



THIZA FALQUETO ALTOÉ

**MODELAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DO
ESTOQUE DE CARBONO EM FRAGMENTOS
NATIVOS DE MINAS GERAIS EM FUNÇÃO DE
FATORES EDAFOCLIMÁTICOS**

**LAVRAS – MG
2017**

THIZA FALQUETO ALTOÉ

**MODELAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO
EM FRAGMENTOS NATIVOS DE MINAS GERAIS EM FUNÇÃO DE
FATORES EDAFOCLIMÁTICOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Altoé, Thiza Falqueto.

Modelagem e espacialização do estoque de carbono em
fragmentos nativos de minas gerais em função de fatores
edafoclimáticos / Thiza Falqueto Altoé. - 2016.

130 p. : il.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Coorientador: Carlos Alberto Silva

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. Fitofisionomias. 2. Mudanças climáticas. 3. Solo. I. Scolforo,
José Roberto Soares. II. Silva, Carlos Alberto . III. Título.

THIZA FALQUETO ALTOÉ

**MODELAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO
EM FRAGMENTOS NATIVOS DE MINAS GERAIS EM FUNÇÃO DE
FATORES EDAFOCLIMÁTICOS**

***MODELING AND SPATIALIZATION OF THE CARBON STOCK IN
NATIVE FRAGMENTS OF MINAS GERAIS, BRAZIL, IN FUNCTION OF
EDAPHOCLIMATIC FACTORS***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 16 de setembro de 2016.

Prof. Dr. Carlos Alberto Silva	UFLA
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello	UFLA
Prof. Dr. Edson José Vidal da Silva	ESALQ/USP
Prof. Dr. José Márcio de Mello	UFLA

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

**LAVRAS – MG
2017**

*A Deus, aos meus pais, Rubinho e Olga; aos meus irmãos, Bê e Tô: fontes
inspiradoras da vida e do bem.
De forma especial ao meu pai que faz o amor e a saudade competirem pela
grandeza, eternamente.
Às Irmãs do Colégio São José e ao Laércio e família.
A todos meus professores, desde a pré-escola à faculdade, todos fizeram parte
desta conquista.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, companheiro fiel e inseparável. Sou grata pela vida. Sou grata por saber que de todos os caminhos que eu poderia trilhar, o Senhor me deu à benção de concluir um doutorado.

Pai, muito obrigada! Se cheguei até aqui foi para te orgulhar e te fazer feliz. Obrigada, por ser inspiração, motivação, referência. Obrigada, por sempre ter acreditado em mim. Obrigada por tanto amor, tanta luz! Dá um abraço em Deus, por mim. Mãe, obrigada por tudo, em especial por ser exemplo de força, persistência e fé. Obrigada, por me ensinar a ir atrás do que eu quero e a me mostrar somente o bem. Amo vocês.

Aos maninhos, Bernardo e Tomás, que sempre me protegeram e estiveram ao meu lado. Obrigada pela sabedoria e amor que acrescentam em minha vida.

Às Irmãs do Colégio São José e ao Laércio e família, que me apoiaram nos passos muito importantes que dei. Tenham minha gratidão!

Ao professor José Roberto Soares Scolforo, mais que um orientador. Serei eternamente grata por tudo que fez por mim: pela ajuda, pelo cuidado, pelos ensinamentos, conselhos, confiança, amizade e, principalmente, pelo exemplo tanto como pessoa, como profissional. Admiro sua generosidade, competência, inteligência e disposição. Obrigada por me encorajar a ser sempre melhor.

Ao professor José Marcio Mello que me deu apoio irrestrito. Eu não conseguiria passar por tudo sem o senhor. Enquanto eu existir, estarei rezando pelo senhor e por sua família, em agradecimento. Obrigada, pelos ensinamentos acadêmicos, pela amizade e pela sensibilidade.

Ao Henrique Ferraço, faltam-me palavras para descrever sua importância para mim e para a conclusão desse trabalho. Meu querido amigo,

você me inspira, sou grata por dividir seus conhecimentos, conselhos, amizade e por sua dedicação e paciência comigo.

A Aliny, Marcela, Maria Cleidivane e Eduarda Silveira que não mediram esforços para me ajudarem e me ofereceram apoio incondicional que foram essenciais para o término desta etapa. Minha eterna gratidão, por tanta generosidade.

Os desafios acadêmicos e pessoais só foram superados porque Deus me apresentou anjos, de corações generosos, durante meu doutorado, sou extremamente grata a vocês, queridos: Paula Vitor, Nathalia Mendonça, Aliny, Marcela, Maria Cleidivane, Eduarda Silveira, Kalill, Bob, Andressa, Anderson Pedro, Paulo Henrique (Terrinha), Marcelo Martins, Carol, Thiago, Gabriel Oliveira, Daniel (Bonitinho), Nathalia Carvalho, Antônio Couto, Flavinha, Hortência, Eduardo Marques, Thiago (Danapa), Gabriel, Tácio, Bárbara, Amanda, Willian's, Luisa, Nicolý, Gilmara, Breno, Mônica, Gláucia, Bruna, Beth, Nara, Fran, Chica, Juliano Oliveira, Vinícius Morais, professora Maria das Graças, José Carlos, Adriano, Vitor Torga, Valéria, Fernanda, Lalá, Cidão e Cidinha, e todos os estagiários.

Aos professores do LEMAF que foram tão compreensíveis e solícitos, citando-se o José Márcio, Antônio (Bob), Lucas, Passarinho, Faustinho e também aos professores do DCF em especial ao professor Rubens, pela sensibilidade.

Aos professores do Departamento de Ciências do Solo: Carlos Alberto e Yuri por todas as reuniões, disponibilidade, paciência, ensinamentos, sugestões e contribuições para que esse trabalho fosse desenvolvido.

Aos professores da banca examinadora que contribuíram significativamente para meu crescimento, para a melhoria deste trabalho e posteriores publicações.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de

Ciências Florestais e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal pela oportunidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado nos dois primeiros anos.

Aos órgãos que fomentaram o Inventário Florestal de Minas Gerais e o estudo do estoque de carbono no estado: Governo de Minas, CEMIG, IEF, UFLA, CNPq (Processo: 308592/2011-5), FAPEMIG (APQ 00291-11). E a todas as pessoas envolvidas nas ações desses projetos.

Ao Rafael Pedemonte e ao professor Marco Aurélio, que me deram conselhos preciosos, apoio e fizeram a caminhada ser mais amena com a amizade de cada um.

Ao Kalill por ser irmão, amigo, alicerce, apoio. Muito obrigada por dividir sua sabedoria comigo, por estar sempre disposto a me ouvir e a me ajudar! Grata!

A toda a minha família que torceu, rezou e me ajudou incondicionalmente. Agradeço a Deus por ter pessoas tão especiais próximas a mim. Cito o Tio Delmo, tia Gê e Regina, Vovó Elza e Vovô Zeca: obrigada por me amarem tanto e por terem sido a força que eu precisava para finalizar esta etapa.

MUITO OBRIGADA!

*À árvore de forma especial deixo todo meu apreço e
reconhecimento, pois dela tirarei meu sustento,
mostrarei minha competência e saldarei meu débito
com a humanidade, ajudando a manter viva quem nos
mantém: a natureza!*

(Da autora)

RESUMO

As florestas nativas desempenham um importante papel no armazenamento de carbono, em diferentes compartimentos e responde de forma diversa às características edafoclimáticas, porém, são informações pouco elucidadas para biomas e fitofisionomias de florestas tropicais. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi identificar os fatores que influenciam no estoque de carbono em diferentes compartimentos da vegetação: serapilheira, estrato arbóreo vivo e morto, no solo, em cinco profundidades diferentes até um metro, e nas raízes, nas mesmas profundidades e separadas por três espessuras, e quantificá-lo para as áreas de florestas nativas de Minas Gerais (MG). Foram utilizadas as informações edafoclimáticas e de estoque de carbono por compartimento de 351 pontos de coletas advindos do Inventário Florestal de MG. A análise das características edafoclimáticas em cada fitofisionomia foi realizada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA) e as médias por fitofisionomia foram obtidas e tiveram testadas sua significância com a aplicação de modelagem mista com *Dummy*. A modelagem para identificação dos fatores edafoclimáticos que atuam nos estoques de carbono em cada compartimento e no total foi realizada através do método de seleção *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*. A espacialização do estoque de carbono para todo o estado foi feita por meio da krigagem com regressão. Observou-se que as fitofisionomias se agrupam por bioma em relação às variáveis edafoclimáticas. Foi possível quantificar os estoques de carbono por fitofisionomia e por compartimento, os quais foram bastante diversos. As variações das características edafoclimáticas provocam resultados distintos sobre o estoque de carbono nas fitofisionomias/biomas arbóreos avaliados. Por fim, o mapeamento do estoque de carbono total permitiu estimar e visualizar suas variações em todo o estado. Esse estoque representou 2,81 Pg de carbono. Isso ressalta a importância de MG, como “hotspot” para a preservação do estoque de carbono mundial. Demonstrando a necessidade de ampliar as questões referentes a conservação destas áreas que têm grande potencial de deixarem de ser drenos e se tornarem fontes de carbono. Para tal, é necessária a redução da antropização, seja por desmatamentos ou queimadas ou, ainda, pela ação das mudanças climáticas, por vezes pouco notada em pequena escala de tempo.

Palavras-chave: Fitofisionomias. Mudanças climáticas. Solos. Serapilheira. Raízes.

ABSTRACT

Native forests have an important role in carbon storage in different compartments and responds differently to the edaphoclimatic characteristics. However, these information are little clarified for biomes and phytophysionomies of tropical forests. In this sense, the objective of this work was to identify the factors that influence the carbon stock in different vegetation compartments: litter, live and dead arboreal, five different soil depths up to one meter, and roots, at the same depths as the soil and divided into three thicknesses, quantifying them for the native forest areas of Minas Gerais (MG), Brazil. The analysis of the edaphoclimatic characteristics in each phytophysionomy was conducted by means of the Principal Component Analysis (PCA), and the means by phytophysionomy were obtained, with its significance tested applying the mixed model with Dummy. The modeling to identify the edaphoclimatic factors that act on the carbon stocks of each compartment and in total was conducted by means of the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator. Spatialization of the carbon stock in the entire State was done by kriging with regression. We verified that the phytophysionomies were grouped by biome in relation to the edaphoclimatic variables. It was possible to quantify the carbon stocks by phytophysionomy and by compartment, which were considerably diverse. The variations of the edaphoclimatic characteristics caused distinct results over the carbon stock of the evaluated phytophysionomies/arboreal biomes. Finally, the mapping of the total carbon stock allowed the estimation and visualization of its variations throughout the State. This stock represented 2.81 Pg of carbon. This stresses the importance of MG as a hotspot for the preservation of global carbon stock, demonstrating the need to expand the issues concerning the conservation of these areas that present great potential in ceasing to be drains and becoming sources of carbon. For such, it is still necessary to reduce anthropization, be it by deforestations or burnings, or still by the action of climatic change, at times little noticed in a small scale of time.

Keywords: Phytophysionomies. Climatic changes. Soils. litter. Roots.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Caracterização do estado de Minas Gerais	17
2.1.1	Caracterização geral dos biomas em Minas Gerais	18
2.1.2	Caracterização geral do solo em Minas Gerais sob vegetação nativa arbórea	20
2.2	Estoque de carbono em florestas	21
2.2.1	Estoque de carbono na parte aérea	22
2.2.2	Estoque de carbono na serapilheira	23
2.2.3	Estoque de carbono nas raízes	25
2.2.4	Estoque de carbono no solo em diferentes profundidades	26
2.3	Espacialização do estoque de carbono	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Área de estudo	29
3.1.1	Localização dos fragmentos florestais estudados	29
3.2	Base de dados	34
3.2.1	Índice de Fertilidade do Solo	40
3.3	Análise de dados e procedimentos estatísticos	42
3.3.1	Caracterização geral das áreas de estudos usando variáveis edafoclimáticas	42
3.3.2	Definição dos estoques de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias	42
3.3.3	Modelagem dos estoques de carbono	43
3.3.4	Mapeamento do estoque de carbono total por meio da Krigagem com regressão	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Caracterização geral das áreas de estudos usando variáveis edafoclimáticas	49
4.2	Definição dos estoques de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias	50
4.2.1	Estoque de carbono no compartimento arbóreo vivo	51
4.2.2	Estoque de carbono no compartimento arbóreo morto em pé	54
4.2.3	Estoque de carbono na serapilheira	55
4.2.4	Estoque de carbono nas raízes	58
4.2.4.1	Estoque de carbono nas raízes grossas	61
4.2.4.2	Estoque de carbono nas raízes médias	64
4.2.4.3	Estoque de carbono nas raízes finas	67
4.2.5	Estoque de carbono no solo	69
4.2.6	Estoque de carbono total nas fitofisionomias de Minas Gerais	77

4.3	Modelagem dos estoques de carbono	79
4.3.1	Raízes	79
4.3.2	Solos.....	87
4.3.3	Compartimento arbóreo vivo e serapilheira	93
4.3.4	Estoque de Carbono Total.....	97
4.4	Mapeamento do estoque de carbono total	99
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	ANEXO A – Desvios padrões da modelagem mista para os compartimentos arbóreos vivo e morto, serapilheira, solos e raízes totais	129
	ANEXO B – Desvios padrões da modelagem mista para os compartimentos de raízes finas, médias e grossas.....	130

1 INTRODUÇÃO

As transformações que ocorrem no ambiente natural obedecem à Teoria Geral dos Sistemas, a qual descreve a sua formação em partes e afirma que a análise de cada elemento isoladamente não equivale à apreciação do todo. O sistema corresponde à integração holística de suas partes e a alteração de um componente pode impactar no todo. Assim, o planeta Terra como um sistema em equilíbrio, ao longo de sua história, vem passando por flutuações climáticas naturais (RIND, 2002).

A ação do homem, pequena peça do sistema, na história recente da Terra, tem impactado nas variações climáticas naturais, provocando a aceleração das mesmas e ocasionando, por vezes, mudanças irreversíveis. O período atual condicionado à interferência humana no curso natural do clima é intitulado de antropoceno. Nesse sentido, as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) são as principais responsáveis pelas atuais mudanças climáticas, sendo o desmatamento e a degradação florestal as mais importantes fontes de GEE quando considerado a maioria dos países tropicais (VICHARNAKORN et al., 2014).

O desmatamento em áreas tropicais libera 1,5 Megagramas (Mg, 1 Mg equivale a 1000 Kg) de carbono na atmosfera a cada ano (GULLISON et al., 2007). De acordo com o IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) oriundas de mudanças no uso e ocupação do solo, ao longo dos anos 90, foram iguais a 1,6 Mg de carbono por ano, em média, variando entre 0,5 e 2,7 Mg de carbono ao ano (IPCC, 2007). As ações antrópicas de mudança do uso da terra potencializam a possibilidade das áreas com vegetação nativa e solos, migrarem de drenos para fontes de carbono para o ambiente.

O papel da vegetação é crucial, nesse cenário de mudanças climáticas, uma vez que a mesma fixa o carbono captado da atmosfera, por meio da fotossíntese e, também, conserva o solo sob seu domínio. Dessa forma, a

vegetação estoca carbono e, juntamente com o solo, é essencial no ciclo biogeoquímico desse elemento (MALHI; DAVIDSON, 2009). A formação das florestas está condicionada tanto ao solo, em escala local, como ao clima em escala regional e global (RUGGIERO et al., 2002; TOLEDO et al., 2011; ARRUDA et al., 2015). Logo, esses dois fatores influenciam diretamente no acúmulo de carbono nessas florestas.

Embora seja de suma importância, a quantificação de carbono nos ambientes naturais é dificultada por questões logísticas, metodológicas e financeiras. Assim, há poucos dados detalhados provenientes de medições diretas em florestas nativas. Os estudos existentes em sua maioria vêm de fontes em escala macro que usam: o sensoriamento remoto (DUBE; MUTANGA, 2015; GALEANA-PIZAÑA et al., 2014; VICHARNAKORN et al., 2014), equações regionais (SCOLFORO et al., 2008) ou fatores de conversão (IPCC, 2006), para estimativa de estoques de carbono em grandes áreas. Tais informações são relevantes e permitem extrapolações que elucidam padrões, mas possuem limitações quando comparadas a dados de medições diretas, como os apresentados em Morais (2014) e Scolforo et al. (2015).

Minas Gerais, o quarto maior estado da Federação, conta com uma extensa base de dados dos seus remanescentes florestais, advinda do projeto Inventário Florestal de Minas Gerais (IFMG). O projeto elaborado pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em parceria com o Instituto Estadual de Florestas (IEF) foi responsável pelo inventário de mais de 160 áreas naturais de vegetação em Minas Gerais, com coleta de amostras de solo; volume, biomassa e densidade básica arbórea e regeneração. Em 2010, além de remedições do inventário florestal, realizou-se o levantamento do estoque de carbono do subsolo (raízes e solo) e também da serapilheira. Essas coletas foram feitas em 351 pontos de 0,5 m² de área, os solos (1755 amostras) e as raízes foram separados em cinco profundidades até um metro. As raízes (4112

amostras) ainda foram subdivididas em três espessuras diferentes. Tais dados, inéditos, representam grande avanço rumo ao esclarecimento de padrões de estoque de carbono e dos fatores que o impactam.

Nesse sentido, buscando atender à demanda por quantificação de estoque de carbono e suas variações, na presente tese, objetivou-se identificar os fatores que influenciam no estoque de carbono em diferentes compartimentos da vegetação: nas raízes, solo, serapilheira, estrato arbóreo e árvores mortas, e quantificá-lo para as áreas de florestas nativas de Minas Gerais. Especificamente, buscou-se (i) caracterizar e diferenciar as fitofisionomias existentes em Minas Gerais, utilizando variáveis edafoclimáticas, por meio de análise multivariada; (ii) definir o estoque de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias e correlacioná-lo com atributos edafoclimáticos; (iii) realizar a modelagem dos estoques de carbono por compartimento em função de variáveis edafoclimáticas; e (iv) espacializar o estoque de carbono total para os remanescentes de florestas nativas de Minas Gerais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

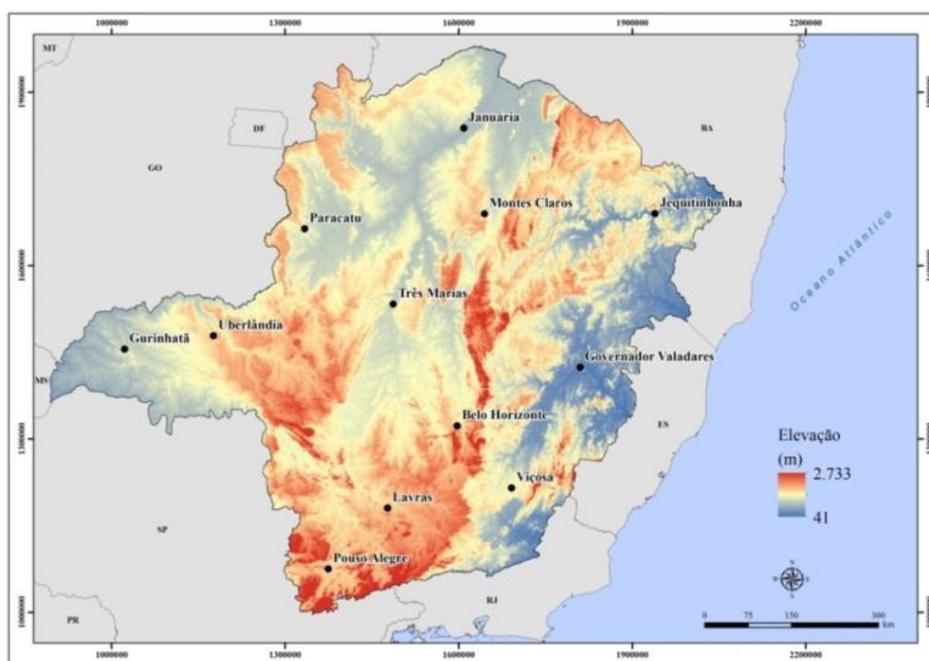
2.1 Caracterização do estado de Minas Gerais

O estado de Minas Gerais, possui uma área de 586.521,235 km², o que equivale a quase 7% da área total do Brasil, quarta maior unidade federativa do país (IBGE, 2016). Estima-se, conforme dados de Carvalho, Luis et al. (2008), utilizando como ano referência 2007, que esse estado ainda conserva 33,51% da sua cobertura vegetal nativa (196.552,3 km²), subdividida em três biomas: Caatinga (10,5%), Cerrado (59%) e Mata Atlântica (27,5%), sendo a diferença da porcentagem atribuída aos campos rupestres. A porcentagem de Caatinga considera a parte de Floresta Estacional Decidual pertencente ao domínio atlântico, denominada como caatinga arbórea, conforme agrupamento realizado por Santos et al. (2012). O Cerrado e a Mata Atlântica possuem um apelo conservacionista evidente por se tratar de *hotspots* de biodiversidade, com grau de endemismo e diversidade únicos (CONSERVATION INTERNATIONAL, 2016).

Minas Gerais é um estado com uma grande variação edafoclimática. A amplitude de temperatura média anual é de 14°C a 27°C, para precipitação média anual, a variação é de 700 mm a 2000 mm e a altitude abrange áreas a 50 m até 2500 m acima do nível do mar. As maiores temperaturas e menores precipitações médias anuais estão localizadas principalmente na faixa Norte-Nordeste, experimentando temperaturas mais amenas e precipitações mais expressivas à medida que se avança para a faixa Sul-Sudoeste do estado. Os solos, em Minas Gerais, em sua maioria são classificados como Latossolos (54%), seguido de Cambissolos (17,3%), Neossolos (12,5%) e Argissolos (11,3%) (UFV; CETEC; UFLA; FEAM, 2010). As maiores altitudes se encontram na parte central e sul de Minas Gerais, conforme análise do mapa de elevação (FIGURA 1) disponibilizado pela NASA-SRTM (*Shuttle Radar*

Topography Mission) com resolução espacial de 30 metros. Nesse contexto geral de variação de precipitação, temperatura, solo e altitude, estão inseridos os fragmentos de vegetação arbórea avaliados nesta tese.

Figura 1 – Mapa de elevação de Minas Gerais.



Fonte: Adaptado de NASA – SRTM.

2.1.1 Caracterização geral dos biomas em Minas Gerais

A vegetação do sudeste brasileiro possui grandes variações em sua estrutura e composição, ao longo dos gradientes latitudinal e altitudinal (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). O estado de Minas Gerais responde à grande parte dessas variações, compreendendo uma área transicional entre três biomas brasileiros: Atlântico, Cerrado e Caatinga.

O Cerrado é o maior bioma brasileiro, caracterizado por vegetação xeromorfa que se desenvolve sobre solos lixiviados, normalmente que apresentam teor de alumínio elevado com verões chuvosos e estação seca bem

definida. Possui um estrato gramíneo considerável no Campo Cerrado o qual vai cedendo espaço a um estrato arbóreo de troncos tortuosos, de forma mais intensa até a formação de Cerradão, que se mostra com sinúcias lenhosas fisionomicamente parecidas a de uma Floresta Estacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2012). Esse bioma possui importante papel no contexto nacional, localizado na parte central do país. Atua como ligação entre quase todos os biomas brasileiros, criando zonas de ecótonos com biodiversidade extremamente alta (BRASIL, 2014) e possuindo participação significativa na produção hídrica superficial brasileira (14%) (LIMA; SILVA, 2005).

Historicamente, discute-se, redefine-se e dividem-se as fitofisionomias existentes dentro do Cerrado, havendo diversas literaturas a esse respeito. Ribeiro e Walter (2008) fizeram um levantamento e verificaram que a teoria sobre a origem das formações savânicas atualmente mais aceita é que estas sejam resultados da interferência conjunta de fatores climáticos (disponibilidade hídrica e temperatura); bióticos (ação humana, como queimadas, desmatamento e pastejo) e pedológicos. Assim como no Brasil, o Cerrado em Minas Gerais é subdividido nas fitofisionomias: Vereda, Campo (savana gramíneo-lenhosa), Campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto* (savana arborizada) e Cerradão (savana florestada). O Cerradão é tido como área florestal com características esclerófilas, e o restante das fitofisionomias, como formações savânicas, sendo que as diferenças entre o Campo Cerrado e o Cerrado *sensu stricto* estão, principalmente, na densidade de indivíduos por hectare, que é menor no Campo Cerrado, onde, conseqüentemente, há maior desenvolvimento do componente gramíneo (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A Mata Atlântica é o bioma brasileiro mais fragmentado e, ainda assim, conserva uma riqueza de espécies vegetais (~20.000) superior a de alguns continentes (BRASIL, 2016). Sua importância ecológica e nível de degradação

elevado resultaram na criação de uma lei própria para dispor sobre a sua utilização e proteção, a Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006). Possui um componente arbóreo alto e denso, com sub-bosque bem povoado, características atribuídas principalmente ao alto índice pluviométrico (INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF, 2016). Por abranger grande variação latitudinal e também variação decorrente da interiorização, a Mata Atlântica abrange uma série de fitofisionomias (desde formações litorâneas, até formações florestais estacionais) (IBGE, 2012). A Mata Atlântica mineira compreende as formações de Floresta Ombrófila, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Nos últimos anos, a Mata Atlântica, juntamente com o Cerrado ganhou status de *hotspots* mundial de diversidade, em razão do elevado número de espécies endêmicas que possuem e às constantes ameaças que sofrem (MYERS et al., 2000).

A Caatinga pertencente inteiramente ao Brasil e, comparativamente aos outros biomas brasileiros, detém poucos estudos relacionados, pois sua biodiversidade é inferior, contudo, é o bioma semiárido com maior diversidade do mundo. A importância de sua conservação e correto manejo está também no fato de que suas áreas são muito mais suscetíveis à desertificação. É um bioma que se caracteriza pelas baixas precipitações e longos períodos de estiagens que podem variar de meses a anos (SEIFFARTH, 2012). Em Minas Gerais, uma parte da Caatinga é regionalmente conhecida como “mata seca”, mas como um todo ela é caracterizada como Floresta Estacional Decidual.

2.1.2 Caracterização geral do solo em Minas Gerais sob vegetação nativa arbórea

Durante a realização do projeto Inventário Florestal de Minas Gerais foi possível traçar um perfil dos solos sob diferentes fitofisionomias em Minas Gerais, conforme compilado por Skorupa et al. (2012). O solo do Campo

Cerrado é composto por um estrato gramíneo mais intenso, que possui um maior teor de matéria orgânica comparado aos valores para o Cerradão e o Cerrado *sensu stricto*, assim como maiores valores de argila. O Cerradão ocorre nos solos com maior fertilidade do bioma Cerrado, possuindo maiores teores de pH e cálcio. Já o Cerrado *sensu stricto* pertence a um solo com valores medianos de textura, localizando-se próximo à média, dentro da amplitude de baixa fertilidade dos solos do Cerrado (SKORUPA et al., 2012).

A Floresta Estacional Decidual apresenta uma alta fertilidade, explicada pelas altas temperaturas e escassez de chuvas, que propiciam baixa lixiviação de nutrientes oriundos da matéria orgânica e, também, em razão do material de origem dos solos sob essa fitofisionomia ser tipicamente raso. Essa fitofisionomia possui também elevados valores de pH e teores de Cálcio²⁺. A Floresta Estacional Semidecidual possui altos valores desses nutrientes, assim como de Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e matéria orgânica, da mesma forma que a Floresta Estacional Decidual, além de altos teores de argila. Já as Florestas Ombrófilas, apresentam como características valores mais representativos de matéria orgânica, fósforo disponível e de acidez no solo, em função da sua ocorrência em áreas de maiores altitudes e precipitação (SKORUPA et al., 2012).

2.2 Estoque de carbono em florestas

As florestas tropicais cobrem extensas áreas em todo o planeta (17 milhões de km²), correspondendo a 20% da superfície terrestre (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2011). Essas florestas são fundamentais para a manutenção do equilíbrio das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono – CO₂ (SAYER et al., 2011), contribuindo com aproximadamente 36% da troca líquida de carbono entre a atmosfera e a vegetação terrestre, e com uma fração significativa do total

estocado de carbono e nitrogênio, tanto em sua biomassa quanto em seus solos (HOUGHTON; HALL; GOETZ, 2009; VIEIRA et al., 2011).

No contexto das mudanças climáticas globais, as florestas constituem sumidouros de carbono em decorrência da capacidade natural dos vegetais de sequestrar CO₂ da atmosfera, por meio da fotossíntese e de fixá-lo sob a forma de carbono na biomassa lenhosa, folhas e raízes, em seus compartimentos aéreos, subterrâneos, assim como no solo (CHENG; WANG; JIANG, 2007; DINIZ et al., 2015).

Assim, o conhecimento da capacidade de absorção do carbono das diferentes fitofisionomias florestais, bem como o estoque de carbono fixado na biomassa florestal, pode fornecer informações fundamentais para a tomada de decisões quanto ao manejo, à proteção e à valoração das florestas (RATUCHNE et al., 2015).

2.2.1 Estoque de carbono na parte aérea

As árvores se destacam dentre os seres vivos pela sua capacidade de fixação do carbono em sua biomassa, o que pode ser explicado pelo seu porte, longevidade e capacidade de crescerem na forma de maciços (SANQUETTA et al., 2014). O termo biomassa florestal corresponde a toda massa vegetal existente na floresta, ou apenas à fração arbórea, viva ou morta (SILVEIRA et al., 2008). Com relação à representatividade dos compartimentos da biomassa florestal, a maior fração da biomassa compreende o caule ou fuste das árvores, sendo a folhagem uma das frações mais trabalhosas de serem determinadas (SANQUETTA, 2002, p. 119).

