



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PAULO HENRIQUE DE SOUZA

**BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTO DE *Anadenanthera*
peregrina (L.) Speg SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

PAULO HENRIQUE DE SOUZA

BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTO DE *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Winckler Caldeira

Coorientadores: Prof. Dr. Otacílio José Passos Rangel e Prof^a. Dra. Elzimar de Oliveira Gonçalves.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Bibliotecário: Felício Gomes Corteletti – CRB-6 ES-000646/O

S719b Souza, Paulo Henrique de, 1975-
Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg sob diferentes espaçamentos. – 2018.
94 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Winckler Caldeira.
Coorientadores: Otacílio José Passos Rangel; Elzimar de Oliveira Gonçalves.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Solo - Uso. 2. Carbono. 3. Sequestro de carbono. 4. Mudanças climáticas. I. Caldeira, Marcos Vinícius Winckler. II. Rangel, Otacílio José Passos. III. Gonçalves, Elzimar de Oliveira. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO EM POVOAMENTO DE *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

Paulo Henrique de Souza

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 25 de Janeiro de 2018.



Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta (Examinador externo)
Universidade Federal do Paraná



Dr. Ranieri Ribeiro Paula (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Dr^a. Valéria Hollunder Klippel (Examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio de Souza e Maria Rita Lopez de Souza, que nunca mediram esforços para possibilitar que seus doze filhos pudessem estudar.

A todos os meus familiares que sempre torceram por mim e sempre me ampararam nos momentos difíceis da vida.

À minha esposa Silvia Cristiane Gomes de Souza e aos meus filhos Jacqueline de Cássia Souza e José Henrique de Souza, que sempre me acompanharam nas mudanças de cidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Senhora de Aparecida, por ter me permitido saúde para chegar até aqui.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – IFBaiano, pela concessão da licença para capacitação.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes – Campus de Alegre, pela concessão da área de estudo.

À FAPES, pelo apoio financeiro da pesquisa, por meio do Edital Nº 011/2013 PPE (Pesquisa em agropecuária no Estado do Espírito Santo), Edital CNPq/FAPES nº 012/2014 – Processo FAPES nº 64946088/2013 e Edital CNPq/FAPES nº 012/2014-DCR – Processo FAPES nº 71416382.

À minha esposa Silvia Cristiane, por sempre ter acreditado em mim e por sempre preparar carinhosamente, ainda de madrugada, o almoço para mim e todos os meus companheiros durante a coleta dos dados em campo.

Ao professor Dr. Marcos Vinícius Winckler Caldeira, pela orientação e amizade.

Aos professores Dr. Otacílio José Passos Rangel e Dr^a. Elzimar de Oliveira Gonçalves, pela coorientação e amizade.

À amiga Elzimar e seu esposo Marco Aurélio, pela acolhida em Jerônimo Monteiro.

Aos professores, Dr. Carlos Roberto Sanquetta da UFPR e Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça do CCAE/UFES, pelas valiosas contribuições no decorrer deste trabalho e pela disponibilidade de sempre.

A todos os meus professores ao longo da minha estudiantil, pelos ensinamentos e incentivo.

À Tauane Garcia Barreto e ao BIOFIX/UFPR, pela colaboração na realização das análises de determinação de carbono.

Aos colegas Roberto Rorras dos Santos Moura, Julia Siqueira Moreau, Kallil Chaves Castro, Eduardo Alves Araújo, Vitor de Souza Abreu, Valéria Hollunder Klippel,

Jaqueline Quintino Santos, Ítalo Favoreto Campanharo, Lucas José Mendes, William Macedo Delarmelina, Ray Luiz Babilon Carreço, Adelson Lemes da Silva Junior e João Gabriel Missia da Silva, pela colaboração no árduo trabalho de coleta dos dados em campo.

A todos os meus colegas do NUPEMASE, pela paciência, amizade, troca de conhecimentos e sugestões na melhoria deste trabalho.

A todos os servidores da UFES e terceirizados, pela amizade, presteza e dedicação.

À sociedade de Jerônimo Monteiro, ES, a qual todos acolhe com muita hospitalidade e carinho, especialmente aos estudantes do DCFM/CCAUE-UFES (Antigo NEDTEC).

Aos colegas do IFBaiano, Júlio Cláudio Martins e Rogério Quinhones, grandes incentivadores desse desafio.

A todas as pessoas, que de alguma forma, até mesmo com uma palavra de incentivo, colaboraram para a realização desse trabalho.

Muito obrigado a todos!

BIOGRAFIA

Paulo Henrique de Souza nasceu em 20 de setembro de 1975, em Viçosa, MG. Iniciou sua vida estudantil na extinta Escola Estadual Sebastião Lopes de Carvalho, passando depois para a Escola Estadual Dr. Raimundo Alves Torres. Em 1996 iniciou o curso de graduação em Engenharia Florestal pela UFV, concluindo-o em maio de 2002. Em 2004 iniciou o curso de mestrado em Ciência Florestal, também pela UFV, concluindo-o em fevereiro de 2006. Entre 2006 e 2012 atuou como engenheiro florestal e professor universitário. Em fevereiro de 2013 ingressou no quadro de professores do IFBaiano/Campus Teixeira de Freitas, onde exerce suas funções até os dias atuais. Em março de 2014 iniciou o curso de doutorado em Ciências Florestais pela UFES, concluindo-o em janeiro de 2018.

RESUMO

SOUZA, Paulo Henrique de. **Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg sob diferentes espaçamentos**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Marcos Vinícius Winckler Caldeira. Coorientadores: Otacílio José Passos Rangel e Elzimar de Oliveira Gonçalves.

