101%).

Conforme dados da Tabela 3, em ambos os fragmentos houve variação entre o carbono total estocado (0 a 100 cm) entre as parcelas, tendo o maior valor de estoque sido encontrado em parcela de fragmento conservado (11,76 Mg ha⁻¹), enquanto o menor valor foi encontrado no fragmento em restauração (1,98 Mg ha⁻¹). O valor médio de estoque de carbono radicular foi de 8,0 Mg ha⁻¹, para o fragmento conservado e de 5,60 Mg ha⁻¹, para o fragmento em restauração. A média dos dois fragmentos considerados juntamente foi de 6,79 Mg ha⁻¹.

Entretanto, na literatura, podem-se encontrar valores mais altos para estoque de carbono radicular. Malhi et al. (2009) estimaram valores de biomassa radicular até 100 cm, considerando a razão entre biomassa raiz/ biomassa parte aérea de Cairns; Brown; Helmer (1997) e encontrou valores de estoque de carbono radicular de 38 Mg ha⁻¹, para florestas em Manaus (AM); 44 Mg ha⁻¹, para florestas em Caxiuanã (PA) e 30 Mg ha⁻¹, para florestas em Tapajós (PA). Wang et al. (2008) encontraram valores de estoques de carbono radiculares de 38,4 Mg ha⁻¹, para florestas mistas de gimnospermas e angiospermas e de 23,8 Mg ha⁻¹, para florestas de angiospermas decíduas, na China, apesar de a profundidade analisada não ter sido determinada. Cairns; Brown; Helmer (1997) citam valores de 34,5 Mg ha⁻¹, para floresta tropical no Brasil e de 28,0 Mg ha⁻¹, para floresta úmida montana na Venezuela.

Morais (2012) encontrou valor médio de 11,05 Mg ha⁻¹ de estoque de carbono radicular para 100 cm. Paiva, Rezende e Pereira (2011) encontraram valor de estoque de 22,38 Mg ha⁻¹, para 200 cm, em áreas de cerrado, o qual está mais de acordo com os máximos encontrados em algumas parcelas neste estudo,

considerando que, aqui, a profundidade de análise foi metade da considerada por estes autores.

Com relação aos altos valores de coeficiente de variação encontrados, Cairns; Brown; Helmer (1997), resumindo pesquisas sobre biomassa radicular numa gama de trabalhos distribuídos por florestas tropicais, temperadas e boreais, observaram que os coeficientes de variação de florestas tropicais são, de fato, maiores, refletindo a maior heterogeneidade desses tipos florestais.

Além disso, como os estoques de carbono radicular são calculados multiplicando-se os valores de biomassa radicular e o teor de carbono destas (conforme equação 2, citada no item 3.4), como os valores de biomassa radicular mostraram alta variação, os valores de estoque de carbono radicular também apresentaram alta variação. A distribuição da proporção acumulada dos estoques de carbono radicular nas profundidades pode ser visualizada na Tabela 4.

Tabela 4. Proporção acumulada dos estoques de carbono radicular em cada profundidade de solo analisada nos fragmentos considerados, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Fragmento conservado							
Parcelas	1	2	3	4	5	Média	CV %
estoque 0 a 10 cm	28,1%	19,5%	52,3%	50,6%	70,2%	44,1%	36,0
estoque 0 a 20cm	38,1%	59,5%	64,9%	79,1%	87,2%	65,7%	28,8
estoque 0 a 40cm	65,3%	76,4%	77,5%	87,2%	92,4%	79,7%	13,15
estoque 0 a 60cm	95,7%	91,1%	92,5%	93,4%	97,0%	93,9%	2,54
estoque 0 a 100cm	100%	100%	100%	100%	100%		
Fragmento em restauração							
Parcelas	1	2	3	4	5	Média	CV%
estoque 0 a 10 cm	22,3%	43,1%	23,6%	45,1%	40,2%	34,8%	31,6
estoque 0 a 20cm	42,2%	78,7%	39,6%	78,7%	73,9%	62,6%	31,8
estoque 0 a 40cm	76,6%	90,3%	68,3%	88,6%	80,5%	80,9%	11,1
estoque 0 a 60cm	97,82%	93,65%	72,68%	94.39%	87,42%	87,89%	12,5
estoque 0 a 100cm	100%	100%	100%	100%	100%		

Pode-se observar que, de forma geral, cerca de 80% do estoque de carbono radicular se concentra na camada de 0 a 40 cm, em ambos os fragmentos florestais, e que, nas camadas de 0 a 20 cm, está a maior variabilidade desses valores. Moraes (2012) encontrou proporção acumulada de 47% a 70% de estoque de carbono radicular na camada de 0 a 40 cm. Maiores valores de estoque de carbono radicular nas profundidades iniciais foram encontrados também por Paiva, Rezende e Pereira (2011) e Paiva e Faria (2007).

Os dados encontrados para estoque de carbono radicular foram submetidos à ponderação (valores considerados para 10 cm, de forma a evitar distorções devido às diferentes espessuras de solo analisadas), comparação por análise de variância (prévia transformação com raiz quadrada) e teste de Scott-Knott (5%), considerando como fontes de variação os fragmentos, as profundidades e as interações entre estes. Observa-se que não houve efeito significativo nos dados de estoque de carbono radicular entre os fragmentos ($p = 0,1365$) e a interação entre profundidade e fragmento ($p = 0,758$). Apenas houve diferença entre as profundidades ($p = 0,000$), tendo as camadas mais superficiais estocado, proporcionalmente, maiores valores de carbono, havendo diferença entre a camada de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, entre si e com as demais camadas (Tabela 5).

Tabela 5. Teste de média Scott-Knott (5%) para valores ponderados de estoque de carbono radicular (Mg ha^{-1}) obtidos por profundidades, localizados em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG.

Profundidades (cm)	Médias*
60 a 100	0,30 a
40 a 60	0,55 a
20 a 40	0,66 a
10 a 20	1,17 b
0 a 10	1,62 c

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

Pode-se observar que as camadas de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm apresentaram maiores valores de estoque de carbono radicular. Paiva, Rezende e Pereira (2011) também encontraram maior estoque de carbono radicular na camada de 10 a 20 cm, tendo os valores também diferido dos da camada de 0 a 10 cm. Observa-se que houve tendência de diminuição do estoque médio de carbono radicular com aumento da profundidade, entretanto, para as camadas de 20 a 40 cm, de 40 a 60 cm e de 60 a 100 cm, estes valores não diferiram entre si, de forma significativa.

A distribuição ponderada dos valores médios de estoque de carbono radicular encontrados para cada fragmento florestal, com relação às diferentes profundidades de coleta, pode ser visualizada no Gráfico 2.

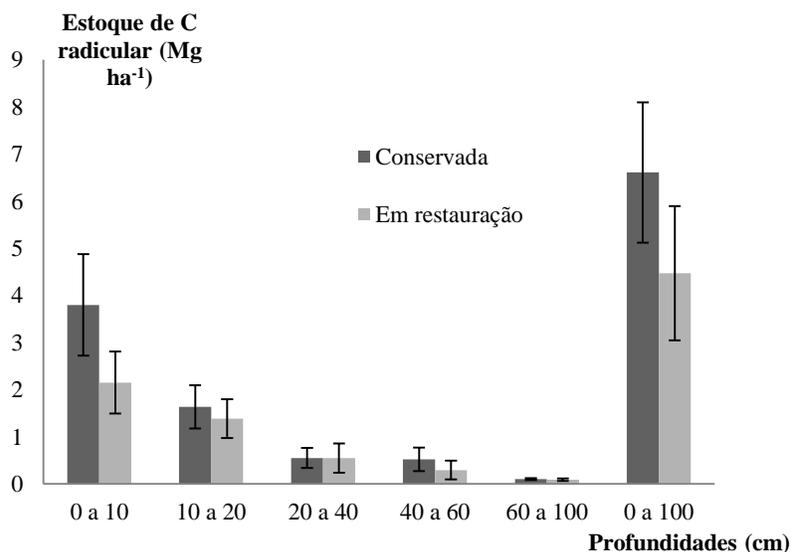


Gráfico 2. Distribuição ponderada do estoque médio de carbono radicular nos fragmentos analisados, com relação às profundidades de coleta e seus respectivos erros padrões da média.

Faria (2012) estimou a parte aérea da vegetação (para DAP \geq 5 cm) nas mesmas parcelas consideradas neste estudo, com base em equações do

inventário florestal de MG, para florestas estacionais semidecíduais. Com relação à razão entre biomassa de raiz/biomassa de parte aérea, considerando os dados desse autor, os valores médios encontrados para os fragmentos analisados foram de 0,26 e 0,19, para fragmento florestal conservado e fragmento florestal em restauração, respectivamente (Tabela 6).

Estes valores foram variáveis entre as parcelas dentro de cada fragmento, entretanto, se mostraram de acordo com o esperado, segundo dados encontrados na literatura. Mallhi et al. (2009) e Cairns; Brown; Helmer (1997) consideram uma razão média de 0,21 para florestas tropicais.

Morais (2012), estudando estoque de carbono e biomassa em áreas sob domínio do Cerrado em MG, encontrou valores muito variáveis para essa razão, estando estes variando de 0,57 a 2,33. Considerando isso, o autor sugere que seja influência da grande heterogeneidade de áreas de Cerrado.

Tabela 6. Razão entre biomassa de raiz: biomassa da parte aérea para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE Camargos, MG.

BIOMASSA SECA (Mg ha⁻¹)				
Parcela	Raízes	Parte aérea¹	Raízes/parte aérea	Média
FC1	29,01	102,86	0,28	
FC2	10,51	149,82	0,07	
FC3	10,99	36,10	0,30	0,26
FC4	30,92	106,64	0,29	
FC5	24,81	68,52	0,36	
FR1	31,16	76,05	0,41	
FR2	8,31	101,91	0,08	
FR3	8,68	146,24	0,06	0,19
FR4	24,92	86,37	0,29	
FR5	5,47	42,58	0,13	

¹ Dados de biomassa de parte aérea estimados, retirados de Faria (2012).

Aduan; Vilela; Klink (2003) e Wang et al.(2008) afirmam que a diminuição da umidade no solo pode forçar um aumento na relação biomassa de raiz e biomassa da parte aérea, no sentido de maior produção de biomassa radicular. Entretanto, alguns autores não verificaram tal fato (LIMA et al., 2011).

Paiva, Rezende e Pereira (2011) afirmam que a heterogeneidade da biomassa radicular, as profundidades de coleta e as diferentes classes de diâmetro estabelecidas para sua realização, bem como as diferenças na composição de espécies, a dificuldade de separação de raízes e solo e a época de coleta podem influenciar os resultados encontrados para biomassa e estoque de carbono radicular.

Além disso, o estágio de desenvolvimento do povoamento parece influenciar sobremaneira tal razão. Wang et al. (2008) relataram diferenças na razão raiz/parte aérea, em florestas primárias (0,31), secundárias (0,26) e florestas plantadas (0,24), na região nordeste da China.

4.2 Análises da matriz solo

Descrevem-se, a seguir, os resultados referentes ao compartimento solo, com relação a teor e estoque de carbono.

4.2.1 Teor de carbono do solo

O teor de carbono no solo tende a diminuir com o aumento da profundidade, como também foi observado por Neves et al.(2004), Grimm et al. (2008), Qiji et al. (2008), Neumann-Cosel et al.(2011) e Morais (2012).Tal fato pode ser explicado pelo acúmulo de serapilheira, não revolvimento do solo e baixa lixiviação de carbono no perfil, devido à baixa solubilidade dos resíduos orgânicos. A distribuição dos teores de carbono no solo encontrada nos fragmentos está representada nos Gráficos 3 e 4.

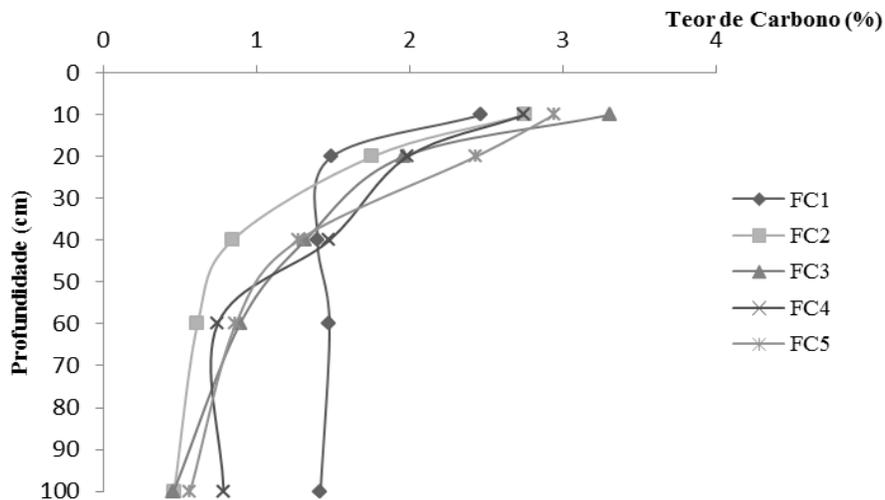


Gráfico 3. Gráfico de dispersão do teor de carbono no solo com relação à profundidade de coleta, em fragmento conservado localizado no entorno da UHE de Camargos, MG, em que FR = fragmento em restauração e a numeração de 1 a 5 representa as parcelas coletadas em campo.

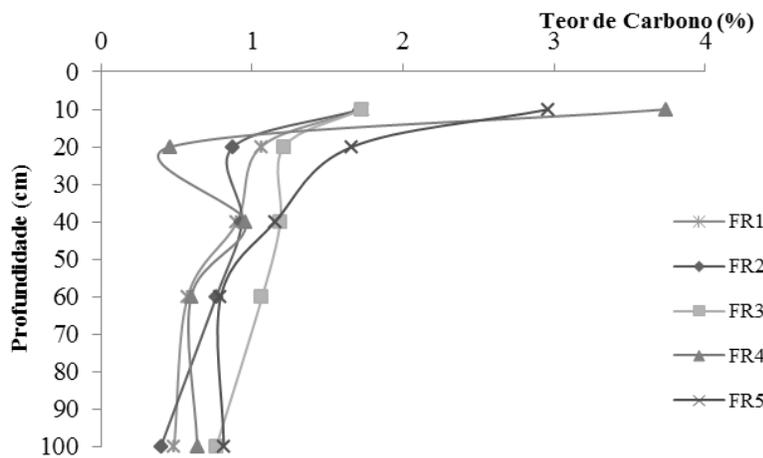


Gráfico 4. Gráfico de dispersão do teor de carbono no solo com relação à profundidade de coleta, em fragmento em restauração localizado no entorno da UHE de Camargos, MG, em que: FR = fragmento em restauração e a numeração de 1 a 5 representa as parcelas coletadas em campo.

Os dados encontrados para teor de carbono no solo apresentaram variabilidade média ($12\% \leq CV \leq 60\%$), segundo Warrick e Nielsen (1984), citados por Chaves e Farias (2008) e Cruz et al. (2010). A profundidade de 60 a 100 cm foi a que apresentou maior variação dos dados ($CV = 44\%$), seguida pelas profundidades 10 a 20 cm e 40 a 60 cm. O valor máximo encontrado para o teor de carbono no solo foi de 3,7% (camada de 0 a 10 cm, no fragmento em restauração), enquanto o menor valor, de 0,4%, foi encontrado no fragmento em restauração (profundidade de 60 a 100 cm).

No entanto, Paiva e Faria (2007) e Paiva, Rezende e Pereira (2011) observaram maiores teores de carbono na camada de 20 a 40 cm, apesar de terem ressaltado que existe tendência de os maiores teores estarem na camada de 0 a 10 cm.

Os parâmetros da estatística descritiva dos valores de teor de carbono encontrados na matriz solo nos fragmento avaliados podem ser visualizados abaixo (Tabela 7).

Tabela 7. Estatística descritiva de valores de teor de carbono no solo (%) encontrados para os fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

	Profundidade				
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 100
Mínimo	1,7	0,5	0,8	0,6	0,4
Máximo	3,7	2,4	1,5	1,5	1,4
Desvio padrão	0,7	0,6	0,2	0,3	0,3
Média	2,6	1,5	1,1	0,8	0,7
CV (%)	26,8	39,7	19,6	32,2	44,2

Conforme já discutido anteriormente, as médias dos teores de carbono no solo tenderam a diminuir com o aumento da profundidade - de 2,8% a 0,7%, no fragmento conservado e de 2,3% a 0,61%, no fragmento em restauração. O teor

médio encontrado para o fragmento conservado foi de 1,53%, enquanto para o fragmento em restauração, foi de 1,16%.