O clima, o tipo de solo, o relevo, a hidrografia e a variação genética dentro de uma espécie e, entre espécies, influenciam a produção e o acúmulo de biomassa em áreas florestais, principalmente no caso de florestas nativas, resultando em diferenças no estoque de carbono em florestas sob as mesmas

condições edafoclimáticas (AMARO et al., 2013; CALDEIRA; SOARES; WATZLAWICK, 2004). Diversos estudos com as formações florestais que ocorrem no território mineiro e outros estados, obtiveram estimativas de estoque de carbono na biomassa florestal, variando de 29 a 192 Mg/ha (AMARO et al., 2013; DINIZ et al., 2015; RATUCHNE et al., 2015; SANQUETTA et al., 2014; SCOLFORO; OLIVEIRA; JÚNIOR, 2008; SOARES et al., 2016).

Analisando a área total das fitofisionomias em Minas Gerais, o Cerrado *sensu stricto* apresenta maior estoque de carbono fixado na parte aérea arbórea. Em segundo lugar, Floresta Estacional Semidecidual, seguido por Floresta Estacional Decidual, Campo Cerrado, Floresta Ombrófila e Cerradão (SCOLFORO; CARVALHO, 2006; SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SISEMA; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM; CENTRO CLIMA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2008).

Morais et al. (2013) constataram que a parte aérea (tronco até 3 cm de diâmetro) contribuiu com 26,3% (36,78 Mg/ha) do estoque total de carbono em um fragmento de Cerradão localizado no município de Limeira do Oeste, MG, e que o solo foi o compartimento que apresentou o maior estoque de carbono no fragmento em estudo (64,8%). Pan et al. (2011) quantificaram o potencial de sumidouro de carbono pelas florestas no mundo e, estimaram que o estoque total seja de 861 Pg (1 Petagrama (Pg) = 10^{15} gramas = 1 bilhão de Toneladas), dos quais 383 Pg (45%) estão estocados no solo até 1 metro de profundidade, 363 Pg (42%) na biomassa acima do solo, 73 Pg (8%) na madeira morta e 43 Pg (5%) na serapilheira.

2.2.2 Estoque de carbono na serapilheira

O carbono orgânico adicionado ao solo sob florestas é procedente principalmente da queda de serapilheira, como mortalidade de árvores. Segundo

Parton et al. (2007), a serapilheira é a principal via de transferência de carbono orgânico para o solo. A formação da serapilheira segue um padrão sazonal, de acordo com condições climáticas ao longo de um período de tempo, e depende do regime de renovação foliar das espécies do local.

A quantidade de serapilheira aportada ou acumulada varia em função da tipologia vegetal e da condição climática. Vários fatores, abióticos e bióticos afetam a produção de serapilheira, como tipo de vegetação, altitude, latitude, precipitação, temperatura, regimes de luminosidade, relevo, herbivoria, deciduidade, estágio sucessional, evapotranspiração, disponibilidade hídrica e características do solo (BRUN et al., 2001; CALDEIRA et al., 2008). Além disso, Brun et al. (2001) ressaltaram a influência dos fatores genéticos de adaptação das espécies a condições meteorológicas locais.

Alguns autores relatam que existem dois padrões básicos para a deposição anual de serapilheira nos ecossistemas brasileiros: o primeiro é caracterizado pela maior deposição na época seca, como ocorre em ecossistemas amazônicos, nas florestas mesófilas e cerrados; o segundo consiste em um aumento na intensidade da deposição de serapilheira na época úmida, típico das florestas atlânticas e restingas (ARAÚJO et al., 2006; CATTANIO et al., 2004; CIANCIARUSO et al., 2006).

No estudo de Fearnside (1994, p. 95), na Amazônia, o autor relatou um valor médio de estoque de carbono para serapilheira era de 10 Mg/ha. Morais et al. (2013) encontraram para o cerrado valores variando de 4,9 a 19,3 Mg/ha de biomassa de serapilheira, normalmente utiliza-se um fator de conversão de biomassa para carbono de 0,5; pois cerca de 50% da biomassa seca é composta de carbono (FANG et al., 2001). No trabalho de Godinho et al. (2013), a deposição de serapilheira foi sazonal, com maiores produções ocorrendo no final da estação seca. A produção, no decorrer de um ano, foi de 9,3 Mg/ha, sendo as

folhas/miscelâneas a fração de maior deposição, que representou 89% da deposição total.

2.2.3 Estoque de carbono nas raízes

A biomassa de raízes representa em média cerca de 20 a 26% da biomassa total (acima do solo e de raízes), sendo considerada também um reservatório de carbono de grande importância mundial (RAVINDRANATH; OSTWALD, 2008). Segundo Gatto et al. (2010), as raízes apresentam maior concentração de substâncias recalcitrantes, que dão origem a formas mais estáveis de carbono orgânico no solo (SCHUMACHER; WITSCHORECK, 2004; SILVA et al., 2004).

No caso de solos mantidos em seu estado natural sob vegetação nativa, as características físicas adequadas ao desenvolvimento ótimo das plantas são mantidas, e conseqüentemente, o desenvolvimento das raízes ocupa grande parte do solo, resultando em maior estocagem de carbono nesse compartimento (CALONEGO et al., 2012). Segundo Paiva, Rezende e Pereira (2011), a determinação do estoque de carbono pelas raízes é influenciada pela heterogeneidade espacial da biomassa subterrânea, assim como pelas profundidades e as classes de diâmetro estabelecidas para a coleta de raízes, além das diferenças na composição florística e na densidade da cobertura arbórea, e a época do ano em que é feita a coleta dos dados.

Balbinot et al. (2008) ressaltam a importância das raízes no total do carbono fixado, chegando a representar no caso das plantações de *Pinus* com menos de 5 anos, 35% do carbono fixado, 21% para plantações entre 5 e 15 anos e 13% naquelas com mais de 15 anos. Esses autores concluíram que não se pode abstrair da quantificação do carbono presente no sistema radicular, principalmente se o objetivo for apresentar estimativas corretas sobre a

capacidade das florestas de fixar carbono atmosférico e, conseqüentemente, gerar créditos comercializáveis de carbono.

2.2.4 Estoque de carbono no solo em diferentes profundidades

Em escala global, os principais reservatórios de carbono são os oceanos seguidos pelos depósitos de combustíveis fósseis, os solos, a atmosfera e a vegetação. Há mais carbono nos solos (1720 Pg), em relação ao presente na atmosfera (740 Pg) (ROSA; SANO; ROSENDO et al., 2014). Em geral, os solos representam o compartimento com maior estoque do carbono de um ecossistema, armazenando de 1300 a 2000 Pg desse elemento até 1 m de profundidade (BATJES, 1996, p. 151; POST et al., 1982; SOMBROEK; NACHTERGAELE; HEBEL, 1993). Segundo Cerri et al. (2006), o estoque de carbono nos primeiros 30 cm é de aproximadamente 800 Pg. Já para o Brasil, Bernoux et al., (2002) estimaram para a mesma profundidade, um estoque de 36 Pg.

Sendo assim, os solos funcionam como um sistema de apoio fundamental à vida no ecossistema e desempenham um papel vital na resiliência deste, frente a mudanças no ambiente, ou seja, mais que um grande reservatório de carbono, o solo funciona como mediador da produtividade e sustentabilidade do ambiente (BREVIK, 2009, p. 106, 2013, p. 398; PARRAS-ALCÁNTARA; LOZANO-GARCÍA; GALÁN-ESPEJO, 2015; RUMPEL; KÖGEL-KNABNER, 2011; TERRA; MELLO; MELLO, 2015).

O estoque de carbono no solo resulta principalmente da taxa de decomposição dos elementos na superfície do solo, da manta orgânica e das raízes, que, em razão da maior concentração de substâncias recalcitrantes, dão origem a formas mais estáveis de C orgânico no solo (GATTO et al., 2010; SCHUMACHER; WITSCHORECK, 2004; SILVA et al., 2004). Em função desses componentes e de variáveis ambientais relacionadas (clima e tipo de

solo), existe uma grande variação do estoque de carbono em relação à profundidade do solo. Gatto et al. (2010) exploraram essa variação num estudo com eucalipto de 7 anos de idade na região centro-leste de Minas Gerais, sobre uma diversidade de classes de solos – como Cambissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvico e Plintossolo Pétrico –, e relataram que a altitude, o déficit hídrico e os teores de argila e Al são as características responsáveis pelas maiores variações dos estoques de carbono no solo até 1 m de profundidade. A distribuição do estoque de carbono no solo se ajusta a um modelo exponencial. À medida que se aprofunda no perfil, menor é o teor de carbono (MORAIS, 2014).

2.3 Espacialização do estoque de carbono

A espacialização dos teores de carbono fornece dados de referência sobre o estoque de carbono para diferentes regiões, seja para o acompanhamento dos efeitos das mudanças climáticas como para subsídios nas decisões quanto ao manejo de áreas (AITKENHEAD; COULL, 2016). Nesse contexto, os métodos geoestatísticos de predição surgem como técnica adequada para o mapeamento da distribuição espacial de atributos da vegetação (MILLER; FRANKLIN; ASPINALL, 2007).

Scolforo et al. (2015) encontraram resultados eficientes para a estimativa da distribuição espacial do estoque de carbono arbóreo gerado pelo método da krigagem com regressão, cuja precisão é suportada por uma distribuição residual homogênea, o que resultou em uma distribuição espacial consistente de estoque de carbono, acima do solo para o estrato arbóreo nos biomas Floresta Atlântica, Caatinga e Cerrado. Poggio e Gimona (2014) modelaram o estoque de carbono orgânico no solo, por meio da krigagem com regressão e outros métodos na Escócia. Nos resultados encontrados por Scolforo et al. (2016) foi verificado que a distribuição espacial do carbono da vegetação arbórea para Floresta Atlântica e

Cerrado apresenta estrutura de dependência espacial definida. Além disso, a krigagem ordinária e co-krigagem apresentaram resultados satisfatórios, no entanto, a krigagem com regressão mostrou resultados melhores para mapear e estimar distribuição do estoque de carbono para todo o estado de Minas Gerais. Li et al. (2013) verificaram que a interpolação, por meio da krigagem ordinária pode revelar diretamente a distribuição espacial do carbono no solo, visto que a distância da amostra foi suficiente para a interpolação. No entanto, os autores sugerem que são necessárias mais pesquisas para esclarecer a variabilidade espacial e compreender os fatores que controlam a variabilidade espacial de carbono do solo na região do Planalto de Loess na China.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A abrangência desta pesquisa engloba todo o estado de Minas Gerais, dentro desse, a área de estudo restringe-se aos fragmentos de florestas nativas. Esses fragmentos estão inseridos em uma grande variedade de condições edafoclimáticas, tornando-os propícios para a análise de quais fatores influenciam os estoques de carbono desses remanescentes de vegetação nativa.

As fitofisionomias consideradas foram: Floresta Estacional Decidual, presente no bioma caatinga; Campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto* e Cerradão, pertencentes ao bioma Cerrado e, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila no bioma da Mata Atlântica.

3.1.1 Localização dos fragmentos florestais estudados

A classificação dos fragmentos florestais mineiros é dificultada, em razão da pluralidade dos fatores que interferem em uma floresta, fazendo com que as transições entre biomas e entre as diversas fitofisionomias presentes em cada bioma se deem na forma de gradiente. A amostragem deste estudo contemplou, além das formações categoricamente classificadas, também, toda essa diversidade existente entre as transições (TABELA 1). Dos fragmentos da Caatinga, três estão inseridos no bioma Caatinga, propriamente dito, (79, 82 e 148) localizados às margens do Rio São Francisco, com áreas alagadas, historicamente, por ele. Essa classificação baseou-se em estudo específico nessa região, denominando-o de Caatinga Arbórea, conforme Santos et al. (2012). Os demais pertencem ao Domínio Mata Atlântica (16, 20, 110), também classificados pelos mesmos autores, supracitados, como caatinga arbórea.

Dos fragmentos do Domínio da Mata Atlântica, há três característicos do bioma Mata Atlântica (4, 88 e 174), contudo, o fragmento 88 pertence a um mosaico formado por esse bioma e o savânico (Cerrado), no qual o fragmento

126 de Cerrado *sensu stricto* localiza-se a menos de dois quilômetros do mesmo. A fitofisionomia de Floresta Estacional Ombrófila, por ser bem restrita em relação à extensa área do Estado de Minas Gerais, foi composta por duas áreas típicas (7 e 97).

No caso do domínio do Cerrado, em que sua própria vegetação é um constante mosaico, há certo grau de dificuldade até mesmo em fazer sua delimitação em relação aos outros domínios. Por servir como conector das diferentes áreas presentes em Minas Gerais, como campos de altitude, Mata Atlântica e Caatinga, este permeia e, por vezes, se assemelha aos seus vizinhos, apresentando uma diversidade de condições ambientais bem maior do que os supracitados. Os fragmentos 70, 73, 74, 75, 84 e 89 (Cerrado *sensu stricto*) ficam próximos à caatinga, no extremo norte do estado. Os fragmentos 13, 21, 94, 96 (Cerrado *sensu stricto*) e 86 (Campo Cerrado) experimentam a influência da variação do próprio bioma juntamente com as Florestas Estacionais Deciduais e Semideciduais, mais ao norte-nordeste do estado. Os fragmentos 56 (Campo Cerrado) e 67 (Cerrado *sensu stricto*) representam a porção noroeste do estado, influenciados pelo próprio Domínio. Na parte central do estado, sob este mesmo efeito e da Floresta Estacional Semidecidual e campos rupestres, estão os fragmentos 34, 46, 47, 53, 98, 121 e 122. No extremo oeste do estado, estão localizados os fragmentos de vegetações mais robustas, em sua maioria, os Cerradões, fragmentos 102, 103, 106, 107, 173 e uma amostra de Cerrado *sensu stricto*, o fragmento 104.

Tabela 1 – Caracterização edafoclimática dos 38 fragmentos de vegetação em Minas Gerais contemplados no presente estudo. (Continua)

ID	Bioma	Fito	Estágio regeneração	Long. (°)	Lat. (°)	Área (ha)	Alt. (m)	Índice de umidade	T (°C)	PPT (mm)	Tipo de solo
56	Cerrado	CC	Campo cerrado	-45,86	-16,94	236,9	583	C2-Subúmido	23,0	1286	Latossolo
86	Cerrado	CC	Campo cerrado	-42,63	-15,99	284,6	906	C1-Subúmido seco	21,8	950	Latossolo
13	Cerrado	CSS	Reg. avançada	-42,77	-17,74	488,3	951	C2-Subúmido	20,4	1089	Latossolo
21	Cerrado	CSS	Reg. Media	-42,12	-16,14	591,3	837	C1-Subúmido seco	22,7	914	Cambissolo
34	Cerrado	CSS	Cerrado Denso	-44,63	-19,40	355,2	720	B1-Úmido	20,9	1350	Latossolo
46	Cerrado	CSS	Cerrado Denso, Reg. avançada	-44,68	-17,54	677,1	512	C1-Subúmido seco	22,9	1233	Gleissolo
47	Cerrado	CSS	Reg. avançada	-45,01	-17,47	271,0	566	C2-Subúmido	22,6	1269	Neossolo
53	Cerrado	CSS	Forte antropização	-44,52	-17,30	859,5	561	C1-Subúmido seco	22,7	1205	Latossolo
67	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-45,69	-16,40	725,8	509	C1-Subúmido seco	23,5	1217	Neossolo
70	Cerrado	CSS	Forte antropização	-44,97	-15,34	253,1	593	C1-Subúmido seco	23,6	1073	Latossolo

Tabela 1 – Caracterização edafoclimática dos 38 fragmentos de vegetação em Minas Gerais contemplados no presente estudo. (Continuação)

32

ID	Bioma	Fito	Estágio regeneração	Long. (°)	Lat. (°)	Área (ha)	Alt. (m)	Índice de umidade	T (°C)	PPT (mm)	Tipo de solo
73	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-44,85	-15,61	56,8	509	C1-Subúmido seco	24,2	1076	Latossolo
74	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-44,83	-15,60	74,8	510	C1-Subúmido seco	24,2	1074	Latossolo
75	Cerrado	CSS	Reg. avançada	-45,24	-15,33	488,3	629	C1-Subúmido seco	23,5	1098	Neossolo
84	Cerrado	CSS	Reg. Media	-44,07	-15,71	241,0	817	C1-Subúmido seco	22,3	1042	Latossolo
89	Cerrado	CSS	Forte antropização	-45,41	-15,00	336,2	757	C1-Subúmido seco	22,6	1102	Latossolo
94	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-42,35	-15,10	201,1	997	C1-Subúmido seco	21,9	867	Latossolo
96	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-43,26	-16,92	307,3	926	C1-Subúmido seco	20,5	1081	Cambissolo
98	Cerrado	CSS	Cerrado Denso, Reg. avançada	-45,44	-18,88	234,5	619	C2-Subúmido	21,8	1376	Latossolo
104	Cerrado	CSS	Reg. Moderada, não antropizado	-49,14	-19,21	301,4	687	B1-Úmido	21,4	1328	Latossolo
121	Cerrado	CSS	Reg. avançada	-43,88	-17,40	223,1	873	C2-Subúmido	21,0	1173	Latossolo
122	Cerrado	CSS	Cerrado Denso	-43,89	-17,39	320,6	869	C2-Subúmido	20,9	1172	Latossolo
126	Cerrado	CSS	Cerrado Denso, Reg. avançada	-44,98	-21,23	3,9	886	B2-Úmido	18,8	1529	Latossolo
102	Cerrado	CE	Reg. avançada	-49,13	-18,79	312,3	722	B1-Úmido	20,9	1301	Latossolo

Tabela 1 – Caracterização edafoclimática dos 38 fragmentos de vegetação em Minas Gerais contemplados no presente estudo. (Conclusão)

ID	Bioma	Fito	Estágio regeneração	Long. (°)	Lat. (°)	Área (ha)	Alt. (m)	Índice de umidade	T (°C)	PPT (mm)	Tipo de solo
103	Cerrado	CE	Reg. avançada	-50,97	-19,67	150,3	672	B1-Úmido	20,9	1400	Latossolo
106	Cerrado	CE	Cerradão	-49,15	-19,70	89,4	871	B1-Úmido	20,3	1347	Latossolo
107	Cerrado	CE	Cerradão	-49,96	-18,92	285,1	710	B1-Úmido	21,0	1352	Latossolo
173	Cerrado	CE	Cerradão	-50,66	-19,53	157,2	803	B1-Úmido	20,7	1374	Latossolo
16	Caatinga	FED	Terra Firme	-42,26	-16,24	144,0	476	C1-Subúmido seco	23,8	906	Nitossolo
20	Caatinga	FED	Terra Firme	-42,21	-17,12	406,9	624	C1-Subúmido seco	23,4	960	Argissolo
79	Caatinga	FED	Terra Firme	-43,98	-14,87	10764	480	D-Semi-árido	24,9	928	Cambissolo
82	Caatinga	FED	Terra Firme	-43,82	-14,75	27147	468	D-Semi-árido	25,0	898	Cambissolo
110	Caatinga	FED	Terra Firme	-42,11	-16,91	209,7	350	C1-Subúmido seco	24,4	873	Argissolo
148	Caatinga	FED	Terra Firme	-43,91	-15,29	7407,3	482	D-Semi-árido	24,6	961	Cambissolo
4	M. Atlântica	FES	Madura	-43,28	-20,55	36,8	843	B1 - Úmido	19,8	1381	Latossolo
88	M. Atlântica	FES	Madura	-44,97	-21,23	6,2	923	B2 - Úmido	18,8	1530	Latossolo
174	M. Atlântica	FES	Madura	-45,73	-20,44	49,4	735	B2 - Úmido	19,9	1537	Latossolo
7	M. Atlântica	FO	Madura	-44,74	-22,14	251,1	1744	B4 - Úmido	14,3	1702	Cambissolo
97	M. Atlântica	FO	Madura	-46,0	-22,89	181,8	1887	A - Superúmido	14,4	1807	Argissolo

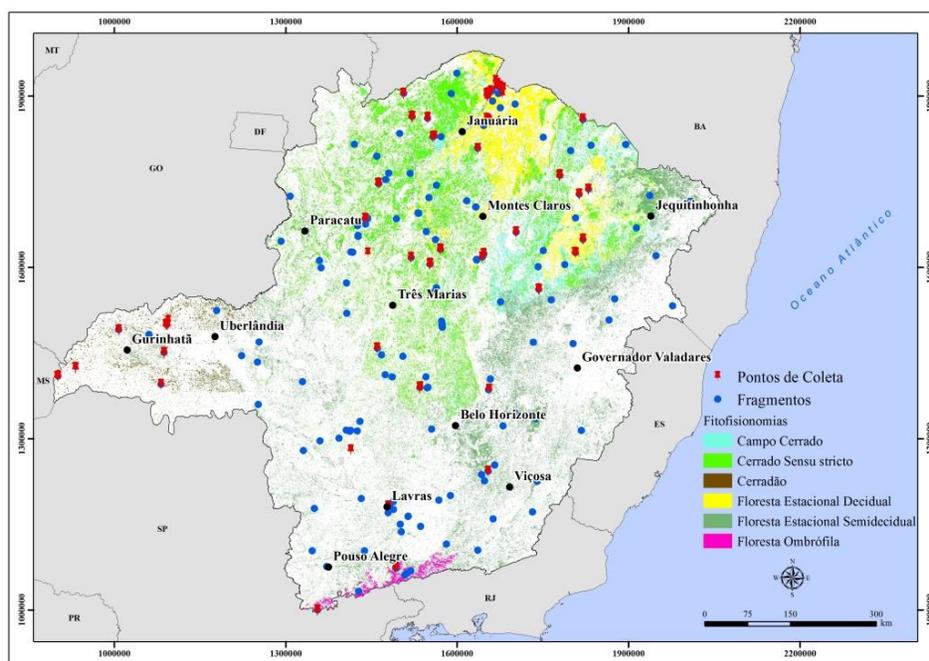
Em que: ID: identificação do fragmento; Fito: Fitofisionomia; CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual; FO: Floresta Ombrófila; Long: Longitude; Lat.: Latitude; Alt.: Altitude; T.: Temperatura; PPT: Precipitação. Fontes: Adaptado de Scolforo et al. (2008); Scolforo, Carvalho e Oliveira (2008) e UFV, CETEC, UFLA e FEAM (2010).

3.2 Base de dados

- FASE I: Projeto Inventário Florestal de Minas Gerais (IFMG)

Os dados relacionados ao estoque de carbono são advindos do projeto Inventário Florestal de Minas Gerais (IFMG), estudo elaborado pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em parceria com o Instituto Estadual de Florestas (IEF).

Figura 2 – Indicação dos fragmentos amostrados no Inventário Florestal com a diferenciação das principais fitofisionomias do estado de MG.



Fonte: Adaptado de Scolforo et al. (2006).

De 2003 a 2005, o projeto fez o mapeamento completo dos fragmentos florestais do estado, de 2005 a 2008, foram selecionadas 169 áreas e realizou-se o inventário florestal. Foram 4456 parcelas (10 x 100 m) lançadas em procedimento de amostragem de dois estágios de forma sistemática e

georreferenciadas, sendo 1763 no Bioma Cerrado, 571 no Bioma Caatinga e 2122 no Bioma Mata Atlântica. Foram amostradas 780000 árvores com diâmetro, a 1,30 m de altura do solo, superior a cinco centímetros, mais detalhes sobre os métodos utilizados podem ser consultados em Scolforo et al. (2006). Para o bioma Cerrado não foram consideradas as fitofisionomias vereda e campo, por estas não apresentarem estrato arbóreo significativo. Para cada indivíduo com circunferência mínima de 15,7cm de DAP, foram obtidas a CAP (cm), a altura total e a identificação botânica. Na Figura 2, mostra-se a distribuição espacial das parcelas lançadas em todo o estado de Minas Gerais, procurando captar as diferentes fitofisionomias e suas heterogeneidades intrínsecas a cada fragmento.

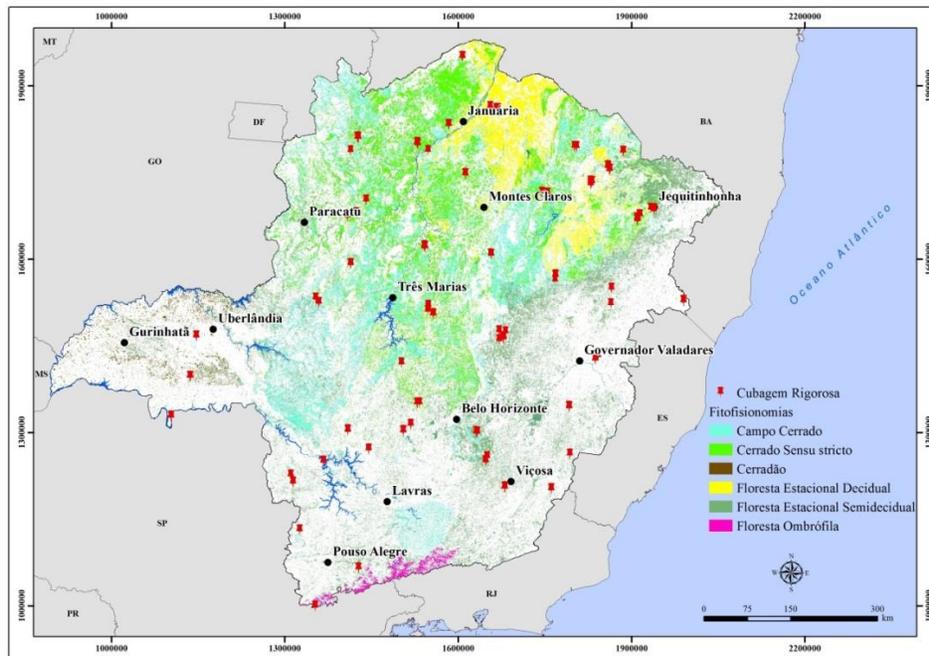
- FASE II: Cubagem Rigorosa

Os dados relacionados ao estudo do estoque de carbono na parte aérea das fitofisionomias arbóreas foram obtidos numa segunda fase do inventário, denominada de cubagem rigorosa. Para a obtenção de volumetria, biomassa e estoque de carbono da parte aérea, foram cubadas 2060 árvores pelo método de Huber, representativas de cada fitofisionomia (FIGURA 3), por diferentes classes de diâmetro e altura. Mais detalhes sobre os métodos utilizados podem ser consultados em Scolforo et al. (2008). Essa fase do projeto do inventário de Minas Gerais permitiu gerar equações alométricas de volumetria, biomassa e carbono para as diferentes fitofisionomias.

Para a obtenção da biomassa, volume e estoque de carbono da parte aérea viva e morta (árvores com diâmetro a 1,30 m de altura do solo, superior a cinco centímetros) foram utilizadas as equações geradas pelo IFMG (SCOLFORO et al., 2008) respeitando-se a fitofisionomia e sub-bacia hidrográfica. Foram utilizados os dados do inventário da remedição realizada em 2010.

No IFMG, Scolforo et al. (2008) após densa investigação sobre quais fatores permitiriam a inferência do nível de antropização de uma área chegaram à Razão de regeneração. Esta é dada pela divisão entre o número de indivíduos com diâmetro de cinco a dez centímetros e o número de indivíduos total inventariado. Quanto maior o valor da razão de regeneração mais perturbada será a área e mais longe do clímax a floresta estará. Essa razão foi calculada para a parcela de cada ponto de coleta dos demais dados

Figura 3 – Identificação dos locais onde foram realizadas as cubagens rigorosas do Inventário Florestal de Minas Gerais.



Fonte: Scolforo et al. (2006).

- FASE III: Avaliação do estoque de carbono no subsolo e serapilheira

Em 2010, dos 169 fragmentos do IFMG foram selecionados 38 para a realização do segundo inventário contínuo e também para os estudos detalhados

com a regeneração, estoques de carbono no solo, nas raízes e serapilheiras, além da densidade, fertilidade e textura do solo (MORAIS, 2014). Para coleta dos materiais, foram escolhidas aleatoriamente 30% das parcelas originais do inventário florestal dentro de cada fragmento e, em cada uma destas, foram lançados de um a dois pontos de coletas. Dessa forma, totalizaram-se 351 pontos avaliados para o estudo do carbono nos 38 fragmentos, sendo 31 em Campo Cerrado, 166 em Cerrado *sensu stricto*, 44 em Cerradão, 75 em Floresta Estacional Decidual, 20 em Floresta Estacional Semidecidual e 15 em Floresta Ombrófila.

Nesses 351 pontos, abriu-se uma trincheira de 0,5 m² de área e 1 metro de profundidade. Em cada ponto, foram coletados a serapilheira e amostras de solos para análise química e física, de densidade e de estoque de carbono. A profundidade foi subdividida em camadas de 0-10; 10-20; 20-40; 40-60 e 60-100 centímetros, gerando 1755 amostras. Para cada um dos 351 pontos (0,5 m²), foi coletada a serapilheira para estudo do carbono nesse material (MORAIS, 2014).

Em cada uma dessas camadas de solo, foram coletadas, quando existiam, as raízes separadas por classes de diâmetro: menores que cinco; de cinco a dez e maiores que dez milímetros de diâmetro, totalizando 4112 amostras de raízes. Descrições mais detalhadas sobre os métodos para a obtenção das variáveis de interesse e dos procedimentos, já citados anteriormente, podem ser encontradas em Morais et al. (2013). Em 31 dos 38 fragmentos foram lançadas subparcelas de 100 m² nos primeiros dez metros de cada parcela do inventário florestal para a mensuração da regeneração. Para os outros oito fragmentos utilizaram-se os dados médios da fitofisionomia inserida na mesma sub-bacia hidrográfica da área em questão.