As questões relacionadas às mudanças climáticas e a elevação da temperatura da atmosfera terrestre têm sido cada vez mais discutidas em todo o planeta. Neste cenário, o potencial das florestas em fixar carbono em sua biomassa vem ganhando destaque. Objetivou-se verificar o efeito do espaçamento sobre a biomassa (BIO) e o estoque de carbono (EC) em um povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg estabelecido em área de pastagem. A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Ifes Campus de Alegre, em Rive, Alegre, ES, Brasil. O povoamento foi implantado em junho de 2011 com diferentes espaçamentos (3 x 2, 3 x 3, 4 x 3, 4 x 4 e 5 x 5 m), distribuído em três blocos. Realizou-se o inventário florestal para obtenção do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e da altura total das árvores (Ht) e na sequência foi amostrada a BIO acima do solo, com a seleção e derrubada de 45 árvores. Desse total, 15 árvores tiveram seu sistema radicular amostrado. Foi amostrada a necromassa de galhos no piso florestal em 15 parcelas (30 x 50 m) da pesquisa e ainda o solo nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm em todas as parcelas obtendo-se o teor de carbono (TC) e carbono isotópico. A partir dos valores individuais, foram ajustados modelos de regressão para estimar a BIO populacional para cada compartimento das árvores. O EC foi calculado por meio da multiplicação da BIO pelo respectivo TC da amostra. Para o solo, o EC foi estimado usando a densidade do solo e do TC na amostra. O EC obtido por meio de equações de BIO multiplicada pelo TC determinado na amostra foi mais exato em relação aos outros métodos testados. As médias de BIO e EC total acima do solo foram, respectivamente, 16,42 e 7,21 Mg ha⁻¹. A participação relativa das frações nesse total foi: galhos (44,99%), fuste (40,77%), folhas (13,99%) e casca (4,90%). Para as raízes e necromassa a média de BIO foi, respectivamente, 6,68 e 1,71 Mg ha⁻¹ e para EC as médias foram, respectivamente, 0,76 e 2,95 Mg ha⁻¹. Os teores médios de carbono variaram de 43,97% nas folhas até 44,31% na casca, com média aritmética geral de 44,20%. Convertendo o valor total do EC (EC solo + EC BIO + EC necromassa) em dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq.}), estima-se 1161,12 Mg de CO₂ sequestrados da atmosfera. Não houve efeito do espaçamento de plantio sobre o EC do solo e sobre a necromassa. Após 68 meses de implantação do povoamento florestal, o EC total do solo foi reduzido em 22,72%. Entretanto, nesta idade, 20,99% do carbono do solo foi oriundo das árvores de *A. peregrina*, em substituição ao carbono oriundo da pastagem. Houve a tendência de maior

quantidade de BIO e carbono nas árvores nos menores espaçamentos, com redução dos valores nos maiores espaçamentos. O solo foi o compartimento que estocou a maior porcentagem de carbono (70%), seguido da biomassa aérea (21%), raízes (6%) e da necromassa (3%).

Palavras-chave: mudança de uso do solo, carbono orgânico, densidade básica, sequestro de carbono, mudanças climáticas.

ABSTRACT

SOUZA, Paulo Henrique de. **Biomass and carbon stock in *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg stands under different planting spacings**. 2018. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Marcos Vinícius Winckler Caldeira. Co-advisors: Otacílio José Passos Rangel and Elzimar de Oliveira Gonçalves.

Issues related to climate change and rising temperatures of the Earth's atmosphere have been increasingly discussed all over the planet. In this scenario, the potential of forests to stock carbon in their biomass have been gaining prominence. The objective of this work was to verify the effect of planting spacing on biomass (BIO) and carbon stock (EC) in *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg stands established in pasture area. The research was developed in the experimental area of Ifes Campus de Alegre, in Rive, Alegre, ES, Brazil. The stands were planted in June of 2011 with different spacings (3 x 2, 3 x 3, 4 x 3, 4 x 4 and 5 x 5 m), distributed in three blocks. The forest inventory was carried out to obtain the diameter at 1.30 m from the ground (DAP) and the total height of the trees (Ht) and in the sequence was sampled the BIO above the ground with the selection and felling of 45 trees. From this total, 15 trees had their root system sampled. The necromass of branches on the forest floor was sampled in 15 plots (30 x 50 m) in the area and also the soil at depths 0-5, 5-10 and 10-20 cm in all plots, obtaining the carbon content (TC) and isotopic carbon. From the individual values, regression models were fitted to estimate the population BIO for each tree compartment. The EC was calculated by multiplying BIO by the respective TC of the sample. For soil, the EC was estimated using soil and TC density in the sample. The EC obtained by BIO equations multiplied by the TC determined in the sample was more accurate in relation to the other methods tested. The mean of BIO and total EC above the ground were, respectively, 16.42 and 7.21 Mg ha⁻¹. The relative participation of the fractions in this total was: branches (44.99%), stem (40.77%), leaves (13.99%) and bark (4.90%). For roots and necromass, the mean of BIO was, respectively, 6.68 and 1.71 Mg ha⁻¹ and, for EC, the means were, respectively, 0.76 and 2.95 Mg ha⁻¹. The carbon mean contents varied from 43.97% in the leaves to 44.31% in the bark, with a general arithmetic mean of 44.20%. Converting the total value of EC (EC soil + EC BIO + EC necromass) into equivalent carbon dioxide (CO_{2eq.}) is estimated that 1161.12 Mg of CO₂ were sequestered from the atmosphere. There was no effect of planting spacing on soil EC and on necromass. After 68 months of implementation of the forest stand, total soil EC was reduced by 22.72%. However, at this age, 20.99% of the soil carbon was originated from *A. peregrina* trees, replacing the carbon originated from the pasture. There was a tendency of higher amount of BIO and carbon in the trees in the smaller spacings, with reduction of the values in the larger spacings. The soil was

the compartment that had the highest percentage of the carbon stocked (70%), followed by aerial biomass (21%), roots (6%) and necromass (3%).