Morais (2012) encontrou valores médios mais baixos para áreas de cerrado em MG (0,33% a 0,74%) e Neves et al. (2004) encontraram valores de 2,6%, 1,52% e 1,19% para as profundidade de 0 a 5 cm, 5 a 20 cm e 20 a 40cm de profundidade, respectivamente, em áreas sob cerrado nativo.

Milcu et al. (2011), avaliando teor de carbono na camada de 0 a 5 cm, em solos sob floresta decídua de, aproximadamente, 60 anos, na Inglaterra, encontraram valores de 6,2%, em suas parcelas controle, sem melhoria prévia de condições químicas do solo, como adição de N, por exemplo. Este valor está bem acima dos encontrados neste trabalho.

Grimm et al. (2008) encontraram teores de carbono variando de 4,4% (0 a 30 cm) a 1,18% (30 a 50 cm) em Latossolo sob Florestas Semidecíduas, em Barro Colorado, Panamá.

Powers; Schlesinger (2002) encontraram teores médios de carbono no solo de 6,19% (0 a 10 cm), 4,39% (10 a 20 cm), 3,17% (20 a 30 cm), 2,09% (30 a 50 cm) e 1,18% (50 a 100 cm), em florestas tropicais na Costa Rica, em áreas de terrenos vulcânicos, com índices elevados de precipitação.

Visando comparar os valores encontrados nos fragmentos considerados neste estudo, os dados obtidos para teor de carbono no solo foram submetidos à análise de variância e a teste de média, considerando como fontes de variação a profundidade de coleta e os fragmentos e interação entre estes. Os dados encontrados para os fragmentos e profundidades foram considerados diferentes ($p= 0,0033$ e $p = 0,000$, respectivamente), tendo o fragmento conservado e as camadas mais superficiais apresentado maior valor de teor de carbono. Como a interação entre os fragmentos e as profundidades analisados não foi considerada significativa ($p = 0,2454$), não consideramos haver diferença entre o teor de

carbono no solo, com relação ao preparo de solo e à antropização, em cada profundidade de coleta.

Com relação à diferença em cada profundidade devido ao preparo de solo, ao manejo ou ao sistema de uso de solo (ou seja, interação entre profundidades e uso de solo), alguns autores também afirmam não ter encontrado diferenças no teor de carbono, na camada de 0 a 10 cm. Neumann-Cosel et al. (2011) encontraram teor médio de 3,7% de carbono orgânico na camada de 0 a 10 cm e de 2,5% na camada de 10 a 20 cm, tanto em áreas sob pastagens quanto sob florestas secundárias, no Panamá. Do mesmo modo, Camargo et al. (1999) encontraram valores muito próximos para teores de carbono para 0 a 10 cm, sendo estes valores de 2,86% (pastagem degradada), 2,72% (floresta secundária de 7 anos), 2,77% (floresta secundária de 16 anos) e 2,87% (floresta primária), em áreas próximas a Paragominas, PA.

Com relação às diferenças entre áreas com diferentes históricos de uso de solo, Qiji et al. (2008) relataram ter encontrado menores teores de carbono orgânico total no solo em campo severamente degradado, comparado a campo levemente degradado, valores estes 7,6% menores.

Os menores teores médios de carbono encontrados no fragmento em restauração podem ser justificados pela sua utilização como área de empréstimo na construção da barragem, com a retirada de até 5 m do perfil do solo. Somam-se a isso a prévia supressão da vegetação e a manutenção desta área sem qualquer cobertura vegetal por mais de 30 anos e o revolvimento do solo, prévio ao plantio das mudas na restauração.

Neves et al. (2004), em estudo semelhante, ainda afirmam que menores teores de carbono encontrados em fragmentos em restauração podem se justificar pelo fato de a matéria orgânica ser mais suscetível à oxidação quando o solo é revolvido; pelo aporte de carbono nas áreas em recuperação ser menor do que nas nativas e pelo fato de as áreas em recuperação terem tido os horizontes

superficiais decaptados. Concluíram, ainda, que perturbações antrópicas sofridas por um sistema florestal nativo causaram perdas de carbono pelo preparo de solo, o aumento de oxidação de compostos orgânicos, a ruptura mecânica dos agregados e a exposição da superfície do solo à chuva.

O resultado do teste de médias para valores de teor de carbono no solo para as profundidades avaliadas pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8. Teste de média Scott-Knott (5%) para valores de teor de carbono no solo (%), obtidos por profundidades, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

PROFUNDIDADES	MÉDIAS*
100	0,6 a
60	0,8 a
40	1,1 b
20	1,4 b
10	2,6 c

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

Considerando as diferenças entre as médias obtidas das profundidades, observa-se que, realmente, existe a tendência de diminuição do teor de carbono, à medida que a profundidade de coleta aumenta.

4.2.2. Estoque de carbono do solo

Os valores de densidade do solo nos fragmentos variaram de 1,12 a 1,95 g.cm⁻³, em fragmento conservado e de 1,21 a 1,72 g.cm⁻³, em fragmento em restauração. Entretanto, os valores médios de densidade do solo não diferiram muito entre os fragmentos, ficando na ordem de 1,53 a 1,57 g.cm⁻³. Conforme a equação 1, citada anteriormente, estes valores foram utilizados para os cálculos de estoque de carbono.

Os dados encontrados para estoque de carbono no solo foram menos variáveis do que os de estoque do sistema radicular, entretanto, ainda foram

considerados de variabilidade média ($12\% \leq CV \leq 60\%$), segundo Warrick e Nielsen (1984) citados por Chaves e Farias (2008) e Cruz et al. (2010). A maior variação nos dados foi encontrada nas camadas de 10 a 20 cm ($CV=41,44\%$). O maior valor de estoque de carbono encontrado foi de $69,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ (40 a 60 cm), enquanto o menor valor foi encontrado para 10 a 20 cm ($6,85 \text{ Mg ha}^{-1}$), ambos no fragmento em restauração (Tabela 9).

Tabela 9. Estatística descritiva de valores de estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) encontrados para os fragmentos florestais, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Estoque de carbono no solo						
Profundidade (cm)						
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 100	0 a 100
Máximo	52,75	37,44	49,73	69,38	52,10	223,10
Mínimo	20,90	6,85	29,97	38,98	26,04	136,90
Desvio padrão	10,18	9,41	7,75	9,75	8,94	28,82
Média	34,26	22,70	38,62	51,18	38,76	185,52
CV (%)	29,70	41,44	20,06	19,05	23,08	15,53

Os estoques de carbono, considerando a camada de 0 a 100 cm, variaram de $136,9$ a $208,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ no fragmento em restauração e de $172,6$ a $223,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, no fragmento conservado. Os valores médios foram de $201,86 \text{ Mg ha}^{-1}$, para fragmento conservado e de $169,16 \text{ Mg ha}^{-1}$, para fragmento em restauração. Tais valores estão de acordo com referências encontradas na literatura para estoque de carbono em Latossolo, de 176 Mg ha^{-1} para 0 a 100 cm (BATJES, 1996).

Para florestas secundárias desenvolvidas em áreas de antigas pastagens no Panamá, Neumann-Cosel et al. (2011) encontraram, na literatura, referências de valores de estoque de carbono para os 10 cm superiores variando de 25 a 50 Mg ha^{-1} , de forma similar aos encontrados no presente trabalho, que variaram de $20,9$ a $52,75 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Neumann-Cosel et al. (2011) relataram, ainda, valores médios de estoque de carbono no solo de 28,1 e 22,7 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, respectivamente, em áreas de pastagens e florestas secundárias, no Panamá. Para áreas de pastagem ativa, o estoque médio foi de 24,8 Mg ha⁻¹, enquanto, para florestas secundárias, foi de 27,5 Mg ha⁻¹, para 0 a 10 cm. Em florestas secundárias de 100 anos, os autores encontraram estoque médio semelhante (34 Mg ha⁻¹) ao encontrado no presente trabalho para a camada de 0 a 10 cm, sendo este estoque de 34,3 Mg ha⁻¹ (considerando os fragmentos conjuntamente) ou 31,63 Mg ha⁻¹ (fragmento restaurado, com 20 anos) e 36,88 Mg ha⁻¹ (fragmento conservado).

Considerando a profundidade de análise de 0 a 20 cm, em fragmento de Floresta Atlântica (em Coimbra, MG), foi encontrado valor de estoque de 63,95 Mg ha⁻¹ (LEITE et al., 2003), resultado similar ao encontrado no fragmento conservado, de 66,18 Mg ha⁻¹ e maior que o encontrado no fragmento em restauração, de 47,73 Mg ha⁻¹, no presente estudo. Já Corazza et al. (1999) relataram valores de estoque médio para cerrado nativo de apenas 39,77 Mg ha⁻¹ e Neumann-Cosel et al. (2011), avaliando florestas secundárias, encontraram valor médio de estoque de carbono no solo de 50,8 Mg ha⁻¹.

Neves et al. (2004) encontraram estoque médio de 62,4 Mg ha⁻¹ para cerrado, também sobre Latossolo Vermelho, para a camada de 0 a 40 cm, valor abaixo do encontrado para os fragmentos neste estudo, para a mesma camada considerada, de 109,78 Mg ha⁻¹, para fragmento conservado e de 81,36 Mg ha⁻¹, para fragmento em restauração. Qiji et al. (2008) encontraram valores médios de 136,92 Mg ha⁻¹ e 131,32 Mg ha⁻¹, para campos levemente e severamente degradados na China, na mesma profundidade de análise.

Em florestas tropicais na Costa Rica, os estoques médios relatados foram de 34,06 Mg ha⁻¹ (0 a 10 cm), 27,43 Mg ha⁻¹ (10 a 20 cm) e 20,71 Mg ha⁻¹ (20 a 30 cm), sendo um acumulado de 82,2 Mg ha⁻¹, para a camada de 0 a 30 cm

(POWERS; SCHLESINGER, 2002), valores estes bem próximos aos encontrados no presente trabalho.

Grimm et al. (2008) relataram estoques de 64,83 Mg ha⁻¹ para a camada de 0 a 30 cm e de 86,62 Mg ha⁻¹, para a camada de 0 a 50 cm, em florestas semidecíduas sobre Cambissolo e Latossolo, em Barro Colorado, Panamá.

Avaliando o perfil do solo até 100 cm, com relação aos dados encontrados para áreas de cerrado em Minas Gerais, tais valores parecem ser bem variáveis, uma vez que Morais (2012) encontrou valores de estoque de carbono no solo variando de 38,8 a 100,2 Mg ha⁻¹. Entretanto, Tonucci et al. (2011) encontraram valores bem acima dos encontrados neste estudo, variando de 461 Mg ha⁻¹, em solo sob pastagem sem componente arbóreo a 393 Mg ha⁻¹, em solo sob plantio de eucalipto em região de cerrado em Paracatu, MG, o que pode ter ocorrido devido ao maior teor de argila nos solos deste estudo e à ausência de revolvimento intenso no preparo do solo.

Ainda com relação à profundidade de 0 a 100 cm, Camargo et al. (1999) encontraram valores de estoque de carbono no solo de 100 Mg ha⁻¹ (em pastagem degradada), 107 Mg ha⁻¹ (em pastagem manejada), 103 Mg ha⁻¹ (em floresta secundária de 16 anos) e de 102 Mg ha⁻¹ para floresta primária na região de Paragominas, PA. Como observado neste estudo, a mudança no uso da terra - de pastagem para florestas - não alterou significativamente tais valores.

Os dados encontrados para estoque de carbono no solo foram submetidos à ponderação (valores considerados para 10 cm, de forma a evitar distorções devido às diferentes espessuras de solo analisadas), à comparação por análise de variância e teste de Scott-Knott ($\alpha = 5\%$), considerando como fonte de variação os fragmentos, profundidades e interação entre estes.

Houve efeito significativo nos dados de estoque de carbono no solo entre os fragmentos ($p = 0,0154$) e entre as profundidades ($p = 0,001$), não havendo para a interação entre tais fatores ($p = 0,1495$).

Os dados encontrados para os fragmentos e as profundidades foram considerados diferentes, tendo o fragmento conservado estocado, em média, mais carbono no solo ($24,33 \text{ Mg ha}^{-1}$) do que o fragmento em restauração ($19,75 \text{ Mg ha}^{-1}$). As diferenças entre os valores médios ponderados por profundidades podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10. Teste de média Scott-Knott (5%) para valores ponderados de estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) obtidos por profundidades, em fragmentos avaliados no entorno da UHE Camargos, MG.

Profundidades (cm)	Médias*
60 a 100	9,69 a
20 a 40	19,31 b
10 a 20	22,70 b
40 a 60	24,25 b
0 a 10	34,25 c

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

A diferença encontrada para os estoques totais entre os fragmentos pode ter sido devido à retirada e ao preparo convencional de solo no fragmento em restauração, uma vez que revolvimento intensivo de solo, já foi mostrado por muitos autores (BAYER; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2000; NEVES et al., 2004; SALTON, 2005; LAL, 2007), é motivo de queda nos estoques de carbono do solo.

O tempo de análise pode ter sido curto para que os estoques do fragmento em restauração atingissem os valores do fragmento conservado, uma vez que o desenvolvimento continuado da floresta em restauração pode levar ao aumento do acúmulo de carbono orgânico no solo. Neumann-Cosel et al. (2011) encontraram, na literatura, valores de recuperação de estoque de carbono no solo num tempo de 35 a 50 anos. Camargo et al. (1999) também observaram que um período de 16 anos não foi suficiente para que houvesse uma similaridade de estoques de carbono no solo entre florestas maduras e secundárias. Assim, talvez

seja necessário o monitoramento de áreas com mais de duas ou três décadas de recuperação florestal.

A distribuição das médias encontradas para cada fragmento em cada profundidade de coleta pode ser visualizada no Gráfico 5.

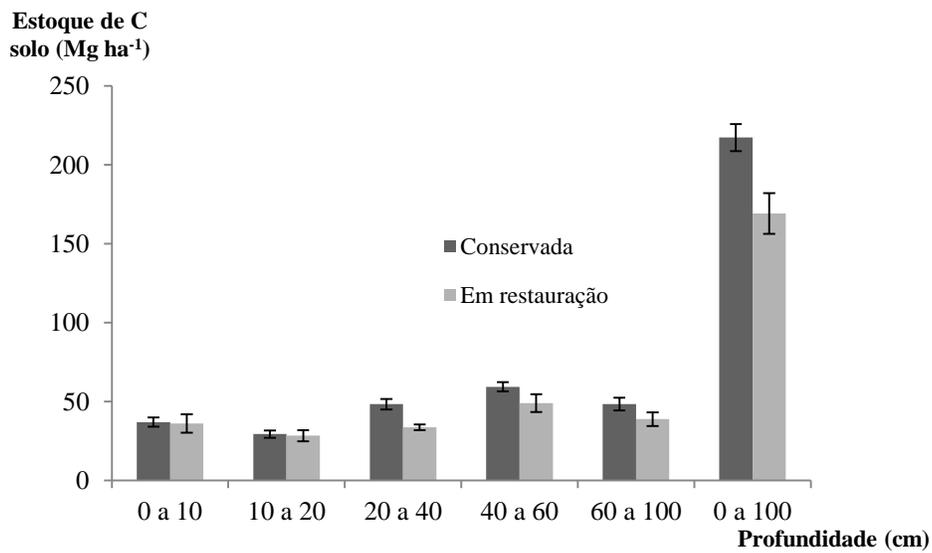


Gráfico 5. Distribuição do estoque médio de carbono do solo nos fragmentos analisados com relação às profundidades de coleta e seus respectivos erros padrões da média.

A distribuição da proporção acumulada dos estoques de carbono no solo no perfil de 100 cm de solo pode ser visualizada na Tabela 11.

Tabela 11. Proporção acumulada estoques de carbono em cada profundidade de solo analisada em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG.