Além de todas as informações supracitadas (FIGURA 4), ainda foram extraídas do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (SCOLFORO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2008), para cada ponto de coleta das amostras de

carbono, as seguintes informações: altitude, precipitação média anual, declividade, evapotranspiração anual, índice de umidade e temperatura média anual. Da base mundial de dados, *WorldClim 2.3* (HIJMANS et al., 2005) com resolução de um quilômetro, foram extraídas as seguintes informações, para os mesmos pontos: temperatura do trimestre mais quente, temperatura do trimestre mais frio, precipitação do trimestre mais chuvoso, precipitação do trimestre mais seco.

Para a modelagem, utilizou-se o cálculo do Excedente/Déficit Hídrico Anual (Exc): diferença entre a precipitação média anual e a evapotranspiração anual, ao invés de utilizar separadamente estas duas variáveis. O Excedente Hídrico ocorre quando o solo atinge a sua capacidade máxima de retenção de água (sinal do resultado da subtração positivo); a situação contrária, quando o solo não é capaz de atingir a sua capacidade de campo, resulta no Déficit Hídrico. O índice de umidade é o obtido, conforme metodologia proposta e utilizada por Thornthwaite e Mather (1955). Conforme critérios expressos no ZEE-MG (CARVALHO, Luiz et al., 2008), as áreas de estudos contemplam valores do superúmido ao semiárido.

Figura 4 – Quadro com as variáveis auxiliares e de interesse utilizadas neste estudo.

Variáveis Auxiliares		
Edáficas	Vegetação	Ambientais
Tipologia*	Bioma*	Altitude (m)
Densidade do solo (g/cm ³) por profundidade	Fitofisionomia*	Precipitação média anual (mm/ano)
Índice de fertilidade do solo por profundidade	Estrato arbóreo:	Precipitação média dos 3 meses mais úmido (mm)
Areia (%)	Volume de madeira (m ³ /ha)	Precipitação média dos 3 meses mais seco (mm)
Argila (%)	Biomassa (Mg/ha)	Temperatura média anual (°C/ano)
Silte (%)	Número de plantas	Temperatura média dos 3 meses mais frios (°C)
pH	Área basal (m ² /ha)	Temperatura média dos 3 meses mais quentes (°C)
Fósforo (P) (mg/dm ³)	Diâmetro quadrático médio (cm)	Evapotranspiração anual (mm/ano)
Fósforo remanescente (Prem) (mg/L)	Regeneração:	Excedente/Déficit hídrico (mm/ano)
Potássio (k) (mg/dm ³)	Número de plantas	Índice de umidade (%)
Cálcio (Ca) (cmol/dm ³)	Altura média (m)	Declividade (%)
Magnésio (Mg) (cmol/dm ³)	Razão de regeneração (antropização)	Coordenada x (Albers, em m)
Alumínio (Al) (cmol/dm ³)	Plantas mortas:	Coordenada y (Albers, em m)
H+Al (cmol/dm ³)	Volume de madeira (m ³ /ha)	VARIÁVEIS DE INTERESSE
Soma de bases (SB) (cmol/dm ³)	Biomassa das plantas mortas (Mg/ha)	Estoque de carbono (Mg/ha):
CTC efetiva (t) (cmol/dm ³)	Número de plantas	Estrato arbóreo
CTC potencial (T) (cmol/dm ³)	Área basal (m ² /ha)	Árvores mortas
Saturação por bases (v) (%)	Diâmetro quadrático médio (cm)	Serapilheira
Saturação por alumínio (m) (%)	Raiz:	Solos nas nove profundidades
Matéria orgânica (mo) (dag/kg)	Biomassa em 3 espessuras e 9 profundidades (Mg/ha)	Raízes em três classes de espessuras e nas nove profundidades
Zinco (Zn) (mg/dm ³)	Serapilheira:	Teor de carbono (%):
Cobre (Cu) (mg/dm ³)	Biomassa (Mg/ha)	Solos, raízes e serapilheira
Ferro (Fe) (mg/dm ³)		
Manganês (Mn) (mg/dm ³)		
Boro (B) (mg/dm ³)		

*: variáveis categóricas.

Fonte: Altoé (2016).

3.2.1 Índice de Fertilidade do Solo

Com o intuito de compilar as informações de fertilidade do solo adaptou-se o índice de Fertilidade do Solo (IFS) proposto por Carmo (2014). O índice permite a redução considerável do número de variáveis a serem trabalhadas e agrupa atributos de fertilidade que juntos possuem uma interpretação muito mais importante para o estudo do que se fossem trabalhados isoladamente. O IFS inicialmente proposto por Carmo (2014) selecionou 8 atributos de fertilidade que estavam envolvidos na condutividade elétrica do solo. Como no presente trabalho o IFS será relacionado com os estoques de carbono nos diferentes compartimentos, será retirada a matéria orgânica que é covariante do carbono fixado no solo e serão selecionados aqueles nutrientes que podem influenciar no desenvolvimento das plantas e que caracterizam os solos quanto ao grau de fertilidade.

A adaptação também consistiu em fazer com que o índice tivesse um valor máximo, no caso 1, pois da forma original ele era afetado pelos atributos de fertilidade do solo que possuíam quantidades muito superiores à ideal, tornando o resultado final de difícil interpretação. Dessa forma, o IFS adaptado varia de zero a um. Foram considerados no IFS os seguintes nutrientes obtidos das análises de solos: Fósforo disponível, pH (H_2O), Potássio (K^+), Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Saturação por bases, Ferro (Fe^{2+}), Zinco (Zn^{2+}), Manganês (Mn^{2+}), Cobre (Cu^{2+}) e Boro (B), totalizando 11 atributos de fertilidade do solo. Foram realizados os seguintes passos: (a) determinação do nível crítico (NC) para cada nutriente, conforme a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999). Entende-se que o NC, é um valor estabelecido o qual seria o adequado para suprir a necessidade de determinado nutriente da maior parte das plantas cultivadas ou, ainda, um teor de nutriente no solo que limita a resposta da planta a aplicação de fertilizante.

Em relação aos macronutrientes e ao Ferro, a limitação surge somente quando o valor do elemento presente no solo está abaixo do NC. Valores superiores ao nível crítico não prejudicam a planta e, tampouco melhoram sua condição. Em relação aos micronutrientes, o comportamento quando os valores são aquém do NC, obedecem à mesma lógica que impera para os macronutrientes. Porém, considera-se que até duas vezes o valor do NC a planta cresce em seu melhor desempenho, se for analisado somente tal nutriente; a partir desse ponto, o micronutriente passa a ser tóxico e, à medida que aumenta a sua concentração, de forma proporcional, a planta apresenta sinais de toxidez. Estima-se que isso ocorra até o valor de quatro vezes o nível crítico. Qualquer valor, além, não permite o desenvolvimento da planta e esta pode ter seu crescimento seriamente afetado pela toxidez.

O Fósforo teve seu nível crítico estabelecido de acordo com a característica física do solo, quando argiloso (argila \geq 35%) $NC_p=10$ mg/dm³, quando textura média (5<argila<35%) $NC_p=20$ mg/dm³ e se arenoso (areia \geq 95%) $NC_p=30$ mg/dm³. Para os demais fatores tem-se: $NC_{pH}= 5,8$; $NC_K= 80$ mg/dm³; $NC_{Ca}= 2,5$ cmol/dm³; $NC_{Mg}= 0,9$ cmol/dm³; $NC_v= 60\%$; $NC_{Zn}= 1,5$ mg/dm³; $NC_{Fe}= 30$ mg/dm³; $NC_{Mn}= 8$ mg/dm³; $NC_{Cu}= 1,2$ mg/dm³ e $NC_B= 0,6$ mg/dm³ (CFSEMG, 1999).

O segundo passo **(b)** consiste no cálculo do Índice do Atributo de Fertilidade (IAF) que é a razão de cada valor obtido na análise de solo para determinado atributo, pelo seu nível crítico (NC). Em seguida **(c)**, procede-se com a Ponderação (Pd) dos valores obtidos para que o valor máximo do índice varie de 0 a 1. Nesse sentido, **(c.1)** para os macronutrientes, saturação por bases e para o Ferro, se a razão (IAF) tivesse valor menor a 1, então $Pd= IAF/11$ e se o IAF fosse maior ou igual a 1, $Pd=1/11$. Já para os micronutrientes **(c.2)**, se o IAF fosse menor que 1, $Pd= IAF /11$, se o resultado da razão (IAF) variar entre 1 e 2, então $Pd=1/11$, se o IAF estiver entre 2 e 4, utiliza-se a seguinte equação:

$Pd = \{IAF - [1 + (IAF - 2) * 1,5]\} / 11$ e se por fim o IAF for maior que 4, $Pd = 0$. Para a obtenção do IFS (**d**) somam-se os valores obtidos de Pd para cada elemento por ponto de coleta.

3.3 Análise de dados e procedimentos estatísticos

Neste item serão apresentadas todas as análises e procedimentos estatísticos para a caracterização geral das áreas de estudos usando variáveis edafoclimáticas; definição dos estoques de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias, modelagem dos estoques de carbono e mapeamento do estoque de carbono total.

3.3.1 Caracterização geral das áreas de estudos usando variáveis edafoclimáticas

Esta etapa consistirá, em um primeiro momento, em analisar e caracterizar as diferentes áreas de estudos amostradas, por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), pois, para relacionar os estoques de carbono com as características edafoclimáticas, estas devem estar bem elucidadas. Serão utilizadas todas as variáveis auxiliares deste estudo: edáficas, da vegetação e ambientais, conforme já demonstradas na Figura 4.

3.3.2 Definição dos estoques de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias

Na sequência, será realizada a caracterização da variação dos estoques médios de carbono em cada compartimento (variável dependente) por fitofisionomia (variáveis independentes), fazendo uso da modelagem mista com variáveis *Dummy*, no intercepto do modelo, para atestar a diferença entre as médias (PINHEIRO; BATES, 2000). Trabalhou-se com as informações por ponto de coleta e utilizou-se como efeito aleatório na modelagem mista o

fragmento. O nível de confiança determinado para considerar as diferenças entre as médias foi de 90%.

3.3.3 Modelagem dos estoques de carbono

A seleção de variáveis explicativas e a modelagem dos estoques de carbono foram realizadas com o método LASSO (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*). É um método de estimativa com modelos lineares, por meio de aprendizado de máquina que penaliza os coeficientes para promover a seleção das variáveis preditoras. Busca minimizar a soma dos quadrados dos erros, desde que a soma absoluta dos valores dos coeficientes seja inferior ao parâmetro de penalização.

O parâmetro de penalização do LASSO é representado por “ λ ” (lambda) ou mesmo “t”, este permite a obtenção de um modelo parcimonioso: simples e que descreve bem a variável resposta. Ele é determinado pelo operador ou por meio da validação cruzada realizada pelo próprio algoritmo de implantação do LASSO, nessa última opção, pode-se escolher o λ mínimo ou o encontrado com um desvio. Quanto menor o λ , mais restritivo será o modelo (SIMON; FRIEDMAN; HASTIE, 2013), pelo grande número de variáveis, optou-se pelo λ mínimo, pois este não gerou processamentos demorados e seus resultados foram consistentes. A limitação da magnitude global dos coeficientes força a entrada de preditores importantes, encolhendo, potencialmente, a zero os menos correlacionados e, conseqüentemente, retirando-os do modelo.

O algoritmo utilizado, LARS (*Least Angle Regression*) funciona da seguinte forma: (a) inicia-se com todos os coeficientes com valor nulo; (b) encontra-se o preditor mais correlacionado com a variável de interesse; (c) aumenta-se o valor do seu coeficiente na direção do sinal de sua correlação com a variável dependente, até encontrar outro preditor tão correlacionado com o resíduo atual como o anterior; (d) nesse ponto, aumenta-se o conjunto dos

coeficientes dos preditores pré-selecionados, na direção dos mínimos quadrados até que algum outro tenha tanta correlação com o resíduo atual como os anteriores; (e) realiza-se esse procedimento até todos os estimadores entrarem no modelo; (f) o processo termina quando a solução de mínimos quadrados é encontrada.

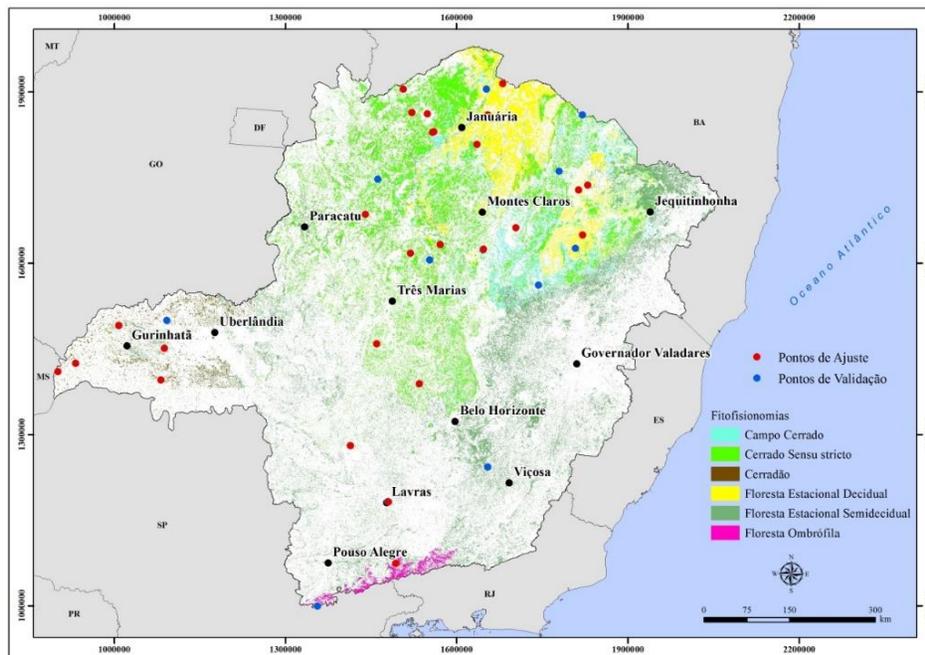
As variáveis pré-selecionadas pela PCA foram adicionadas para ajuste do estoque de carbono em cada compartimento. Quando uma variável claramente não tinha relação com o estoque de carbono em questão, no sentido de prever a causa, esta foi retirada, assim como aquelas que por si só tinham grande correlação, mas pouco explicavam sobre as causas. Por exemplo, para o entendimento do que leva a um maior estoque de carbono na serapilheira, não foram considerados os nutrientes presentes no solo e nem a biomassa da mesma. Este último foi retirado por ser fortemente correlacionado com a biomassa e, dessa forma, mascararia os efeitos das demais variáveis.

Para a modelagem do estoque de carbono total, a base de dados original (38 fragmentos) foi dividida em dois conjuntos de dados: o conjunto de pontos de ajuste (70% da base de dados) e o conjunto de pontos de validação (30% da base de dados). A base de validação, bem como de ajuste, está bem distribuída espacialmente por todo o estado de Minas Gerais, conforme detalhado na Figura 5. Assim, foram utilizadas 26 observações para a modelagem do estoque de carbono total e 12 observações para a validação do modelo selecionado. Os mesmos pontos de validação da modelagem foram utilizados para validar a krigagem com regressão (validação preditiva). Para a modelagem dos demais compartimentos, foram utilizadas as informações de todos os 38 fragmentos amostrados.

Os modelos selecionados para a estimativa do estoque de carbono em cada compartimento foram avaliados pelas estatísticas: erro médio (ME), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático (RMSE) e coeficiente de

determinação (R^2), assim como pelo gráfico de dispersão dos valores estimados ao redor da reta 1:1. Essas estatísticas foram obtidas a partir do conjunto de pontos de validação para o estoque de carbono total, e a partir de todas as observações para os demais compartimentos. O EM mostra a tendência do modelo em subestimar (sinal positivo) ou superestimar (sinal negativo) a estimativa da variável de interesse. A MAE indica a magnitude do erro, demonstrando a habilidade do modelo em fazer estimativas mais próximas das reais quando seu valor tende a zero. Já a RMSE expressa a acurácia dos resultados representando o desvio padrão do erro de predição. E o R^2 demonstra em porcentagem o quanto o modelo é capaz de explicar dos dados observados.

Figura 5 – Identificação dos pontos de ajuste e validação utilizados na modelagem do estoque de carbono total.



Fonte: Altoé (2016).

3.3.4 Mapeamento do estoque de carbono total por meio da Krigagem com regressão

Buscou-se espacializar as estimativas do estoque de carbono total para todas as áreas de florestas nativas de Minas Gerais. Para tal, utilizou-se o método da krigagem com regressão, que corresponde a um método híbrido que inclui a combinação de uma regressão linear múltipla entre a variável principal e variáveis preditoras, com a krigagem ordinária dos resíduos da regressão (PALMER et al., 2009; VIANA et al., 2012).

A krigagem com regressão fez o uso do modelo gerado, a partir da técnica LASSO, para o estoque de carbono total. Foram utilizados somente preditores geográficos e climáticos que possuíssem informações disponíveis e de fácil acesso para todo o estado. Em seguida, realizou-se a krigagem ordinária dos resíduos da regressão. Os valores interpolados dos resíduos da regressão foram então adicionados às estimativas do modelo de regressão, obtendo-se, assim, as estimativas do estoque de carbono total para todas as áreas de florestas nativas de Minas Gerais pelo método da krigagem com regressão.

Para a aplicação da krigagem ordinária aos resíduos da regressão considerou-se a pressuposição de estacionariedade, conforme descrita na hipótese intrínseca (JOURNEL; HUIBREGTS, 1978), por meio de ajuste de funções teóricas aos modelos de semivariogramas experimentais (EQUAÇÃO 1).

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

Em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor de distâncias h ; x_i é a posição espacial da variável Z .

Foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, descritos por Journel e Huijbregts (1978), aos semivariogramas dos resíduos da regressão pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. A avaliação do desempenho de cada modelo e a seleção do melhor modelo basearam-se no critério de validação cruzada (KIRALJ; FERREIRA, 2009), pelo qual calcula-se o erro médio reduzido (EMR) (EQUAÇÃO 2) e o desvio padrão do erro médio reduzido (S_{ER}) (EQUAÇÃO 3). No ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais determinaram-se os parâmetros efeito pepita (τ^2), patamar (σ^2) e alcance (ϕ). Para a análise do grau de Dependência Espacial (DE) foram utilizadas a relação $\tau^2/(\tau^2+\sigma^2)$ e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994), que consideram como dependência espacial forte ($DE < 25\%$); moderada ($25\% < DE < 75\%$) e fraca ($DE > 75\%$).

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(x_{i0}) - \hat{Z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (2)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z(x_{i0}) - \hat{Z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \right)^2} \quad (3)$$

Em que: $Z(x_{i0})$ é o valor observado no ponto $i0$; $\hat{Z}(x_{i0})$ é o valor estimado para o ponto $i0$ e $\sigma(x_{i0})$ é o desvio padrão da krigagem no ponto $i0$. O ideal é que o EMR seja próximo de zero e o S_{ER} seja próximo de um.

Para a aplicação da krigagem com regressão foram criadas, para todos os remanescentes de vegetação nativa de Minas Gerais, células georreferenciadas contínuas de dimensões de 100 m x 100 m, com o auxílio do programa ArcMap (ESRI, 2010). Cada célula, continha as informações das variáveis preditoras. Os *rasters* destas foram obtidos a partir do ZEE-MG e da base do *WorldClim*. Já, as

informações sobre a vegetação de Minas Gerais foram obtidas a partir do Mapeamento e Inventário da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais (SCOLFORO; CARVALHO, 2006).

Para a validação preditiva da krigagem com regressão foram utilizadas as informações obtidas no conjunto de pontos de validação, calculando-se as estatísticas: erro médio (ME), erro médio absoluto (MAE), e a raiz do erro quadrático (RMSE), que medem a precisão das estimativas.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa R (R CORE TEAM, 2016). Foram utilizados os pacotes: *vegan* (para PCA), *glmnet* (para o LASSO) e *geoR* (ajuste dos modelos teóricos de semivariograma ao semivariograma experimental). Posteriormente, o mapa de Krigagem foi gerado no ArcGis (ESRI, 2010) utilizando-se o modelo espacial selecionado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização geral das áreas de estudos usando variáveis edafoclimáticas

De acordo com a Análise de Componentes Principais (PCA), com todas as 289 variáveis, exceto estoques de carbono e variáveis categóricas, o comportamento do mesmo atributo de fertilidade, textura e densidade do solo nas diferentes profundidades e de forma cumulativa ou não, foram bem semelhantes. Com o intuito de diminuir as fontes de variação foi escolhida apenas uma profundidade, sendo esta de 0-40 cm. Isso porque, a análise prévia identificou que era até esse compartimento que havia as maiores correlações com os estoques de carbono. E também, por ser uma profundidade comumente utilizada nas análises de solo brasileiras, o que facilita a aplicabilidade do que será exposto no presente trabalho. Também foram retiradas as variáveis que pouco contribuíram, na PCA, para explicar os padrões existentes nas áreas de estudos.

Assim, foi realizada uma nova PCA com 38 variáveis. A primeira componente principal explicou 31,33% e diferenciou a Caatinga (Floresta Estacional Decidual) dos demais biomas, principalmente do Domínio Atlântico. Foi evidenciada a melhor fertilidade desses solos, caracteristicamente básicos, eutróficos, com capacidade de troca de cátions efetiva e soma de bases altas, com maior disponibilidade de nutrientes, principalmente, o Ca^{2+} decorrente da rocha de formação do solo ser calcária (IGLESIAS; UHLEIN, 2009). Em relação aos outros aspectos ambientais, a Caatinga localiza-se onde ocorrem as maiores temperaturas e taxas de evapotranspiração, em menores altitudes e declividades que as demais fitofisionomias, com baixos valores de precipitação e índice de umidade, ocorrendo nas maiores latitudes (projeção cônica Albers equivalente) do estado. A PCA corrobora a hipótese de que esses solos são mais

férteis, em decorrência de dois fatores: a qualidade da rocha de origem desses solos pouco profundos e a condição climática de altas temperaturas, que beneficia a ciclagem de nutrientes, e as baixas precipitações, que não favorecem a lixiviação dos mesmos.

O domínio Atlântico, por sua vez, ficou caracterizado por solos ácidos e com as demais características inversas às citadas para a Caatinga: menores temperaturas e taxas de evapotranspiração, em maiores altitudes e declividades que as demais fitofisionomias, com altos valores de precipitação, índice de umidade e ocorrendo nas menores latitudes (projeção cônica Albers equivalente) do estado. A componente secundária explicou 23,59% e fez a distinção entre a savana e os outros grupos. Os principais fatores que caracterizaram o agrupamento foi o alto teor de areia e de fósforo remanescente. Observou-se que um grupo de fragmentos (70, 73, 74, 75, 84 e 89), dentro desse bioma, formou uma nuvem nesse extremo do gráfico da PCA, que também são caracterizados por maiores valores de Y (projeção cônica Albers equivalente), baixos índice de fertilidade, biomassa florestal, área basal, matéria orgânica, CTC potencial e teor de silte. Como já mencionado o cerrado é um grande mosaico que conecta as outras formações e isso também ficou explícito na PCA na qual a maior parte da sua amostragem correspondeu à descrição agora realizada, mas o mesmo também teve amostras misturando-se aos outros Biomas. A análise de componentes principais foi bastante eficiente com o uso de variáveis edafoclimáticas para a separação dos biomas no presente estudo.

4.2 Definição dos estoques de carbono por compartimento para as diferentes fitofisionomias

Escolheu-se a realização da análise descritiva do ponto de vista de cada fitofisionomia por ser um dos mais restritos agrupamentos da vegetação que

mantém uma série de características edafoclimáticas e vegetacionais comuns a cada grupo, possibilitando sua correlação com as variáveis de interesse.

A modelagem mista permitiu a obtenção das médias por fitofisionomias, para cada um dos compartimentos analisados, partindo-se das informações por ponto de coleta. Conforme os dados de desvio padrão do intercepto e residual, vide Anexo A e Anexo B, observa-se que o desvio padrão do intercepto que responde pela variação dentro de cada fragmento é em torno da metade, no caso das raízes finas, médias e grossas e, até mesmo, o dobro do valor do desvio padrão residual (que condiz com o erro aleatório do modelo), para os demais compartimentos estudados. Essa proporção entre o desvio padrão do intercepto e o residual expõe uma alta variação do estoque de carbono submetido a uma mesma condição, no caso no fragmento e, confirma a adequação do uso da modelagem mista como controladora dessa variação.

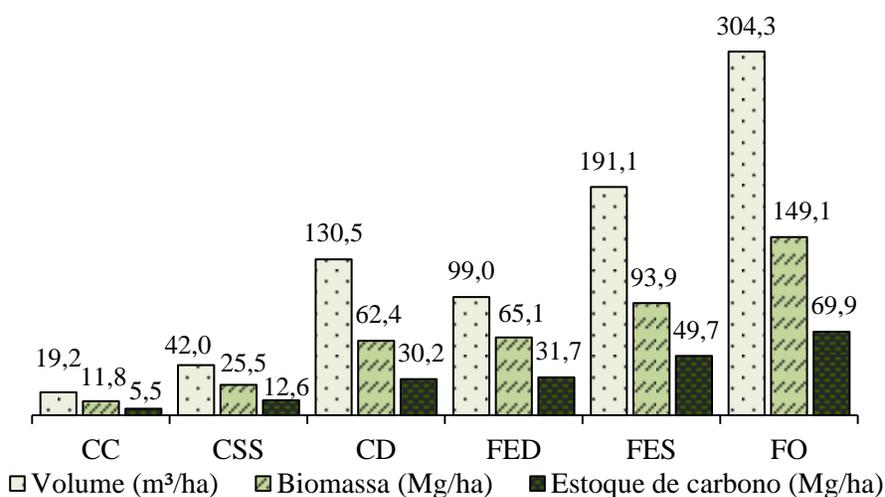
As médias por ponto de coleta resultam em um melhor aproveitamento das informações obtidas em campo e, até mesmo, da amostragem em si, com um maior número de observações. E isso só foi possível com a modelagem mista porque ela controla a alta variação existente dentro do fragmento.

4.2.1 Estoque de carbono no compartimento arbóreo vivo

Na Figura 6, mostra-se que o estoque de carbono tem a mesma tendência do volume de madeira e da biomassa. A significância dos parâmetros dos modelos mistos com variáveis *Dummy* comprovou, por meio do teste t, que Campo Cerrado (CC) e Cerrado *sensu stricto* (CSS) diferem das demais fitofisionomias, e entre si, para as três variáveis analisadas. A Floresta Ombrófila (FO) só é similar à Floresta Estacional Semidecidual (FES). Esta última, por sua vez, apresentou-se com médias equivalentes às obtidas no Cerradão (CD) e na Floresta Estacional Decidual (FED); com exceção para o volume de madeira que se diferenciou entre FED e FES.

Tomando como bases os valores médios apresentados na Figura 6, nota-se que o gradiente esperado entre a fitofisionomia menos robusta visualmente para a mais robusta é respeitado quanto ao estoque de carbono e biomassa, porém não para o volume que possui uma inversão de posição entre CD e FED. Esse fato mostra que a FED possui uma melhor proporção de carbono estocado por volume de madeira, aliás, também superior às outras formações e mais próxima do CSS e CC.

Figura 6 – Volume, biomassa e estoque de carbono do compartimento arbóreo por fitofisionomia para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila. Fonte: Altoé (2016).

Sabe-se que o estoque de carbono está relacionado com a biomassa, demonstrado pela quantidade de estudos que usam um fator para a conversão da biomassa em estoque de carbono (IPCC, 2006), isso mostra que o teor de carbono não varia tanto. A relação é atribuída à composição da madeira com lignina, celulose e hemicelulose, que possuem na sua estrutura química os

átomos de carbono. A conversão entre volume e biomassa é atribuída à densidade da madeira. De posse dessas informações percebe-se que as Florestas Estacionais Deciduais têm uma melhor estocagem de carbono por volume decorrente de uma maior densidade da madeira, conforme comprovado por Oliveira et al. (2012), em estudo com dados do mesmo projeto, que atribuem essa superioridade à limitação hídrica da região.

O desmatamento em um hectare de floresta deixaria de estocar muito mais carbono se realizado na Floresta ombrófila do que em qualquer outra, em contraste com o campo cerrado, no outro extremo. Porém, em se tratando de volume de madeira, a queima de um metro cúbico proveniente da FED emitiria mais carbono para a atmosfera que as demais, seguida por essa sequência: cerrado *sensu stricto*, campo cerrado, floresta estacional semidecidual, cerradão e floresta ombrófila. Essa sequência está de acordo com a disponibilidade hídrica de cada local.

Essas tendências foram condizentes com os estudos promovidos por Scolforo et al. (2015), mesmo que os valores por fitofisionomia tenham variado. Essa disparidade deve-se à diferença da amostragem. No trabalho supracitado, foram utilizados todos os fragmentos florestais amostrados no IFMG. Por ora, pretende-se detalhar e correlacionar todos os fatores possíveis que influenciam o armazenamento de carbono em uma floresta nativa, o que a presente intensidade amostral tem se mostrado satisfatória.