Key words: land use change, organic carbon, basic density, carbon sequestration, climate change.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios dos atributos do solo, para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm, aos nove meses (setembro de 2010) antes da implantação do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES	20
Tabela 2 – Valores médios para argila, silte, areia e densidade do solo (DS) na profundidade de 0-20 e de 20-40 cm, aos nove meses (setembro de 2010) antes da implantação do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES.....	21
Tabela 3 – Equações ajustadas e suas respectivas estatísticas para a estimativa da Ht das árvores de <i>A. peregrina</i> , aos 44 meses de idade, em Rive, Alegre, ES.....	22
Tabela 4 – Critérios de seleção e quantidade de árvores de <i>A. peregrina</i> abatidas para a obtenção da biomassa individual	22
Tabela 5 – Valores médios das variáveis dendrométricas avaliadas no povoamento de <i>A. peregrina</i> ., aos 44 meses após o plantio, em Rive, Alegre, ES	23
Tabela 6– Distribuição de frequências das árvores do povoamento de <i>A. peregrina</i> por espaçamento e por classes de diâmetro, aos 44 meses após o plantio	24
Tabela 7– Distribuição de frequências das árvores do povoamento de <i>A. peregrina</i> por espaçamento de plantio e classes de altura total, aos 44 meses após o plantio	24
Tabela 8 – Equações ajustadas para estimativa da biomassa total e dos compartimentos da árvore acima do solo para a população de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES.....	27
Tabela 9 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para os dados de biomassa e estoque de carbono nas raízes e na necromassa e para a comparação dos teores de carbono entre os diferentes componentes da biomassa avaliados no povoamento de <i>A. peregrina</i>	39
Tabela 10 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para análise dos dados de densidade básica e teor de carbono da madeira de <i>A. peregrina</i>	42
Tabela 11 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para o teste de igualdade das médias de biomassa e estoque de carbono dos compartimentos da biomassa acima do solo e para o estoque de carbono no solo	43
Tabela 12 – Estoque de carbono médio (kg) estimado por diferentes métodos para árvores de <i>A. peregrina</i> , com 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES.....	51

Tabela 13 – Valores médios para as variáveis dendrométricas das 45 árvores de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos e aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES, para a comparação dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo	53
Tabela 14 – Resultado do teste t-pareado para comparação dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo para árvores de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	53
Tabela 15 – Matriz de correlação de Pearson entre as características dendrométricas das árvores de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	56
Tabela 16 – Estatísticas complementares para avaliação da precisão dos métodos de estimativa do estoque de carbono acima do solo para árvores de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	57
Tabela 17 – Biomassa total acima do solo e de seus componentes para o povoamento de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	59
Tabela 18 – Estoque de carbono total acima do solo e de seus componentes para o povoamento de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	64
Tabela 19 – Valores médios para a caracterização dendrométrica das quinze árvores amostradas para o estudo da biomassa e do estoque de carbono nas raízes no povoamento de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	66
Tabela 20 – Comparação das médias populacionais para biomassa acima do solo, biomassa de raízes e estoque de carbono das raízes de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	68
Tabela 21 – valores médios de necromassa e estoque de carbono da necromassa no povoamento de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos, aos 60 meses de idade em Rive, Alegre, ES	70
Tabela 22 – Estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}) do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos e aos 68 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	72
Tabela 23 – Estoque total de carbono orgânico no solo para a profundidade de 0-20 cm, em diferentes locais, tipos e idades de vegetação	73
Tabela 24 – Estoque de carbono no solo, para a profundidade 0-20 cm, antes e após a implantação do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES.....	74

Tabela 25 – Densidade média do solo (g cm^{-3}) para a profundidade 0-20 cm, antes e após a implantação do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre-ES.....	75
Tabela 26 – Abundância isotópica natural do ^{13}C do solo da pastagem e do solo do povoamento de <i>A. peregrina</i> , aos 68 meses após a implantação e até 20 cm de profundidade, em Rive, Alegre, ES	77
Tabela 27 – Estoque total de carbono, considerando a parte aérea das árvores de <i>A. peregrina</i> e o solo do povoamento, em Rive, Alegre, ES.....	80
Tabela 28 – Estoque médio de carbono da parte aérea, raízes, necromassa e solo para no Bloco 3 do povoamento de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo do delineamento utilizado no plantio de <i>A. peregrina</i> , com distribuição das parcelas e em diferentes espaçamentos, em Rive, Alegre, ES	14
Figura 2 – Localização da área de estudo com indicação dos blocos onde foi instalado o experimento com <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES	16
Figura 3 – Modelo digital de elevação com indicação da distribuição espacial das parcelas e a altitude nos três blocos experimentais com plantio de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES	17
Figura 4 – Modelo digital de elevação com a distribuição espacial das parcelas e das curvas de nível nos três blocos com plantios de <i>A. peregrina</i> , em Rive, Alegre, ES.	18
Figura 5 – Esquema de subdivisão da área para a coleta de amostras de solo no povoamento de <i>A. peregrina</i> , tomando-se como exemplo o espaçamento 4 x 4 m, em Rive, Alegre, ES	34
Figura 6 – Sistematização dos coletores para coleta de folhas senescentes das árvores de <i>A. peregrina</i> , aos 68 meses de idade, em Rive, Alegre, ES.....	37
Figura 7 – Teores médios de carbono para os diferentes compartimentos da biomassa avaliados no povoamento de <i>A. peregrina</i> , aos 56 meses de idade (exceto necromassa que foi aos 60 meses de idade), em Rive, Alegre, ES Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, ao nível de 5% de significância pelo teste Tukey.	45
Figura 8 – Densidade básica da madeira de <i>A. peregrina</i> ao longo do fuste, aos 56 meses de idade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância	49
Figura 9 – Distribuição dos resíduos para o estoque de carbono total acima do solo, estimado por diferentes métodos	54
Figura 10 – Participação dos componentes copa (folhas + galhos) e fuste com casca na biomassa total acima do solo do povoamento de <i>A. peregrina</i> , em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES	63
Figura 11 – Participação relativa das <i>A. peregrina</i> e da pastagem na matéria orgânica do solo, em Rive, Alegre, ES.....	78

Figura 12 – Participação relativa individual dos componentes no estoque total de carbono do ecossistema, para no Bloco 3 do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES83