Fragmento conservado						
parcelas	1	2	3	4	5	média
Estoque 0 a 10 cm	12,37%	21,56%	23,34%	15,16%	14,90%	17,47%
Estoque 0 a 20 cm	20,81%	15,73%	37,12%	29,51%	31,67%	26,97%
Estoque 0 a 40 cm	37,93%	55,20%	57,68%	52,98%	53,30%	51,42%
Estoque 0 a 60 cm	68,30%	81,26%	86,52%	76,10%	80,0%	78,47%
Estoque 0 a 100 cm	100%	100%	100%	100%	100%	100,00%
Fragmento em restauração						
parcelas	1	2	3	4	5	média
Estoque 0 a 10 cm	16,97%	17,30%	11,36%	30,88%	17,30%	18,76%
Estoque 0 a 20 cm	29,17%	26,58%	19,45%	34,90%	30,88%	28,20%
Estoque 0 a 40 cm	50,51%	48,47%	39,04%	53,54%	49,70%	48,25%
Estoque 0 a 60 cm	77,22%	80,97%	76,76%	76,70%	74,99%	77,33%
Estoque 0 a 100 cm	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%

A distribuição acumulada percentual dos valores encontrados para estoque de carbono nas diferentes profundidades de coleta foi similar para ambos os fragmentos: cerca de 18% do estoque de carbono estiveram concentrados na camada de 0 a 10 cm; de 26%-28% se concentraram na camada de 0 a 20 cm; de 48%-51%, na camada de 0 a 40 cm e 77%-78% do estoque de carbono encontrado concentrou-se na camada de 0 a 60 cm.

Yimer; Ledin; Abdelkadir (2007), em solos do sudeste da Etiópia, encontraram um acumulado de 58% de teor de carbono, considerando a camada de 0 a 20 cm. Balbinot et al. (2003) encontraram correspondência de 65% de estoque de carbono para a camada de 0 a 40 cm de solo, sob plantio de *Pinus taeda*, no Rio Grande do Sul (Tabela 9).

4.2.3 Análises químicas e físicas do solo

Os resultados da análise de fertilidade (macro/micronutrientes) e textura estão apresentados nos Anexos I e II, ao final deste trabalho.

Com relação à textura, os solos foram considerados de textura média a argilosa. A textura tem sido citada, por muitos autores, como importante agente influenciador do estoque de carbono, uma vez que solos mais argilosos atuam como barreira física, protegendo frações da matéria orgânica do solo (LAL, 2007; NAIR et al., 2011).

Com relação à acidez ativa (pH), os solos foram considerados quimicamente ácidos – acidez muito elevada (pH 4,2) a acidez fraca (6,7); com relação à classificação agronômica, de muito baixa a boa. A acidez trocável (H+Al) foi maior no fragmento conservado, sendo, neste fragmento, maior que $5,0 \text{ cmol dm}^{-3}$ em quase todas as amostras. O teor de Al foi maior que o nível crítico ($<1,0 \text{ cmol dm}^{-3}$) nas parcelas do fragmento conservado. Com relação à saturação por alumínio, o mesmo padrão foi verificado. Sendo assim, maiores valores de saturação por alumínio foram encontrados para o fragmento conservado.

Pode-se dizer que o solo das áreas estudadas apresentam uma carência de Ca e Mg (valores encontrados menores que o nível crítico, de 2,4 e $0,9 \text{ cmol.dm}^{-3}$ respectivamente). Os valores de soma de bases foram menores que o nível crítico ($3,6 \text{ cmol.dm}^{-3}$). Os únicos valores de saturação por bases maiores que o nível crítico foram encontrados no fragmento em recuperação.

Com relação à CTC, a CTC efetiva (t) das amostras foi considerada baixa, e a CTC a pH 7,0 (T) só foi maior no fragmento conservado. Com relação aos teores de fósforo disponível, analisados segundo o teor de argila, estes foram considerados muito baixos, com exceção da amostra de uma parcela do fragmento em restauração, de 0 a 10 cm, que apresentou valor considerado

muito bom. Os teores de potássio disponível se encontraram entre muito baixo a médio/bom, variando entre as parcelas e as profundidades de coleta.

Com relação aos micronutrientes, os níveis de Zn foram considerados abaixo do nível crítico ($1,5 \text{ mg dm}^{-3}$), exceto para as profundidades superficiais de algumas parcelas. Os níveis de Mn no fragmento conservado foram maiores que o nível crítico apenas nas duas camadas superficiais, enquanto, no fragmento em restauração, foram considerados altos em todas as profundidades, nas parcelas FR1 e FR4, localizadas mais próximas ao fragmento conservado. Os níveis de Cu foram praticamente maiores que o nível crítico em todas as parcelas/profundidades do fragmento conservado, e em apenas uma parcela do fragmento em restauração. Com relação ao B, todas as parcelas, em todas as profundidades, se mostraram bem abaixo do nível crítico. Com relação aos níveis de S, os valores mostraram-se variáveis de muito baixo a muito bom.

Segundo o histórico de plantio da área, a adubação de implantação foi de 250 g/cova de superfosfato simples por planta no plantio e foi feita uma única adubação em cobertura, aos dois anos, com 150 g/planta de NPK 10:30:10 (DAVIDE; FARIA, 1997). A fertilidade atual não reflete a fertilidade do momento da implantação.

Com os dados resultantes das análises de solo foi realizada ainda análise multivariada, sendo escolhida a análise de componentes principais (PCA), para alguns parâmetros nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Muitos autores têm escolhido a PCA para análise exploratória de dados de fertilidade de solo (MOURA et al., 2006; MELÉM JÚNIOR et al., 2008; KRUMMER et al., 2010; MIQUELONI; BUENO, 2011).

Pretendeu-se avaliar a relação entre propriedades de solo e estabelecer agrupamentos entre os pontos analisados. Os gráficos dos escores apresentados fornecem a composição dos componentes principais em relação às amostras de solo. A aproximação entre dois pontos significa semelhança entre os valores das

propriedades do solo para cada agrupamento. As propriedades químicas do solo são representadas por vetores, que indicam o sentido do aumento dos valores da variável estudada.

Para a apresentação dos resultados, optou-se pelo ordenamento das amostras (*scores*) e das variáveis (*loadings*) no mesmo gráfico da PCA, ou seja, adotou-se a utilização de vetores identificando os principais fatores (variáveis) responsáveis pelos agrupamentos das amostras. (Gráfico 6).

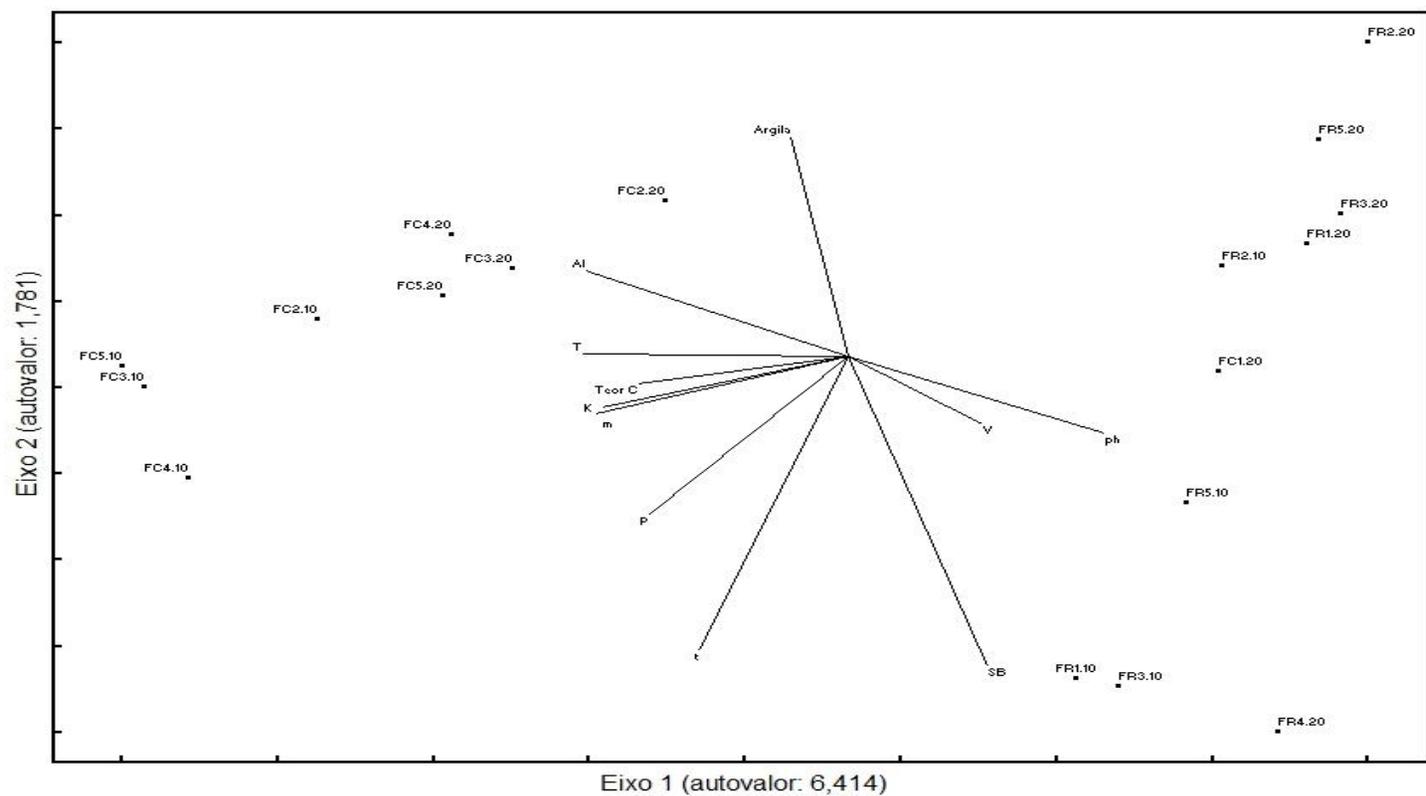


Gráfico 6. Análise de componentes principais (PCA) para parâmetros de solo das profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, dados de fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos, MG, sendo: soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC a pH 7,0 (T), Al^{3+} , teor de C, pH, saturação por bases (V), potássio (K), e saturação por alumínio (m) e teor de argila (argila).

Foram avaliados onze atributos químicos, de forma a sintetizar a análise, sendo: soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC a pH 7,0 (T), Al^{3+} , teor de C, pH, saturação por bases (V), potássio (K) e saturação por alumínio (m) e teor de argila. Tais atributos foram considerados como indicadores representativos da fertilidade do solo (MELÉM JÚNIOR et al., 2008).

Pela análise da PCA observa-se que o primeiro eixo separou os dados em dois grupos, de acordo com os fragmentos. Os pontos de coleta do fragmento conservado foram mais correlacionados com teor de C, Al, T, K e m, enquanto os pontos de coleta do fragmento em restauração foram mais correlacionados com a V, pH e um pouco com a SB. Não houve um agrupamento definido de forma a diferenciar as profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Os dois primeiros eixos explicaram, conjuntamente, 74,5% da variância dos dados (58,2% e 16,2%, respectivamente).

Devido a características de baixo status nutricional, alta acidez e concentração de alumínio de alguns solos, como é o caso do solo dos fragmentos avaliados, a matéria orgânica presente no solo (ou mesmo o estoque de carbono orgânico) tem papel importante no aspecto físico, químico e processos biológicos relacionados à ciclagem de nutrientes, agregação do solo e disponibilidade de água para as plantas (RESCK, 1998, citado por NAIR et al., 2011), o que é fundamental para o desenvolvimento das plantas estabelecidas no processo de restauração florestal.

4.3 Análises da matriz serapilheira

Os resultados encontrados para a matriz serapilheira (biomassa, teor e estoque de carbono) coletada em dez pontos em parcelas de fragmentos florestais, conservado e em restauração, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de biomassa de serapilheira encontrados para os fragmentos florestais, localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

*Sendo FC fragmento conservado e FR fragmento em restauração.

Biomassa serapilheira (Mg ha⁻¹)			
Fragmentos	Somatório	Média	Coefficiente de variação
Conservado	52,3	10,4	40,54%
Em restauração	105,4	21,0	43,31%

Os maiores valores de biomassa de serapilheira encontrados no fragmento em restauração pode ser devido à elevada presença de indivíduos de *Acacia mangium* nesta área, que é uma espécie capaz de contribuir consideravelmente no acúmulo de biomassa sobre o solo, em forma de serapilheira, principalmente em época seca (SAHARJO; WATANABE, 2000; ZHANG; GUAN; SONG, 2012). Esta espécie foi introduzida em parcelas no fragmento florestal em restauração e, em algumas parcelas, contribui de forma significativa na composição da biomassa da serapilheira. Para maiores informações a respeito das espécies presentes nos fragmentos florestais considerados, ver Ferreira (2009) e Faria (2012).

As diferenças de biomassa de serapilheira expressam a influência dominante de características das espécies, da idade dos povoamentos, da taxa de incremento, das condições climáticas, das propriedades do solo, da intensidade da cobertura florestal e, ainda, do estágio sucessional (WATZLAWICK et al., 2012). Considerando isso, Menezes et al. (2010) encontraram valores de

biomassa de serapilheira da ordem de 6,5; 7,4 e 10,9 Mg ha⁻¹, para fragmento florestal em estágio inicial, médio e avançado de sucessão, respectivamente.

Cabe ressaltar aqui que a deposição da serapilheira em época seca é maior que em época úmida, o que pode ter superestimado os valores neste estudo, quando comparado aos de Menezes et al. (2010), coletados em época úmida e seca. Entretanto, Paiva, Rezende e Pereira (2011) encontraram valores médios de biomassa de serapilheira de 7,11 Mg ha⁻¹ em época seca para áreas de domínio do cerrado.

Os dados encontrados para a matriz serapilheira, bem como sua análise descritiva, podem ser encontrados na Tabela 13.

Tabela 13. Valores de biomassa, teor e estoque do carbono de serapilheira encontrados para os fragmentos localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. FC: fragmento conservado e FR: fragmento em restauração.

Fragmento	Parcela	Biomassa (Mg ha⁻¹)	Teor de C (%)	Estoque de C (Mg ha⁻¹)
Conservado	FC1	3,8	27,4	1,0
	FC2	11,1	28,3	3,1
	FC3	12,8	32,0	4,1
	FC4	9,3	39,3	3,6
	FC5	15,0	40,6	6,1
Em restauração	FR1	12,6	27,2	3,4
	FR2	14,9	16,6	2,4
	FR3	23,9	12,4	2,9
	FR4	35,5	32,3	11,5
	FR5	18,2	37,1	6,7
	Média	15,7	29,3	4,5
	Desvio padrão	8,7	9,2	2,9
	Máximo	35,5	40,6	11,5
	Mínimo	3,8	12,4	1,0
	CV (%)	55,4	31,3	65,2

No fragmento em restauração, os dados mais altos de biomassa e estoque de carbono da serapilheira foram devido à presença de indivíduos de *Acacia mangium*, conforme mencionado anteriormente.

Morais (2012) encontrou, para serapilheira de fragmentos sob Cerrado *sensu stricto*, valores médios de biomassa, teor e estoque de carbono de 6,24 Mg ha⁻¹, 44,36%, 3,05 Mg ha⁻¹, respectivamente. Watzlawick et al. (2012) encontraram valores médios de 8,01 Mg ha⁻¹ e 3,06 Mg ha⁻¹ para biomassa e estoque de carbono da serapilheira, para floresta ombrófila mista montana. Cunha (1997) encontrou valores de biomassa de serapilheira de 4,2 Mg ha⁻¹ para capoeira com 13 anos; 5,6 Mg ha⁻¹, para capoeira com 19 anos e 6,0 Mg ha⁻¹, para floresta secundária com mais de 30 anos, em floresta estacional do RS.

O estoque médio de carbono em serapilheira acumulada em Floresta Ombrófila Densa variou de 4,47 Mg ha⁻¹ a 5,28 Mg ha⁻¹, segundo levantamentos de Caldeira et al. (2008). Em florestas semidecíduas no sudeste do Brasil, os valores encontrados variaram de 5,5 Mg ha⁻¹ a 8,6 Mg/ha (MORELLATO, 1992).

Ainda para florestas estacionais decíduas, no Rio Grande do Sul, a biomassa da serapilheira acumulada, para diferentes estágios sucessionais, foi de 5,1 Mg ha⁻¹ (capoeirão), 5,7 Mg ha⁻¹ (floresta secundária) e 7,1 Mg ha⁻¹ (floresta madura) (BRUN et al., 2001).