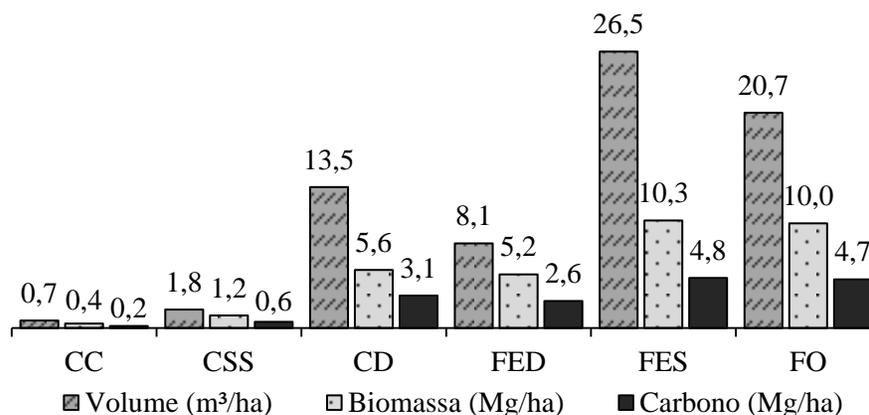
A produção de biomassa e, conseqüentemente, o estoque de carbono aéreo por fitofisionomia estão subordinadas à combinação de três fatores: precipitação, temperatura e fertilidade do solo (AMARO et al., 2013). A Floresta Ombrófila possui os maiores índices pluviométricos e as mais baixas temperaturas, embora tenha um solo argiloso este é pouco fértil, com raízes profundas e elevada eficiência na ciclagem de nutrientes; a F. E. Semidecidual possui o mesmo comportamento, mas com valores menos pronunciados. A

Floresta Estacional Decidual possui a mais baixa precipitação média anual, com a mais alta temperatura média anual e com os solos mais férteis. Já o cerrado possui os valores médios dentre as fitofisionomias, para os três fatores, além do fato de seus solos serem mais arenosos.

4.2.2 Estoque de carbono no compartimento arbóreo morto em pé

Os estoques de carbono das árvores mortas em pé, Figura 7, não obedeceram à disposição crescente entre fitofisionomias, estabelecida no compartimento arbóreo vivo em pé.

Figura 7 – Volume, biomassa e estoque de carbono do compartimento arbóreo morto em pé por fitofisionomia para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila. Fonte: Altoé (2016).

Porém, por serem produtos da decadência da parte aérea viva, houve uma tendência de os locais com maiores produções de estoques vivos também terem os maiores estoques de carbono (PEARSON; BROWN; BIRDSEY, 2007), número de plantas, biomassa e volume de árvores mortas. Contudo, o resultado da modelagem mista considerou as médias do CC e do CSS

equivalentes e, diferentes das encontradas para o CD, FED, FES e FO. Estas últimas também não se diferenciaram entre si.

Como a mortalidade é resultado de uma série de fatores tanto abióticos como bióticos, dentre eles a ação do homem, constatou-se uma variabilidade maior que a própria média em alguns casos, o que explica essa não diferenciação completa.

A conversão de volume para biomassa e para carbono do estrato arbóreo morto foi muito diferente para as fitofisionomias e quando comparado ao comportamento do estrato arbóreo vivo. A FES, FO e CD possuem valores altos de volume, entretanto seus estoques de carbono não contrastaram da mesma forma. Como são áreas, que apesar de não terem as maiores temperaturas, são tropicais; mais úmidas; possuem dossel mais fechado – que contribui para uma umidade da superfície do solo maior – e com densidade de suas madeiras mais baixas que nos outros locais, a ação de xilófagos decompositores dessa madeira morta é instigada (BATISTA et al., 2013; DELANEY et al., 2006; FINÉR et al., 2016). Parte dessa biomassa que anteriormente estava fixada, gera dióxido de carbono e parte transforma-se em matéria orgânica que, posteriormente, é incorporada ao solo.

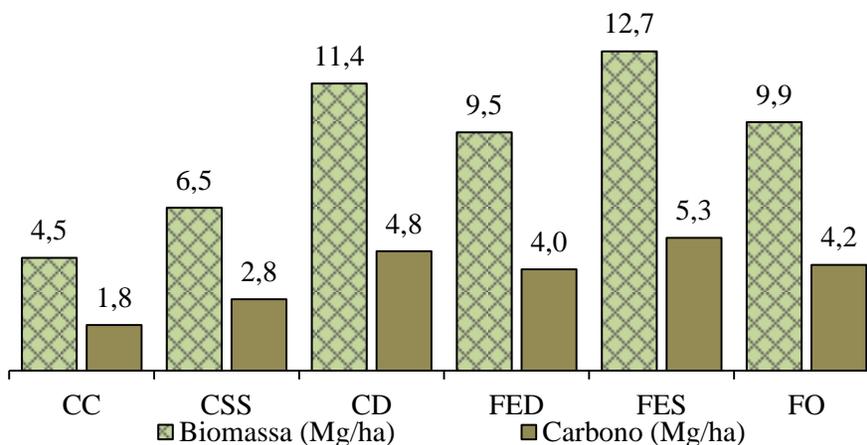
Os valores obtidos para as árvores mortas foram baixos para todas as variáveis se comparado aos outros compartimentos ou mesmo a outras literaturas (DELANEY et al., 2006; GAUTAM; PIETSCH, 2012).

4.2.3 Estoque de carbono na serapilheira

A serapilheira, Figura 8, tem grande variabilidade, pois se mostra complexa desde a sua composição: fragmentos de troncos, cascas, galhos, frutos, sementes e folhas, assim como frações e resíduos da fauna; que foram agregados em diferentes estágios de desenvolvimento e estão em distintos níveis de decomposição. Além disso, possui alta dinâmica de aquisição e decomposição

desses materiais. Esses, por sua vez, sofrem influência tanto das condições climáticas como da composição, quantidade e eficiência dos organismos decompositores (COÛTEAUX; BOTTNER; BERG, 1995; TRUMBORE; CZIMCZIK, 2008). Outros fatores que interferem no acúmulo de biomassa da serapilheira e, conseqüentemente, no estoque de carbono são: a época de amostragem da serapilheira distinta entre os fragmentos e os padrões da dinâmica da serapilheira serem diferenciados em cada fitofisionomia/bioma.

Figura 8 – Biomassa e estoque de carbono na serapilheira por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Dada essa complexidade, torna-se difícil em nível de fitofisionomia e em extensa área como a do estado de Minas Gerais descreverem padrões e distinções para os valores apresentados. Todavia, essa informação é de suma importância, pois contabiliza o estoque médio de carbono na serapilheira que é uma das principais fontes de carbono para o solo. Seus valores chegam até a serem mais expressivos que do estoque de carbono de árvores mortas em pé.

A biomassa de serapilheira foi maior no CD do que no CSS e CC. Estes dois últimos, foram iguais entre si e destoantes da FES. A FED e a FO não obtiveram significância quando comparadas com qualquer fitofisionomia. Para o estoque de carbono a modelagem mista evidenciou a superioridade do Cerradão em relação ao CSS e ao CC e, da FES com este último.

A tendência crescente dos valores para as fitofisionomias dentro do bioma cerrado demonstra o reflexo do componente arbóreo nessa quantidade de biomassa e carbono da serapilheira, assim como em relação à FES.

Os valores não destoantes na modelagem mista para as demais combinações indicam respostas diferentes às variações climáticas, como a precipitação e a quantidade de luz que atinge o solo da floresta, que interfere na temperatura do local e também na umidade do ambiente e do solo. Ou seja, uma vegetação mais robusta e com maior deciduidade tende a produzir mais serapilheira, mas a velocidade de sua decomposição e permanência no sistema está condicionada a outros fatores também.

A grande quantidade de serapilheira em uma área pode significar que a decomposição é mais lenta, como por exemplo, comparando-se uma floresta temperada em relação a uma tropical (MALHI; BALDOCCHI; JARVIS, 1999; SIX et al., 2002a). No ambiente tropical, as altas temperaturas promovem uma transformação mais rápida da serapilheira, dessa forma, quanto maior sua biomassa, maior a disponibilidade de carbono para o solo (SAYER et al., 2011).

A não diferenciação dos demais estoques de carbono disponíveis de serapilheira mostra claramente uma diferença na dinâmica entre os três biomas estudados. O cerrado possui a vegetação de menor biomassa da parte aérea, não caducifólia e é xeromorfa (IBGE, 2012), característica que dificulta a decomposição, em razão da composição química mais resistente de suas plantas. (LI et al., 2015).

A caatinga (FED) possui a deciduidade de suas folhas que caem de uma vez; a maior biomassa arbórea em contraste com o cerrado e, as mais altas temperaturas, fatores que favorecem a disponibilização de material e sua decomposição (CORNWELL et al., 2008). Contudo, as baixas umidades impedem a otimização do processo, em razão da decomposição ser dependente tanto da temperatura quanto da umidade. (ADAIR et al., 2008).

Já a Mata Atlântica (FES e FO) tem a maior biomassa arbórea, disponibilidade de água e temperatura, apesar de mais amena, ainda assim, traduz-se em locais quentes boa parte do ano e tem sua porção semidecidual; que resulta em uma madeira mais tenra (OLIVEIRA et al., 2012), facilitando sua degradação e também propiciando uma maior quantidade de agentes decompositores. Esses fatores acarretam em uma ciclagem de nutrientes mais acelerada que a dos demais domínios, porém a produção de serapilheira pela floresta também é considerável, pela quantidade de biomassa apostada à superioridade do solo.

4.2.4 Estoque de carbono nas raízes

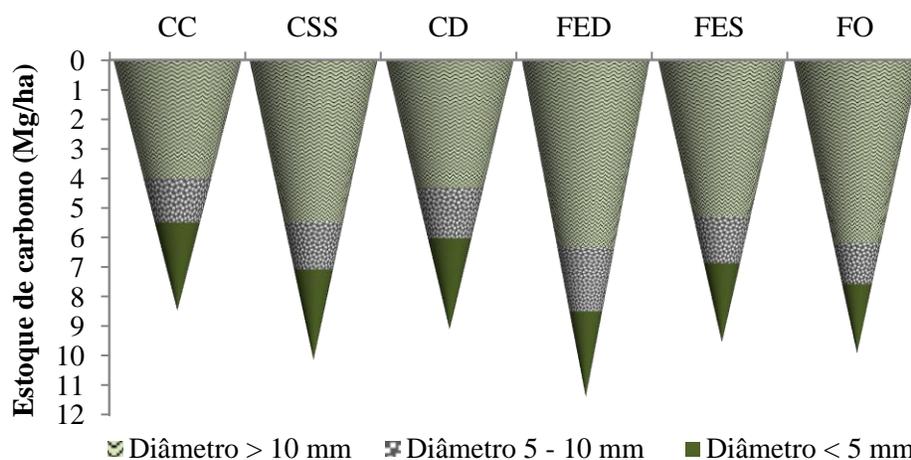
Juntamente com a serapilheira estão o *turnover* e os exsudatos de raízes como importantes fontes de carbono para o solo (WANG et al., 2013). Na Figura 9, indica-se que os maiores estoques de carbono, independentemente do bioma analisado, estão nas raízes grossas e, na sequência, nas raízes finas.

O estoque de carbono nas raízes finas, médias e grossas, assim como o total (CC: 8,8 Mg/ha; CSS: 10,4 Mg/ha; CD: 9,4 Mg/ha, FED: 11,9 Mg/ha; FES: 10,2 Mg/ha e FO: 10,9 Mg/ha, médias geradas a partir dos pontos de coleta), não se diferenciaram entre as fitofisionomias.

Com exceção apenas da produção de carbono nas raízes médias que foi superior na FED quando comparada ao CSS. Essa significância evidencia o quão variável é a base de dados, pois valores médios para carbono menores que o

encontrado para o CSS nas raízes médias, a exemplo o da FO, não se diferenciaram da FED. Essa alta variabilidade (vide Anexo B) compromete a diferenciação dos valores que se apresentaram, de maneira geral, próximos. Porém, para estudo detalhado com a modelagem, vide tópico seguinte, e adição das características edafoclimáticas na tentativa de explicar o comportamento do estoque de carbono nos diferentes compartimentos torna-se interessante. Essa variabilidade também é compreendida por se tratar de um ambiente natural de área considerável.

Figura 9 – Estoque total de carbono nas raízes por fitofisionomias, separado em classes de espessura, para Minas Gerais até 100 cm de profundidade.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila. Fonte: Altoé (2016).

Mesmo com a maior biomassa da parte aérea a FO não se destacou nos estoques de carbono das raízes. Houve apenas uma tendência do valor mediano para as raízes grossas, que desempenham função essencialmente estrutural, ser maior, o que se justifica nessa fitofisionomia. É importante ressaltar que a metodologia empregada não amostrou as raízes diretamente abaixo do tronco e

sim nas adjacências entre uma árvore e outra, de forma aleatória. Se fossem coletadas todas as raízes de diferentes árvores em todos os locais, às vezes a resposta de estoque total nas raízes poderia ser outra, mas seria necessária a derrubada das árvores. Dessa forma, o resultado apresentado mostra a quantidade de raízes espacializadas na área.

Quanto mais raízes, maior será a área de absorção de água e nutrientes para as plantas. Contudo, deve-se lembrar de que as plantas investem em mais raízes em ambientes não ideais para o seu desenvolvimento arbóreo, nesse caso, como uma estratégia de sobrevivência (WAISEL; ESHEL; KAFKAFI, 2002), típica da vegetação do cerrado.

Dessa maneira, percebem-se diferentes táticas utilizadas pelas plantas para adaptarem-se às variações dos fatores ambientais importantes ao seu crescimento. Infere-se, a partir da Figura 6, que, apesar de possuir um estrato arbóreo muito mais robusto, com um solo não tão fértil, entretanto com melhor disponibilidade hídrica, as árvores da Mata Atlântica (FO e FED) não investem mais recursos para a formação de mais raízes se comparado aos outros biomas, ou mesmo fitofisionomias. O que é verificado ao calcular que suas raízes representam apenas 13% para FO e 16% para FES do estoque de carbono do total que compreende raízes e parte aérea viva e morta.

A fertilidade dos solos da FED torna possível a alocação de recursos para o desenvolvimento das raízes (representando 26% do total de carbono estocado nas plantas), importante para a exploração do subsolo em busca de água.

É interessante notar que o cerradão, que advém de solos menos ácidos e pobres em nutrientes que os demais tipos de cerrado, tido como uma formação florestal assemelha-se mais à FES e à FED no tocante à participação das raízes no estoque total de carbono alocado na planta, correspondendo a 22%.

Já o campo cerrado e o cerrado *sensu stricto*, agrupados por IBGE (2012) como savana arborizada, têm suas raízes sob os efeitos de ambientes com as limitações hídricas e de fertilidade do solo, incluindo sua acidez e a toxidez por alumínio. E, ainda, considerando a Figura 6 de estoque de carbono da parte aérea, para Minas Gerais, faz verdade o conceito difundido de que o cerrado é uma floresta subterrânea, para o CC, no sentido de ter um maior desenvolvimento de suas raízes e não de sua parte aérea.

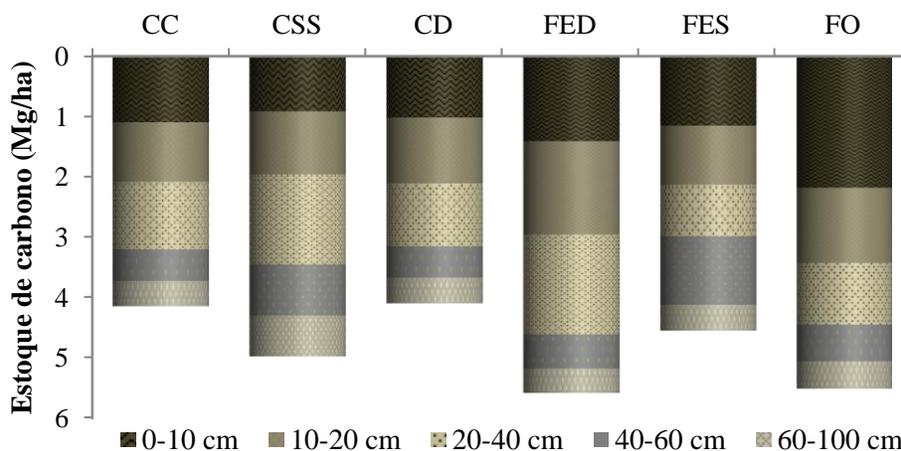
No CC, as raízes têm a maior importância no total de carbono alocado nas plantas, em torno de 62%. Já para o CSS o valor também é expressivo, tendo 45% de carbono estocado nas plantas, são alocados nas raízes. Há de se ressaltar que, desse valor, 35% para o CC e 30% para o CSS, advêm das raízes finas, evidenciando a importância dessas raízes para a manutenção da planta em ambientes adversos, e também, em se tratando de formações mais abertas, da contribuição do estrato gramíneo, que possui sistema radicular bem desenvolvido, na alocação de carbono no subsolo. Pelas metodologias aplicadas, neste estudo, não se pode precisar qual a verdadeira contribuição do estrato gramíneo e do sistema radicular arbóreo no compartimento de raízes finas. Experimentos mais específicos se fazem necessários para tal fim. Há de se considerar também que o fogo no cerrado é algo recorrente, influenciando nessa proporção de raízes e parte aérea.

4.2.4.1 Estoque de carbono nas raízes grossas

Nas Figuras 10, 12 e 14 retrata-se o estoque de carbono nas raízes grossas, médias e finas, respectivamente, em cada camada de solo amostrada e por fitofisionomia. Assim como na Figura 11, 13 e 15, só que de forma proporcionalizada em relação ao total de carbono alocado até a profundidade de 100 cm separados em camadas de mesma espessura.

Com base nos valores que geraram a Figura 10, as raízes grossas se diferenciaram na camada de 0 a 10 centímetros de profundidade na qual a fitofisionomia FO se mostrou superior às médias do CD e CSS. Este último ainda diferiu da FED, condição que se repetiu na camada subsequente, de 10 a 20 cm. Na camada de 20 a 40 cm a FED diferenciou-se da FES. Mantendo essa significância para a camada de 40 a 60 cm, na qual FES também foi superior ao CD. Na camada mais profunda, de 40 a 100 cm, FED se diferiu do CSS.

Figura 10 – Estoque de carbono nas raízes grossas, com diâmetros maiores que 10 mm, por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

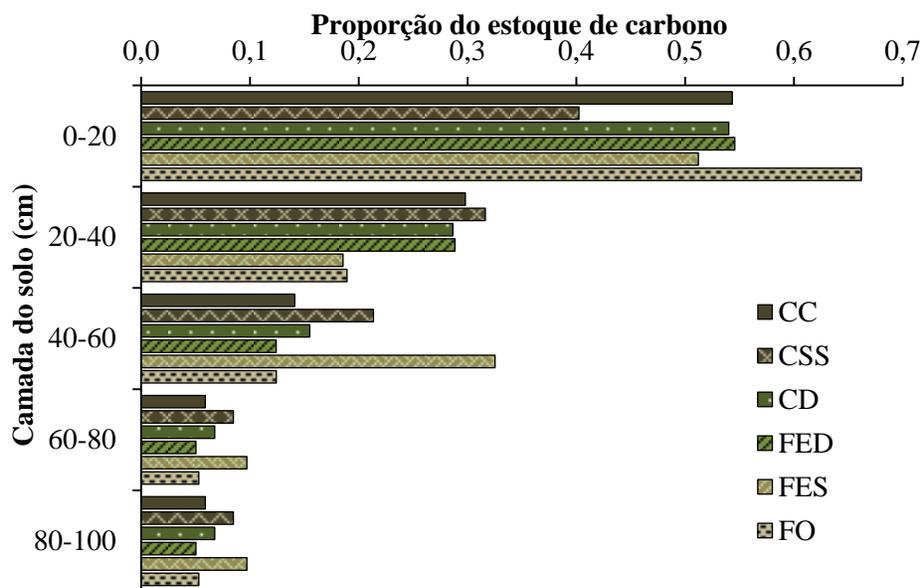
De forma cumulativa as fitofisionomias se distinguem, apenas, até 40 centímetros de profundidade. De 0 a 20 cm somente CSS se mostrou inferior à FED e FO. E de 0 a 40 cm FED tem um maior estoque de carbono nas raízes grossas que o CD e o CSS. Todas as outras combinações, por camada e de forma cumulativa, não foram diferenciadas pela modelagem mista.

Percebe-se que as árvores da Floresta Ombrófila priorizam o crescimento das raízes grossas em menores profundidades, quando comparadas

ao cerradão e o cerrado *sensu stricto*. Isso pode estar relacionado à maior disponibilidade de nutrientes na superfície ou mesmo por estratégia estrutural. Como seu dossel é fechado, a superfície do solo não fica tão exposta à radiação solar, permitindo essa maior exploração pelas raízes. A FED de alguma forma se mostrou superior ao longo de todo o perfil, mas de forma cumulativa obteve vantagem na estocagem de carbono até 40 centímetros. Em decorrência da alta variabilidade tanto dos valores de estoque de carbono, como em relação à frequência dessas raízes, nas diferentes camadas do solo, a modelagem mista não evidenciou outras diferenças.

O CSS é a fitofisionomia que possui a melhor distribuição (FIGURA 11) de raízes grossas ao longo do perfil estudado, com apenas 40% de suas raízes grossas até 20 cm de profundidade e com ocorrência em 87% dos pontos amostrais, considerando as diferentes profundidades. A cada vinte centímetros de profundidade, em solos do CSS, há a diminuição em torno de 10% estoque de carbono nesse compartimento. Já o CC, CD e FED diminuem cerca da metade do carbono que é estocado na camada acima. Dessa forma, os estoques de carbono de suas raízes grossas (com 77, 80 e 87% de ocorrência, respectivamente, contabilizando todas as profundidades) ficam concentrados até 40 cm de profundidade. A FES, como esperado, também tem seu maior estoque quanto mais próximo da superfície, mas apresentou distribuição variada ao longo do perfil. Além disso, sua frequência foi inferior a 70% nas áreas amostradas com ausências superiores a 40% a partir da camada de 40 a 60 centímetros. A concentração das raízes grossas da FO, próximas à superfície, mais pronunciada que em outras fitofisionomias, ficou evidente, na Figura 11. Sua ocorrência foi de 80% de todos os pontos amostrais.

Figura 11 – Proporção do estoque de carbono alocado por camada do solo, nas raízes grossas, com diâmetros maiores que dez milímetros.



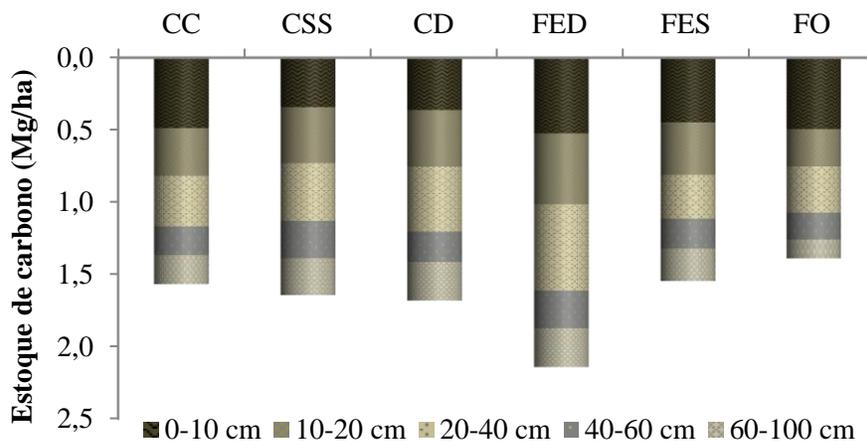
Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Na literatura, há poucos estudos com as raízes grossas, em decorrência de sua principal função ser estrutural e por possuir baixo *turnover*. Mas esta se apresenta como importante compartimento de estocagem de carbono, representando em torno da metade do que é fixado nas raízes (CC: 47%; CSS: 54% e CD: 47%; FED: 55%; FES: 55% e FO: 62%), e somando-se a parte aérea para o CC ela chega a ser responsável por mais de 17% do carbono total (CSS: 16%; CD: 8%; FED: 11%; FES: 7% e FO: 6%).

4.2.4.2 Estoque de carbono nas raízes médias

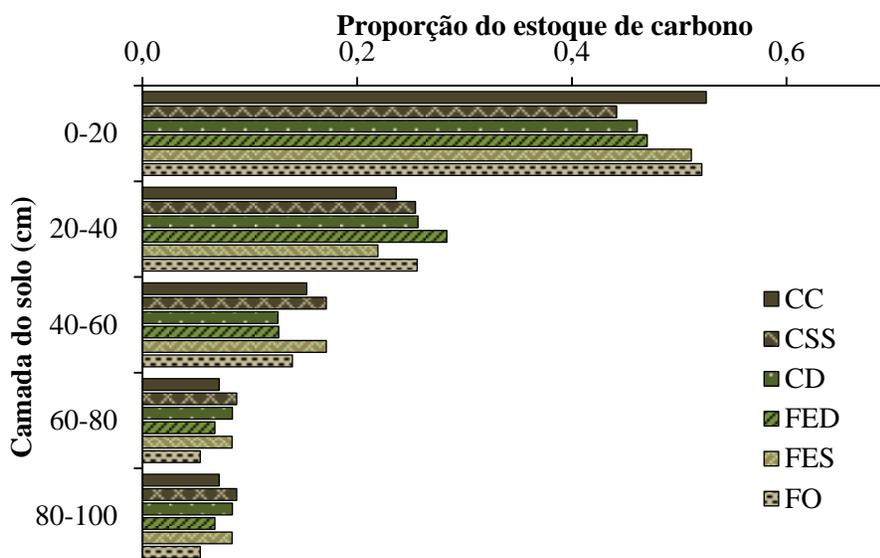
O estoque de carbono nas raízes médias (FIGURA 12 e FIGURA 13) é muito inferior ao estoque presente nas grossas e também em relação às raízes finas, sendo, em média, responsável por 17% do carbono alocado nas raízes.

Figura 12 – Estoque de carbono nas raízes médias, com diâmetros entre 05 e 10 mm, por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Figura 13 – Proporção do estoque de carbono alocado por camada do solo, nas raízes médias, entre cinco e dez milímetros de diâmetro.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Analisando as diferenças desse compartimento em cada vegetação e por camadas de solo, a FED se mostrou superior na quantidade de carbono quando comparada ao CSS nas camadas de 0 a 10 cm e em todas as camadas de forma acumulada. Na camada de 20 a 40 cm a sua quantidade de carbono superou as de todas as outras fitofisionomias. Na camada de 10 a 20, a modelagem mista não expôs nenhuma significância entre as diferenças. E na camada de 60 a 100 cm a FO tem estoque inferior ao encontrado no CD, CSS e FED.

O destaque da FED em relação ao CSS, assim como nas raízes grossas, pode ser explicado pela disponibilidade de nutrientes que contribuem para seu desenvolvimento somado à necessidade de explorar mais áreas em busca de água. Nesse compartimento, também nota-se que a FO não tem preferências pela camada mais profunda. Apesar de sua ocorrência a partir de 60 cm ser de 93% seu estoque de carbono é baixo.

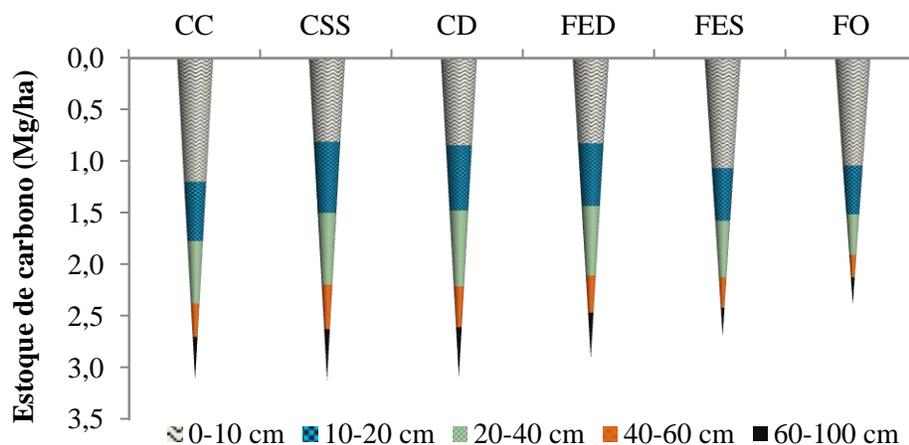
As raízes médias possuem como funções: o transporte de água e nutrientes, absorvidos em maior grau pelas raízes finas, para as raízes grossas e, conseqüentemente, para o restante da planta e como suporte e caminho para que as raízes finas alcancem maiores distâncias. Por vezes, as raízes são classificadas em finas e grossas e o papel das raízes médias agrupa-se com o das raízes grossas aqui especificadas (ZHANG; WANG, 2015).

Sua ocorrência é maior que 90% nos pontos amostrais, em todas as profundidades. As raízes médias acumulam em torno de 75% do carbono presente até um metro de profundidade, nos primeiros 40 centímetros, conforme Figura 13. As fitofisionomias não foram destoantes entre si nesta distribuição. A constância do comportamento do estoque de carbono no perfil do solo é pertinente para inferências dos estoques até um metro quando houver somente amostras menos profundas.

4.2.4.3 Estoque de carbono nas raízes finas

Apesar do estoque de carbono nas raízes finas ser menor que 4 Mg/ha (FIGURA 14) é um dos compartimentos mais importantes na ciclagem e estocagem do carbono em ambiente natural (ZHANG; WANG, 2015). Por meio dela, a planta obtém os produtos não advindos da respiração que permitem seu crescimento e acúmulo de carbono. As raízes finas contribuem para o estoque de carbono no solo por liberação de exsudatos e do seu *turnover*. E estudos ainda mostram que quando associadas aos fungos permitem a comunicação entre plantas e trocas de carbono entre si, significando até 40% do carbono presente nas raízes finas (KLEIN; SIEGWOLF; KÖRNER, 2016).