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo geral.....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.....	5
2.2	Efeito do espaçamento de plantio no crescimento das árvores	6
2.3	Biomassa e carbono em formações florestais.....	8
2.4	Métodos para obtenção da biomassa e do carbono	11
3	METODOLOGIA	14
3.1	Implantação e condução do povoamento	14
3.2	Caracterização da área de estudo	15
3.3	Caracterização dendrométrica do povoamento	21
3.4	Amostragem da biomassa acima do solo.....	25
3.5	Amostragem da biomassa de raízes e da necromassa.....	27
3.6	Determinação do teor e estimativa do estoque de carbono nos tecidos vegetais.....	29
3.7	Determinação da densidade básica da madeira	30
3.8	Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo	31
3.9	Amostragem do solo	32
3.9.1	Obtenção da densidade, teor de carbono e abundância isotópica natural do ¹³ C	35
3.9.2	Estimativa do estoque de carbono no solo.....	38
3.10	Análises dos dados	39
3.10.1	Teores de carbono entre os diferentes compartimentos da biomassa ...	39
3.10.2	Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo	40
3.10.3	Densidade básica e teor de carbono da madeira	41
3.10.4	Biomassa e estoque de carbono acima do solo e estoque de carbono no solo	42

3.10.5	Biomassa e estoque de carbono nas raízes e na necromassa.....	44
3.10.6	Mudanças no estoque de carbono no solo.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Teores de carbono nos diferentes compartimentos da biomassa	45
4.2	Densidade básica e teores de carbono da madeira em função do espaçamento de plantio e da posição axial no fuste	47
4.3	Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo	51
4.4	Biomassa e estoque de carbono acima do solo.....	58
4.5	Biomassa e estoque de carbono nas raízes	65
4.6	Necromassa	69
4.7	Estoque de carbono no solo.....	71
4.8	Mudanças no estoque de carbono do solo após a introdução das árvores .	74
4.9	Estoque total de carbono no povoamento de <i>A. peregrina</i> após 68 meses de plantio	79
5	CONCLUSÕES.....	85
6	REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

A cada dia, é maior a preocupação das pessoas em todo o planeta com as mudanças climáticas, tendo em vista que estas influenciam todas as formas de vida na Terra, inclusive o crescimento dos vegetais e a estabilidade dos ecossistemas. A atmosfera terrestre é composta por material particulado e por um conjunto de gases, dentre eles, o dióxido de carbono (CO_2), que formam uma camada protetora que dificulta o retorno da radiação solar refletida pela terra para o espaço, causando o chamado efeito estufa (BALBINOT et al., 2003). Esse efeito é um fenômeno natural imprescindível para a manutenção da vida na Terra, como a conhecemos, pois evita as mudanças abruptas da temperatura do ar na baixa atmosfera.

Os principais gases formadores do efeito estufa (GEE) são óxido nitroso (IPCC, 2007), o gás carbônico e o metano (BALBINOT et al., 2003). Entre os GEE, o CO_2 é o mais importante e a sua concentração aumentou de aproximadamente 280 para 379 ppm entre o ano 1750 e 2005, sendo este aumento devido principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra, enquanto os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso são devidos principalmente à agricultura (IPCC, 2007).

Diante do aumento das concentrações dos GEE, principalmente do CO_2 , o potencial das florestas em fixar carbono em sua biomassa passou a ser destacado (LIPINSKI et al., 2017). As florestas são importantes meios de subsistência para milhões de pessoas e contribuem para a economia e desenvolvimento de muitos países e, além disso, elas são fontes e sumidouros de carbono (KÖHL et al., 2015). Segundo Sanquetta et al. (2014), a quantificação do carbono estocado nos diferentes compartimentos da biomassa é fundamental para dimensionar o potencial de mitigação do efeito estufa pelas florestas.

Dentre os fatores que podem afetar o estoque de carbono em florestas plantadas, o espaçamento de plantio é de extrema relevância, pois ele pode influenciar na arquitetura da copa e na distribuição das raízes e, indiretamente, afetar o crescimento das árvores e a alocação da biomassa (BENOMAR; DESROCHERS; LAROCQUE, 2012). A área plantada com árvores para fins econômicos no Brasil, em 2015, era de 7,8 milhões de hectares. Os plantios com as

espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, representam, respectivamente, cerca de 72 e 20% da área total plantada. As espécies florestais não convencionais, tais como acácia, teca, seringueira, paricá, araucária, dentre outras, representam cerca de 8,0% desse total (IBÁ, 2016).

Para as espécies florestais tradicionalmente plantadas, a exemplo as dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, é vasto o conhecimento científico acumulado (IBÁ, 2016). Por outro lado, até o momento, são poucos os estudos relacionados à avaliação de espécies arbóreas nativas no Brasil, especialmente na forma de plantios puros. Quando se trata da avaliação dessas espécies quanto à quantidade de carbono estocado, os estudos são ainda mais raros e escassos e, no estado do Espírito Santo, estudos dessa natureza são considerados inéditos.

Diante da carência de estudos relacionados ao comportamento de espécies nativas em povoamentos florestais puros ou mistos, surgiu no estado do Espírito Santo o projeto “Floresta Piloto”. Este projeto teve como objetivo avaliar o comportamento de espécies florestais com potencial para exploração econômica ou para proteção e foi implantado no ano de 2011 em uma área pertencente ao INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA – Ifes Campus de Alegre, Várias unidades demonstrativas de florestas compuseram a estrutura do projeto Floresta Piloto, e em uma dessas unidades, com fins de produção, foi realizado o plantio puro de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg, em cinco tamanhos de espaçamento.

Anadenanthera peregrina (L.) Speg é uma espécie naturalmente adaptada a diversos tipos de ambientes e com ampla distribuição geográfica no Brasil (CARVALHO, 2003). Apresenta crescimento moderado a rápido e cerne resistente, possibilitando diversos usos da madeira (LORENZI, 2000). Estas características fazem dela uma espécie com potencial para ser usada em plantios puros com fins comerciais ou consorciada com outras espécies de árvores com a finalidade de recuperação de áreas degradadas. Associada às funções de produção e de proteção ambiental, *A. peregrina* ainda pode exercer importante papel nos serviços ecossistêmicos, mediante o sequestro de carbono.