A serapilheira pode ser definida como todo tipo de material biogênico em vários estádios de decomposição. Sendo assim, a variação entre os valores de teores de carbono da serapilheira pode ter sido devido ao método de coleta realizado neste trabalho, uma vez que o material foi coletado juntamente ao solo, o que pode ter permitido prévia decomposição deste e diminuição dos teores esperados de carbono.

A distribuição dos estoques de carbono da serapilheira pode ser observada no Gráfico 7.

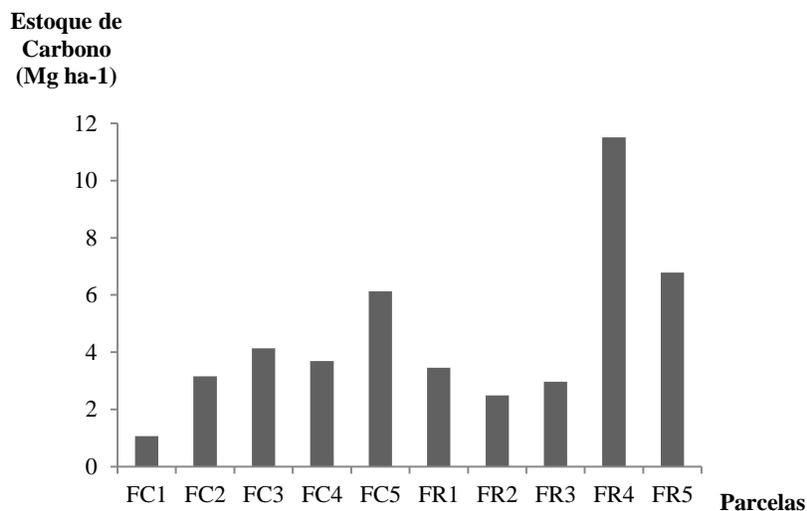


Gráfico 7. Estoque de carbono da serapilheira (Mg ha⁻¹) encontrado em fragmento conservado (FC) e fragmento em restauração (FR), localizados no entorno da UHE de Camargos, MG, sendo 1, 2, 3, 4 e 5 as parcelas analisadas.

Os dados obtidos para a serapilheira foram considerados normais, segundo teste de Shapiro-Wilk, para as variáveis analisadas, teor de carbono (%) e estoque de carbono (Mg ha⁻¹). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância e teste de média, considerando como fonte de variação os fragmentos. Não houve diferenças entre os fragmentos para dados de serapilheira, tanto de teor de carbono ($p = 0,1569$) como estoque de carbono ($p = 0,3654$).

Apesar de o estoque médio de carbono da serapilheira do fragmento em restauração (5,38 Mg ha⁻¹) ter sido maior do que o estoque médio no fragmento conservado (3,58 Mg ha⁻¹), não houve diferença significativa entre eles. Watzlawick et al. (2002) afirmam que também não foi encontrada diferença entre o estoque de carbono da serapilheira entre fragmentos florestais em diferentes estágios sucessionais, em floresta ombrófila mista. Entretanto, George et al. (2010), estudando uma cronossequência de florestas em restauração, na

Austrália, verificaram que o acúmulo de serapilheira em florestas em restauração ultrapassou os valores encontrados em florestas nativas, num intervalo de tempo de 12 anos da restauração.

A biomassa e o estoque de carbono da serapilheira apresentaram elevados valores de CV (%), assim como os encontrados em solos de Cerrado, por Morais (2012), uma vez que ecossistemas florestais com essências apresentam alta variabilidade, o que acarreta alta amplitude entre máximos e mínimos.

Uma coleta mais sazonal, de forma a abranger os meses de maior e menor deposição e decomposição da serapilheira, poderia diminuir tais coeficientes de variação, uma vez que tal coleta se deu de forma isolada e pontual.

4.4 Correlações entre variáveis e matrizes analisadas

Os resultados obtidos das variáveis de solo (análises de fertilidade), teores e estoques de carbono radicular e de solo e serapilheira foram submetidos à análise de correlação de Pearson, considerando o nível de 5% de significância. A correlação foi realizada no software Excel. O objetivo foi avaliar a existência de correlação entre atributos de fertilidade do solo com teores e estoques de carbono no solo, bem como a correlação entre os estoques dos diferentes compartimentos analisados no presente trabalho (Tabela 14).

Tabela 14. Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre as variáveis obtidas na análise de rotina de solo (fertilidade) e teor, estoque de carbono no solo e biomassa radicular, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

		Coeficiente de correlação de Pearson									
		pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	
Est. C		-0,11	-0,17	0,09	-0,08	-0,24	0,13	0,00	-0,11	-0,06	
		T	V	m	P-rem	Zn	Mn	Cu	B	S	T, C
		-0,05	-0,20	0,22	-0,15	-0,28	-0,21	0,06	-0,34	0,04	0,06
T. C		pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	
		-0,49	0,84	0,43	0,33	0,36	0,59	0,72	0,37	0,66	
		T	V	m	P-rem	Zn	Mn	Cu	B	S	
		0,88	0,01	0,25	0,28	0,42	0,39	0,06	-0,34	0,22	
Biom.Rad.		pH	K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	
		-0,11	-0,16	0,08	-0,08	-0,24	0,13	0,00	-0,11	-0,05	
		T	V	m	P-rem	Zn	Mn	Cu	B	S	
		-0,05	-0,20	0,21	-0,15	-0,28	-0,20	0,06	-0,34	0,04	

*Em que Est C = estoque de carbono; T.C = teor de carbono; SB = soma de bases; t = CTC efetiva, T = CTC a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação por alumínio; P-rem = fósforo remanescente; bioma. Rad.= biomassa radicular.

Os valores de estoque de carbono e biomassa radicular apresentaram baixa correlação com as variáveis de solo avaliadas (todas menores que 0,3), exceto para o boro, que apresentou correlação de 0,34, porém, a correlação foi indireta. Entretanto, na literatura, existem registros de forte correlação (0,83) entre biomassa radicular e oferta de nutrientes e saturação de bases (SELLE et al., 2010). Estes resultados encontrados aqui podem ser decorrentes do baixo status nutricional do solo em ambos os fragmentos, de forma que não passaram a interferir sobremaneira no crescimento radicular.

Os valores de teor de carbono foram altamente correlacionados com K, H+Al⁺ e CTC a pH 7,0. Bayer e Bertol (1999) e Silva e Mendonça (2007) também salientam a relação direta positiva entre o teor de carbono no solo e a CTC.

Houve, ainda, correlação moderada com pH, P, Ca, Mg, Al, SB, CTC efetiva, Zn, Mn e B. Para os demais atributos do solo, a correlação foi considerada fraca.

Com relação ao pH do solo, o teor de carbono funciona como tampão, aumentando ou reduzindo o pH do solo, dependendo da predominância dos processos que consomem ou liberam H^+ . Além disso, de 30% a 90% do P_{total} do solo podem estar associados à matéria orgânica do solo, dependendo do sistema de uso (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Foi ainda realizada a análise da correlação entre os valores de estoque de carbono das matrizes analisadas entre si e entre a biomassa radicular (Tabela 15).

Tabela 15. Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre os valores médios de estoque de carbono das matrizes analisadas, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

	Raízes	Serapilheira	Parte aérea¹	Global
Solo	-0,335	0,477	-0,328	0,247
	Serapilheira	Parte aérea	Global	
Raízes	-0,755	0,327	0,091	
	Parte aérea	Global		
Serapilheira	-0,469	-0,107		
	Global			
Parte aérea	0,826			
	Solo			
Biomassa de raízes	-0,335			

¹ Dados retirados de Faria (2012).

Os estoques médios globais (parte aérea + serapilheira + raízes + solo) das parcelas se correlacionaram de forma fraca com os estoques médios de solo, raízes e serapilheira. Entretanto, apresentou forte correlação com parte aérea, o que seria esperado, considerando que cerca de 50% do estoque global correspondem ao estoque da parte aérea, como já mostrado anteriormente.

Apesar de 43% do estoque global ser correspondente ao solo, a correlação entre tais valores foi considerada fraca.

Outra forte correlação se deu entre o estoque de carbono radicular e o estoque de carbono da serapilheira, entretanto, de forma indireta. Raich; Nadelhoffer (1989), citados por Nadelhoffer e Raich (1992), em estudos sobre balanço de carbono em florestas, sugerem que o carbono da serapilheira pode ser importante fator na estimativa da alocação total de carbono para as raízes finas. Entretanto, ao avaliarem dados combinados de 59 artigos sobre o assunto, os autores não encontraram correlações entre produção de raízes finas com carbono da serapilheira ou alocação de carbono da parte aérea. Entretanto, afirmam, ainda, que tal correlação depende dos métodos de obtenção de dados de raízes finas.

Apresentaram correlações moderadas: o estoque de carbono do solo com estoque de raízes, serapilheira e parte aérea; o estoque das raízes com parte aérea e o estoque da serapilheira com parte aérea.

Selle et al. (2010) encontraram forte correlação entre biomassa de raízes de pinus e teor de matéria orgânica do solo (0,835), entretanto, aqui foi encontrada correlação moderada e indireta (-0,335) entre biomassa de raízes e estoque de carbono no solo.

Os valores de biomassa encontrados para as matrizes analisadas - raízes, parte aérea, serapilheira e global - também foram submetidos à análise de correlação de Pearson (Tabela 16).

Tabela 16. Dados de correlação de Pearson (coeficiente ρ) entre os valores médios de biomassa das matrizes analisadas, para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

	Parte aérea¹	Serapilheira	Global
Raízes	0,288	-0,604	0,216
	Serapilheira	Total	
Parte aérea	-0,022	0,982	
	Total		
Serapilheira	0,156		

¹Dados retirados de Faria (2012).

Com relação aos dados de biomassa, eles foram fortemente correlacionados apenas a biomassa total e da parte aérea. A biomassa da serapilheira e a de raízes foram moderadamente correlacionadas, ainda que de forma indireta, e as demais correlações foram consideradas fracas.

4.5 Espacializações dos estoques de carbono nas áreas de estudo

Para a realização da espacialização, foram utilizados dados de estoque de carbono da serapilheira, solo e raízes (0 a 10 cm e 10 a 20 cm) e, ainda, os valores encontrados por Faria (2012), para estoque de carbono da parte aérea, considerando as mesmas parcelas analisadas neste estudo. Tais dados foram, ainda, somados de forma a encontrar o estoque global dos fragmentos, que também foi submetido à espacialização, tendo, para raízes e solo, sido utilizado o somatório do estoque de 0 a 100 cm.

Para o estoque de carbono total, estoque da serapilheira e estoque de carbono do solo de 0 a 10 cm, o melhor modelo espacial ajustado para retratar a continuidade dos dados encontrados foi gaussiano; enquanto para o estoque de carbono da parte aérea, estoque de carbono do solo de 10 a 20 cm e estoque de carbono radicular de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, o melhor modelo espacial

ajustado foi o esférico. Os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 17. Os respectivos valores estimados de efeito pepita, patamar e alcance prático são descritos a seguir.

Tabela 17. Parâmetros dos modelos ajustados para as semivariâncias em função das distâncias, para valores de estoque de carbono para fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Variável	Modelo	Efeito pepita τ^2	Patamar	Alcance prático ϕ	Dependência espacial
C parte aérea	Esférico	0,0	525,36	110,22	-
C total	Gaussiano	0,0	2232,64	130,26	-
Serapilheira	Gaussiano	1,71	25,67	190,77	-
Raiz 0-10	Esférico	0,0	5,34	101,49	-
Raiz 10-20	Esférico	0,0	1,46	102,03	-
Solo 0-10	Gaussiano	15,5	149,81	107,24	10,34
Solo 10-20	Esférico	0,0	52,41	49,16	0,00

Morais (2012), avaliando o estoque de carbono da parte aérea, em fragmentos de cerrado em MG, observou que os modelos exponencial e esférico foram os que tiveram melhor desempenho para seus dados. Entretanto, Faria (2012), avaliando também os estoques de carbono da parte aérea em fragmentos florestais – em três níveis: preservado, perturbado e degradado -, no entorno da UHE de Camargos, MG, encontrou melhor ajuste para o modelo exponencial.

Chaves e Farias (2008), avaliando a distribuição espacial do estoque de carbono em solo sob cultivo de cana-de-açúcar na Paraíba, encontraram melhores ajustes dos dados com os modelos esférico e exponencial. Ferreira et al. (2010) e Grego et al. (2010) encontraram melhor ajuste com modelo esférico para o estoque de carbono orgânico de solo nas profundidades de 0 a 20 cm, em área degradada, no Piauí e área sob plantio direto com cana-de-açúcar, em São Paulo, respectivamente. Entretanto, Cruz et al. (2010) encontraram melhor ajuste para o modelo gaussiano, considerando estoque de carbono no solo de 0 a 20 cm em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar.

Morais (2012), avaliando a espacialização de estoque de carbono em raízes em áreas de domínio do cerrado, em MG, também encontrou melhor ajuste para o modelo esférico. Entretanto, para estoque de carbono da serapilheira, encontrou melhor ajuste para o modelo exponencial.

O modelo esférico é o mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica. O modelo gaussiano tem comportamento parabólico próximo à origem e a tangente, nesse ponto, é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias (LANDIM, 2003). A escolha de qual melhor modelo a ser utilizado depende do melhor ajuste dos dados das variáveis analisadas.

Com relação aos parâmetros dos modelos ajustados, quanto maior o valor do efeito pepita mais fraca é a dependência espacial do atributo de solo em questão (CHAVES; FARIAS, 2008; CAMBARDELLA et al., 1994). Assim, o maior valor de efeito pepita (τ^2) encontrado nos ajustes de estoque de carbono de solo foi para a profundidade de 0 a 10 cm.

A relação percentual do efeito pepita com o patamar é indicativo do grau de dependência espacial dos dados de solo. Se este valor estiver entre 0% e 25%, a dependência espacial é considerada forte; se estiver entre 26% e 75%, é considerada moderada e, se for maior que 75%, é considerada fraca (CAMBARDELLA et al., 1994). Nos resultados encontrados aqui, pode-se observar que ambas as análises mostraram dependência espacial forte, uma vez que foram de 0% (solo 10 a 20 cm) a 10,34% (solo 0 a 10 cm).

Para dados de solo, existe um índice de análise de dependência espacial. Cambardella et al. (1994) afirmam que quanto mais forte for a dependência espacial apresentada por um atributo do solo, mais ele é influenciado por propriedades intrínsecas (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo); aqueles com fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, como, por exemplo, preparo e cultivo do solo. Neste caso, o estoque de

carbono na profundidade de 0 a 10 cm é mais influenciado por fatores externos do que o estoque da camada de 10-20 cm. Chaves e Farias (2008) também verificaram maior dependência espacial entre amostras mais profundas de solo, com relação ao estoque de carbono.

Com relação ao alcance prático, amostras das matrizes selecionadas a distâncias inferiores ao alcance prático foram correlacionadas entre si. O maior valor se deu para estoque de carbono na serapilheira (190,77 m) e o menor, para estoque de carbono do solo de 10 a 20 cm (49,16m). Maiores valores de alcance prático significam maior homogeneidade dos valores de estoque de carbono, ocorrendo numa área de maior raio, enquanto em menores valores, maior descontinuidade na distribuição espacial desses valores. Em outras palavras, quanto maior o alcance, maior a homogeneidade entre as unidades amostrais.

Pode-se observar, ainda, que, com relação ao estoque de carbono do solo, a profundidade de 10 a 20 cm é mais homogênea ($a = 107,24$ m) do que a profundidade inferior de 10 a 20 cm (49,16 m). Uma maior homogeneidade na camada superficial com relação ao estoque de carbono do solo também foi verificada por Chaves e Farias (2008).

Os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores de estoque de carbono em locais não amostrados pelo método da krigagem, gerando, dessa forma, mapas de distribuição espacial do estoque de carbono.