Figura 14 – Estoque de carbono nas raízes finas, com diâmetros menores que 5 mm, por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Com foco nas camadas amostradas no solo, de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm as quantidades de carbono estocado foram as mesmas para todas as fitofisionomias. Como a quantidade e diversidade dos organismos

decompositores, umidade, porosidade e disponibilidade de nutrientes do solo são maiores quanto mais próximos da superfície e também da serapilheira, é estratégico as plantas de qualquer bioma tentar ocupar ao máximo essa área com as raízes finas.

Outro fato que ainda contribui para essa camada ser rica em raízes finas é a maior facilidade de todas as plantas terrestres de qualquer idade ou estrato serem capazes de acessar o subsolo até essa profundidade. Todavia, há uma tendência do CC ter os maiores estoques nessas duas primeiras camadas, por ser uma formação campestre, porém, acredita-se que em razão da alta variabilidade inerente ao ambiente natural, a amostragem não conseguiu diferenciá-lo das demais fitofisionomias.

Na espessura de 20 a 40 cm, a FO obteve o menor valor quando comparada ao CSS, CD e FED; na camada de 40 a 60 centímetros de profundidade houve diferença significativa somente com o CSS. Já entre 60 a 100 centímetros de profundidade a FES e FO foram inferiores ao CSS, CD e FED. Entretanto, de forma cumulativa a modelagem mista não foi capaz de diferenciar nenhum estoque.

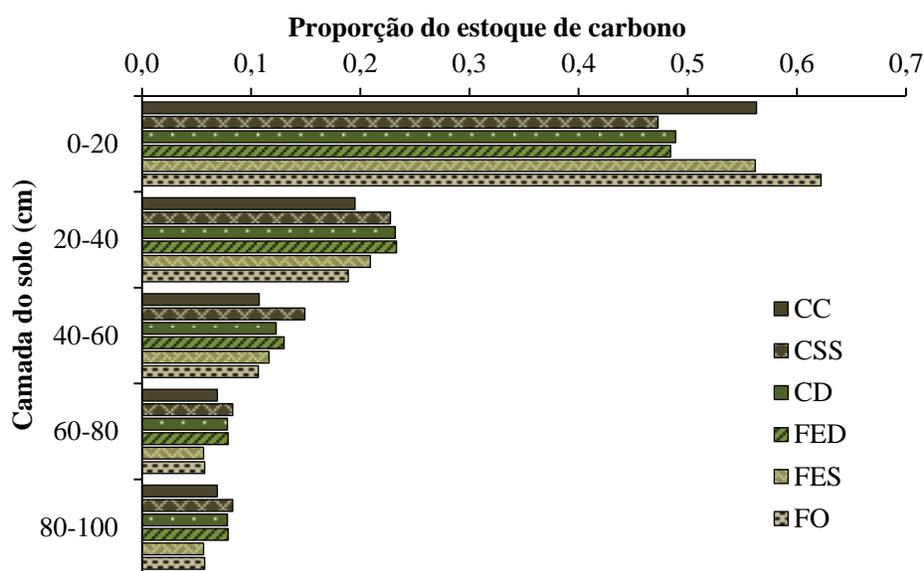
As plantas da mata atlântica não precisam dedicar tanto seus recursos em raízes finas, que é um gasto energético alto (PERSSON, 1983, p. 87), já que conseguem se nutrir por meio de uma rizosfera menos pronunciada. O cerrado se destaca nesse compartimento, embora não significativo, pela necessidade de ter mais área superficial específica radicular, para captação de água e nutrientes capazes de sustentar o desenvolvimento da planta, e também, pela influência do estrato gramíneo expressivo.

A ocorrência de raízes finas em todos os pontos amostrais, considerando todas as profundidades e fitofisionomias, foi de 99%. Verificou-se, também, que as raízes finas na FO representam apenas 3% do estoque arbóreo total contabilizado, na FES 4%, FED 6%, CD 7%, CSS 13% e no CC, consideráveis,

21%. Em relação ao teor de carbono nas amostras de raízes, este foi muito homogêneo, com valor médio para as raízes de 0 a 5 mm de diâmetro de 44,4 (DP=3,5%), para raízes entre 5 e 10 mm de diâmetro de 44,8 (DP=3,3%) e 44,9 (DP=3,5%) para as raízes maiores que dez milímetros de diâmetro.

Na Figura 15, evidenciam-se as estratégias de ocupação do subsolo semelhantes entre CSS, CD e FED. Como também confirma a preferência das raízes finas das plantas do CC, da FES e, principalmente, da FO em ocupar a faixa mais superficial.

Figura 15 – Proporção do estoque de carbono alocado por camada do solo, nas raízes menores que cinco milímetros de diâmetro.



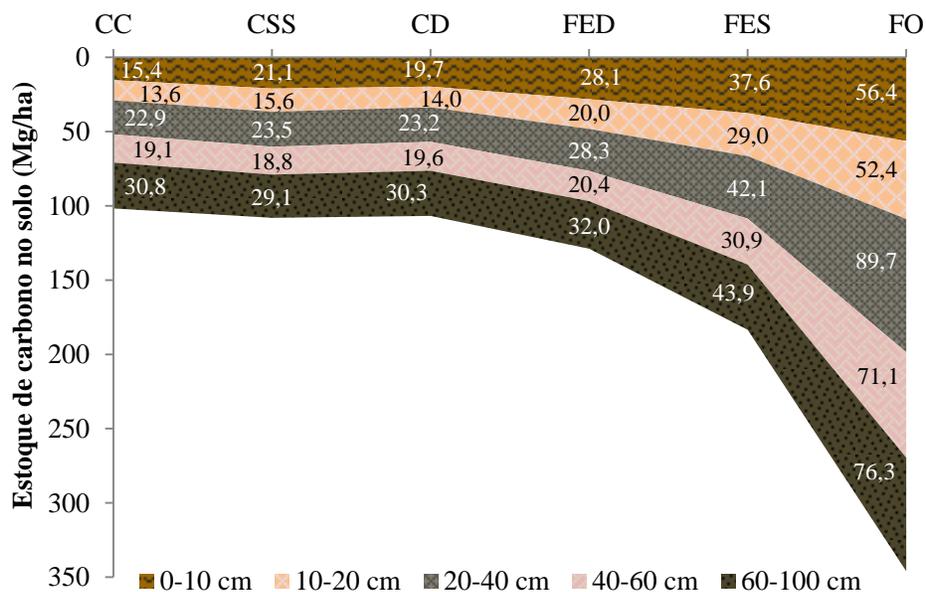
Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila. Fonte: Altoé (2016).

4.2.5 Estoque de carbono no solo

Os maiores estoques de carbono pertencem ao solo (FIGURA 16). A modelagem mista com variáveis *Dummy* foi sensível às diferenças em todas as

profundidades e de forma cumulativa para os estoques da FO, em relação à FED, CD, CSS e CC. A FO só diferenciou-se da FES na camada de 40 a 60 cm. Esta última ainda teve a quantidade de carbono no solo diferente das três fitofisionomias do cerrado na camada de 0 a 10 cm e de forma acumulada até 20 cm de profundidade. De 10 a 20 cm a média desta mesma fitofisionomia foi maior que CC e CSS, o mesmo aconteceu para a profundidade até 40 cm. Por último, FES teve média diferente que o CSS na camada de 20 a 40 cm e de forma acumulada até 60 cm. Além da FO, a FED se diferenciou do CC na faixa de 0 a 10 cm.

Figura 16 – Estoque de carbono no solo, em diferentes profundidades, por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.

Fonte: Altoé (2016).

Os valores apresentados, na Figura 16, vão ao encontro de estudos fragmentados sobre o estoque de carbono no solo nos biomas considerados

(ASSAD et al., 2013; CORBEELS et al., 2016; VIEIRA et al., 2011; VILLELA et al., 2012). Há uma tendência dos valores aqui discutidos serem um pouco maiores, por exemplo, dos encontrados em Bernoux et al., (2002). Especialmente, as FED possuem valores mais pronunciados, pois os trabalhos encontrados têm como objeto de estudo a caatinga florestada e não a arbórea (GIONGO et al., 2011; MENEZES et al., 2012; SCHULZ et al., 2016).

Infere-se que as estimativas de biomassa e estoque de carbono no componente aéreo, na serapilheira e nas raízes, responderam ao conjunto das alterações relacionadas à disponibilidade hídrica e às características do solo. Na Tabela 2, apresenta-se uma caracterização resumida de algumas características edafoclimáticas por fitofisionomia, já citadas, visando a dar suporte à discussão.

Tabela 2 – Médias de variáveis edafoclimáticas separadas por fitofisionomias, para as áreas amostradas em Minas Gerais.

Fito	CC	CSS	CD	FED	FES	FO
Arg+sil	57,2 (32,5)	48,6 (65,1)	22,7 (12,9)	63,8 (16,5)	86,4 (10,2)	44 (11,2)
Ds	1,2 (18,8)	1,3 (19,3)	1,4 (2,6)	1,4 (6,8)	1,2 (18,6)	1 (1,0)
IFS	0,21 (29,6)	0,26 (34)	0,39 (18,3)	0,60 (6,6)	0,32 (3,8)	0,28 (1,7)
T	22,4 (3,7)	22,1 (6,3)	20,7 (1,3)	24,3 (2,6)	19,5 (3,3)	14,4 (0,4)
ETP	1307 (2,7)	1270 (11,7)	1063 (3,5)	1354 (13,2)	1018 (3,9)	884 (10)
PPT	1118 (21,3)	1163 (13,5)	1355 (2,7)	921 (3,8)	1483 (6)	1755 (4,2)
Água sup	9,4 (50,3)	11,9 (31,1)	14,6 (12,2)	8,8 (35)	16,8 (19,9)	20,5 (0,1)
Alt	744 (30,8)	716 (23,3)	758 (10,5)	482 (18,7)	830 (11,4)	1815 (5,6)

Fonte: Altoé (2016).

Na qual, CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado *Sensu Stricto*; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual; FO: Floresta Ombrófila; Fito: fitofisionomia; Arg+sil: argila+silte (%); DS: Densidade do Solo (g/cm^3); IFS: Índice de Fertilidade do Solo; T: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); ETP: Evapotranspiração (mm/ano); PPT: Precipitação (mm/ano); Água sup: água superficial (L/s.km^2); Alt: altitude (m). Os valores entre parênteses é o coeficiente de variação (%). As características pedológicas são para a profundidade até 100 cm.

As fitofisionomias do cerrado e mesmo a FED (com exceção da primeira camada, quando comparada ao CC), não se diferenciaram para o estoque de carbono no solo, mesmo tendo características vegetacionais e de fertilidade do

solo tão distintas. Esse fato não revela uma relação clara dos estoques de carbono da parte aérea sobre os estoques do solo, isso porque os fatores que condicionam um estoque, não atuam ou modificam, de forma diferente, o outro.

Por meio da não diferenciação da FED, que possui os maiores IFS, nota-se que essa variável, isoladamente, não diferencia os estoques de carbono no solo, quando tratados por fitofisionomia.

A maior disponibilidade hídrica da FO acarreta em solos lixiviados e, em adição, seu sistema radicular apesar de eficiente (pelo porte das árvores que este suporta), é o de menor estrutura. Seu índice de fertilidade do solo (TABELA 2) indica que sua baixa fertilidade, alta acidez e teores de Fe e Al, de certa forma poderiam ser benéficos para a conservação do carbono orgânico no solo por conferirem proteção física à matéria orgânica do solo (KLEBER et al., 2005), porém não destoante dos valores encontrados para a maior parte das fitofisionomias.

De maneira contrária ao esperado, o teor de argila + silte é o segundo menor dentre as fitofisionomias. Essa associação também é conhecida por formar agregados que protegem a matéria orgânica no solo. Todas essas características supracitadas não justificariam seu maior acúmulo de carbono no solo. Contudo, um dos motivos que ajuda a explicar os valores encontrados é a provável decomposição acelerada de sua serapilheira.

Outros fatores que contribuem para o maior aporte de carbono nesta fitofisionomia são: a menor temperatura e densidade do solo e maior umidade. Apesar de não se ter informações precisas da umidade e temperatura do solo, os valores de temperatura média anual, precipitação média anual, água superficial e evapotranspiração são indicativos delas. O aumento da temperatura, até certo ponto, não determinado (e muito influenciado por outros fatores ambientais), favorece a decomposição da matéria orgânica e sua agregação ao solo (DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Esse aumento, no sentido exclusivo de elevar

o ressecamento do solo, e as baixas umidades do mesmo, prejudicam o processo de decomposição (SIERRA et al., 2015). A menor densidade do solo da FO também pode estar contribuindo para o processo de decomposição da matéria orgânica e alocação de carbono no solo por ser mais bem aerado.

Pelo fato da Floresta Ombrófila ter um dossel e sub-bosque mais fechados, resulta-se em uma menor ação direta da radiação solar no solo e do impacto da chuva nos agregados do solo, o que também são fatores favoráveis para a conservação da matéria orgânica no sistema.

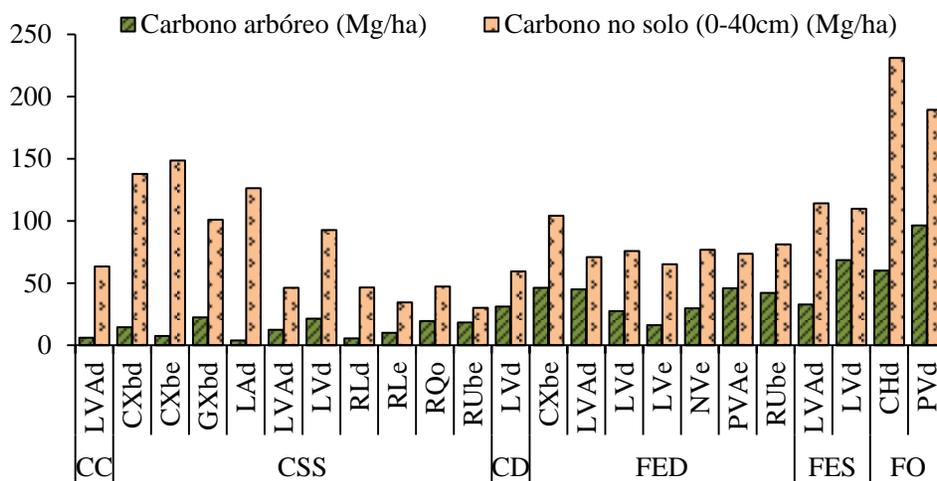
Outro atributo que, possivelmente, interfere na quantidade de carbono estocado no solo é sua tipologia (PAZ et al., 2016). Os solos da FO estão classificados em Argissolo Vermelho e Cambissolo Húmico. Já as áreas de FES em Latossolo Vermelho Amarelo, assim como para o CC e em Latossolo Vermelho, como os solos de Cerradão, neste estudo. A FED e o CSS possuem uma diversidade maior de tipos de solos.

Na Figura 17, mostra-se o contraste entre os estoques de carbono no solo até 40 cm e na parte aérea viva, com a separação por fitofisionomia, nos diferentes tipos de solos amostrados, isso na expectativa de verificar a interferência da tipologia do solo no carbono estocado no estrato arbóreo e esses dois fatores em regular o armazenamento no solo. Não foi utilizado o estoque até 100 cm para ser possível retratar o estoque de carbono no solo juntamente com o da parte aérea, na mesma escala gráfica. Porém, ao analisar os dois tipos de latossolos, citados anteriormente, que ocorrem em quatro das seis fitofisionomias estudadas; comparando os valores encontrados para os estoques na parte aérea e no solo, as médias são variáveis e a razão entre carbono estocado na parte aérea e no solo não são parecidas.

Nota-se que as variações dos estoques de carbono por fitofisionomia não podem ser explicadas, somente, por essa classificação já que o mesmo tipo de solo ocorre em várias delas e gera respostas diferentes. Essa diferença, porém,

poderia ser atribuída às características climáticas intrínsecas de cada local. Além do mais, os tipos de solos que ocorrem na FO não ocorreram nas outras fitofisionomias e, podem estar relacionados à superioridade dos estoques desses fragmentos. Dessa forma, esse tema não é conclusivo pelos resultados aqui expostos.

Figura 17 – Estoques de carbono no estrato arbóreo e no solo até 40 cm de profundidade nas áreas de estudo, separados por tipologia do solo de acordo com a classificação de UFV, CETEC, UFLA e FEAM (2010).



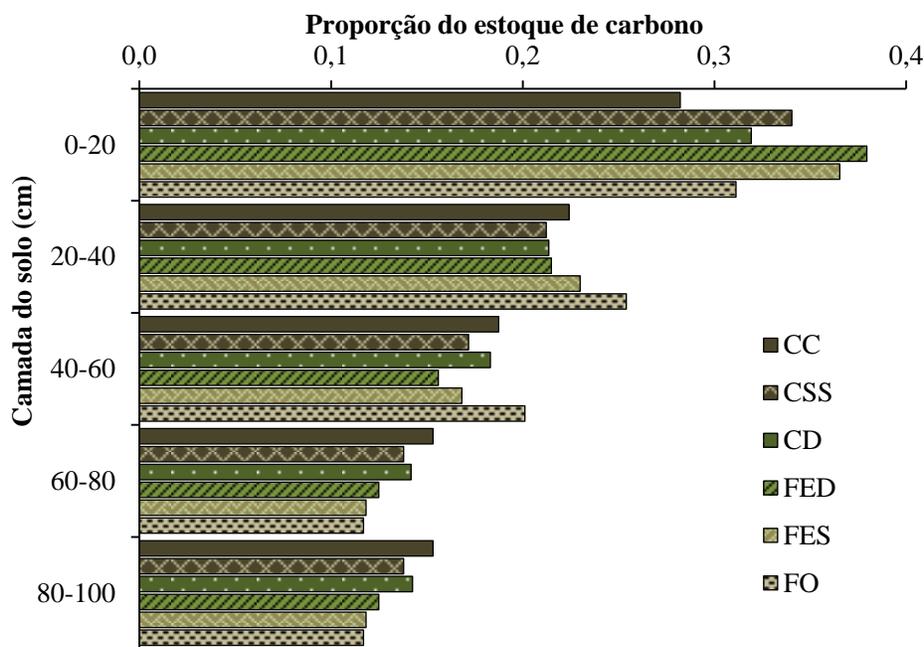
Em que: CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado *Sensu Stricto*; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual; FO: Floresta Ombrófila; CH: *Cambissolo húmico*; CXb: *Cambissolo háplico Tb*; GXB: *Gleissolo háplico Tb*; LA: *Latossolo amarelo*; LVA: *Latossolo vermelho-amarelo*; LV: *Latossolo vermelho*; NV: *Nitossolo vermelho*; PVA: *Argissolo vermelho-amarelo*; PV: *Argissolo vermelho*; RL: *Neossolo lítólico*; RQ: *Neossolo quartzarênico órtico*; RUB: *Neossolo Flúvico Tb*. E d: distrófico e e: eutrófico.

De maneira geral, conforme Figura 18, as fitofisionomias possuem uma melhor distribuição dos estoques de carbono, até um metro de profundidade, no compartimento solo do que raízes. Todos eles apresentam a camada superficial com maior importância no armazenamento e com tendência decrescente, ao

passo em que se adentra no subsolo. O CC é o que possui uma distribuição mais homogênea em todo o perfil.

Até 40 cm de profundidade há de 50 a 60% de todo o estoque de carbono presente até um metro de profundidade. De acordo com Morais (2014), essa maior quantidade de carbono do solo próxima à superfície ilustra a necessidade de conservação dessas áreas e o empenho para controlar as ações antrópicas que contribuem para o acelerado aquecimento global. Isso porque os primeiros 40 cm de solo são os mais susceptíveis a essas variações de temperatura e/ou supressão da vegetação que ocasiona uma maior exposição solo.

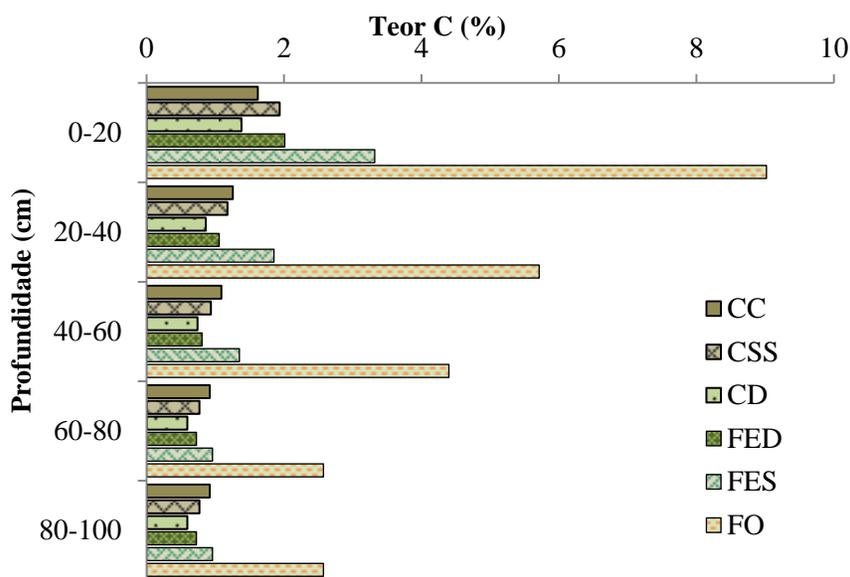
Figura 18 – Proporção do estoque de carbono no solo em relação ao total até 100 cm, separado em diferentes profundidades, por fitofisionomia para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

Quando se analisa os teores de carbono entre as fitofisionomias (FIGURA 19), verifica-se a padronização dos valores entre as fitofisionomias do cerrado e a FED e a leve tendência de decrescerem com a profundidade. A FES possui comportamento mais conspícuo entre as camadas do solo e mesmo dentre os tipos vegetacionais. Porém, a FO supera as demais fitofisionomias em torno de quatro vezes além das concentrações encontradas para as mesmas. Seus teores justificam os estoques de carbono encontrados em um solo com menor densidade.

Figura 19 – Teor de carbono no solo, em diferentes profundidades, por fitofisionomias para Minas Gerais.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

De maneira geral, não foi relatada a interferência da diversidade de espécies da vegetação nos estoques de carbono do solo por entender que a vegetação é condicionada pelas características edafoclimáticas. Ela contribui

para o estoque de carbono do solo (LANGE et al., 2015), mas antes é um resultado do mesmo, juntamente com as características climáticas. Como se busca no presente estudo entender as causas dos estoques em cada compartimento, a abordagem da interferência da vegetação foi exposta indiretamente pelos estoques de sua parte aérea, raízes e serapilheira.

4.2.6 Estoque de carbono total nas fitofisionomias de Minas Gerais

Na Tabela 3, mostra-se a compilação dos dados médios de estoques de carbono para cada compartimento e para o total por fitofisionomia. O estoque de carbono total obedece aos padrões estabelecidos pelo solo, pois esse compartimento é o que possui os maiores estoques. As fitofisionomias do Cerrado possuem valores relativamente próximos assim como a FED e o CD.

Tabela 3 – Estoques médios de carbono por compartimento e total (Mg/ha) por fitofisionomia para o Estado de Minas Gerais.

Fito	Arbórea Morta	Serapilheira	Raiz	Arbórea viva	Solo	Total
CC	0,20	1,82	8,81	5,48	102,08	118,4
CSS	0,60	2,84	10,42	12,57	110,73	137,2
CD	3,12	4,75	9,36	30,21	108,25	155,7
FED	2,60	4,04	11,92	31,66	133,39	183,6
FES	4,81	5,29	10,16	49,69	186,83	256,8
FO	4,67	4,21	10,87	69,94	359,36	449,1

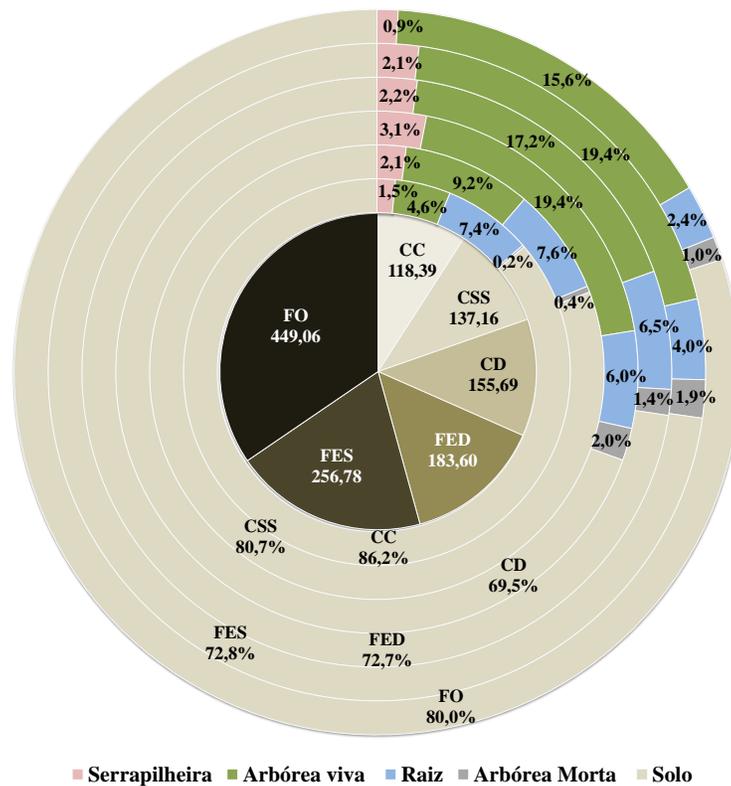
Fonte: Altoé (2016).

Em que, Fito: Fitofisionomia; CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado *Sensu Stricto*; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.

A média de carbono por hectare da FO equivale a mais do que a soma das três fitofisionomias do cerrado ou mesmo do somatório da FED e FES. Contudo, a mesma representa apenas 5% da área de Mata Atlântica. Mesmo tendo os menores estoques totais, as fitofisionomias do cerrado, principalmente o CSS, tem sua relevância baseada na área que ocupa no estado, assim como é o caso da FES. Apesar da FO, FED, CC e CD terem área mais restrita em Minas

Gerais a diversidade de estoques e ambientes é interessante para entender os fatores que afetam na quantidade de carbono em cada compartimento. Em se tratando da importância de cada compartimento, já expostos, no estoque de carbono total das fitofisionomias consideradas, na Figura 20, apresentam-se esses valores em porcentagem e o cálculo de estoque total por hectare.

Figura 20 – Importância de cada compartimento no estoque de carbono total de uma floresta em Minas Gerais e estoque de carbono total (m^3/ha) por fitofisionomia.



Na qual CC: Campo Cerrado; CSS: Cerrado Sensu Stricto; CD: Cerradão; FED: Floresta Estacional Decidual; FES: Floresta Estacional Semidecidual e FO: Floresta Ombrófila.
Fonte: Altoé (2016).

O CC tem comportamento peculiar, suas raízes possuem maior participação no estoque total que o estrato arbóreo e o solo contribui mais

significativamente do que nas outras fitofisionomias. Contudo, as raízes têm maior porcentagem no CSS. Neste, o estrato arbóreo responde pelo dobro que na vegetação anterior. O estoque total do CD foi o mais bem distribuído dentre os compartimentos, por esse motivo, a participação do solo foi a menos pronunciada, embora corresponda a expressivos 69,5%. Sua serapilheira tem a maior participação, assim como os estratos arbóreos vivo e morto, estes últimos iguais aos valores obtidos para FES.

A FED e a FES têm estratégias muito parecidas, embora a FED invista mais em raízes que a FES. A serapilheira e as raízes possuem a menor contribuição no estoque total na FO, comparativamente às outras fitofisionomias. Apesar das semelhanças na distribuição dos estoques de carbono nos compartimentos analisados, os estoques totais, apresentados na Tabela 3, por sua vez foram bem distintos.

4.3 Modelagem dos estoques de carbono

A modelagem com o LASSO, método de seleção de variáveis, auxiliou na obtenção dos fatores que mais se relacionaram com as mudanças dos estoques de carbono.

4.3.1 Raízes

Na Tabela 4, apresentam-se os ajustes dos modelos lineares múltiplos para as raízes. Nota-se que a estocagem de carbono em uma mesma espessura de raiz, mas em diferentes profundidades no solo, normalmente, sofre interferência dos mesmos fatores edafoclimáticos, contudo comparando-se às diferentes espessuras, há a alteração das características ambientais selecionadas.

Tabela 4 – Estimativas dos parâmetros dos modelos lineares múltiplos para determinação do estoque de carbono (C, Mg/ha) para as Raízes Grossas (RG), Médias (RM) e Finas (RF) em diferentes profundidades sob florestas nativas de Minas Gerais.

8

Compartimento	C RG (0-40)	C RG (0-100)	C RM (0-40)	Ln C RM (0-100)	Ln C RF (0-40)	Ln C RF (0-100)
Intercepto	-5,4119	-12,5347	3,0776	1,4961	0,6112	1,0744
Ln Altitude	2,0810	2,8860			0,0428	0,0324
(PPT-ETP)+1000	-0,0008	-0,0019			-0,00003	-0,0001
Bio 10	-0,1525	-0,0064				
Bio 16	-0,0051		-0,0021	-0,0014		
Ln PS Arbóreo	0,0985				-0,1420	-0,1653
Ln PS serapilheira	0,9808	1,3372	0,3405	0,2951	0,3754	0,3668
DS (0-40)	-0,1440	-1,3088	-0,8883	-0,5365	-0,2832	-0,1990
(Ln IFS)+1 (0-40)	6,6061					
(Ln IFS)+1 (0-100)		4,6574				

Fonte: Altoé (2016).