Considerando a importância da espécie, a raridade de estudos, bem como o povoamento florestal já estabelecido via projeto Floresta Piloto, tornou-se relevante a coleta dos dados de produção de biomassa e de estoque de carbono neste povoamento. Assim, os resultados deste estudo poderão auxiliar no direcionamento

de projetos que visem à fixação de carbono e aumentar a base de dados disponíveis sobre esse assunto e ainda, poderão servir como referência para cálculo em transações comerciais e de indenizações no caso de retirada de povoamentos com *A. peregrina*, para atendimento a obras de interesse social ou de utilidade pública, como rodovias, linhas de transmissão ou formação de lagos para geração de energia, por exemplo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo teve como objetivo geral verificar o efeito do espaçamento de plantio sobre a produção de biomassa e o estoque de carbono no povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar os teores de carbono entre os diferentes compartimentos da biomassa: fuste, casca, galhos, folhas, raízes e necromassa;
- Avaliar o efeito do espaçamento de plantio e da posição ao longo do fuste sobre os teores de carbono da madeira e sobre a densidade básica;
- Comparar a exatidão de diferentes métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo;
- Avaliar a produção de biomassa e o estoque de carbono em diferentes compartimentos da árvore, na necromassa e no solo do povoamento (profundidade: 0-5, 5-10, 10-20 e 0-20 cm) em função do espaçamento de plantio;

- Analisar as mudanças no estoque total de carbono do solo (profundidade de 0-20 cm) após 68 meses de implantação do povoamento florestal;
- Estimar a quantidade total de CO_{2eq} capturada no povoamento, considerando os compartimentos solo e parte aérea das árvores;
- Estimar a participação relativa de cada compartimento no estoque total de carbono do povoamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg

Anadenanthera peregrina (L.) Speg. é uma espécie de porte arbóreo da família Fabaceae, sendo caracterizada como do tipo decídua e heliófita. Ela é conhecida popularmente, entre outros nomes, como angico do morro, angico, angico vermelho e angico curtidor. *A. peregrina* pode atingir alturas de mais de 20 m, sendo uma espécie característica das matas semidecíduais, ocorrendo preferencialmente em formações primárias e secundárias sobre terrenos de meia encosta com solos pedregosos, arenosos ou argilosos, porém bem drenados, podendo formar populações quase puras (LORENZI, 2009).

A espécie tem ocorrência nos estados brasileiros do Acre, Amazonas, Pará, Roraima, Bahia, Paraíba, Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná e abrange os domínios fitogeográficos da Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica (REFLORA, 2017). Ela está entre as espécies do gênero com maior abrangência geográfica no Brasil e apresenta expressiva regeneração natural, ocorrendo indiferentemente em solos secos e úmidos; é tolerante a solos rasos, compactados, mal drenados e até encharcados, de textura média a argilosa (CARVALHO, 2003).

Além da excelente capacidade de adaptação a diferentes ambientes, a espécie apresenta crescimento moderado a rápido, madeira com cerne resistente e bastante durável, servindo para construção civil e naval, produção de móveis, lenha, carvão, entre outros usos, a casca dessa espécie pode ser rica em tanino, o que permite a utilização das mesmas para o curtimento de couro (LORENZI, 2000). As sementes são leves, achatadas, escuras, discóides e são dispersas pelo vento a curtas distâncias, porém, com maior frequência, estabelecem-se junto à árvore matriz, caracterizando a síndrome de dispersão do tipo barocórica (COSTA; CONTINI; MELO, 2003) e o padrão de distribuição do tipo agregado (GALVÃO et al., 2014).

A polinização cruzada em *A. peregrina* é favorecida tanto pelo alto grau de autoincompatibilidade genética quanto pela incompatibilidade da época de maturação dos frutos e das sementes. Em área de Cerrado, a maturação dos frutos e das sementes desta espécie coincide com o final da estação seca, quando diversas espécies deste bioma estão com poucas folhas (COSTA; CONTINE; MELO, 2003).

Anadenanthera peregrina, em fragmentos localizados em uma área de transição Cerrado-Floresta na cidade de Macapá, AP, apresentou característica de uma espécie secundária oportunista que necessita de luz em sua fase inicial de desenvolvimento (GALVÃO et al., 2014). Entretanto, Lorenzi (2009) classificou a espécie como sendo pioneira. A produção de mudas desta espécie por via seminal é facilitada pelo fato das sementes poderem ser armazenadas, à temperatura de 5 e 20 °C e sem nenhum tratamento adicional, mantendo a sua viabilidade de germinação por até cinco meses (PINHO et al., 2009).

2.2 Efeito do espaçamento de plantio no crescimento das árvores

Espaçamento de plantio é o termo usado tecnicamente para indicar as distâncias entre as árvores em um povoamento florestal. Ele determinará a quantidade de mudas a ser plantada na área, devendo ser definido em função dos objetivos da produção (SILVA, 2011). A escolha do espaçamento de plantio é um dos principais fatores que devem ser analisados quando da elaboração e implantação de projetos de reflorestamento, tendo em vista que o mesmo tem relação com o crescimento em diâmetro e em altura das árvores e conseqüentemente na biomassa e no estoque de carbono dos povoamentos florestais.

A adoção de um determinado espaçamento de plantio tem muitas implicações no gerenciamento das plantações florestais. Do ponto de vista silvicultural, considerando uma mesma espécie e um mesmo sítio, implicará no número de tratos culturais a serem efetuados, na taxa de crescimento das árvores, no volume de madeira produzido, na taxa de mortalidade e dominância, na idade de

estagnação do crescimento, no volume da copa, na frutificação e nos custos de produção, dentre outros aspectos (SANQUETTA et al., 2003).