Os semivariogramas ajustados estão representados nos Gráficos 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

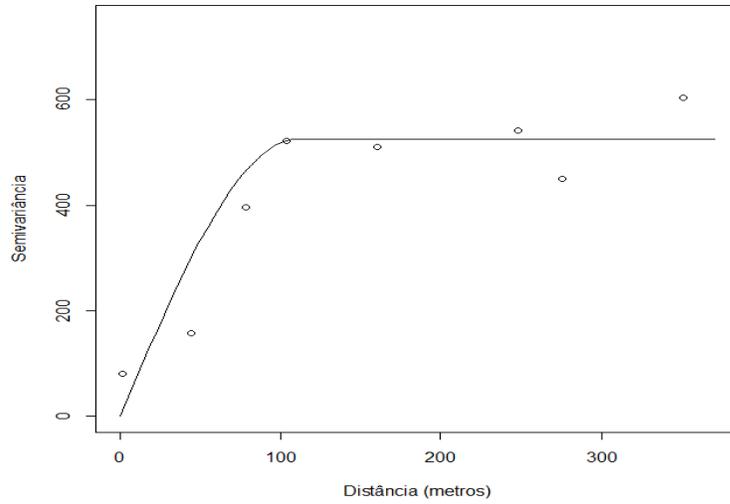


Gráfico 8. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na parte aérea, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

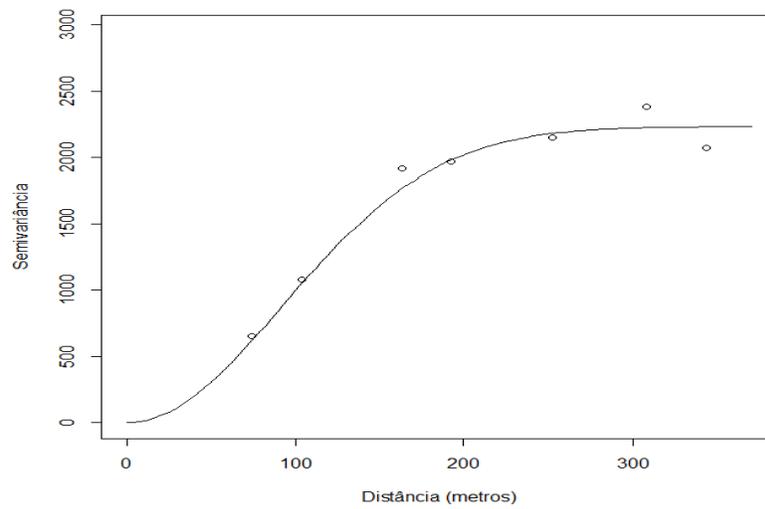


Gráfico 9. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono total, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

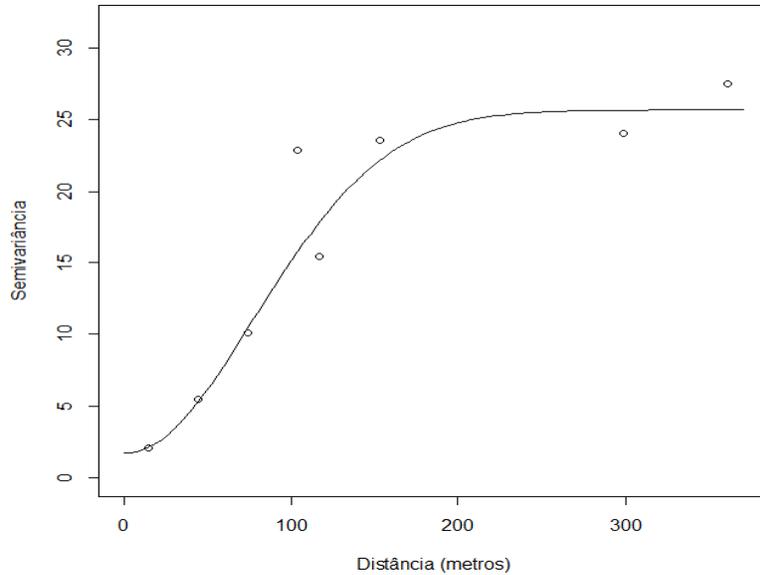


Gráfico 10. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na serapilheira, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

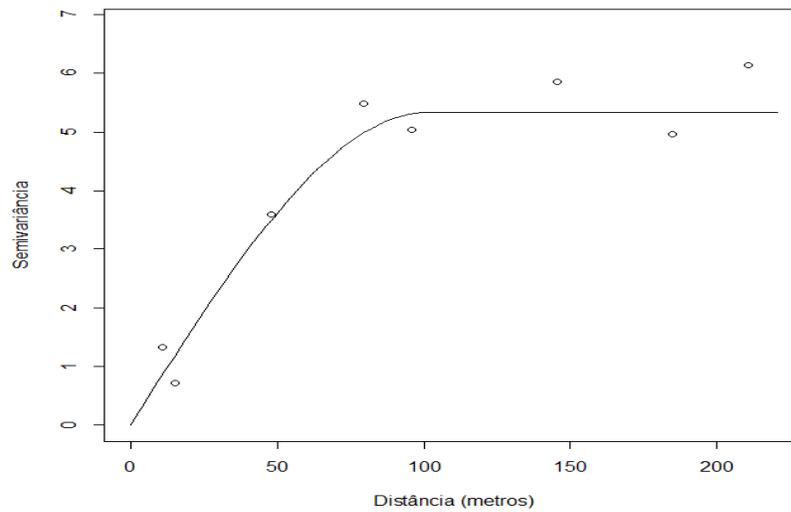


Gráfico 11. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na raiz, a 0-10 cm de profundidade, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

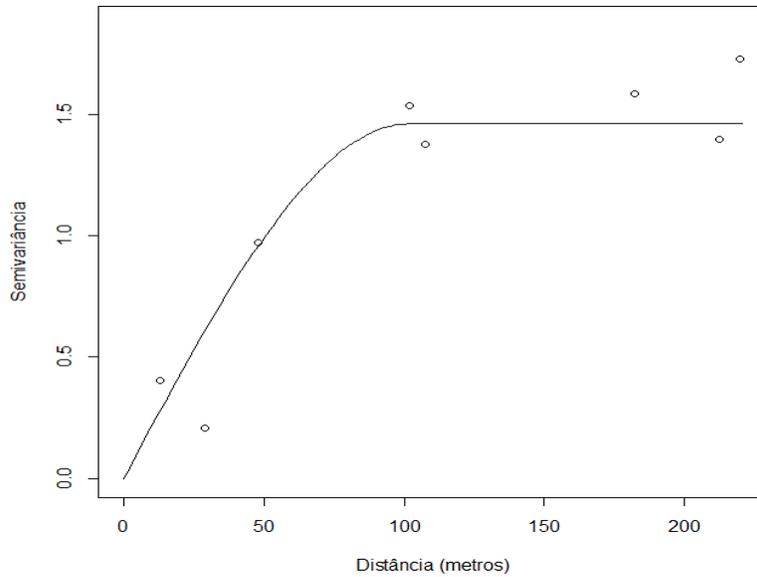


Gráfico 12. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente na raiz, a 10-20 cm de profundidade, com modelo esférico, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

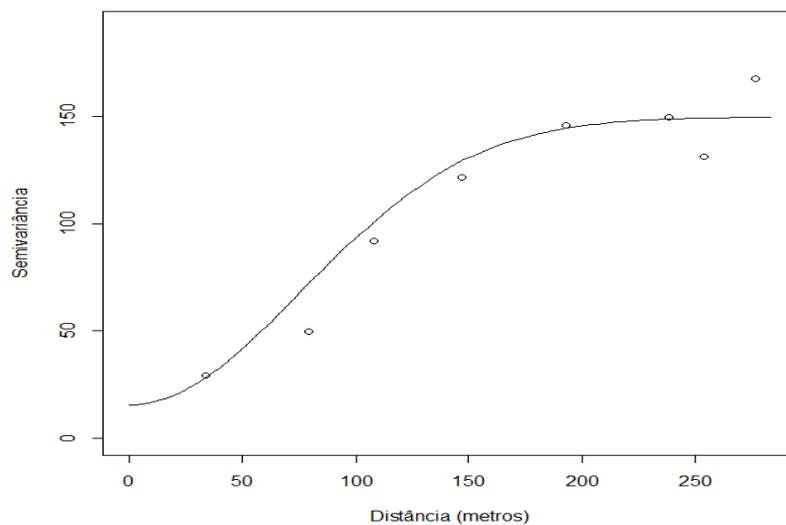


Gráfico 13. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente no solo, a 0-10 cm de profundidade, com modelo gaussiano, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

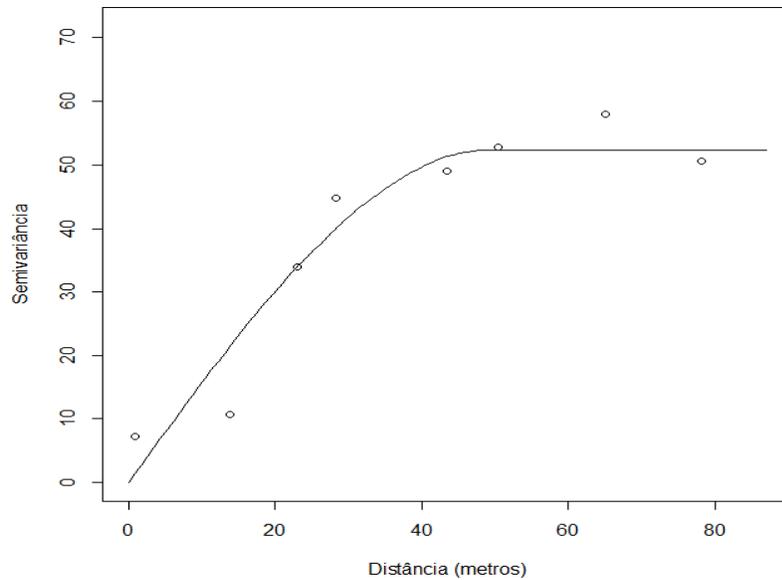


Gráfico 14. Semivariograma ajustado para a variável estoque de carbono presente no solo, a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG.

Por meio da interpolação pela krigagem ordinária, estimaram-se os valores de estoque de carbono para os pontos não amostrados, através dos modelos ajustados, originando um mapa de krigagem, de forma a representar a distribuição dos estoques de carbono nas áreas em estudo.

As análises espaciais foram realizadas para a área total de 4,02 ha, ou seja, considerando ambos os fragmentos de forma conjunta. Para diferenciar os fragmentos, ver Figura 2, neste trabalho.

Os mapas de krigagem, mostrando a distribuição do estoque de carbono nas áreas em estudo para os diferentes compartimentos, estão representados nas Figuras 11 a 18.

Na Figura 11 observa-se o mapa da área no entorno da UHE de Camargos, com as classes de estoque de carbono da matriz aérea, os dados foram retirados de Faria (2012) e procedeu-se à análise espacial. A porção da área com coloração cinza médio é a que tem menos carbono estocado na matriz aérea (região sul e centro-oeste do fragmento em restauração). A maior porção da área tem um estoque de carbono no intervalo de 44,36-50,25 Mg ha⁻¹, principalmente no fragmento conservado, sendo esta área representada pela coloração cinza-claro.

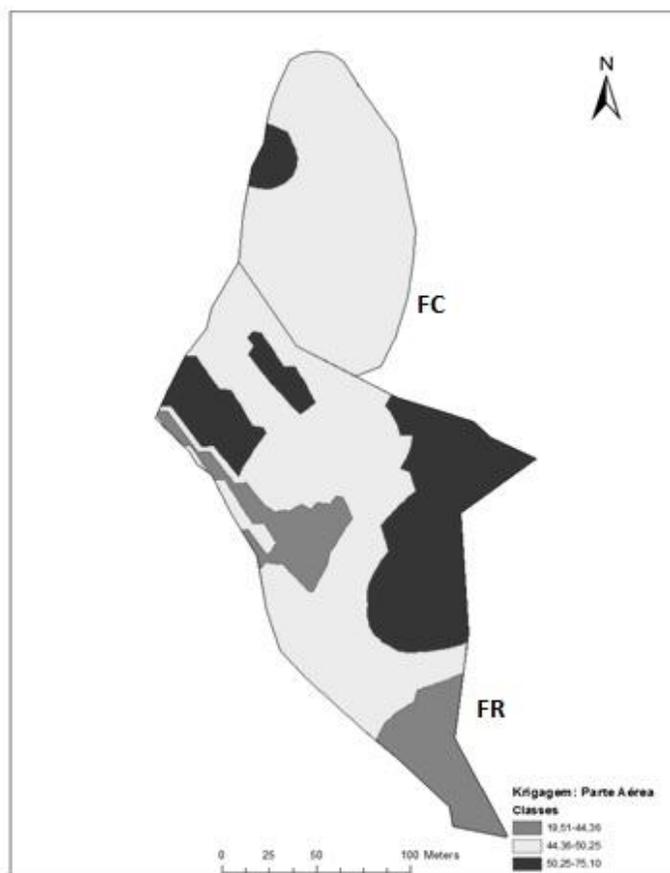


Figura 11. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na parte aérea, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha⁻¹.

O mapa da área com as classes de estoque de carbono na serapilheira nos fragmentos no entorno da UHE de Camargos pode ser observado na Figura 12. A região que tem maior estoque de carbono na serapilheira se encontra na interseção entre os fragmentos (cinza-escuro), estando a maior parte dos fragmentos contida na classe mediana de estoque de carbono na serapilheira (cinza-claro).

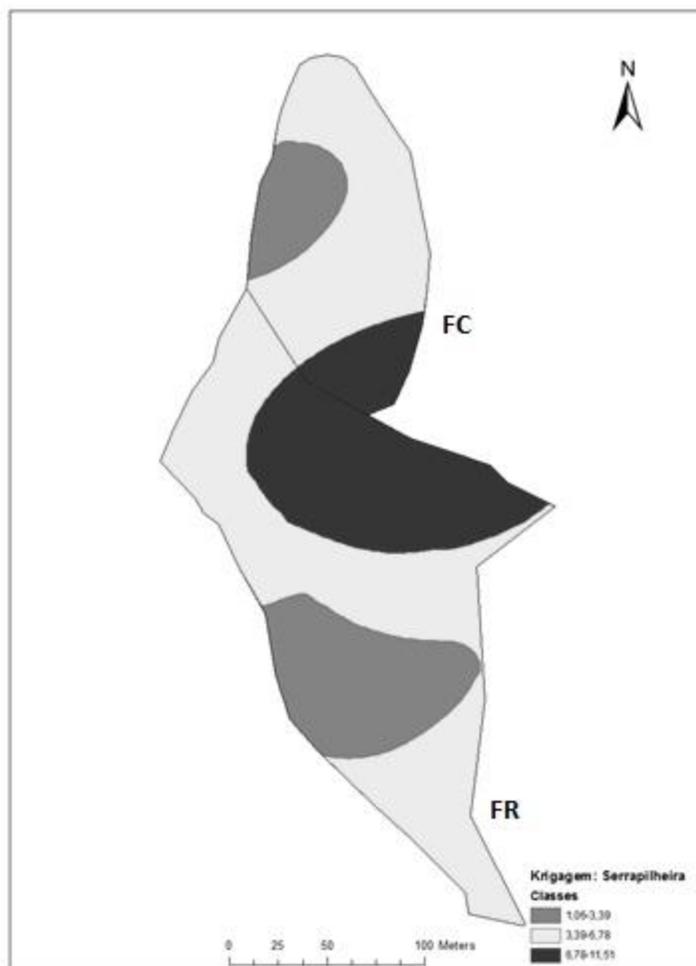


Figura 12. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na serapilheira, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha^{-1} .

Na Figura 13 observa-se o mapa da área no entorno da UHE de Camargos, com as classes de estoque de carbono radicular (0 a 10 cm). A porção sul (cinza-médio), no fragmento em restauração, tem menos carbono radicular estocado. A região com maior estoque de carbono radicular se encontra ao norte no fragmento conservado, com uma pequena área (cinza-escuro). A maior porção da área tem um estoque entre 1,74 e 3,5 Mg ha⁻¹.