Em que, Ln: logaritmo neperiano; PPT (mm/ano): precipitação média anual; ETP (mm/ano): evapotranspiração anual; PPT-ETP: Excesso hídrico (mm/ano); Bio 10: temperatura média dos três meses mais quentes; Bio 16 (mm): precipitação dos três meses mais úmidos; Ps Arbóreo: biomassa total do estrato arbóreo (vivo e morto) (Mg/ha); Ps serapilheira: biomassa total de serapilheira (Mg/ha); DS (g/cm³): densidade do solo; IFS: Índice de Fertilidade do Solo. Os valores entre parênteses definem as profundidades consideradas em centímetros.

Antes de interpretar cada variável selecionada, é necessário analisar a qualidade do ajuste (TABELA 5), para certificar-se que os modelos foram capazes de explicar a variação dos estoques de carbono.

Tabela 5 – Erro médio (ME, Mg/ha), Raiz quadrada média do erro (RMSE, Mg/ha), Erro absoluto médio (MAE, %) e coeficiente de determinação (R^2 , %) dos ajustes gerados para os estoques de carbono (C) nos diferentes compartimentos das florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	ME	RMSE	MAE	R²
C RG (0-40)	0,10	1,50	30,30	44,30
C RG (0-100)	0,20	2,20	29,00	34,60
C RM (0-40)	0,00	0,40	28,40	43,10
Ln C RM (0-100)	0,10	0,50	20,50	44,10
Ln C RF (0-40)	0,10	0,50	19,30	42,90
Ln C RF (0-100)	0,10	0,70	17,00	47,10

Fonte: Altoé (2016).

Em que, RF: raiz fina; RM: raiz média; RG: raiz grossa.

De acordo com a, percebe-se pelo ME que os estoques de carbono foram subestimados em quase todos os ajustes, com exceção das raízes médias até 40 cm. Em termos de acurácia, o RMSE demonstrou que as raízes grossas obtiveram os maiores desvios e que as raízes médias foram as que apresentaram os melhores resultados. O MAE, em termos absolutos, demonstra que quanto maior a espessura, maior a magnitude do erro, já o R^2 obteve valores baixos, porém comparável com o encontrado por Fernandes et al. (2007) para um plantio de *Hevea* sp. Ao se considerar a origem dos dados (florestas nativas), a complexidade de coleta dessas amostras, o tamanho da área de estudo e da área amostrada; fatores que aumentam as fontes de erro, os valores apresentados, na tornam-se aceitáveis, excetuando o estoque de carbono para raízes grossas até 100 cm de profundidade que esteve entre os piores valores em todas as medidas, indicando que o ajuste deve ser considerado com cautela.

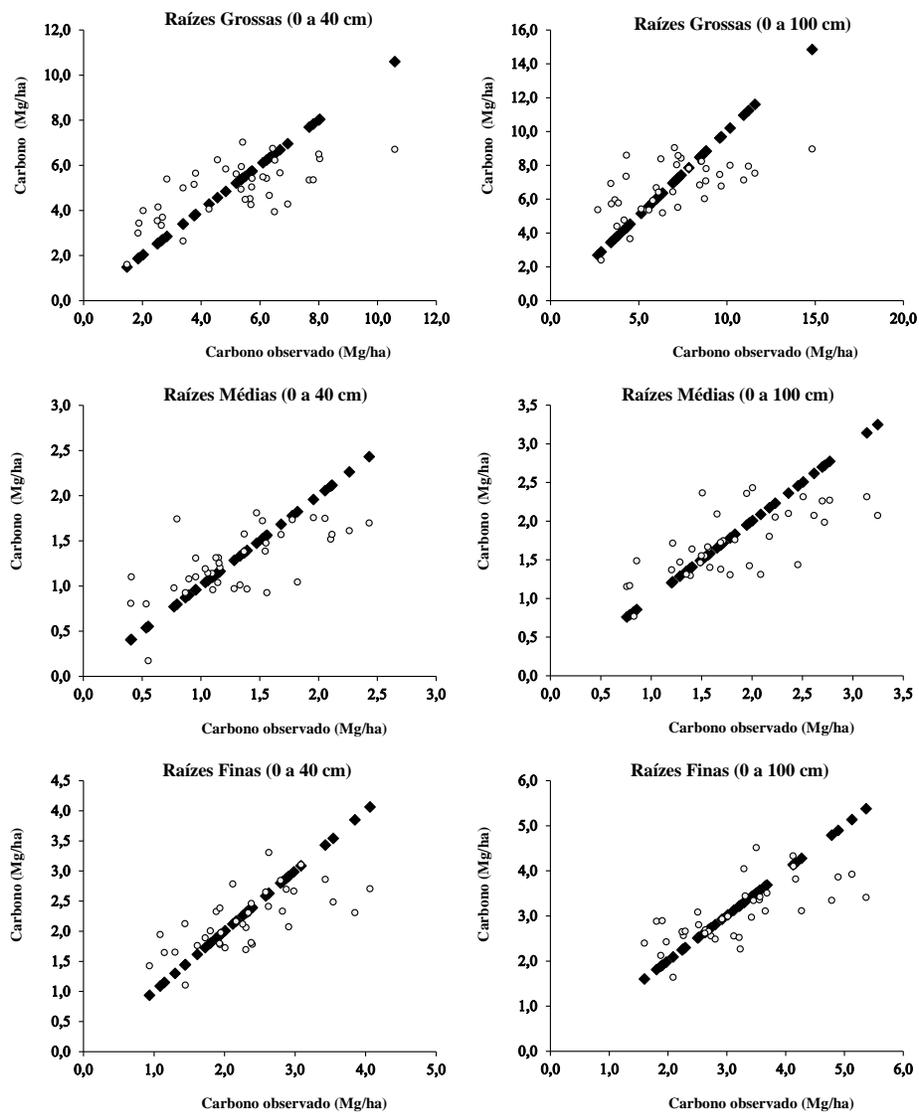
Somando-se a essas informações apresentadas na Tabela 5, a Figura 21 apresenta os gráficos 1:1 dos mesmos ajustes. Percebe-se pelos gráficos que os modelos respondem à tendência dos dados observados, mas há uma dispersão dos valores preditos, principalmente para as raízes grossas até 100 cm.

Os valores extremos inferiores são superestimados e os superiores subestimados. Esse comportamento pode ser atribuído à dificuldade de coleta, variabilidade dos dados amostrados e condições edafoclimáticas nas quais nem todas as influências podem ter sido captadas, a exemplo, as micorrizas que desempenham importantes trocas entre solo e plantas (SIMARD et al., 1997), ou ainda os agentes decompositores existentes em cada ecossistema de forma distinta (POLLIERER et al., 2007; WIEDER; BONAN; ALLISON, 2013) que influenciam na ciclagem do carbono.

A interpretação independente de cada variável, presente na Tabela 4, não condiz com a realidade de campo na qual vários fatores atuam ao mesmo tempo. Ou seja, a grande variação dos dados dentro de cada fitofisionomia que impedia a diferenciação entre elas, vista no tópico 4.2, esmiúça-se no comportamento de atributos que nem sempre são constantes dentro de uma mesma formação vegetal. Por exemplo, o modelo mostra que os locais que têm os maiores estoques de carbono nas raízes grossas, têm a tendência de apresentar o estrato arbóreo mais desenvolvido, com menores temperaturas médias nos três meses mais quentes e estarem em maiores altitudes, características condizentes com a Floresta Ombrófila.

Quanto mais desenvolvido o estrato arbóreo, representado pelo PS Arbóreo, maior será a quantidade de carbono estocado nessas raízes. Esse resultado está de acordo com o encontrado em Girardin et al. (2010) que consideram o comportamento das raízes grossas (com diâmetros superiores a 2 mm) semelhante ao da parte aérea.

Figura 21 – Valores observados versus valores observados com a dispersão dos valores preditos do estoque de carbono (Mg/ha) para as raízes grossas, médias e finas em diferentes profundidades sob florestas nativas de Minas Gerais.



Fonte: Altoé (2016).

Porém os maiores estoques nas raízes grossas também ocorrem em locais com menores excessos hídricos, menores médias de precipitações nos três meses mais úmidos (Bio 16) e em solos mais férteis: condições encontradas nas Florestas Estacionais Deciduais ou mesmo em alguns fragmentos de Cerrado *sensu stricto*.

A seleção da variável Bio 16 indica que, além do excesso hídrico, a concentração de altas precipitações no período chuvoso (analisando as raízes até 40 cm de profundidade) resulta em um menor estoque de carbono nas raízes grossas. As plantas, em geral, não precisam investir em crescimento de raiz quando o solo está em sua capacidade de campo. Já em condições de estresse hídrico, mesmo as raízes grossas que têm essencialmente a função estrutural para a planta, acusaram uma tendência de investimento em biomassa. O maior crescimento dessas raízes aumenta a capacidade de absorção de nutrientes e água pelas raízes finas, que passam a operar em uma maior área de abrangência (CORREIA; NOGUEIRA, 2004).

Em relação ao relevo, o comportamento das raízes grossas de estocarem mais carbono com o aumento da altitude também foi observado por Soethe, Lehmann e Engels, (2007), em raízes com diâmetros maiores que 5 mm. Maiores altitudes, observando o gradiente de Minas Gerais, têm árvores de maiores dimensões as quais requerem um sistema radicular de sustentação mais desenvolvido, explicando assim o maior aporte de carbono nestas raízes.

A densidade do solo pode ser entendida como uma barreira física, quanto maior for seu valor (BALIEIRO et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2005). Contudo, há fragmentos estudados que, mesmo com a densidade do solo elevada, possuem estoque de carbono nas raízes grossas dentre os mais altos, isso porque as outras características compensam com valores de IFS maiores, menores Bio 16 e excesso hídrico, entre outras já citadas, todas juntas ou não.

O IFS afetou diretamente o estoque de carbono nas raízes grossas condizente com a profundidade analisada. Isso mostra que a fertilidade do solo estimula o crescimento das plantas em todo o perfil, mesmo com a atuação da DS até 40 cm de profundidade, reduzindo consideravelmente a biomassa de raízes e seu estoque de carbono após essa profundidade.

As raízes médias seguiram algumas tendências das raízes grossas. Elas são estimuladas a gerarem maiores estoques de carbono na ocorrência de maior biomassa de serapilheira e menor quantidade de chuva no quarto de ano mais chuvoso (Bio 16). A DS atua como inibidora do desenvolvimento das raízes. O estrato arbóreo passou a não atuar para a explicação do estoque de carbono nas raízes médias, tampouco a altitude.

Nas raízes médias, o IFS não foi selecionado para as duas profundidades consideradas, indicando que, para o armazenamento de carbono, esse compartimento não é tão sensível quanto às boas condições de fertilidade do solo.

A disponibilidade hídrica, nas duas profundidades foi representada pela Bio 16, de forma inversa. As raízes médias desenvolvem-se menos em ambientes com precipitações concentradas no período mais úmido. A água como sendo essencial para as plantas faz com que elas priorizem o crescimento radicular em busca desse recurso.

A densidade do solo, da mesma forma que nas raízes grossas, continuou a ser selecionada, porém tanto para as raízes médias como para as finas, teve sua maior influência até 40 cm de profundidade. Sabendo-se que a DS aumenta com a profundidade e está relacionada negativamente com as raízes, entende-se que o impedimento físico que a maior DS causa ao crescimento é um dos fatores que contribui para que as raízes e seus estoques de carbono estejam concentrados até os 40 cm iniciais do solo.

As raízes finas é um dos compartimentos mais ativos na ciclagem de carbono em uma floresta (RUESS et al., 2003), sendo mais sensíveis à variação ambiental justamente por sua espessura (NADELHOFFER; ABER; MELILLO, 1985). Porém, os melhores ajustes do presente trabalho sugerem, em concordância com Yunusa et al. (2012), que o solo com maior fertilidade não interfere significativamente na sua armazenagem de carbono e destacam respostas positivas das mesmas aos valores de altitude e biomassa de serapilheira. Por outro lado, houve resposta negativa à biomassa do estrato arbóreo, ao excesso hídrico e à DS.

Yunusa et al. (2012) identificaram que a evapotranspiração promove o crescimento das raízes finas para absorção de água. Williams et al. (1998) explicam que a temperatura do solo tem pouca variação ao longo do ano e que o desenvolvimento do sistema radicular em maiores profundidades é prescrito pela necessidade de buscar água. A água é útil para que seja mantida a evapotranspiração em uma condição de déficit hídrico, na estação mais seca, ou nos locais mais secos; dessa forma, justifica-se a relação inversa com o excesso hídrico.

Domec et al. (2010) salientam ainda o importante papel das raízes no processo de redistribuição hidráulica, quando há escassez hídrica no solo. As raízes desenvolvem-se na procura de água nas camadas mais profundas e a redistribuem próximo à superfície. Isso mitiga os efeitos da seca no solo, no subsolo e mantém a evapotranspiração, propiciando que todo o ecossistema opere como sumidouro de carbono.

A disponibilidade de água no solo, demonstrada em alguns trabalhos pela umidade do solo, também acarreta em uma decomposição mais rápida dessas raízes (WANG et al., 2013), o que corrobora o fato dos estoques de carbono nas raízes finas responderem de forma inversa aos valores de excesso hídrico. Como nos locais com maiores déficits hídricos os recursos para o

desenvolvimento das plantas são limitados, as plantas tendem a desenvolver menos o estrato arbóreo e a desenvolverem mais o sistema radicular.

Os estoques de carbono nas raízes finas, nas duas profundidades, também aumentaram conforme incremento da altitude de um local para o outro. Contudo, ressalta-se que para altitudes muito elevadas, no caso da base de dados acima de 1670 m, isso não se fez verídico, pois essas áreas, caracteristicamente, têm disponibilidade hídrica proeminente em Minas Gerais. A maior quantidade de raízes finas com o aumento da altitude pode estar pautada na tendência dessas áreas também serem as de maiores declividades no estado. Nessa situação, as plantas que em ambientes planos desenvolvem seu sistema radicular orientado na profundidade do solo, tendem a desenvolver suas raízes lateralmente no sentido do aclave e/ou do declive (CHIATANTE et al., 2002; SUN et al., 2008). Estes mesmo autores observaram que a declividade ocasiona o nascimento de um maior número de raízes laterais a partir da raiz principal, próximas ao colo. Chiatante et al. (2002) ainda descrevem que a maior ramificação dessas raízes laterais e mais superficiais permite uma rápida transferência das forças de tração no solo.

A relação positiva das raízes finas com a biomassa de serapilheira sugere que os fatores que interferem nos seus estoques são parecidos, e também que nos locais com maior quantidade de serapilheira há uma maior produção de raízes finas para absorção dos nutrientes liberados pela decomposição da serapilheira (KHIEWTAM; RAMAKRISHNAN, 1993; NADELHOFFER; RAICH, 1992).

4.3.2 Solos

Como os maiores estoques de carbono estão concentrados nos solos, na Tabela 6 foram apresentados os ajustes para quatro profundidades diferentes. Percebe-se que a profundidade de 0 a 20 cm sofreu a intervenção de forma

exclusiva, pela biomassa da serapilheira. As outras camadas tiveram os mesmos atributos selecionados, inclusive na camada até 20 cm. Em comum para todas as profundidades do solo, os estoques de carbono foram explicados pela Bio 11, DS (0 a 20 cm), biomassa da parte arbórea e ainda, pelo IFS, Arg+Silt e PS RT, só que essas três últimas características tiveram diferentes profundidades selecionadas. As únicas variáveis com comportamento inversamente proporcional para todas as profundidades foram DS e a Bio 11.

Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros dos modelos lineares múltiplos para determinação do estoque de carbono (C, Mg/ha) para o solo em diferentes profundidades das florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	Ln C Solo (0-20)	Ln C Solo (0-40)	Ln C Solo (0-60)	Ln C Solo (0-100)
Intercepto	4,2416	5,3034	5,7677	5,8227
Bio 11	-0,0348	-0,0531	-0,0515	-0,0294
Ln PS Arbóreo	0,0398	0,0099	0,0161	0,0550
Ln PS serapilheira	0,0226			
DS (0-20)	-0,6829	-0,8910	-0,9965	-0,9630
(Ln IFS)+1 (0-20)	0,7476			
(Ln IFS)+1 (0-40)		1,3001	1,1488	0,2101
Arg+Silt (0-20)	0,0055			
Arg+Silt (0-40)		0,0046		
Arg+Silt (0-60)			0,0036	0,0030
Ln Ps RT (0-20)	0,1380			
Ln Ps RT (0-40)		0,1510	0,1440	0,1382

Fonte: Altoé (2016).

Em que, Ln: logaritmo neperiano; Bio 11: Temperatura média dos três meses mais frios; PS arbóreo: biomassa arbórea (arbóreo vivo e morto, Mg/ha); PS serapilheira: biomassa total da serapilheira (Mg/ha); DS (g/cm³): densidade do solo; IFS: Índice de Fertilidade do Solo; Arg+Silt (%): argila+silt; PS RT: biomassa total de raízes. Os valores entre parênteses definem as profundidades consideradas, em centímetros.

O efeito positivo da serapilheira no estoque de carbono do solo se deve à adição de matéria orgânica da serapilheira no solo, por meio da percolação do carbono orgânico e da ação da fauna associada à microbiota ou somente dos

microrganismos (NOTTINGHAM et al., 2015). Gentile, Vanlauwe e Six (2011) verificaram que a quantidade de serapilheira controla mais a decomposição e estabilização do carbono no solo que a composição da mesma. Dessa forma, quanto maior a biomassa na serapilheira se houver condições climáticas favoráveis à decomposição e ao desenvolvimento dos agentes decompositores, maior será a oferta de carbono para o solo. Schlesinger e Lichter (2001) sugeriram que o efeito da serapilheira no estoque de carbono do solo se dá, significativamente, apenas na camada superficial, em concordância com os modelos obtidos no presente estudo.

A densidade selecionada para todas as profundidades de estoque de carbono manteve-se representada pela profundidade de 0-20 cm. A densidade dessa camada interfere na estocagem do carbono até maiores profundidades, porque é nela que acontece a incorporação da matéria orgânica de forma mais intensa, seja por meio da bioturbação ou em virtude do clima e do tempo. A maior disponibilidade de carbono no solo colabora como agente cimentante na formação de agregados, gerando solos mais porosos e resultando na relação inversa com os valores de DS (PÁDUA; GUERRA; ZINN, 2015). A presença de Arg+silt contribui para a formação desses agregados e estabilização do carbono por ter a propriedade de adsorver a matéria orgânica do solo protegendo-a dos microrganismos decompositores (FELLER; BEARE, 1997; SIX et al., 2002b).

Os ajustes captam dois cenários distintos evidenciando em cada um deles, embora no mesmo modelo, o que impacta nos estoques de carbono no solo, pois as condições ótimas ditadas pelo sinal de cada variável no modelo não condizem com um ambiente único em Minas Gerais. Um cenário é composto pelo IFS e a biomassa de raiz obedecendo à lógica encontrada na FED e o outro pela maior biomassa do estrato arbóreo e menor Bio 11, característicos da mata atlântica.

Maiores IFS e biomassa de raiz não ocorrem no mesmo lugar que o indicado para as outras variáveis, por exemplo, no ambiente em que há temperatura mais alta e menor biomassa do estrato arbóreo, os fatores que possuem maior influência no estoque de carbono são os supracitados: IFS e Biomassa de raiz. A DS, Arg+silt e biomassa da serapilheira são variáveis intermediárias, podendo variar nos dois cenários descritos.

As raízes para as três camadas mais profundas de solos foram selecionadas até 40 cm de profundidade como as que mais contribuíram para descrever o estoque ao longo do perfil. Elas têm um efeito positivo para o carbono no solo por liberarem exsudados; por após morrerem se transformarem em matéria orgânica e por serem responsáveis por captar e translocar água e nutrientes disponíveis no solo para a parte aérea das plantas (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003). A parte aérea arbórea, por sua vez, traz benefícios ao solo com a formação da serapilheira, *turnover* de suas raízes, conservação da umidade e proteção do solo contra a radiação solar direta, o impacto das gotas de chuva e, até mesmo, do vento. Dessa forma, as raízes, a serapilheira e o sistema arbóreo superior ao solo atuam positivamente nos estoques de carbono do solo. O IFS por promover o desenvolvimento das plantas soma-se ao modelo, sendo que seu valor foi significativo até 40 cm de profundidade.

No tópico 4.2.5 a separação dos estoques por fitofisionomias demonstrou a tendência de que os maiores estoques de carbono no solo estavam localizados em sítios onde ocorriam as menores temperaturas, evidenciadas na FO. Porém, como discutido, os dados para todos os compartimentos foram muito variáveis dentro de uma mesma fitofisionomia que, por muitas vezes, não permitiram uma diferenciação significativa entre estas. A modelagem permitiu uma visão mais clara dos fatores pertinentes para o aporte de carbono.

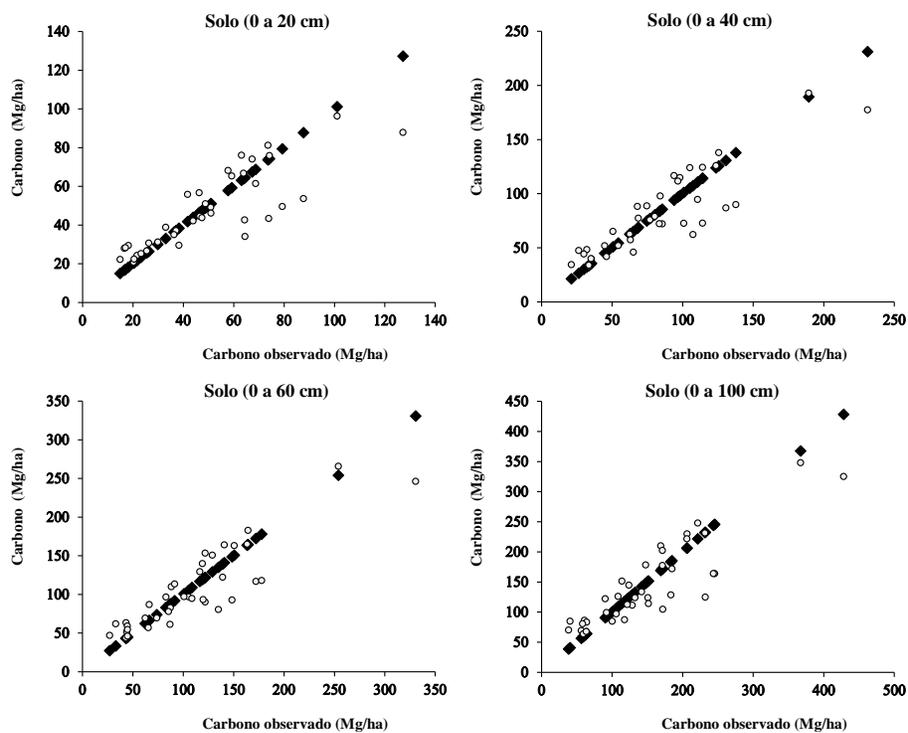
As maiores temperaturas, que têm sua implicação ressaltada pela seleção do Bio 11, o qual demonstra a média das temperaturas nos meses mais frios que,

para o Brasil, se igualam aos meses mais úmidos, acarretaram em menores estoques de carbono em todas as camadas do solo, em razão da alta taxa de decomposição da matéria orgânica (KURUPPUARACHCHI; SENEVIRATNE; MADURAPPERUMA, 2016) e ao seu efeito indireto na disponibilidade de água para o ecossistema. O efeito da temperatura atua nas camadas superficiais, porém a matéria decomposta transloca-se no perfil, resultando no seu efeito significativo até 100 cm de profundidade. A seleção do Bio 11, ao invés das outras variáveis relacionadas com a temperatura, mostra que locais mais quentes durante todo o ano acarretam em um menor estoque de carbono no solo.

Quando as altas temperaturas estão associadas a solos mais férteis e clima mais seco tem-se um ganho de estoque de carbono no solo, pelo crescimento arbóreo, em destaque para suas raízes e serapilheira, como ocorre nas FED. Se o clima for com alta temperatura e baixa precipitação, com solos pobres, todo o sistema fica comprometido, inclusive o carbono no solo, a exemplo, o CC. Em solos mais ácidos, com altas temperaturas e com maior precipitação, o estoque de carbono, no solo, é compensado pelo desenvolvimento do estrato arbóreo acima do solo, citando-se as FES e o CD mineiros. O CSS permeou nessa variedade de condições e contribuiu para a modelagem destacar as variáveis mais influentes. A FO possui área muito restrita em MG e, por isso, o modelo tendeu a subestimar os maiores estoques de carbono do solo encontrados nela, Figura 22, justamente pelo ajuste também contemplar situações não presentes nessa condição, na maioria dos casos.

Na Figura 22, mostra-se a boa estimativa gerada pelos modelos para os estoques de carbono no solo com uma tendência de subestimativa de alguns valores medianos e extremo superior. Porém, conforme a Tabela 7, as estatísticas de erros e coeficientes de determinação são aceitáveis, tendo seus maiores valores para a maior profundidade, que no caso do coeficiente de determinação é seu melhor valor.

Figura 22 – Valores observados versus valores observados com a dispersão dos valores preditos do estoque de carbono (Mg/ha) no solo em diferentes profundidades das florestas nativas de Minas Gerais.



Fonte: Altoé (2016).

Tabela 7 – Erro médio (ME, Mg/ha), Raiz quadrada média do erro (RMSE, Mg/ha) e Erro absoluto médio (MAE, %) dos ajustes gerados para os estoques de carbono (C) no solo das florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	ME	RMSE	MAE	R²
Ln C Solo (0-20)	2,30	13,90	19,80	69,70
Ln C Solo (0-40)	2,30	20,90	20,60	77,90
Ln C Solo (0-60)	3,30	28,00	21,40	78,70
Ln C Solo (0-100)	6,40	39,80	23,30	77,00

Fonte: Altoé (2016).

Em que, Ln: logaritmo neperiano.

4.3.3 Compartimento arbóreo vivo e serapilheira

Na Tabela 8, apresenta-se o ajuste para cálculo do estoque de carbono da serapilheira e da parte arbórea aérea viva. As estimativas deste último compartimento, espacializadas para o estado de Minas Gerais podem ser encontradas em Scolforo et al. (2015). Esses autores selecionaram apenas latitude e altitude, para tornar possível a espacialização do estoque de carbono. Já, no presente trabalho, o modelo foi formado pelo excesso hídrico, declividade e IFS (0 a 100 cm), todos diretamente relacionados e a DS (0 a 20 cm) inversa ao estoque de carbono arbóreo.

Tabela 8 – Estimativas dos parâmetros dos modelos lineares múltiplos para determinação do estoque de carbono (Mg/ha) para o estrato arbóreo e para a serapilheira das florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	Ln Carbono Arbóreo	Ln Carbono Serapilheira
Intercepto	0,3768	-29,7133
Ln Altitude		2,6272
Ln Declividade	0,5669	
(PPT-ETP)+1000	0,0006	
Temperatura		0,4747
Ln Bio 17		0,3585
Ln PS Arbóreo		0,6465
DS (0-20)	-0,6511	
Ln(IFS+1) (0-100)	4,5469	

Fonte: Altoé (2016).

Em que, Ln: logaritmo neperiano; PPT (mm/ano): precipitação média anual; ETP (mm/ano): evapotranspiração anual; PPT-ETP: Excesso hídrico (mm/ano); Bio 17 (mm): precipitação dos três meses mais secos PS arbóreo: peso seco (arbóreo vivo e morto, Mg/ha); DS (g/cm³): densidade do solo; IFS: Índice de Fertilidade do Solo. Os valores entre parênteses definem as profundidades consideradas.

Sob o clima tropical atual a temperatura não é o fator mais limitante ao desenvolvimento arbóreo, em Minas Gerias, mas um importante catalizador nos processos. Já a disponibilidade hídrica descreve um ambiente mais úmido e figura como uma das determinantes ao crescimento arbóreo e armazenamento de

carbono (DELPierre et al., 2012). Prova disso, foi o excesso hídrico a ser selecionado para o modelo.

Del Grosso et al. (2008) verificaram que os locais dominados por árvores têm sua produtividade primária líquida melhor explicada pela precipitação, isso porque há uma maior eficiência no uso dos nutrientes disponíveis; dessa forma, o excesso hídrico favorece o crescimento da parte aérea das árvores. A evapotranspiração é muito sensível às variações de temperatura e atua no armazenamento de carbono no estrato arbóreo da seguinte maneira: em períodos de baixa pluviosidade a contínua ETP ocasiona uma redução na umidade do solo e um aumento de sua resistência hidráulica, limitando o fluxo de energia latente diário. Há um aumento do calor sensível e eleva-se a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor, neste ponto, os estômatos tendem a fechar e há uma diminuição da fixação de carbono pelas plantas (WILLIAMS et al., 1998).

O IFS, idealizado justamente para representar o quanto das exigências nutricionais das plantas podem ser supridas pelo solo, era esperado como um dos preditores do estoque de carbono arbóreo. Destaca-se que o valor de IFS mais influente foi até 100 cm de profundidade. Mesmo com poucas raízes após os 60 cm, independente do diâmetro das mesmas, estas desempenham um papel significativo para o compartimento arbóreo, já que os nutrientes dessa camada também influenciaram no seu estoque de carbono. Contudo, a biomassa de raiz total não entrou no modelo, o que é entendível, já que a eficiência de absorção de água e nutrientes do solo está concentrada nas raízes finas, de baixa biomassa.