São muitos os estudos sobre espaçamentos de plantio para espécies tradicionais na silvicultura econômica, como as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (NASCIMENTO et al., 2012). A maioria dos estudos com espaçamento de plantio enfoca principalmente os aspectos silviculturais como crescimento e produção madeireira (SANQUETTA et al., 2003). Entretanto, com relação às espécies arbóreas nativas não cultivadas tradicionalmente, como é o caso da *A. peregrina*, são escassos trabalhos dessa natureza, principalmente em plantios puros. Dentre os estudos com espécies não tradicionais pode-se citar Galvão (1984) que avaliou a fixação de nitrogênio em árvores no âmbito do Programa Nacional de Pesquisa Florestal e também o trabalho de Rocha et. al. (2009) que realizou teste de procedências e progênies em *Anadenanthera peregrina* (L.) visando o estabelecimento de pomar de sementes.

O efeito do espaçamento de plantio sobre o crescimento de seis espécies de folhosas nativas da Mata Atlântica, aos 22 meses de idade, plantadas em área de recomposição florestal, em Seropédica, RJ, foi investigado por Nascimento et al. (2012). Neste estudo, os autores compararam quatro níveis de espaçamento (1 x 1, 1,5 x 1,5, 2 x 2 e 3 x 2 m) e concluíram que estes tiveram influência significativa no crescimento em diâmetro ao nível do solo e na área de copa das árvores destas espécies, sendo os espaçamentos mais amplos responsáveis pelos maiores valores para estas variáveis.

Para a espécie *Schizolobium amazonicum*, aos com 60 meses de idade, em Sinop, MT, Rondon (2002) constatou que os maiores espaçamentos testados (4 x 3 e 4 x 4 m) foram os que proporcionaram os maiores crescimento das árvores, enquanto que nos espaçamentos mais reduzidos (1,5 x 1,5, 2 x 2, 3 x 2 e 4 x 2 m) ocorreram os menores valores para altura e de diâmetro das plantas.

Estudos realizados por Vidaurre et al. (2015) encontraram efeito do espaçamento de plantio sobre o crescimento em altura de árvore de *Eucalyptus benthamii* com cinco anos de idade. Porém, essa característica não seguiu um padrão bem definido. Os autores afirmaram que em plantios realizados com mudas provenientes de sementes, a autodiferenciação, ou seja, as características genéticas das árvores podem mascarar parcialmente o efeito do espaçamento sobre as características dendrométricas das árvores.

Quanto mais amplo o espaçamento de plantio, menor e mais tardia será a competição entre as árvores em um povoamento florestal pelos recursos de crescimento, especialmente luminosidade, água e nutrientes. Este comportamento foi verificado por Schneider et al. (2015) para clones de *Eucalyptus saligna* Smith, com 18 anos de idade, na região da Serra no Sudeste do estado do Rio Grande do Sul.

Na fase inicial de crescimento, quando as árvores ainda são pequenas, o espaço vital disponível é abundante e até excessivo, e na medida em que as árvores crescem, ocorre um aumento da competição entre os indivíduos da população, desencadeando um processo até chegar a um estágio de alta competição, quando inicia a mortalidade natural de indivíduos, caracterizando o autodesbaste (SCHNEIDER et al., 2015). Para um conjunto formado por cinco espécies de árvores nativas (*Cardwellia sublimis*, *Stenocarpus sinuatus*, *Syzygium luehmannii*, *Guioa lasioneura* Radlk. e *Flindersia brayleyana*), com 4 anos de idade em região tropical no nordeste da Austrália, embora o espaçamento de plantio tenha afetado o crescimento, na fase inicial do povoamento florestal, esse efeito não foi muito relevante (PREECE et al., 2015).

2.3 Biomassa e carbono em formações florestais

Os estudos sobre biomassa e carbono por parte dos pesquisadores em várias regiões do planeta foram fortemente impulsionados pela entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, que se deu em 16 de fevereiro de 2005. O termo biomassa pode ser entendido como a massa orgânica produzida por unidade de área, podendo ser expressa em peso de matéria seca, peso de matéria úmida ou ainda em peso de carbono (ODUM, 1988). Já o conceito de fixação de carbono, normalmente se refere ao armazenamento de reservas de carbono em solos, florestas e outros tipos de vegetação (BALBINOT et al., 2003).

A quantificação da biomassa é importante para a avaliação do potencial de fixação em espécies florestais, pois parte dela corresponde ao carbono, que pode ser convertido ao equivalente de CO₂ (CO_{2eq}) para aplicação em projetos de MDL e

outros mercados de carbono (DALLAGNOL et al., 2011). Por ser o CO₂ um dos GEE que mais têm aumentado sua concentração na atmosfera nos últimos anos, esse efeito ambiental tem sido exaustivamente estudado, buscando a compreensão plena do papel das florestas na fixação do carbono (CASSOL; SALDANHA; KUPLICH, 2014).

As florestas também podem ser solução para minimizar os efeitos do aquecimento global, pois a sua conservação evita as emissões de gases de efeito estufa – GEE e os reflorestamentos permitem a remoção de CO₂ da atmosfera através da fotossíntese. Além disso, o uso da madeira como um substituto para outras matérias primas reduz as emissões de carbono nos produtos finais (SANQUETTA; DALLA CORTE; MAAS, 2011). Elas possuem um papel importante do ponto de vista ambiental, sobretudo pelos serviços ambientais prestados, como a manutenção do clima, dos regimes hidrológicos e da biodiversidade, na purificação do ar e na fixação de dióxido de carbono da atmosfera.

É importante esclarecer que as florestas exercem um importante papel no contexto das alterações climáticas, seja como vetores ou como vítimas do problema. Como vetores, as florestas contribuem para o aquecimento global, devido ao desmatamento, queimadas, emissões de CO₂ devidas à decomposição de resíduos vegetais e emissões de carbono estocado no solo. Como vítimas, as florestas têm de se adaptar a um mundo de mudança climática agravada pelo aquecimento global (SANQUETTA; DALLA CORTE; MAAS, 2011).