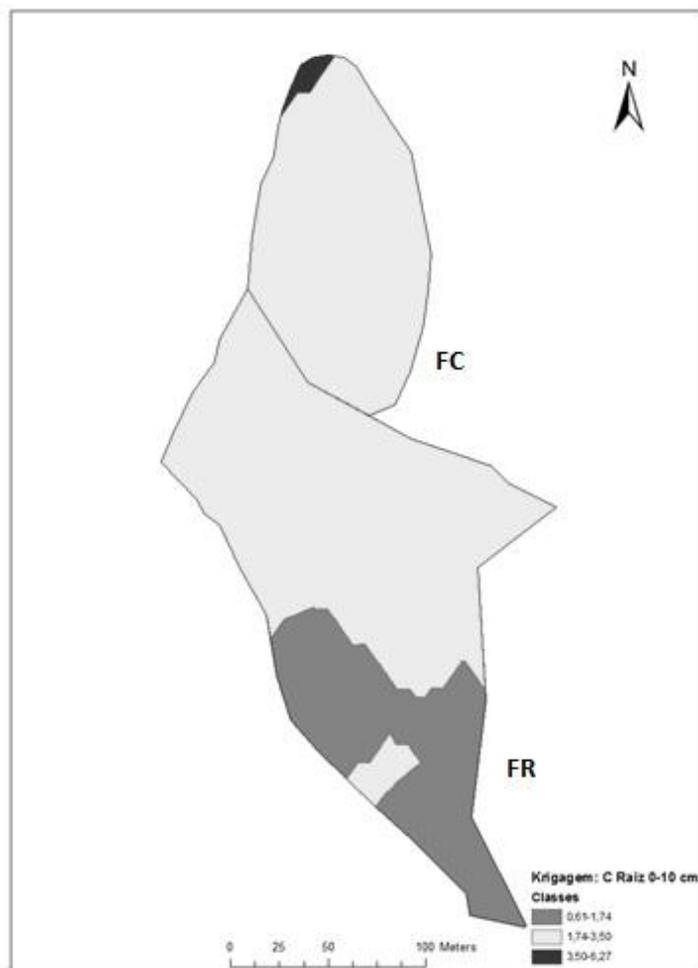


Figura 13. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na raiz a 0-10 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha⁻¹.

O mapa da área no entorno da UHE de Camargos, com estoque de carbono radicular (10 a 20 cm), pode ser observado na Figura 14. A porção centro-sul (cinza médio), que se encontra no fragmento em restauração, tem menos carbono radicular estocado. A região com maior estoque de carbono (cinza-escuro) se encontra no fragmento conservado. A maior porção da área tem um estoque entre 1,51 e 2,23 Mg ha^{-1} .

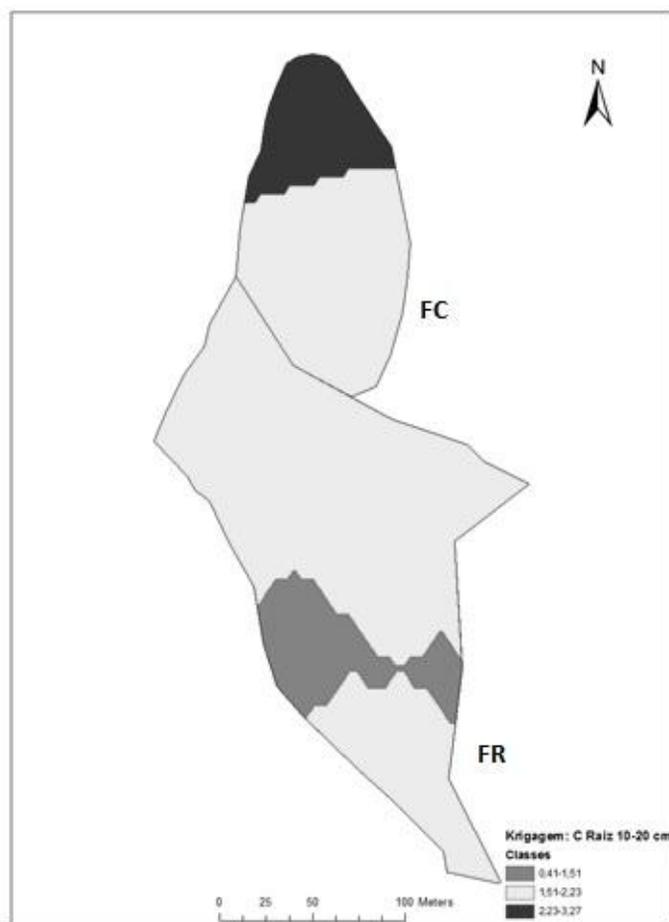


Figura 14. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente na raiz a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha^{-1} .

Na Figura 15 observa-se o aspecto da distribuição de carbono estocado no solo na camada de 0 a 10 cm, em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos. A porção da área mais ao norte (maior porção do fragmento conservado) e localizada na interseção dos fragmentos tem maiores estoques de carbono no solo (cinza-escuro).

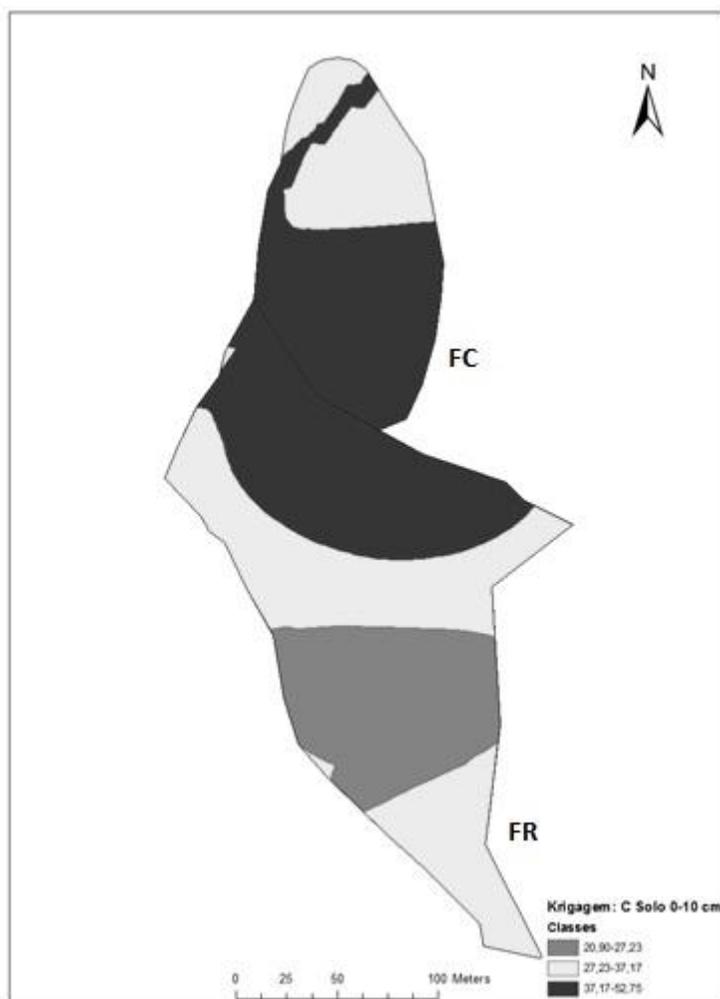


Figura 15. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente no solo a 0-10 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha⁻¹.

Na Figura 16 é possível observar a distribuição de carbono estocado no solo na camada de 10 a 20 cm, em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos. A porção da área mais ao norte (cinza-escuro) tem maiores estoques de carbono no solo. A maior parte da área apresenta estoque de carbono no solo no menor intervalo, entre 6,85 e 17,04 Mg ha^{-1} (cinza-médio).

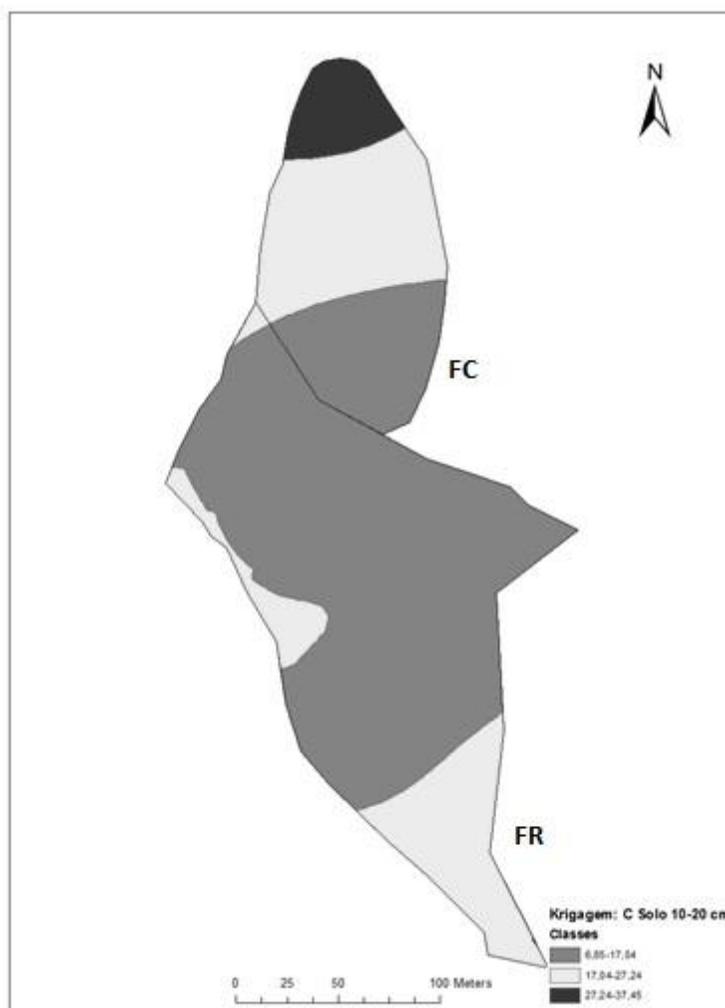


Figura 16. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono presente no solo a 10-20 cm de profundidade, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha^{-1} .

O mapa da área no entorno da UHE de Camargos, com as classes de estoque de carbono total nos fragmentos, se encontra na Figura 17. A porção sul (cinza-médio), no fragmento em restauração, é a que tem menos carbono total estocado, sendo mais abrangente. A região na interseção dos fragmentos tem estoque de carbono total na classe mediana. A região com maior estoque de carbono total se encontra no fragmento conservado.

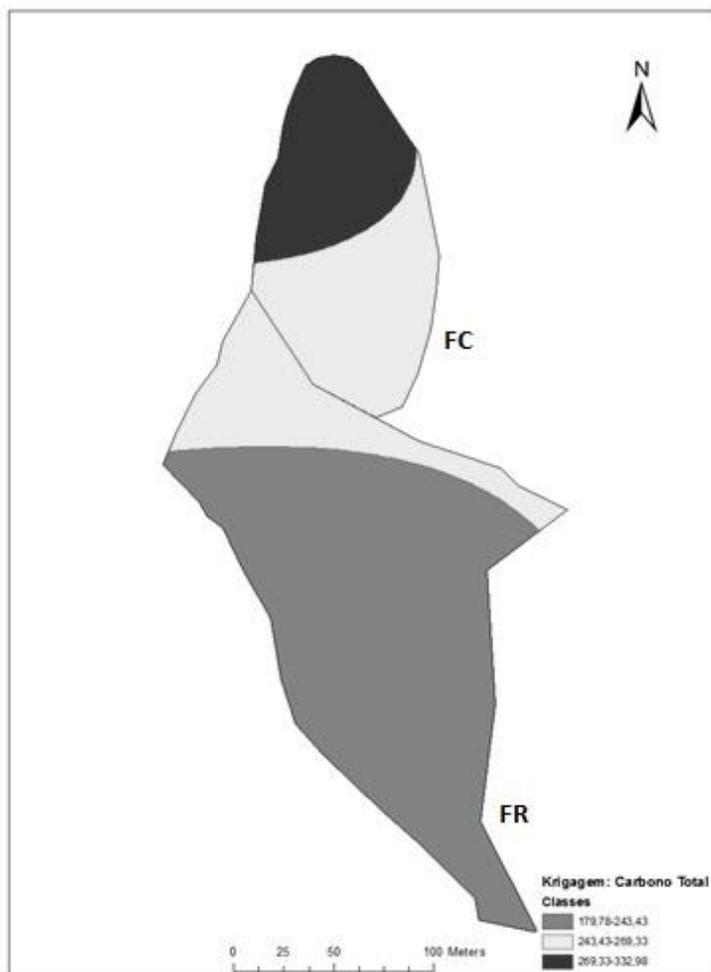


Figura 17. Krigagem ajustada para a variável estoque de carbono total, em fragmentos florestais localizados no entorno da UHE de Camargos, MG. Os valores de estoque de carbono estão em Mg ha^{-1} .

No mapa da Figura 17 observa-se um gradiente nítido de aumento no estoque global de carbono à medida que passamos do fragmento em restauração (mais ao sul) para o fragmento conservado (mais ao norte).

4.6 Estoques globais dos fragmentos florestais

Considerando os estoques das matrizes analisadas já expostos nos itens anteriores e os dados de estoque da parte aérea, retirados de Faria (2012) para as mesmas parcelas analisadas neste estudo, o estoque total médio do fragmento em restauração foi de $224,81 \text{ Mg ha}^{-1}$ e, no fragmento conservado, de $263,34 \text{ Mg ha}^{-1}$. A distribuição percentual dos estoques de carbono das matrizes analisadas pode ser visualizada nas Figuras 18 e 19.

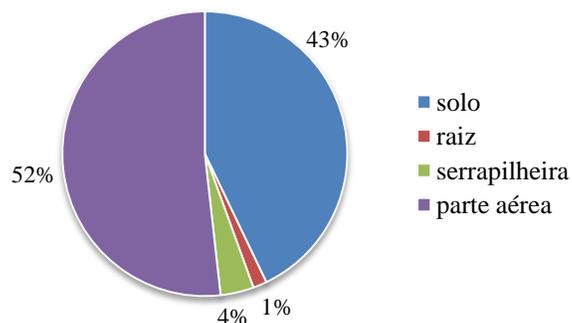


Figura 18. Distribuição percentual de estoque de carbono das matrizes analisadas no fragmento conservado, no entorno da UHE de Camargos, MG.

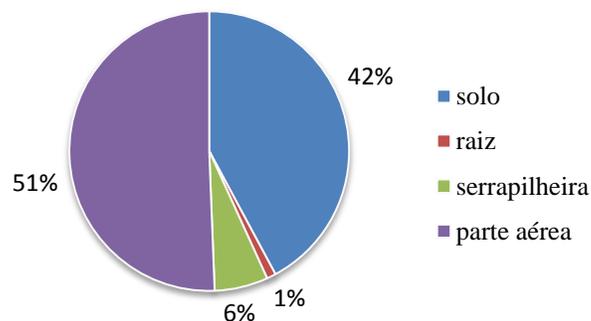


Figura 19. Distribuição percentual de estoque de carbono das matrizes analisadas no fragmento em restauração, no entorno da UHE de Camargos, MG.

Pelo exposto, observa-se que a maior parte do carbono está estocada na parte aérea (51%-52%) e no solo (43%-42%) sendo bem maior que serrapilheira (4%-6%) e raízes (1%-1,5%). A grande contribuição do carbono no solo para o estoque global de carbono em sistemas também foi observada por de Camargo et al. (1999); Lal (2007); Paiva e Faria (2007) e Paiva, Rezende e Pereira (2011).

Paiva e Faria (2007) avaliaram o estoque subterrâneo em fragmento de cerrado sensu stricto e encontraram valores maiores para o estoque do compartimento radicular (7,3%) do que o encontrado neste estudo. Tal fato pode ser devido à ocorrência de maior contribuição da biomassa radicular no cerrado, embora os autores não tenham considerado a matriz serrapilheira.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A biomassa radicular tendeu a diminuir com o aumento da profundidade de coleta, o que pode ser devido à maior concentração de material biológico em decomposição na superfície do solo, disponibilizando nutrientes minerais e orgânicos, permitindo um ambiente favorável para desenvolvimento das raízes nesta camada. Os valores variaram de 5,5 a 31 Mg ha⁻¹ e de 10,5 a 30,9 Mg ha⁻¹, nos fragmentos em restauração e conservado, respectivamente.

- Os valores de teor de carbono radicular variaram de 30,58% a 43,24%, tendo o valor médio sido de 36,81%. Estes valores se encontraram um pouco abaixo das estimativas encontradas em literatura. Tais diferenças podem ser devido à composição química do material radicular: se mais lignificado ou não, por exemplo.