Também há de se mencionar que a DS, tratada como barreira física para as raízes foi selecionada na espessura mais superficial, de 20 cm. As maiores umidades, disponibilidade de nutrientes, biota ativa nos processos de decomposição da matéria orgânica e quantidade de raízes, normalmente, estão

próximas à superfície do solo (NOTTINGHAM et al., 2015). Logo, as variações nos valores de DS que terão maior intervenção na estocagem de carbono na parte arbórea aérea serão os da camada mencionada.

Esperava-se que áreas mais declivosas tivessem um desenvolvimento arbóreo menor (CHIATANTE et al., 2002; SATTTLER et al., 2014) resultando em uma relação negativa com o estoque de carbono nesse compartimento. Apesar de a declividade ser uma característica de relevo, no modelo ela está representando, também, a interferência humana no ambiente natural (WANG; WANG; OUYANG, 2012). Por as áreas muito declivosas serem protegidas por lei ou também não possibilitarem o uso da terra para outros fins, esses locais são detentores das matas mais robustas, conservadas, considerando um ambiente em que as demais características sejam aproximadamente constantes. Essa condição também é contemplada pela presença da Mata Atlântica, localizada em uma região mais acidentada do relevo de MG.

Na Figura 23, mostra-se que o ajuste gera boas estimativas para o estoque de carbono na parte arbórea aérea, principalmente para os valores mais baixos e médios. Os valores extremos superiores são consideravelmente subestimados para a FO, elevando os erros do ajuste (TABELA 9).

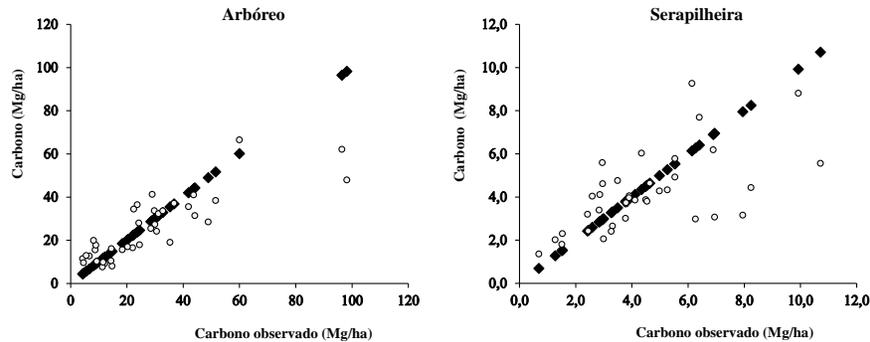
Tabela 9 – Erro médio (ME, Mg/ha), Raiz quadrada média do erro (RMSE, Mg/ha) e Erro absoluto médio (MAE, %) dos ajustes gerados para os estoques de carbono do estrato arbóreo vivo e da serapilheira das florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	ME	RMSE	MAE	R²
Ln Carbono Arbóreo	2,60	12,50	40,70	66,20
Ln Carbono Serapilheira	0,30	1,80	30,10	32,70

Fonte: Altoé (2016).

A serapilheira, vide Tabela 8, por ser originada, principalmente, de partes do estrato arbóreo, estabeleceu relação positiva com o mesmo: quanto maior sua biomassa, maior o estoque de carbono na serapilheira.

Figura 23 – Valores observados versus valores observados com a dispersão dos valores preditos do estoque de carbono (Mg/ha) na serapilheira e no compartimento arbóreo vivo das florestas nativas de Minas Gerais.



Fonte: Altoé (2016).

O modelo gerado também ilustrou cenários distintos. Em um houve dependência direta para a altitude. Essa variável agrupa em si padrões de variações de componentes edafoclimáticos. Maiores estoques de carbono na serapilheira nos locais mais elevados, na área de estudo, significam maior porte do estrato arbóreo e pluviosidade pronunciada também nos meses mais secos (Bio 17), que, conseqüentemente, geram mais serapilheira.

O outro cenário expõe os locais com altas temperaturas e com a presença das Florestas Estacionais Deciduais. Embora a temperatura seja um catalisador da decomposição da serapilheira, a falta de água a limita, promovendo um estoque de serapilheira também pronunciado.

A serapilheira apresenta-se muito mutável, na Figura 23 e na Tabela 9 indicam o alto erro do modelo pela dispersão dos valores preditos no gráfico e pelos valores dos erros, respectivamente, além do baixo coeficiente de determinação. É compreensível tal situação, pois esta sofre influência da deciduidade das folhas das florestas, da composição da serapilheira e da velocidade da decomposição de seu material, características ausentes nas variáveis de entrada do modelo.

4.3.4 Estoque de Carbono Total

Os estoques de carbono de todos os compartimentos foram somados e obteve-se a média de carbono total por fragmento. Após aplicação do método LASSO, gerou-se o ajuste para estimativa do estoque de carbono total (Mg/ha) das florestas nativas de Minas Gerais (EQUAÇÃO 4) apenas com variáveis disponíveis em formato raster para posterior espacialização desse estoque. Foram selecionadas como variáveis independentes, as Dummy: Cerradão (CD) e Floresta Estacional Decidual (FED); a Latitude (Y) na projeção cônica Albers equivalente (m), o Ln da Declividade (%), a Evapotranspiração Anual (ETP, mm) e a Temperatura Média dos Três Meses Mais Quentes (BIO₁₀, °C).

$$C_{TOTAL} = 1254,07 + 3,68783 * CD + 100,8266 * FED - 9,01 * 10^{-5} * Y - 11,389 * \text{Ln}(\text{Declividade}) - 0,026728 * ETP - 37,28967 * \text{BIO}_{10} \quad (4)$$

Para Minas Gerais, é esperada a seleção da latitude por haver um gradiente de temperatura e precipitação no eixo norte-sul (SCOLFORO et al., 2015), variáveis que muito influenciam o carbono em todos os compartimentos detalhados no presente trabalho. Há poucas literaturas que concentram os esforços em elucidar a influência da declividade no estoque de carbono em ambientes naturais, normalmente centram-se nas diferenças de altitudes. Porém, os trabalhos específicos encontrados também observaram uma relação inversa entre declividade e estoque de carbono no solo ou estrato arbóreo (FONTANA et al., 2014, GONÇALVES et al., 2013; SILVA et al., 2007).

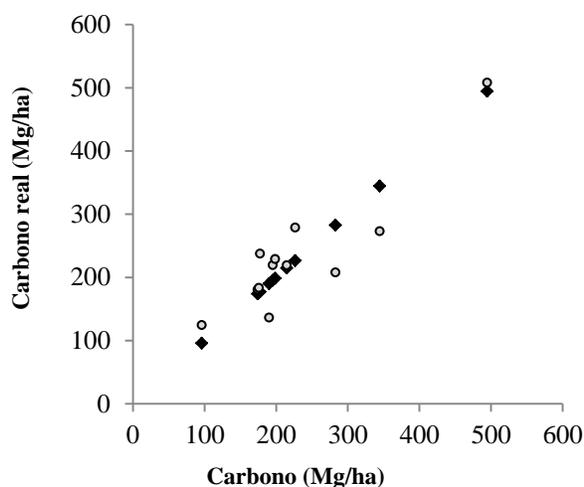
Apesar de pouco explorada, a declividade mostra-se muito importante na dinâmica de um ambiente natural, pois sua variação altera a forma que os compartimentos estão expostos às variações climáticas. O solo é reorganizado pela topografia acidentada, Chen et al. (1997) relataram que a declividade redistribui os minerais no solo, acarretando em solos mais férteis nas baixadas e

solos com maior teor de alumínio e ácidos nos maiores declives. Roose et al. (2006) descreveram que as perdas de estoques de carbono são maiores com o aumento da declividade por causa das erosões no solo que, segundo Gonçalves et al. (2013) tornam os solos de áreas mais declivosas menos profundos. Esses solos rasos e pouco férteis dificultam a retenção e a infiltração de água e resultam em uma perda de estoque de carbono do solo, reduzido desenvolvimento do estrato arbóreo, incluindo o sistema radicular, e lixiviação da serapilheira. Por Minas Gerais apresentar uma área considerável de seu estado sob efeito de relevos acidentados, a declividade contribui para a explicação dos estoques totais do estado.

A evapotranspiração, conforme Williams et al. (1998) elucidaram, responde a um aumento de temperatura e promove uma restrição hídrica no sistema, comprometendo os estoques de carbono em todas as partes do ambiente. E o Bio 10 expõe que extremos de temperaturas altas interferem, negativamente, no armazenamento de carbono. Esse fato corrobora com os grandes esforços mundiais dispensados no intuito de diminuir a contribuição humana no aquecimento global.

Na Figura 24, com o gráfico 1:1 dos valores ajustados com os dados de validação, mostra que o modelo descreve bem os extremos e subestima os valores localizados mais abaixo do limite superior até a metade do gráfico. A metade mais baixa apresenta valores muito próximos do real com uma leve tendência de superestimá-los. Os erros associados às respostas da validação (TABELA 10) indicam que o ajuste estima bem os estoques de carbono com as variáveis independentes selecionadas. E o coeficiente de determinação, presente na mesma tabela, possui um valor satisfatório dada à magnitude da área de estudo.

Figura 24 – Valores observados versus valores observados (losangos) com a dispersão dos valores preditos (círculos) do estoque de carbono total (Mg/ha) das florestas nativas de Minas Gerais gerado a partir da validação.



Fonte: Altoé (2016).

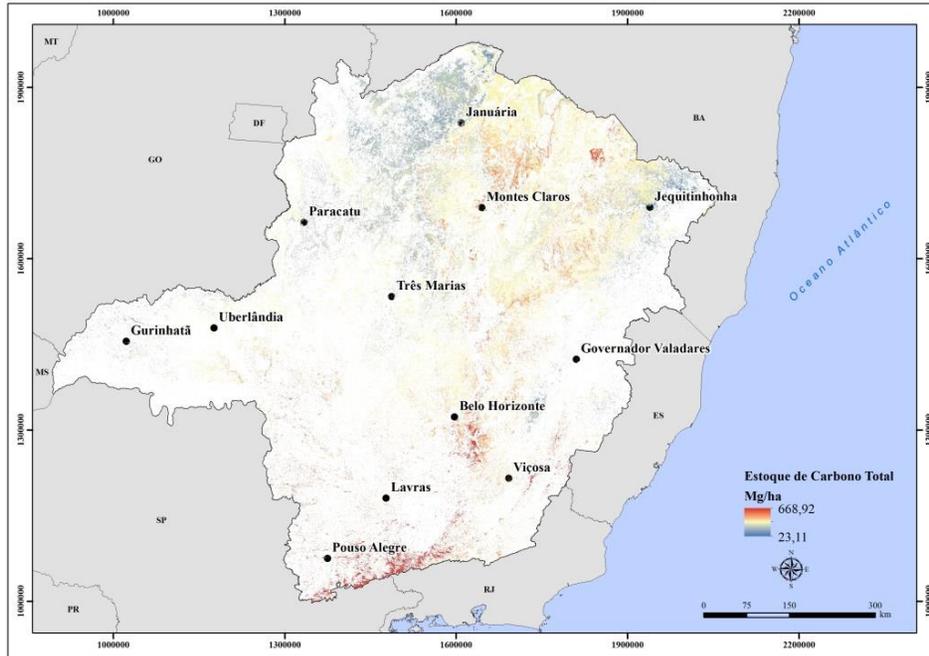
Tabela 10 – Erro médio (ME, Mg/ha), Raiz quadrada média do erro (RMSE, Mg/ha), Erro absoluto médio (MAE, %) e coeficiente de determinação (%) do ajuste gerado para o estoque de carbono total nas florestas nativas de Minas Gerais.

Compartimento	ME	RMSE	MAE	R ²
Estoque Total	-2,4	43,4	17,0	80,65

4.4 Mapeamento do estoque de carbono total

O mapeamento do estoque de carbono total obtido a partir da Equação 4 (FIGURA 25) demonstra, de maneira global, o comportamento desse estoque nas florestas nativas de Minas Gerais. Segundo Scolforo et al. (2015), o processo de estimativa da variável de interesse, utilizando equações de regressão múltipla, permite a geração de mapas que demonstram o comportamento espacial geral dessa variável, não detalhando áreas ou regiões mais específicas.

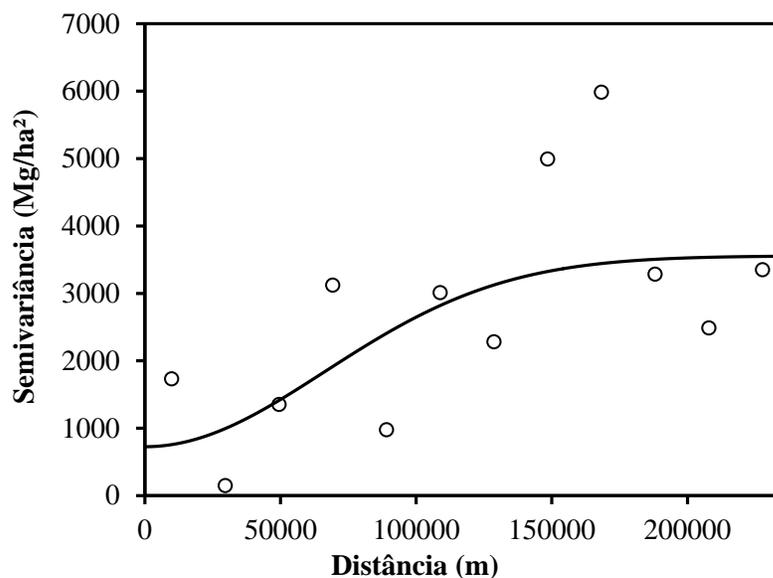
Figura 25 – Mapeamento do estoque de carbono total obtido pelo modelo de regressão.



Fonte: Altoé (2016).

O semivariograma experimental construído a partir dos resíduos do modelo de regressão evidenciou uma estrutura de dependência espacial clara (FIGURA 26) e grau de dependência espacial forte (TABELA 11). Os resíduos apresentaram um efeito pepita aceitável (τ^2), para o qual o valor desejável deve ser igual a zero. O valor do efeito pepita indica que a variação dos resíduos foi explicada pelo modelo do semivariograma (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Esse fato garante maior precisão no processo de estimativa da krigagem com regressão. O parâmetro alcance (ϕ) evidencia a magnitude da dependência espacial (162,5 km) dos resíduos da regressão. O valor do alcance é alto em função das distâncias entre os pontos de amostragem que se localizam numa área grande como a do estado de Minas Gerais.

Figura 26 – Semivariograma experimental e a curva do modelo Gaussiano ajustado para os resíduos da regressão.



Fonte: Altoé (2016).

Tabela 11 – Parâmetros efeito pepita (τ^2), patamar (σ^2), alcance teórico (ϕ), o grau de dependência espacial (DE), erro médio reduzido (EMR) e desvio padrão do erro médio reduzido (S_{ER}) para o modelo de função de semivariância selecionado para o erro residual do estoque de carbono total.

Variável	Modelo Selecionado	τ^2	σ^2	ϕ (m)	DE (%)	EMR	S_{ER}
Resíduo	Gaussiano	725,9	2830,8	162504,4	20,4	-0,047	1,006

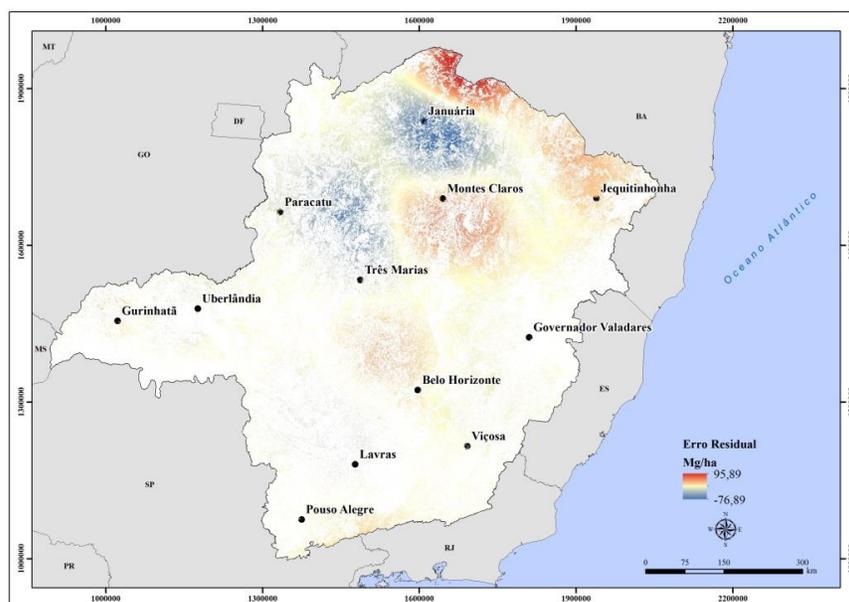
Fonte: Altoé (2016).

O modelo gaussiano apresentou o melhor ajuste aos resíduos do modelo de regressão. Já, nos estudos de Castillo-Santiago et al. (2013), Galeana-Pizaña et al. (2014) e Scolforo et al. (2015) o modelo exponencial apresentou o melhor desempenho quando utilizado na krigagem dos resíduos da regressão. No entanto, o modelo de melhor ajuste ao semivariograma experimental é influenciado pela natureza dos dados, e é específico para cada região de estudo,

sendo que os modelos exponencial, gaussiano e esférico são os mais recorrentes na literatura (ACERBI JÚNIOR et al., 2015; MELLO et al., 2013; REIS et al., 2015).

A distribuição espacial do resíduo da regressão (FIGURA 27) evidenciou regiões de sub e superestimativas do modelo ao longo do estado de Minas Gerais. Os maiores erros são observados na extremidade norte e se estende até parte central do estado. As diferenças nos erros interpolados pela krigagem foram provavelmente, decorrentes da elevada variabilidade espacial do estoque de carbono total, o que não foi totalmente caracterizado espacialmente pela densidade da amostragem disponível.

Figura 27 – Distribuição espacial do resíduo da regressão.



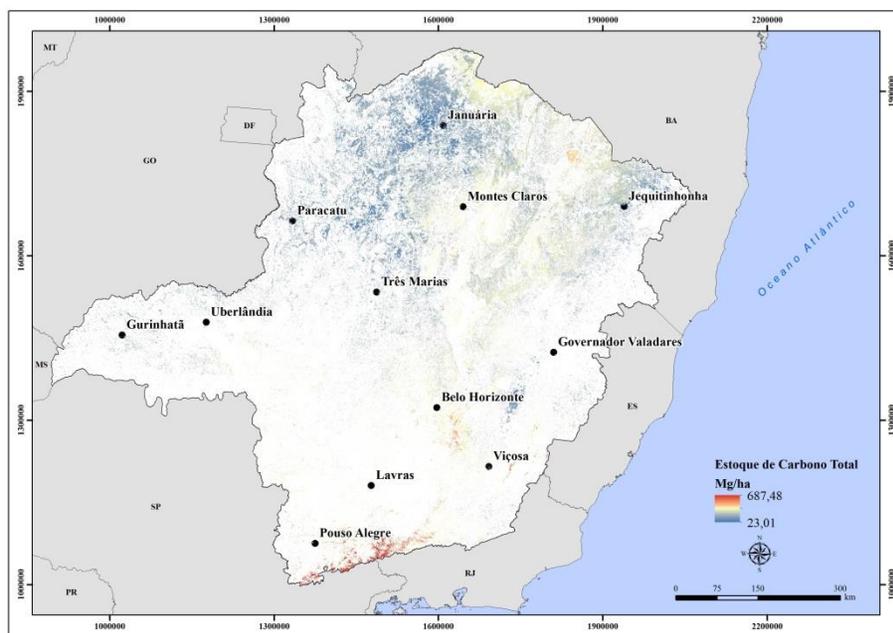
Fonte: Altoé (2016).

O estoque de carbono total em Minas Gerais tende a variar dentro de algumas centenas de metros, influenciado por fatores biofísicos, como

fertilidade do solo, topografia e clima, e pelo efeito das atividades humanas, como, por exemplo, práticas agrícolas e incêndios (SCOLFORO et al., 2015). Pela Figura 27, também é possível verificar que há uma variação acentuada nas fitofisionomias FED e CSS.

O mapeamento do estoque de carbono total (FIGURA 28) obtido pela krigagem com regressão apresenta maior sensibilidade às variações locais. Isso se deve ao fato de esse método ter sido desenvolvido para levar em consideração o ajuste do modelo de variância espacial, a fim de melhorar as estimativas obtidas a partir de modelos globais (HENGL; HEUVELINK; ROSSITER, 2007).

Figura 28 – Mapeamento do estoque de carbono total obtido pela krigagem com regressão.



Fonte: Altoé (2016).

A avaliação da krigagem com regressão foi feita comparando as estatísticas apresentadas na Tabela 12, obtidas pela validação preditiva. O erro médio (ME), que em condições ideais deve ser próximo de zero, se o método de predição for imparcial, sugere que as previsões da krigagem com regressão geraram boas estimativas do estoque de carbono total em Minas Gerais. O valor de RMSE foi consistente com o relatado na literatura para modelagem do estoque de carbono em grandes áreas (GALEANA-PIZAÑA et al., 2014).

Tabela 12 – Erro médio (ME, Mg/ha), Raiz quadrada média do erro (RMSE, Mg/ha) e Erro absoluto médio (MAE, %) obtidas pela validação preditiva.

Compartmento	ME	RMSE	MAE
Estoque de Carbono Total	-13,4	42,2	17,7

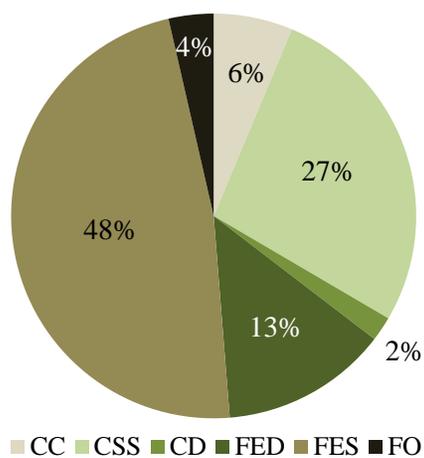
Fonte: Altoé (2016).

O mapa do estoque de carbono total apresentado na Figura 28, evidencia o gradiente norte-sul na distribuição do estoque de carbono. Sendo assim, as florestas úmidas, Ombrófilas, presentes nos morros do sul de Minas concentram mais carbono total em comparação com as Florestas Estacionais Deciduais e, principalmente, Cerrados do centro-norte do estado. Esse comportamento da variável carbono total já era esperado, uma vez que as florestas do sul de Minas são, em geral, mais densas e possuem árvores com maiores dimensões, além de ciclagem de nutrientes mais intensa (WATZLAWICK et al., 2012). Já as Florestas Estacionais Deciduais e Cerrados do centro-norte, possuem vegetação menos densa e árvores menores em relação às florestas úmidas (MURPHY; LUGO, 1986), apesar de apresentarem raízes mais robustas, estocando mais carbono nessa porção (LOIOLA; CARVALHO; BATALHA, 2015). A FED se destaca quanto ao Cerrado por habitar solos mais férteis.

Em termos relativos (FIGURA 29), o total de carbono por área ocupada por cada fitofisionomia, indica que a Floresta Estacional Semidecidual (1,341

Pg) possui maior valor de estoque total por área, seguida pelo Cerrado *sensu stricto* (0,7627 Pg), Floresta Estacional Decidual (0,3747 Pg), Campo Cerrado (0,1778 Pg), Floresta Ombrófila (0,1008 Pg) e Cerradão (0,0553 Pg). Isso se deve ao fato da FES possuir o segundo maior valor médio de estoque de carbono total combinado com a segunda maior área em MG.

Figura 29 – Porcentagem do estoque de carbono total por área de cada fitofisionomia em Minas Gerais.



Fonte: Altoé (2016).

Apesar da FO ter a menor área de remanescentes florestais e, por isso, esperava-se que o menor estoque de carbono total fosse dessa fitofisionomia, o CD foi o que obteve o menor estoque, pois a FO tem um valor de estoque de carbono por área muito mais expressivo que o Cerradão. Os valores apresentados expressam o quão importante é cada fitofisionomia para a conservação desses sumidouros de carbono, destacado pelo caso do CC. Apesar dessa fitofisionomia ser a mais restritiva em relação aos recursos edafoclimáticos para um bom desenvolvimento do estrato arbóreo, ainda assim, em razão da sua abrangência no estado de MG, estoca mais carbono que o CD e a FO.

Conforme valores gerados a partir da Figura 29, a média geral de estoque total de carbono por hectare foi de 209,15 Mg, sendo que a estimativa de armazenamento total de carbono nos fragmentos florestais de Minas Gerais foi de 2,81 Pg. Isso representa 0,33% do estoque de carbono total armazenado nas florestas do mundo, de acordo com o estimativa apresentada por Pan et al. (2011). E esse estoque de carbono está alocado em uma área de floresta que equivale a 0,37% da área total dos remanescentes florestais mundiais.

Deve-se usar esse valor com cautela, pois o mesmo foi gerado a partir de uma amostragem que apesar de intensa e detalhada em nível de campo apresentou desvios na captação de toda a variabilidade espacial existente no estado de Minas Gerais. No entanto, faz-se de grande importância por ter sido gerado, diretamente, a partir de dados coletados nas diversas condições das florestas naturais do estado e por conseguir valorar as proporções dos estoques de carbono. Seu expressivo valor mostra o quão necessário e urgente é a conservação desses fragmentos. É importante lembrar que as formações vegetacionais são consideradas reservatórios vivos de carbono e estão ameaçadas pelas constantes reduções de estoque ocasionadas por diferentes tipos de intervenções antrópicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível identificar as principais características edafoclimáticas da vegetação de MG que se agruparam por biomas. A Caatinga possui solos mais férteis e com as maiores restrições climáticas; ao contrário da Mata Atlântica localizada em solos mais ácidos e em maiores altitudes. Já o Cerrado caracterizou-se com solos mais arenosos e com altos valores de fósforo remanescente, contudo evidenciou-se, principalmente, que é um bioma versátil, formando mosaicos em uma ampla variedade de condições edafoclimáticas.

Os estoques de carbono por fitofisionomia foram detalhados em cada compartimento, o que permitiu vislumbrar o quão variável são os estoques e que não é possível indicar apenas um ou poucos fatores que ditam a quantidade de carbono em cada fitofisionomia, pois este é resultado de uma variedade de ambientes nos quais a limitação por um recurso faz com que outros atuem de forma distinta, ou mesmo que limite a expressão potencial dos demais.

A modelagem permitiu delinear os atributos edafoclimáticos que atuam em cada compartimento que condicionam um maior estoque de carbono, o que não havia sido alcançado quando se trabalhou por fitofisionomia. Os estoques de carbono nas raízes responderam de forma diferente, de acordo com sua espessura, a profundidade do solo não alterou os fatores que influenciam nesses estoques. Os solos apresentaram estabilidade quanto aos atributos que ditam seu estoque de carbono ao longo do perfil, com exceção da primeira camada que teve a influência de outras características. O estrato arbóreo teve seu estoque de carbono descrito por variáveis já esperadas, com exceção da declividade, que atuou de forma positiva, demonstrando a interferência humana na alocação do carbono, já que as florestas de maior porte se localizam nessas áreas que são protegidas por lei e/ou não apresentam condições de serem destinadas a outro uso e, por isso, são mais conservadas. O estoque de carbono na serapilheira foi

bastante variável e mostrou que se comporta de maneira diferente de acordo com os cenários a que está submetida.

Por fim, conseguiu-se valorar o estoque de carbono total presente em MG. Todas essas informações demonstram as estimativas mais completas seja por fitofisionomia ou por compartimento para um estado inteiro e, a partir de informações coletadas em campo, além de explicitar quais as características edafoclimáticas estão atuando em cada caso.

Tais conhecimentos ressaltam a importância de MG para o estoque de carbono mundial e que as variações nas características edafoclimáticas causam respostas diferentes nesses estoques. Isso ratifica a necessidade da conservação dessas áreas que têm grande potencial de deixarem de ser drenos e se tornarem fontes de carbono, já que estocam expressivas quantidades desse elemento, e sofrem constantes interferências, seja por meio do desmatamento e queimadas ou ainda pela ação, por vezes pouco notada em pequena escala de tempo, das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ACERBI JÚNIOR, F. W. et al. Change detection in Brazilian Savannas using semivariograms derived from NDVI images. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 2, p. 103-109, mar./abril. 2015.
- ADAIR, E. C. et al. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. **Global Change Biology**, [Malden], v. 14, n. 11, p. 2636-2660, 2008.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. de F.; KLINK, C. A. Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - o caso do Cerrado brasileiro. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, 2003. 30 p.
- AITKENHEAD, M. J.; COULL, M. C. Mapping soil carbon stocks across Scotland using a neural network model. **Geoderma**, [S.l.], v. 262, p. 187-198, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706115300628>>. Acesso em: 26 jun. 2016.
- ALTOÉ, T. F. **Estoque de carbono nos fragmentos florestais de Minas Gerais**: modelagem e espacialização em função de fatores edafoclimáticos. Lavras: Ed. UFLA, 2016. 130 p.
- AMARO, M. A. et al. Estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 5, p. 849-857, 2013.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M. et al. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain). **Hydrology and Earth System Sciences**, [Karlsruhe], v. 13, p. 1907-1920, 2009. Disponível em: <<http://digital.csic.es/handle/10261/19590>>. Acesso em: 01 jun. 2016.
- ARAÚJO, R. S. de et al. Aporte de serapilheira e nutrientes ao solo em três modelos de revegetação na Reserva Biológica de Poço das Antas, Silva Jardim, RJ. **Floresta e Ambiente - Floram**, Seropédica, v. 12, n. 2, p. 15-21, 2006.
- ARRUDA, D. M. et al. Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. **Folia Geobotanica**, v. 50, n. 3, p. 175-184, 2015.