Para o plantio de florestas com objetivo de capturar CO₂ deve-se dar prioridade às espécies que apresentem folhas perenes, pois estas realizam fotossíntese durante todo o ano, além de espécies de rápido crescimento (PAIVA e VITAL, 2003). Os pesquisadores ressaltam ainda que ao se utilizar a madeira proveniente destes plantios, o CO₂ pode retornar para a atmosfera, e por isto, observadas a características químicas da madeira, deve-se dar prioridade de uso para este material em produtos que tenham a maior duração possível para aumentar o rendimento líquido na fixação de carbono.

Frequentemente são encontrados na literatura trabalhos que utilizam o fator de 0,50, de forma generalizada, para converter a biomassa em carbono em espécies florestais, conforme sugerido pelo IPCC (2003). Entretanto, em seu Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa de 2006, o IPCC (2006), sugere fatores mais específicos para conversão da biomassa acima do solo em carbono, a

saber: para quaisquer componentes 0,47; para a madeira de árvores com DAP < 10 cm 0,49; para a madeira de árvores com DAP ≥ 10 cm 0,46; folhagem em geral 0,47; folhagem de árvores com DAP > 10 cm 0,43; e folhagem de árvores com DAP ≥ 10 cm 0,46. Com o objetivo de aumentar a precisão das estimativas do estoque de carbono em formações florestais, vários pesquisadores têm utilizado valores mais ajustados para esta conversão, a exemplo de Dallagnol et al. (2011), Sanquetta et al. (2013), Behling et al. (2014) e Cubas; Costa; Zaniz (2016).

Trabalhando com diferentes espécies de árvores, Dallagnol et al. (2011) observaram que existem diferenças significativas entre os teores de carbono, por espécies e também por compartimentos da árvore, apontando para a necessidade de uso de teores específicos quando são necessárias estimativas precisas sobre estoque de carbono. Estes autores encontraram os maiores teores de carbono nos compartimentos casca, madeira e raízes para *Pinus taeda*, com 44,68, 45,36 e 43,98%, respectivamente. Os menores teores médios de carbono foram observados para *Eucalyptus grandis*, nos compartimentos casca, galhos, madeira e raízes, com 39,46, 42,06, 42,61 e 42,20%, respectivamente.

Em um plantio de *Pinus taeda* aos cinco anos de idade, no Rio Grande do Sul, Balbinot et al. (2003) constataram que a madeira foi o compartimento que apresentou a maior quantidade de carbono fixado por hectare, representando mais de 44% da quantidade total, devido esta representar também a maior parte da biomassa seca da árvore. Porém, o maior teor de carbono foi encontrado nas acículas (47,3%). Os autores ainda concluíram com este trabalho, que o carbono orgânico total fixado pelas raízes com diâmetro maior ou igual a 1 cm, até 100 cm de profundidade no solo, foi de 3,6 Mg ha⁻¹, sendo que a profundidade de 0-20 cm respondeu por 77% desse total.

Fatores ambientais como água e nutrientes, por exemplo, podem afetar a produção de massa seca e conseqüentemente interferir no balanço de carbono. Em função da importância que a variável teor de carbono possui na estimativa dos estoques de carbono presentes na biomassa florestal e, em função das diferenças entre os teores de carbono encontrados em estudos científicos, torna-se importante que mais estudos demonstrem, para as mais diversas situações, esses valores (DALLAGNOL et al., 2011).

2.4 Métodos para obtenção da biomassa e do carbono

Os métodos para obtenção da biomassa e do carbono em florestas normalmente se resumem a duas formas: métodos diretos e métodos indiretos. No primeiro método prevalece o princípio de determinação, ou seja, a biomassa é obtida por meio da pesagem direta do material e o estoque de carbono é calculado utilizando o teor de carbono determinado na amostra. No segundo método prevalece o princípio de estimação, em que a biomassa e ou o estoque de carbono são obtidos de forma indireta por meio de variáveis, como por exemplo, DAP e altura, que são empregadas como variáveis independentes no ajuste de equações de regressão ou por meio de relação entre fatores, como por exemplo, o fator de expansão da biomassa (FEB) e a razão de raízes (R). No método indireto as árvores não precisam ser abatidas, gerando assim, menor custo e dispêndio de tempo para a obtenção dos dados. Por estas razões, este método é vantajoso em relação ao método direto.

O uso de modelos de regressão para estimativa da biomassa é o procedimento mais comum nos trabalhos científicos. Na maioria dos casos, ele é recomendado, pois estas equações oferecem previsões em função das variáveis dendrométricas, que são de fácil medição e simples aplicação. Contudo, em termos de precisão, nem sempre são satisfatórias, já que seus ajustes podem resultar em níveis de erro acima dos toleráveis em mensuração florestal, particularmente se a base de dados utilizada nos ajustes apresentar inconsistências (SANQUETTA et al., 2014).

Uma alternativa metodológica para estimar a biomassa e o estoque de carbono é o ajuste de equações de volume do fuste (VF), que é comumente estimado em inventários florestais convencionais e geralmente obtido com alto nível de precisão, combinado com fatores que extrapolam a massa do fuste para toda a biomassa aérea e adicionalmente à biomassa subterrânea. Estes fatores são chamados de Fator de Expansão de Biomassa (FEB) e Razão de Raízes (R) (SANQUETTA; DALLA CORTE; SILVA, 2011).

As estimativas que utilizam equações alométricas são extremamente úteis para obter dados que, de outra forma, não estão disponíveis ou que demandam alto esforço para sua aquisição. No entanto, a utilização generalizada de equações

desenvolvidas para outros locais, espécies e idades, carregam, inerentemente, incertezas nas estimativas (NJANA et al., 2015).