- Nas profundidades de coleta de 40 a 60 cm e 60 a 100 cm, sendo estas camadas mais profundas, o teor de carbono radicular foi maior que nas demais profundidades. Quando se compararam somente os valores encontrados para os fragmentos, não foram encontradas diferenças.

- O valor médio de estoque de carbono radicular foi de 8,0 Mg ha⁻¹, para o fragmento conservado e de 5,6 Mg ha⁻¹, para o fragmento em restauração. O valor médio, considerando ambos os fragmentos, foi de 6,79 Mg ha⁻¹. De forma geral, cerca de 80% do estoque de carbono radicular se concentraram na camada de 0 a 40 cm, em ambos os fragmentos e nas camadas de 0 a 20 cm está a maior variabilidade desses valores.

- As camadas de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm apresentaram maiores valores de estoque médio de carbono radicular, não havendo diferenças entre estoques de carbono radicular dos fragmentos.

- Com relação à razão biomassa raiz/parte área, os valores médios encontrados para os fragmentos analisados foram de 0,26 e 0,19, para fragmento conservado e em restauração, respectivamente.

- O teor de carbono no solo também apresentou tendência de diminuição com o aumento da profundidade de análise e apresentou variabilidade média ($12\% \leq CV \leq 60\%$). O valor máximo encontrado para o teor de carbono no solo foi 3,7%, para a camada de 0 a 10 cm, no fragmento em restauração, enquanto o menor valor (0,4%) foi encontrado no fragmento em restauração, à profundidade de 60 a 100 cm.

- Ainda com relação ao teor de carbono no solo, o fragmento conservado apresentou maiores valores médios do que o fragmento em restauração, o que pode ter sido devido à antropização intensa sofrida pela área em restauração. Com relação às profundidades de coleta, a camada superficial apresentou maior valor médio, sendo seguida pelas camadas de 10 a 20 cm e de 20 a 40 cm, que não se diferenciaram entre si e, depois, pelas camadas de 40 a 60 cm e 60 a 100 cm, que também não se diferenciaram entre si, o que comprovou a tendência de diminuição do teor de carbono à medida que a profundidade aumenta.

- Cerca de 40% do teor de carbono estão concentrados na camada de 0 a 10 cm; 60% se concentraram na camada de 0 a 20 cm; 79%-80%, na camada de 0 a 40 cm e 90% do teor de carbono encontrado concentraram-se na camada de 0 a 60 cm.

- Os dados de estoque de carbono do solo apresentaram variabilidade média ($12\% \leq CV \leq 60\%$). O maior valor de estoque de carbono encontrado foi de 69,38 Mg ha⁻¹ (40 a 60 cm), enquanto o menor valor foi encontrado para 10 a 20 cm (6,85 Mg ha⁻¹), ambos no fragmento em restauração. Os estoques de carbono de 0 a 100 cm variaram de 136,9 a 208,3 Mg ha⁻¹, no fragmento em restauração e de 172,6 a 223,1 Mg ha⁻¹, no fragmento conservado. Os valores

médios foram de 201,86 Mg ha⁻¹, para fragmento conservado e de 169,16 Mg ha⁻¹, para fragmento em restauração.

- O fragmento conservado estocou mais carbono no solo (24,33 Mg ha⁻¹) do que o fragmento em restauração (19,75 Mg ha⁻¹). Com relação às profundidades de coleta, a camada 0 a 10 cm estocou mais carbono, seguida pelas camadas 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm, não tendo estas últimas se diferenciado entre si. A camada que menos estocou carbono foi a mais profunda, de 60 a 100 cm.

- Para que o estoque de carbono do solo entre os dois fragmentos seja similar, um maior tempo de análise decorrido da restauração parece ser requerido.

- Com relação aos atributos químicos, os solos foram, de maneira geral, caracterizados como pobres, ácidos, estando os nutrientes quase que totalmente abaixo dos níveis críticos. A textura do solo foi considerada de média a argilosa.

- Os maiores valores de biomassa de serapilheira foram encontrados no fragmento em restauração, que parece ter sido devido à elevada presença de indivíduos de *Acacia mangium* nesta área, implantados na restauração. Considerando os fragmentos como um todo, os valores médios de biomassa, teor e estoque de carbono na serapilheira foram de 15,7 Mg ha⁻¹, 29,3% e 4,5 Mg ha⁻¹, respectivamente.

- Não houve diferença entre o teor e estoque de carbono da serapilheira entre os fragmentos analisados, apesar de o estoque médio de carbono da serapilheira do fragmento em restauração (5,38 Mg ha⁻¹) ter sido maior do que o fragmento conservado (3,58 Mg ha⁻¹).

- As análises de correlação só demonstraram relações consideradas fortes entre os estoques de carbono da parte aérea e estoque de carbono global (parte aérea + serapilheira + raízes + solo). Outra forte correlação se deu entre o

estoque de carbono radicular e o estoque de carbono da serapilheira, entretanto, de forma indireta.

- Os modelos esférico e gaussiano foram os melhores modelos ajustados para a espacialização dos dados de estoque de carbono das matrizes analisadas. Os dados de solo apresentaram forte dependência espacial ($IDE \leq 25\%$).

- De forma geral, nos fragmentos em estudo, de 51% a 52% do estoque global de carbono se situaram na matriz aérea; de 43% a 42%, na matriz solo; 1% na matriz radicular e de 4% a 6% na matriz serapilheira.

- Com relação ao estoque global (somatório do estoque dos compartimentos: solo, raízes [0 a 100 cm], serrapilheira e parte aérea), o fragmento em restauração estocou, em média, $224,29 \text{ Mg ha}^{-1}$ e o fragmento conservado, $262,87 \text{ Mg ha}^{-1}$.

CONCLUSÃO

Com relação às hipóteses avaliadas neste estudo,

- O fragmento florestal em restauração há 20 anos apresentou estoque de carbono do solo menor que o estoque do fragmento conservado.

- O fragmento florestal em restauração há 20 anos apresentou estoque de carbono radicular semelhante ao fragmento conservado.

6 REFERÊNCIAS

ADUAN, R. E. ; VILELA, M. de F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p. (Documentos, 105).

ALCÂNTARA, F. A. **Conversion of cerrado into riparian forest impacting soil attributes**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002. Disponível em: <<http://www.biblioteca.ufla.br/pergamum/biblioteca/index.php>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 617-625, jul./ago. 2007.

ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.12, n.138, p.9-13, 1986.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 337-345, mar./abr. 2004.

AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 41 p.

BAKER, D. S.; FERREIRA, L. M.; SAILE, P. W. *Biodiversity monitoring in federal protected areas: defining the methodology*. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON BIODIVERSITY MONITORING IN FEDERAL PROTECTED AREAS: DEFINING THE METHODOLOGY. **Proceedings...**Brasília: IBAMA/GTZ, 1997. 246 p.

BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 60-68, jan./jun. 2003.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 2, p. 151-163, June 1996.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetados por sistema de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 687-694, 1999.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 599-607, 2000.

BOTELHO et al. 2001. **Implantação de florestas de proteção**. Lavras: UFLA/FAEPE. 2001.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

BRUN, E. J. et al. Decomposição da serrapilheira produzida em três fases sucessionais de floresta estacional decidual no RS. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2001.

CAIRNS, M. A.; BROWN, M.; HELMER, G. A. Root biomass allocation in the world's upland forests. **Oecologia**, v. 111, p. 1-11, June 1997.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Quantificação de serrapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2008.

CAMARGO, P. B. et al. Soil carbon dynamics in regrowing forests of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 5, p. 693-702, 1999.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Set./Oct.1994.

CARPANEZZI, A. A. Fundamentos para a reabilitação de ecossistemas florestais. In: GALVÃO, A. P. M.; SILVA, V. P. da. (Ed.). **Restauração florestal: fundamentos e estudos de caso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. p. 27-45.

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

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 20-25, 2008.

CORAZZA, E. J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte de depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 425-432, abr./jun. 1999.

CORRÊA, R. S. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração no Cerrado**: manual para revegetação. 2. ed. Brasília: Universa, 2009.

CRUZ, J. S. et al. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010.

CUNHA, G. C. **Aspectos da ciclagem de nutrientes em diferentes fases sucessionais de uma Floresta Estacional do Rio Grande do Sul**. 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1997.

CUNHA, G. M. et al. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas montanas da mata atlântica na região norte do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1175-1185, 2009.

DAVIDE, A. C.; FARIA, J. M. R. Revegetação de área de empréstimo da Usina Hidrelétrica de Camargos (CEMIG). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3., 1997, Ouro Preto. **Trabalhos voluntários...** Viçosa, MG: SOBRADE; UFV/ DPS/DEF, 1997. p. 462-473.

FARIA, R. A. V. B. **Estoque de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração**. 2012. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, 2012, Lavras.

FERREIRA, J. S. et al. Variabilidade espacial do carbono orgânico total e da biomassa microbiana em uma área degradada em Giulbués, PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 33., Uberlândia. 2010. **Anais ...**Uberlândia: SBCS, 2010.

FERREIRA, W. C. **Estoque de biomassa e carbono e parâmetros indicadores de recuperação de mata ciliar**. 2009. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em: <http://bdtd.ufla.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2125>. Acesso em: 10 abr. 2012.

FERREIRA, W. C. et al. Avaliação do crescimento do estrato arbóreo de área degradada revegetada à margem do rio Grande, na Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 177-185, 2007.

FONSECA, F. et al. Distribuição e desenvolvimento do sistema radicular em povoamentos jovens de *Castanea sativa* e *Pseudotsuga menziesii*. In: CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL, 5., 2005, Viseu. **Actas das Comunicações...** Lisboa: SPCF, 2005. 8 p.

FORSTER, H. W.; MELO, A. C. G. Biomassa aérea e de raízes em árvores de reflorestamentos heterogêneos no vale do Paranapanema, SP. **IF Série Registros**, São Paulo, n. 31, p. 153-157, 2007.

FUJISAKA, S. et al. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: estimates of carbon emissions and plants species loss in a Brazilian amazon colony. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.69, p.17-26, 1998.

GAITÁN, J. J.; PENÓN, E. A.; COSTA, M. C. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *Maidenii* y su relación com algunas propiedades del suelo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 33-41, 2005.

GANDARA, F. B; KAGEYAMA, P. Y. Indicadores de Sustentabilidade de florestas naturais. **Série Técnica /IPEF**, v. 12, n. 31, p. 79-84, abr. 1998.

GARCÍA-OLIVA, F.; MASERA, O. R. Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto Protocol. **Climatic Change**, Germany, v. 5, p. 347-364, 2004.

GEORGE, S. J. et al. Soil carbon and litter development along a reconstructed biodiverse forest chronosequence of South-Western Australia. **Biogeochemistry**, v. 101, p. 197-209, 2010.

GREGO, C. R. et al. Estoque de carbono no solo e produtividade da cana-de-açúcar analisados quanto à variabilidade espacial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 33., 2010, Uberlândia. **Anais ...Uberlândia: SBCS**, 2010.

GRIMM, R. et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forest analysis. **Geoderma**, v. 146, 102–113, 2008.

HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1-13, 2009.

HOUGHTON, R. A. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Estocolmo, v. 62B, p. 337-351, 2010.

HOUGHTON, R. A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Estocolmo, v. 55, n. 2, p. 378-390, 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change, 2007**: synthesis report. Valencia, 2007. 52 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

JANS, W. W. P. et al. Carbon exchange of a maize (*Zea mays* L.) crop: influence of phenology. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 139, p.316-324, 2010.

JENKINSON, D. S. et al. The turnover of carbon and nitrogen in soil (and discussion). **Philosophical Transactions of the Royal Society: biological sciences**, v. 329, n. 1255, p. 361-168, 1990.

JOURNEL, A. G.; RAO, S. E. **Deriving conditional distributions from ordinary kriging**. Palo Alto: Stanford Center for Reservoir Forecasting, 1996. 25 p. (Report, 9).

KINDEL, A.; GARAY, I. Caracterização de ecossistemas da Mata Atlântica de Tabuleiros por meio das formas de húmus. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 551-563, 2001.

KRUMMER, L. et al. Uso da análise de componentes principais para agrupamento de amostras de solos com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 6, p. 469-480, 2010.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 303-322, 2007.

LAL, R. Carbon sequestration in soil. **CAB Reviews: perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources**, v. 3, n. 30, p. 1-20, 2008.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. revis. e ampl. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: UNESP/IGCE/DGA/Laboratório de Geomatemática. (Texto Didático, 6). 19 p. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

LEITE, L. F. C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 821-832, 2003.

LIMA, H. V. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no semiárido cearense. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1085-1098, set./out. 2007a.

LIMA, J. A. S. et al. Avaliação da biomassa radicular fina em fragmentos florestais da Planície Costeira Fluminense. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, p. 450-452, 2007b. Suplemento, 1.

LIMA, J. A. S. et al. Biomassa radicular fina em fragmentos da mata atlântica fluminense. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n.1, p. 27-38, 2011.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Indicadores hidrológicos em áreas florestais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 12, n. 31, p. 53-64, abr. 1998.

LUYSSAERT, S. et al. Old-growth forests as global carbon sinks. **Nature**, v. 455, p. 213-215, 2008.

MALHI, Y. et al. Comprehensive assessment of the carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 15, p. 1255-1274, 2009.

MARTINS, S. V. **Recuperação de matas ciliares**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2007. 255 p.

MELÉM JÚNIOR, N. J. et al. Análise de componentes principais para avaliação de resultados analíticos da fertilidade de solos do Amapá. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 29, n. 3, p. 499-506, 2008.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

MENEZES, C. E. G. et al. Aporte e decomposição da serapilheira e produção de biomassa radicular em florestas com diferentes estágios sucessionais em pinheiral, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 439-452, jul./set. 2010.

MILCU, A. et al. Identification of general patterns of nutrient and labile carbon control on soil carbon dynamics across a successional gradient. **Ecosystems**, v. 14, p. 710-719, 2011.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 2175-2182, 2011.

MORAIS, V. A. **Modelagem e espacialização do estoque de carbono de cerrado sensu stricto em Minas Gerais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012. Disponível em:

<<http://www.ti.lemaf.ufla.br/lemaf/rest/Download/DownloadDocumento?idDocumento=372>> Acesso em: 10 dez. 2012.

MORELLATO, L. P. C. Nutrient cycling in two south-east Brazilian forest. I Litterfall and litter standing crop. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 8, n. 1, p. 205-215, 1992.

MOTOMIYA, A. V. A. et al. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 485-496, 2006.

MOURA, M. C. S. et al. Estudo multivariado de solos urbanos da cidade de Teresina. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 429-435, 2006.

NADELHOFFER, K. J.; RAICH, J. W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. **Ecology**, v. 73, n. 4, p. 1139-1147, 1992.

NAIR, P. K. R. et al. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Org.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems**. 1. ed. New York: Springer Science, 2011. v. 8, p. 145-162.

NEUMANN-COSEL, L. et al. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures: a case study from Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1625-1633, 2011.

NEVES, C. M. N. et al. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, 2004.

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, jan./fev. 2007.

OLSZEVISKI et al. Estimativa do estoque de carbono em unidades geoambientais da bacia hidrográfica do Rio Preto. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 7, n.2, p.56-64, 2007.

PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. Estoque de carbono sob cerrado *Sensu Stricto* no Distrito Federal, Brasil. **Revista Trópica: ciências agrárias e biológicas**, Chapadinha, v. 1, n. 1, p. 59, 2007.

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.

PAUL, S. E.; VELDKAMP, E.; FLESSA, H. Soil organic carbon in density fractions of two tropical soil types under forest – pasture – secondary forest land use changes. **European Journal of Soil Science**, v. 59, n. 2, p. 359-371, Apr. 2008.

POGGIANI, F.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. In: WORKSHOP SOBRE MONITORAMENTO AMBIENTAL EM ÁREAS FLORESTADAS, 2., 1998, Piracicaba: IPEF, 1998. p. 33-44. (Série Técnica IPEF, 12).

POWERS, J. S.; SCHLESINGER, W. H. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rainforests of northeastern Costa Rica. **Geoderma**, v. 109, p. 165–190, 2002.