ASSAD, E. D. et al. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, [Malden], v. 10, n. 10, p. 6141-6160, 2013.

BALBINOT, R. et al. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, abr./jun. 2008.

BALIEIRO, F. de C. et al. Biomassa de raízes e regime hídrico do solo em plantio de *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms em um Planossolo Háplico. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 2, p. 221-230, 2005.

BATISTA, J. F. et al. Relação entre o teor de umidade e a proliferação de fungos em madeira de espécies florestais. **Enciclopédia Biosfera - Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 831-844, 2013.

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

BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.

BRASIL. Lei n.º 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 dez. 2006. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm>. Acesso em: 13 jun. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Mata Atlântica**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Projeto “apoio a estratégias nacionais de redução do desmatamento e dos incêndios florestais no cerrado brasileiro”**. Brasília, DF, 2014. 52 p.

BRASIL. Portaria IGAM n.º 010, de 30 de dezembro de 1998. Altera a redação da Portaria n.º 030/93, de 07 de junho de 1993. **Diário do executivo [de] Minas Gerais**, Belo Horizonte, 23 jan. 1999. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=669->>. Acesso em: 07 jun. 2016.

BREVIK, E. C. Soil health and productivity. In: VERHEYE, W. H. (Ed.). **Soils, plant growth and crop production**. Oxford, UK: UNESCO-EOLSS, 2009. p. 106-137.

BREVIK, E. C. The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. **Agriculture**, Switzerland, v. 3, n. 3, p. 398-417, 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2077-0472/3/3/398>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BRUN, E. J. et al. Relação entre a produção de serapilheira e variáveis meteorológicas em três fases sucessionais de uma Floresta Estacional Decidual no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 9, n. 1, p. 277-285, 2001.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 53-68, jan./mar. 2008.

CALDEIRA, M. V. W.; SOARES, R. V.; WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista Montana – General Carneiro-PR. **Biomassa & Energia**, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 291-310, 2004.

CALONEGO, J. C. et al. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 128-135, mar./jun. 2012.

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

CARMO, D. L. do. **Condutividade elétrica e sua relação com a fertilidade de solos tratados com corretivos e resíduos orgânicos**. Lavras: Ed. UFLA, 2014. 168 p.

CARVALHO, Luis M. T. de et al. Análises espaciais e estatísticas da flora nativa. In: CARVALHO, L. M. T.; SCOLFORO, J. R. (Ed.). **Inventário florestal de Minas Gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. cap. 2, p.25-316.

CARVALHO, Luiz G. de et al. Clima. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. de; OLIVEIRA, A. D. de (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do estado de Minas Gerais: componentes geofísico e biótico**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 89-102.

CASTILLO-SANTIAGO, M. A. et al. Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico. **Energy for Sustainable Development**, [Portland], v. 17, n. 2, p. 177-188, 2013.

CATTANIO, J. H. et al. Phenology, litterfall, growth, and root biomass in a tidal floodplain forest in the Amazon estuary. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 703-712, out./dez. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-84042004000400010&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 29 jun. 2016.

CERRI, C. C. et al. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R. et al. (Eds.). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Haworth, 2006. p. 41-47.

CHEN, Z. S. et al. Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. **Plant Ecology**, [Perth], v. 132, n. 2, p. 229-241, 1997.

CHENG, C. M.; WANG, R. S.; JIANG, J. S. Variation of soil fertility and carbon sequestration by planting *Hevea brasiliensis* in Hainan Island, China. **Journal of Environmental Sciences**, [Edmonton], v. 19, n. 3, p. 348-352, 2007.

CHIATANTE, D. et al. The influence of steep slopes on root system development. **Journal of Plant Growth Regulation**, [Dordrecht], v. 21, n. 4, p. 247-260, 2002.

CIANCIARUSO, M. V. et al. Produção de serapilheira e decomposição de material foliar em um Cerradão na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, Feira de Santana, v. 20, n. 1, p. 49-59, 2006.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.

CONSERVATION INTERNATIONAL. **Hotspots**. Washington, D.C., 2016.

Disponível em: <<http://www.conservation.org/How/Pages/Hotspots.aspx>>.

Acesso em: 12 jun. 2016.

CORBEELS, M. et al. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, London, v. 6, n. 21450, p. 1-8, 2016.

CORNWELL, W. K. et al. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. **Ecology Letters**, [Montpellier], v. 11, n. 10, p. 1065-1071, 2008.

COÛTEAUX, M. M.; BOTTNER, P.; BERG, B. Litter decomposition, climate and litter quality. **Trends in Ecology & Evolution**, [Cambridge], v. 10, n. 2, p. 63-66, 1995.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, London, v. 440, p. 165-173, 2006.

DEL GROSSO, S. et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. **Ecology**, Washington, D.C., v. 89, n. 8, p. 2117-2126, 2008.

DELANEY, M. et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela. **Biotropica**, [Gainesville], v. 30, n. 1, p. 2-11, 2006.

DELPIERRE, N. et al. Quantifying the influence of climate and biological drivers on the interannual variability of carbon exchanges in European forests through process-based modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, [New Haven], v. 154/155, p. 99-112, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192311003091>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

DINIZ, A. R. et al. Biomassa, estoques de carbono e de nutrientes em estádios sucessionais da Floresta Atlântica, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, Recife, v. 10, n. 3, p. 443-451, 2015.

DOMEC, J. C. et al. Hydraulic redistribution of soil water by roots affects whole-stand evapotranspiration and net ecosystem carbon exchange. **New Phytologist**, Lancaster, UK, v. 187, n. 1, p. 171-183, 2010.

DUBE, T.; MUTANGA, O. Quantifying the variability and allocation patterns of aboveground carbon stocks across plantation forest types, structural attributes and age in sub-tropical coastal region of KwaZulu Natal, South Africa using remote sensing. **Applied Geography**, [Kennesaw], v. 64, p. 55-65, 2015.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Geostatistical analyst tutorial**. Redlands, 2010. 57 p.

FANG, J. et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. **Science**, v.292, n.5525, p.2320-2322, 2001.

FEARNSIDE, P. M. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p. 95-124.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, [S.l.], v. 79, n. 1/4, p. 69-116, 1997.

FERNANDES, T. J. G. et al. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp., aos 12 anos de idade, na Zona da Mata Mineira. **Revista Árvore**, v. 31, n. 4, p. 657-665, 2007.

FINÉR, L. et al. Does clear-cut harvesting accelerate initial wood decomposition? A five-year study with standard wood material. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 372, p. 10-18, 2016.

FONTANA, A. et al. Matéria orgânica de horizontes superficiais em topolitossequências em ambiente de Mar de Morros, Pinheiral, RJ. **Revista Ciência Agronômica – RCA**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 221-229, abr./jun. 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **State of the World's Forests**. Rome, 2011. 179p. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/013/i2000e/i2000e00.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

GALEANA-PIZAÑA, J. M. et al. Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [Enschede], v. 30, p. 179–189, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243414000440>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, 2010.

GAUTAM, S.; PIETSCH, S. A. Carbon pools of an intact forest in Gabon. **African Journal of Ecology**, [Malden], v. 50, n. 4, p. 414-427, 2012.

GENTILE, R.; VANLAUWE, B.; SIX, J. Litter quality impacts short- but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions. **Ecological Applications**, Washington, D.C., v. 21, n. 3, p. 695-703, 2011.

GIONGO, V. et al. Soil organic carbon in the Brazilian Semi-arid Tropics. **Dynamic Soil Dynamic Plant**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 12-20, 2011.

GIRARDIN, C. A. J. et al. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. **Global Change Biology**, [Illinois], v. 16, n. 12, p. 3176-3192, 2010.

GODINHO, T. de O. et al. Biomassa, macronutrientes e carbono orgânico na serapilheira depositada em trecho de floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 131-144, mar. 2013.

GONÇALVES, M. A. et al. Diferenciação dos solos em duas topossequências sobre rochas basálticas no norte-central paranaense. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2777-2792, nov./dez. 2013.

GULLISON, R. E. et al. Tropical forests and climate policy. **Science**, Washington, D.C., v. 316, n. 5827, p. 985-986, 2007.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; ROSSITER, D. G. About regression-kriging: from equations to case studies. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v. 33, n. 10, p. 1301-1315, 2007.

HIJMANS, R. J. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, nov. 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1276/full>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Biogeosciences**, Malden, v. 114, n. G2, p. 1-13, 2009.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 2, p. 256-266, jun. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Área Territorial Oficial 2015**: Resolução N° PR-02, de 21 de junho de 2016. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/resolucao_02_2016.shtml>. Acesso em: 10 jun. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed., rev. e amp. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271 p.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Biodiversidade em Minas**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/biodiversidade>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**: agriculture, forestry and other land use. Japan: Institute for global environmental strategies (IGES), 2006. v. 4. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 02 jul. 2016.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Ed. Academic, 1978. 600 p.

KHIEWTAM, R. S.; RAMAKRISHNAN, P. S. Litter and fine root dynamics of a relict sacred grove forest at Cherrapunji in north-eastern India. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 60, n. 3/4, p. 327-344, 1993.

KIRALJ, R.; FERREIRA, M. Basic validation procedures for regression models in QSAR and QSPR studies: theory and application. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 4, p. 770-787, 2009.

KLEBER, M. et al. Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. **European Journal of Soil Science**, [Malden], v. 56, n. 6, p. 715-725, 2005. Disponível em:
<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.2005.00706.x/full>>.
Acesso em: 14 jun. 2016.

KLEIN, T.; SIEGWOLF, R. T. W.; KÖRNER, C. Belowground carbon trade among tall trees in a temperate forest. **Science**, Washington D.C., v. 352, n. 6283, p. 342-344, 2016.

KÖRNER, C. The use of “altitude” in ecological research. **Trends in Ecology and Evolution**, [Cambridge], v. 22, n. 11, p. 569-574, 2007.

KURUPPUARACHCHI, K. A. J. M.; SENEVIRATNE, G.;
MADURAPPERUMA, B. D. Carbon sequestration in tropical forest stands: its control by plant, soil and climatic factors. **Open Journal of Forestry**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 59-71, 2016. Disponível em:
<<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=63330>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

LANGE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature communications**, London, v. 6, n. 6707, p. 1-8, 2015.

LI, M. et al. Spatial analysis of soil organic carbon in Zhifanggou catchment of the Loess Plateau. **PLoS ONE**, [San Francisco], v. 8, n. 12, p. e83061, 2013.

LI, Y. et al. Plant species rather than climate greatly alters the temporal pattern of litter chemical composition during long-term decomposition. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 15783, p. 1-13, 2015. Disponível em:
<<http://www.nature.com/articles/srep15783>>. Acesso em: 23 jun. 2016.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da. Estimativa da produção hídrica superficial do Cerrado brasileiro. In: SCARIOT, A.; SILVA, J. C. S.; FELFILI, J. M. (Org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do meio ambiente, 2005. p. 61-72.

LOIOLA, P. P.; CARVALHO, G. H.; BATALHA, M. A. Disentangling the roles of resource availability and disturbance in fine and coarse root biomass in savanna. **Austral Ecology**, Malden, v. 41, n. 3, p. 255-262, 2015.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell & Environment**, [Malden], v. 22, n. 6, p. 715-740, 1999. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-3040.1999.00453.x/full>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

MALHI, Y.; DAVIDSON, E. A. Biogeoquímica e ecologia de ecossistemas terrestres da Amazônia. **Geophysical Monograph Series: Amazonia and Global Change**, [Washington, D.C.], v. 186, 2009.

MELLO, C. R. de et al. Recursos hídricos. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. de; OLIVEIRA, A. D. de (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 103-136.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, [S.l.], v. 202/203, p. 88-102, 2013.

MENEZES, R. S. C. et al. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Revista Brasileira de Biologia**, São Paulo, v. 72, n. 3, p. 643-653, 2012.

MILLER, J.; FRANKLIN, J.; ASPINALL, R. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. **Ecological Modelling**, [Towson], v. 202, n. 3/4, p. 225-242, 2007.

MORAIS, V. A. **Carbono no Cerrado de Minas Gerais**: modelagem e estoques em solo, raízes e serrapilheira. Lavras: Ed. UFLA, 2014. 117 p.

MORAIS, V. A. et al. Carbon and biomass stocks in a fragment of cerrado in Minas Gerais state, Brazil. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 237-245, 2013.

MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forests. **Annual Review of Ecology and Systematics**, [Palo Alto], v. 17, p. 67-88, 1986.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NADELHOFFER, K. J.; ABER, J. D.; MELILLO, J. M. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. **Ecology**, Washington, D.C., v. 66, n. 4, p. 1377-1390, 1985.

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

NOTTINGHAM, A. T. et al. Climate warming and soil carbon in tropical forests: insights from an elevation gradient in the Peruvian Andes. **BioScience**, [S.l.], v. 65, n. 9, p. 906-921, 2015.

OLIVEIRA, G. M. V. et al. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun. 2012.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica**, [Gainesville], v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.

PÁDUA, E. J. de; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 3, p. 725-736, mai./jun. 2015.

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.

PALMER, D. J. et al. Comparison of spatial prediction techniques for developing *Pinus radiata* productivity surfaces across New Zealand. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 258, n. 9, p. 2046-2055, 2009.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sinks in the world's forests. **Science**, Washington, D.C., v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011.

PARRAS-ALCÁNTARA, L.; LOZANO-GARCÍA, B.; GALÁN-ESPEJO, A. Soil organic carbon along an altitudinal gradient in the Despeñaperros Natural Park, southern Spain. **Solid Earth**, [Parma], v. 6, n. 1, p. 125-134, 2015.

PARTON, W. et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, Washington, D.C., v. 315, n. 5810, p. 361-364, 2007.

PAZ, C. P. et al. Soil types influence predictions of soil carbon stock recovery in tropical secondary forests. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 376, p. 74-83, 2016.

PEARSON, T. R. H.; BROWN, S. L.; BIRDSEY, R. A. Measurement guidelines for the sequestration of forest carbon. **USDA Forest ServiCD: Northern Research Station**, [Newtown Square], v. 18, n. 1, p. 1-42, 2007.

PERSSON, H. Å. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 71, n. 1/3, p. 87-101, 1983.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Ed. Springer-Verlag, 2000. 528p.

POGGIO, L.; GIMONA, A. National scale 3D modelling of soil organic carbon stocks with uncertainty propagation – na example from Scotland. **Geoderma**, [S.l.], v. 232/234, p. 284-299, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706114002006>>. Acesso em: 02 jul. 2016.

POLLIERER, M. M. et al. The underestimated importance of belowground carbon input for forest soil animal food webs. **Ecology Letters**, [Montpellier], v. 10, n. 8, p. 729-736, 2007.

POST, W. M. et al. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, London, v. 298, p. 156-159, jul. 1982.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

RATUCHNE, L. C. et al. Quantificação de carbono florestal em povoamentos de *Araucaria angustifolia* no sudoeste do estado do Paraná. **Ambiência**, Guarapuava, v. 11, n. 2, p. 321-335, jan./abr. 2015.

RAVINDRANATH, N. H.; OSTWALD, M. **Carbon inventory methods: handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects**. London: Springer Science + Business Media, 2008. 304 p.

REIS, A. A. et al. Estratificação em cerrado *sensu stricto* a partir de imagens de sensoriamento remoto e técnicas geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 377-386, jun. 2015.

RIAL, M.; CORTIZAS, A. M.; RODRÍGUEZ-LADO, L. Mapping soil organic carbon content using spectroscopic and environmental data: A case study in acidic soils from NW Spain. **Science of the Total Environment**, [Barcelona], v. 539, p. 26-35, 2016.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S.P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p.151-212.

RIND, D. The sun's role in climate variations. **Science**, Washington, D.C., v. 296, n. 5568, p. 673-677, 2002.

ROOSE, E. J. et al. (Eds.). **Soil erosion and carbon dynamics (Advances in Soil Science)**. Boca Raton: CRC, 2006. 418p.

ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. dos S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 333-351, mai./ago. 2014.

RUESS, R.W. *et al.* Coupling fine root dynamics with ecosystem carbon cycling in black spruce forests of interior Alaska. **Ecological Monographs**, Washington, D.C., v. 73, n. 4, p. 643-662, 2003.

RUGGIERO, P. G. C. et al. Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology**, v. 160, n. 1, p. 1-16, 2002.

RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter - a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 338, n. 1, p. 143-158, 2011.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, out. 2011.

SANQUETTA, C. R. et al. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, set. 2014.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Ed. FUPEF/UFPR, 2002. p. 119-140.

SANTOS, R. M. et al. Identity and relationships of the Arboreal Caatinga among other floristic units of seasonally dry tropical forests (SDTFs) of North-Eastern and Central Brazil. **Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 409-428, 2012.

SATTLER, D. et al. Influence of soil and topography on aboveground biomass accumulation and carbon stocks of afforested pastures in South East Brazil. **Ecological Engineering**, [Florida], v. 73, p. 126-131, 2014.

SAYER, E. J. et al. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. **Nature Climate Change**, London, v.1, p. 304-307, 2011.

SCHLESINGER, W. H.; LICHTER, J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. **Nature**, London, v. 411, n. 6836, p. 466-469, 2001.

SCHULZ, K. et al. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 367, p. 62-70, 2016. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112716300305>>.
Acesso em: 11 jun. 2016.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R. Inventário de carbono em povoamentos de *Eucalyptus* spp. nas propriedades fumageiras do sul do Brasil: “Um estudo de caso”. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (eds.). **Fixação de carbono: Atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: AM Impressos, 2004. p. 111-124.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in brazilian biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi-arid woodland. **PLoS ONE**, [San Francisco], v. 10, n. 6, p. 1-20, jun. 2015.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 376, p. 24-35, 2016.

SCOLFARO, J. R. et al. Amostragem e coleta de dados para equações de volume, peso de matéria seca, tanino, cortiça, óleo, sistema radicular, conversão de volumes e carbono. In: SCOLFARO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W. A. (Eds.). **Inventário florestal de Minas Gerais**: equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. Lavras: Ed. UFLA, 2008. cap. 1, p. 1-65.

SCOLFARO, J. R. et al. Procedimento do inventário florestal – flora nativa. In: SCOLFARO, J. R.; CARVALHO, L. M. T.(Ed.). **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: Ed. UFLA, 2006. cap. 4, p.63-73.

SCOLFARO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. de; OLIVEIRA, A. D. de. (Eds.). **Zoneamento ecológico-econômico do estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: Ed. UFLA, 2008. 161 p.

SCOLFARO, J. R.; CARVALHO, L. M. T.(Eds.). **Mapeamento e Inventário da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 288 p.

SCOLFARO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W. A. (Eds.). **Inventário florestal de Minas Gerais**: equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes Fisionomias da flora nativa. Lavras: Ed. UFLA, 2008. 216 p.

SEIFFARTH, J. A. Semiárido, o bioma mais diverso do mundo. Revista do Instituto Humanitas Unisinos – IHU on-line, São Leopoldo, v. 12, n. 389, p. 9-10, abr. 2012. Disponível em: <<http://fmclimaticas.org.br/wp-content/uploads/2014/03/Caatinga-um-bioma-exclusivamente-brasileiro.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

SIERRA, C. A. et al. Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, [Malden], v. 7, n. 1, p. 335-356, 2015.

SILVA, A. C. et al. Relações entre matéria orgânica do solo e declividade de vertentes em topossequência de Latossolos do Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1059-1068, 2007.

SILVA, I. R. et al. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: Uma questão estratégica para a manutenção da sustentabilidade.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 29, p. 10-20, 2004.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.

SIMARD, S. W. et al. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. **Nature**, London, v. 388, n. 6642, p. 579-582, 1997.

SIMON, N.; FRIEDMAN, J.; HASTIE, T. A blockwise descent algorithm for group-penalized multiresponse and multinomial regression. **Journal of Statistical Software**, [Linz], v. 20, n. 2, p. 1-15, nov. 2013.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – SISEMA; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM; CENTRO CLIMA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Inventário de emissões de gases de efeito estufa do estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2008. 120 p.

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. **Agronomy for Sustainable Development**, [S.l.], v. 22, n. 7/8, p. 755-775, 2002a.

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002b.

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

SOARES, C. P. B. et al. Equações para estimar estoque de carbono por hectare nos fustes das árvores de Floresta Estacional Semidecidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 579-588, abr./jun. 2016.

SOETHE, N.; LEHMANN, J.; ENGELS, C. Carbon and nutrient stocks in roots of forests at different altitudes in the Ecuadorian Andes. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 23, n. 3, p. 319-328, 2007.

SOMBROEK, W. G.; NACHTERGAELE, F. O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio**, Washington, D.C., v. 22, n. 7, p. 417-426, nov. 1993.

SUN, H. L. et al. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. **Ecological Engineering**, [Florida], v. 32, n. 1, p. 60-67, 2008.

TERRA, M. de C. N. S.; MELLO, J. M. de; MELLO, C. R. de. Relação espacial do carbono da vegetação e matéria orgânica do solo na Serra da Mantiqueira. **Floresta e Ambiente - Floram**, Seropédica, v. 22, n. 4, p. 446-455, 2015.

TESFAYE, M. A. et al. Impact of changes in land use, species and elevation on soil organic carbon and total nitrogen in Ethiopian Central Highlands. **Geoderma**, [S.l.], v. 261, p. 70-79, 2016.

TOLEDO, M. et al. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. **Journal of Ecology**, v. 99, n. 1, p. 254-264, 2011.

TRUMBORE, S. E.; CZIMCZIK, C. I. An uncertain future for soil carbon. **Science**, Washington, D.C., v. 321, n. 5895, p. 1455-1456, 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1355-mapa-de-solos>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

VIANA, H. et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological Modelling**, [Towson], v. 226, p. 22-35, 2012.

VICHARNAKORN, P. et al. Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in Savannakhet, Lao PDR. **Remote Sensing**, Beijing, v. 6, n. 6, p. 5452-5479, 2014.

VIEIRA, S. A. et al. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above-and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. **Ecology and Evolution**, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 421-434, 2011.

VILLELA, D. M. et al. Carbon and nitrogen stock and fluxes in coastal Atlantic Forest of southeast Brazil: potential impacts of climate change on biogeochemical functioning. **Brazilian Journal of Biology**, São Paulo, v. 72, n. 3, p. 633-642, 2012.

WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant Roots: the hidden half**. 3. ed. New York: M. Dekker, 2002.

WANG, H. et al. Dynamics and speciation of organic carbon during decomposition of leaf litter and fine roots in four subtropical plantations of China. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v. 300, p. 43-52, 2013.

WANG, S.; WANG, X.; OUYANG, Z. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the upstream watershed of Miyun reservoir, north China. **Journal of Environmental Sciences**, [Edmonton], v. 24, n. 3, p. 387-395, 2012.

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, set. 2012.

WIEDER, W. R.; BONAN, G. B.; ALLISON, S. D. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. **Nature Climate Change**, London, v. 3, n. 10, p. 909-912, 2013.

WILLIAMS, M. et al. Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: a modelling analysis. **Plant, Cell and Environment**, [Malden], v. 21, n. 10, p. 953-968, 1998.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

YUNUSA, I. A. M. et al. Fine root biomass and its relationship to evapotranspiration in woody and grassy vegetation covers for ecological restoration of waste storage and mining landscapes. **Ecosystems**, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 113-127, 2012.

ZHANG, X.; WANG, W. The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 9940, p. 1-10, 2015.

ZINN, Y. L. et al. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões sul e Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 5, p. 1395-1406, 2012.

**ANEXO A – DESVIOS PADRÕES DA MODELAGEM MISTA PARA OS
COMPARTIMENTOS ARBÓREOS VIVO E MORTO, SERAPILHEIRA,
SOLOS E RAÍZES TOTAIS**

Compartimento	Variável	Desvio padrão	
		Intercepto	Residual
Arbóreo vivo	Ln Volume (m ³ /ha)	0,4528	0,5244
Arbóreo vivo	Ln Peso seco (Mg/ha)	0,4533	0,5343
Arbóreo vivo	Ln Carbono (Mg/ha)	0,4642	0,5206
Arbóreo morto	Ln Volume (m ³ /ha)	1,0038	0,9093
Arbóreo morto	Ln Peso seco (Mg/ha)	0,9093	0,9224
Arbóreo morto	Ln Carbono (Mg/ha)	0,9487	0,9109
Serrapilheira	Ln Peso seco (Mg/ha)	0,5431	0,5682
Serrapilheira	Ln Teor de C (%)	0,0571	0,0919
Serrapilheira	Ln Carbono (Mg/ha)	0,5646	0,5777
Solo	Ln Carbono (0 a 10) (Mg/ha)	0,4679	0,3043
Solo	Ln Carbono (10 a 20) (Mg/ha)	0,5639	0,2608
Solo	Ln Carbono (20 a 40) (Mg/ha)	0,5382	0,2542
Solo	Ln Carbono (40 a 60) (Mg/ha)	0,5254	0,2936
Solo	Ln Carbono (60 a 100) (Mg/ha)	0,5740	0,4018
Solo	Ln Carbono (0 a 20) (Mg/ha)	0,4991	0,2656
Solo	Ln Carbono (0 a 40) (Mg/ha)	0,5072	0,2358
Solo	Ln Carbono (0 a 60) (Mg/ha)	0,5054	0,2317
Solo	Ln Carbono (0 a 100) (Mg/ha)	0,5134	0,2612
Raiz Total	Ln Carbono (0 a 10) (Mg/ha)	0,2638	0,4744
Raiz Total	Ln Carbono (10 a 20) (Mg/ha)	0,2629	0,4679
Raiz Total	Ln Carbono (20 a 40) (Mg/ha)	0,2240	0,4957
Raiz Total	Ln Carbono (40 a 60) (Mg/ha)	0,1877	0,4691
Raiz Total	Ln Carbono (60 a 100) (Mg/ha)	0,1915	0,3861
Raiz Total	Ln Carbono (0 a 20) (Mg/ha)	0,3106	0,4727
Raiz Total	Ln Carbono (0 a 40) (Mg/ha)	0,2973	0,4583
Raiz Total	Ln Carbono (0 a 60) (Mg/ha)	0,2793	0,4488
Raiz Total	Ln Carbono (0 a 100) (Mg/ha)	0,2818	0,4352

**ANEXO B – DESVIOS PADRÕES DA MODELAGEM MISTA PARA OS
COMPARTIMENTOS DE RAÍZES FINAS, MÉDIAS E GROSSAS**

Compartimento	Variável	Desvio padrão	
		Intercepto	Residual
Raiz Fina	Ln Carbono (0 a 10) (Mg/ha)	0,1604	0,2098
Raiz Fina	Ln Carbono (10 a 20) (Mg/ha)	0,1462	0,1665
Raiz Fina	Ln Carbono (20 a 40) (Mg/ha)	0,1201	0,1645
Raiz Fina	Ln Carbono (40 a 60) (Mg/ha)	0,0895	0,1381
Raiz Fina	Ln Carbono (60 a 100) (Mg/ha)	0,0789	0,1295
Raiz Fina	Ln Carbono (0 a 20) (Mg/ha)	0,2116	0,2273
Raiz Fina	Ln Carbono (0 a 40) (Mg/ha)	0,2264	0,2363
Raiz Fina	Ln Carbono (0 a 60) (Mg/ha)	0,2329	0,2333
Raiz Fina	Ln Carbono (0 a 100) (Mg/ha)	0,2298	0,2336
Raiz Média	Ln Carbono (0 a 10) (Mg/ha)	0,0979	0,2145
Raiz Média	Ln Carbono (10 a 20) (Mg/ha)	0,1062	0,1985
Raiz Média	Ln Carbono (20 a 40) (Mg/ha)	0,1025	0,1768
Raiz Média	Ln Carbono (40 a 60) (Mg/ha)	0,0546	0,1387
Raiz Média	Ln Carbono (60 a 100) (Mg/ha)	0,0515	0,1355
Raiz Média	Ln Carbono (0 a 20) (Mg/ha)	0,1578	0,2524
Raiz Média	Ln Carbono (0 a 40) (Mg/ha)	0,1994	0,2466
Raiz Média	Ln Carbono (0 a 60) (Mg/ha)	0,2063	0,2408
Raiz Média	Ln Carbono (0 a 100) (Mg/ha)	0,2062	0,2391
Raiz Grossa	Ln Carbono (0 a 10) (Mg/ha)	0,1915	0,5690
Raiz Grossa	Ln Carbono (10 a 20) (Mg/ha)	0,1924	0,5588
Raiz Grossa	Ln Carbono (20 a 40) (Mg/ha)	0,1926	0,6045
Raiz Grossa	Ln Carbono (40 a 60) (Mg/ha)	0,1618	0,5357
Raiz Grossa	Ln Carbono (60 a 100) (Mg/ha)	0,1500	0,4445
Raiz Grossa	Ln Carbono (0 a 20) (Mg/ha)	0,2621	0,6198
Raiz Grossa	Ln Carbono (0 a 40) (Mg/ha)	0,2795	0,6303
Raiz Grossa	Ln Carbono (0 a 60) (Mg/ha)	0,2755	0,6313
Raiz Grossa	Ln Carbono (0 a 100) (Mg/ha)	0,2934	0,6284