QIJ, W. et al. Response of carbon and nitrogen content in plants and soils to vegetation cover change in alpine *Kobresia meadow* of the source region of Lantsang, Yellow and Yangtze Rivers. **Acta Ecologica Sinica**, v. 28, n. 3, p. 885-894, 2008.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2007. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 10 out. 2012.

REIS, D. N. dos. **Desenvolvimento de um índice para avaliação da recuperação de ecossistemas ciliares**. 2008. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <http://bdtd.ufla.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1618>. Acesso em março de 2011.

RIBEIRO, S. C. et al. Above and belowground biomass in a Brazilian cerrado. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 262, n. 3, p. 491-499, 2011.

RICHTER, D. D. et al. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. **Nature**. v. 400, julho 1999.

RODIN, P. **Distribuição da biomassa subterrânea e dinâmica de raízes finas em ecossistemas nativos e em uma pastagem plantada no Cerrado do Brasil Central**. 2004. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia)-Universidade de Brasília. Departamento de Ecologia, Brasília, 2004. Disponível em: <ftp://sassu.cptec.inpe.br/lba_archives/CD/CD-05/Thesis/Thesis-Patricia-Rodin-2004.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2012.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, 2009. 256 p.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Restauração de florestas tropicais: subsídios para uma definição metodológica e indicadores de avaliação e monitoramento. In: DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V. Recuperação de áreas degradadas. Editora UFV, p.203-215,1998.

RODRIGUEZ, L. C. E. Monitoramento florestal: iniciativas, definições e recomendações. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 12, n. 31, p. 9-22, abr. 1998.

SAHARJO, B. H.; WATANABE, H. Estimation of litter fall and seed production of *Acacia mangium* in a forest plantation in South Sumatra, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 130, n. 21, p. 265-268, Apr. 2000.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 178 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4834/000505349.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 21 set. 2012.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOTO, M. A. B. **Fixação de carbono**: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: UFPR/Ecoplan, 2004.

SELLE, G. L. et al. Biomassa radicular, densidade d solo e análise química do solo de um povoamento de *Pinus sp.* **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 6, n. 1, p. 61-74, 2010.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. 275-374 p.

SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Amazonas, 2007. Disponível em: <http://tede.inpa.gov.br/tde_arquivos/6/TDE-2008-01-30T151909Z-76/Publico/Tese_Roseana_Silva_Pt1.pdf>. Acesso em: 24 set. 2012.

SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL SCIENCE. POLICY WORKING GROUP. 2004. **The SER International Primer on Ecological Restoration**. Society for Ecological Restoration International, Tucson. Disponível em: <www.ser.org>. Acesso em: 10 ago. 2010.

SOUZA, J. A.; DAVIDE, A. C. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 101-113, mar. 2001.

TONUCCI, R. G. et al. Soil carbon storage in silvopasture and related land use systems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, p.1-9, 2011.

VALCARCEL, R. et al. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo submetida a diferentes composições de espécies. **Árvore**. Viçosa, MG, v. 31, p. 923-930, 2007.

YIMER, F.; LEDIN, S.; ABDELKADIR, A. Changes in soil organic carbon and total contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, south-

eastern highlands of Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 242, p. 337-342, 2007.

WANG et al. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China. **Forest Ecology and Management**. v. 255, p.4007- 4020, 2008.

WATZLAWICK, L. F. et al. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 353-362, 2012.

WATZLAWICK, L. F. Fixação de carbono em floresta ombrófila mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Org.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 153-173.

ZHANG, H.; GUAN, D.; SONG, M. Biomass and carbon storage of Eucalyptus and Acacia plantations in the Pearl River Delta, South China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 277, n. 1, p. 90-97, Jan. 2012.

ANEXO I

Resultados das análises de solo para o fragmento conservado

Parcela	Prof.	pH	mg/dm ³		cmol/dm ³						%		dag/kg	md/dm ³					Teor de argila (%)	
			K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	P-remanescente	Zn	Mn	Cu	B		S
1	0 a 10	5,3	64	1,71	4,5	0,3	0,1	4,04	4,96	5,06	9	55,16	1,98	25,07	1,8	27,05	0,72	0,24	7,42	35
	10 a 20	5,2	28,08	0,84	0,8	0,1	0,5	4,52	0,97	1,47	5,49	17,7	34,01	20,22	0,54	7,61	1,93	0,13	8,23	34
	20 a 40	5	14,04	0,56	0,2	0,1	0,8	5,05	0,34	1,14	5,39	6,23	70,18	15,04	0,23	4,23	1,5	0,06	25,85	36
	40 a 60	5	10,92	0,84	0,1	0,1	1,2	6,3	0,23	1,43	6,53	3,49	83,92	13,33	0,28	4,44	1,52	0,06	6,25	39
	60 a 100	4,7	9,36	0,84	0,1	0,1	1,4	7,04	0,22	1,62	7,26	3,09	86,42	13,75	0,2	3,31	1,46	0,1	9,06	36
2	0 a 10	4,4	54,6	2	0,1	0,1	1,8	10,99	0,34	2,14	11,33	3	84,11	12,53	0,88	22,52	3,09	0,13	16,08	38
	10 a 20	4,6	28,08	1,13	0,1	0,1	1,5	7,87	0,27	1,77	8,14	3,34	84,75	11,37	0,39	10,68	3	0,13	3,67	40
	20 a 40	4,8	12,48	0,56	0,1	0,1	0,9	4,52	0,23	1,13	4,75	4,88	79,65	13,33	0,17	5,11	1,91	0,06	2,28	30
	40 a 60	5	10,92	0,28	0,1	0,1	0,5	2,9	0,23	0,73	3,13	7,28	68,49	15,04	0,19	5,86	1,56	0,04	2,28	26
	60 a 100	5,1	10,92	0,56	0,1	0,1	0,3	1,86	0,23	0,53	2,09	10,91	56,6	19,58	0,15	4,76	0,85	0,06	1,29	17
3	0 a 10	4,3	74,88	2,3	0,1	0,1	2	10,99	0,39	2,39	11,38	3,44	83,68	12,93	0,91	20,4	2,59	0,13	6,63	37

	10 a 20	4,4	46,8	1,42	0,1	0,1	1,5	9,83	0,32	1,82	10,15	3,15	82,42	12,53	0,51	10,65	2,93	0,1	4,03	36
	20 a 40	4,6	21,84	0,84	0,1	0,1	1,1	5,64	0,26	1,36	5,9	4,34	80,88	14,17	0,27	6,63	2,51	0,1	3,67	32
	40 a 60	4,8	12,48	0,56	0,1	0,1	0,5	3,62	0,23	0,73	3,85	6,03	68,49	12,53	0,24	3,61	1,82	0,1	2,97	32
	60 a 100	5,2	7,8	0,28	0,1	0,1	0,1	1,86	0,22	0,32	2,08	10,58	31,25	12,93	0,26	3,32	0,81	0,06	1,95	32
4	0 a 10	4,2	51,48	2,91	0,1	0,1	2,2	12,28	0,33	2,53	12,61	2,63	86,96	15,04	1,02	38,03	2,06	0,13	8,64	27
	10 a 20	4,4	40,56	1,71	0,1	0,1	1,8	9,83	0,3	2,1	10,13	3	85,71	12,53	0,64	21,84	2,39	0,06	7,82	43
	20 a 40	4,7	15,6	0,84	0,1	0,1	1,3	6,3	0,24	1,54	6,54	3,67	84,42	14,6	0,31	8,92	1,8	0,06	11,68	37
	40 a 60	4,9	9,36	0,56	0,1	0,1	0,6	3,62	0,22	0,82	3,84	5,83	73,17	16,88	0,26	7,84	1,41	0,06	7,42	28
	60 a 100	5,1	6,24	0,56	0,1	0,1	0,5	2,32	0,22	0,72	2,54	8,5	69,44	16,41	0,18	4,76	0,79	0,08	6,25	21
5	0 a 10	4,2	53,04	2,91	0,1	0,1	2,3	12,28	0,34	2,64	12,62	2,66	87,12	14,17	0,92	24,9	2,12	0,13	14,55	41
	10 a 20	4,4	32,76	2	0,1	0,1	1,8	9,83	0,28	2,08	10,11	2,81	86,54	14,6	0,72	13,27	2,18	0,17	14,55	37
	20 a 40	4,7	12,48	0,84	0,1	0,1	1,1	5,64	0,23	1,33	5,87	3,95	82,71	15,49	0,36	6,31	2,02	0,04	7,03	34
	40 a 60	4,9	9,36	0,84	0,1	0,1	0,5	3,24	0,22	0,72	3,46	6,47	69,44	17,36	0,34	5,04	1,42	0,06	8,23	24
	60 a 100	5,1	6,24	0,84	0,1	0,1	0,1	1,66	0,22	0,32	1,88	11,49	31,25	19,95	0,26	4,1	0,92	0,08	6,63	16

ANEXO II

Resultados das análises de solo para o fragmento em restauração

Parcela	Prof.	pH	mg/dm ³		cmol/dm ³						%		dag/kg	md/dm ³					Teor de argila (%)	
			K	P	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	P-remanescente	Zn	Mn	Cu	B		S
1	0 a 10	5,1	23,4	2,6	1,7	0,3	0,3	3,62	2,06	2,36	5,68	36,27	12,71	32,08	0,63	28,73	0,32	0,13	11,23	20
	10 a 20	5,3	14,04	1,42	0,3	0,2	0,3	2,9	0,54	0,84	3,44	15,58	35,71	16,41	0,24	11,7	0,66	0,13	0,13	27
	20 a 40	5,4	10,92	1,42	0,1	0,1	0,3	2,32	0,23	0,53	2,55	8,94	56,6	8,05	0,24	15,51	0,72	0,06	0,06	24
	40 a 60	5,4	6,24	0,56	0,3	0,1	0,1	1,86	0,42	0,52	2,28	18,25	19,23	16,88	0,4	13,05	0,65	0,08	0,08	22
	60 a 100	6,5	10	3,84	1	0,1	0	1,07	1,13	1,13	2,2	51,17	0	24,34	0,67	20,14	0,32	0,1	0,1	11
2	0 a 10	5,5	23,4	1,13	0,6	0,4	0,6	5,05	1,06	1,66	6,11	17,35	36,14	15,04	0,91	5,66	0,91	0,21	21,2	37
	10 a 20	5,3	15,6	0,56	0,1	0,1	0,5	4,52	0,24	0,74	4,76	5,04	67,57	8,05	0,28	1,52	0,9	0,13	10,34	38
	20 a 40	5,3	9,36	0,28	0,1	0,1	0,1	2,32	0,22	0,32	2,54	8,82	31,25	3,79	0,19	0,96	0,6	0,13	13,08	40
	40 a 60	5,6	6,24	0,28	0,1	0,1	0,1	1,86	0,22	0,32	2,08	10,38	31,25	4,44	0,25	0,9	0,52	0,1	6,25	30
	60 a 100	5,6	4,68	0,28	0,1	0,1	0,1	1,66	0,21	0,31	1,87	11,34	32,26	5,95	0,19	0,93	0,32	0,08	11,68	22

3	0 a 10	5,3	28,08	0,84	2,3	1,1	0,1	3,62	3,47	3,57	7,09	48,97	2,8	17,86	5,59	11,09	0,58	0,19	13,08	42
	10 a 20	5,4	18,72	0,28	0,7	0,5	0,2	5,05	1,25	1,45	6,3	19,81	13,79	7,02	2,98	2,8	0,6	0,1	18,82	42
	20 a 40	5,4	17,16	0,28	0,4	0,3	0,1	4,04	0,74	0,84	4,78	15,56	11,9	5,47	1,9	1,69	0,61	0,08	24,45	41
	40 a 60	5,6	10,92	0	0,2	0,1	0	2,32	0,33	0,33	2,65	12,38	0	1,62	0,6	1,09	0,53	0,1	14,05	44
	60 a 100	5,7	4,68	0	0,1	0,1	0	1,86	0,21	0,21	2,07	10,24	0	1,71	0,35	0,71	0,18	0,1	20,59	43
4	0 a 10	5,6	64	34	8,3	0,8	0	2,08	9,26	9,26	11,34	81,69	0	33,07	3,06	55,25	0,79	0,21	11,68	20
	10 a 20	5,9	23,4	2	2,1	0,3	0	2,32	2,46	2,46	4,78	51,46	0	27,34	1,57	39,8	0,95	0,21	5,87	22
	20 a 40	6,3	12,48	0,84	2,8	0,1	0	1,19	2,93	2,93	4,12	71,17	0	18,32	1,03	43,43	2,82	0,19	8,64	20
	40 a 60	6,6	9,36	1,13	1,9	0,1	0	1,07	2,02	2,02	3,09	65,5	0	11,37	0,53	34,59	3,69	0,17	9,48	18
	60 a 100	6,7	10,92	1,13	1,7	0,1	0	0,95	1,83	1,83	2,78	65,76	0	6,65	0,4	28,38	2,26	0,19	12,14	18
5	0 a 10	5,8	29,64	0,56	1,3	0,7	0,2	5,05	2,08	2,28	7,13	29,12	8,77	16,88	1,63	11,2	0,51	0,1	21,82	34
	10 a 20	5,5	15,6	0,56	0,4	0,2	0,3	3,62	0,64	0,94	4,26	15,02	31,91	9,91	0,68	3,45	1	0,1	13,08	38
	20 a 40	5,9	7,8	0,28	0,2	0,1	0	1,86	0,32	0,32	2,18	14,68	0	1,52	0,57	0,69	1,06	0,06	35,88	43
	40 a 60	6	6,24	0,28	0,1	0,1	0	1,33	0,22	0,22	1,55	13,94	0	0,98	0,24	0,32	0,49	0,08	12,61	44
	60 a 100	6,1	4,68	0,28	0,1	0,1	0	1,19	0,21	0,21	1,4	15,14	0	0,98	0,28	0,22	0,34	0,08	27,31	42

Anexo III

Tabelas de análises de variância e testes de média dos teores e estoques dos compartimentos analisados

Tabela 18. Análise de variância dos dados de teor de carbono radicular para os fatores analisados (fragmentos e profundidade de coleta), no entorno da UHE de Camargos, MG. Em que * representa significância na análise.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	p-nível
profundidade	93,06	4	23,26	2,82	0,0375 *
fragmentos	0,65	1	0,65	0,079	0,780
interação	44,30	4	11,07	1,343	0,2711 *
erro	330,01	40	8,25		
TOTAL	468,03	49			

CV= 7,8%

Tabela 19. Análise de variância dos dados ponderados de estoque de carbono radicular para os fatores analisados (fragmentos ou áreas e profundidade de coleta), localizados em fragmentos florestais no entorno da UHE de Camargos. Em que * representa significância na análise.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	Pr>Fc
fragmento	0,358	1	0,358	2,309	0,1365 NS
profundidade	11,210	4	2,802	18,032	0,000 *
interação	0,2912	4	0,4094	0,072	0,7585 NS
erro	6,2171	40	0,1554		
Total	18,077	49			

CV(%) = 45,63%

Tabela 20. Análise de variância dos valores de teor de carbono (%) obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG. Em que * representa significância na análise.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
fragmentos	1	1,70	1,7	9,645	0,0033 *
profundidade	4	23,6	5,9	33,497	0,0000 *
interação	4	0,9	0,2	1,4186	0,2454 NS
erro	44	7,7	0,1		
TOTAL	49	33,0			

CV=31,06%

Tabela 21. Análise de variância dos valores ponderados de estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}), obtidos nos diferentes fragmentos avaliados no entorno da UHE Camargos, MG.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
fragmentos	1	265,60	265,60	6,3062	0,0154*
profundidade	4	3126,66	781,66	18,558	0,0001*
interação	4	301,13	75,28	1,7875	0,1495NS
erro	40	1.684,73	42,11		
TOTAL	49	5.378,12			

CV= 29,52%

Tabela 22. Análise de variância dos valores de teor de carbono da serapilheira (%), obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
fragmentos	1	178,295	178,295	2,44	0,1569 NS
erro	8	584,573	73,071		
TOTAL	9	762,868			

CV= 29,12%

Tabela 23. Análise de variância dos valores de estoque de carbono da serapilheira (Mg ha^{-1}), obtidos nos diferentes fragmentos avaliados na UHE Camargos, MG.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	PR>FC
fragmentos	1	8,166	8,166	0,924	0,3645 NS
erro	8	70,688	8,836		
TOTAL	9	78,854			

CV= 65,54%