No estudo realizado por Torres et al. (2013), o uso de equações alométricas generalizadas para tipologias vegetais, sugeridas pelo IPCC (2003), apresentou tendência de subestimar a biomassa e o carbono de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual regenerado naturalmente no município de Viçosa, MG, em comparação ao uso de equações regionais. Os autores ressaltaram que, apesar deste resultado, o uso das equações do IPCC é de grande importância para nortear pesquisas de carbono, principalmente quando não se dispõe de equações alométricas apropriadas para cada região e que por este motivo, são necessários estudos em outras florestas, visando obter padronização nas metodologias e melhorar os bancos de dados e as bases comparativas entre os estudos.

Cabe ressaltar que um compartimento que não deve ser ignorado nos estudos de quantificação de carbono é o solo, tendo em vista que ele normalmente é o que acumula a maior quantidade de carbono no ecossistema. A massa de carbono orgânico do solo se refere à massa para uma determinada profundidade, e é estimada em função da percentagem de carbono determinada na fração < 2 mm do solo e da densidade aparente (AMUNDSON, 2001).

A entrada de carbono orgânico no solo depende da entrada de material orgânico por meio da senescência de componentes da biomassa acima e abaixo do solo, queda das folhas, resíduos das árvores e de animais mortos, com suas respectivas taxas de decomposição. Entretanto, no início do estabelecimento de florestas naturais e plantações florestais, a produção de serapilheira é baixa, aumentando com a idade, podendo posteriormente ocorrer redução (BALBINOT et al., 2003).

Quando se trata do compartimento raízes, os estudos de quantificação de biomassa em formações florestais as metodologias ainda estão em desenvolvimento, não havendo uma padronização das metodologias e nem protocolos bem definidos (RATUCHNE et al., 2016). Os métodos comumente usados para a amostragem desse compartimento são destrutivos e envolvem muito trabalho, tempo e custo, principalmente quando se utiliza da escavação e lavagem das raízes. Além disso, uma quantidade considerável de raízes finas e mortas é perdida durante a lavagem (SUBEDI; MA; LIANG, 2006). Esses mesmos autores relatam que

existem métodos mais modernos e menos custosos para estimar o crescimento, a massa e o comprimento de raízes, por exemplo, análise de imagens automatizadas. No entanto, estes métodos ainda não foram amplamente difundidos devido à exigência de equipamentos caros e treinamento especializado para operá-los.

A medição do sistema radicular da árvore para o propósito de biomassa e carbono é de crucial importância, pois uma parcela significativa do estoque pode estar contida nesse compartimento. Porém o acesso aos conjuntos completos de dados do sistema raiz é raro (SOCHACKI et al., 2017)

Muitos pesquisadores preferem métodos de escavação para estimar biomassa de raízes grossas, pois apesar do alto custo e mão de obra necessária, eles apresentam estimativas com maior precisão (ADDO-DANSO; PRESCOTT; SMITH, 2016). A precisão das estimativas, por meio da escavação, pode ser melhorada em 10 a 15%, em função da proximidade do ponto da amostragem em relação à árvore, tendo em vista que próximo à árvore é local onde ocorrem predominantemente raízes de grande diâmetro (SOCHACKI et al., 2017). Entretanto, a utilização de métodos indiretos ou também conhecidos como modelos empíricos (equações alométricas, por exemplo) são amplamente utilizados para prever a biomassa das raízes finas e raízes grossas nos estudos de carbono, e estas apresentam uma alternativa menos onerosa aos métodos diretos (ADDO-DANSO; PRESCOTT; SMITH, 2016).

Com base em uma extensa revisão de literatura e em uma análise comparativa, Addo-Danso, Prescott e Smith (2016) recomendam que o método de escavação como adequado para estimar a biomassa de raiz grossa, pois este pode funcionar como um fator intermediário entre o custo e a eficiência. Sochacki et al. (2017), em observância as recomendações dos primeiros autores citados neste parágrafo, aplicaram o método de escavação, com diferentes profundidades, para a amostragem de raízes em *Eucalyptus globulus* (Labill.), com 2 e 7 anos de idade, no sudeste da Austrália e constataram que aproximadamente metade da massa radicular foi encontrada nos primeiros 0,5 m de profundidade do solo e 85% até a profundidade de 1,0 m, considerando as duas idades avaliadas.

3 METODOLOGIA

3.1 Implantação e condução do povoamento

O povoamento de *A. peregrina* objeto desse estudo foi implantado em junho de 2011, sendo o uso anterior da área feito por pastagem composta por *Brachiaria* sp., controlada exclusivamente pela herbivoria do gado e sem aplicações de fertilizantes a pelo menos 40 anos. Foram selecionados três locais na área, os quais apresentavam diferentes declividades e área mínima de 8,5 ha para a instalação do experimento. Para permitir o controle local, o plantio foi estabelecido na forma de blocos (3), em cinco espaçamentos (3 x 2, 3 x 3, 4 x 3, 4 x 4 e; 5 x 5 m) e com três repetições (parcelas) de 1500 m² de área em cada um dos blocos, totalizando assim, 45 unidades amostrais (Figura 1). A distribuição das parcelas no interior de cada bloco foi feita por sorteio.

Figura 1 – Esquema representativo do delineamento utilizado no plantio de *A. peregrina*, com distribuição das parcelas e em diferentes espaçamentos, em Rive, Alegre, ES

BLOCO 1			BLOCO 2			BLOCO 3		
3X2 m	4X4 m	3X2 m	5x5 m	4x4 m	3X2 m	4x3 m	3x2 m	4x4 m
4x3 m	3x3 m	4X4 m	3x3 m	3x3 m	4x3 m	5x5 m	4x4 m	4x3 m
5x5 m	4X4 m	5x5 m	4x4 m	3X2 m	5x5 m	3x3 m	3x3 m	3x2 m
3x3 m	4x3 m	3x3 m	4x3 m	4x3 m	4x4 m	5x5 m	3x2 m	5x5 m
5x5 m	3X2 m	4x3 m	5x5 m	3X2 m	3x3 m	3x3 m	4x4 m	4x3 m

Total: 5 tratamentos x 3 repetições x 3 blocos = 45 unidades amostrais (30 x 50 m)

Fonte: o autor.

No preparo do terreno para a implantação florestal, o gado foi retirado e foi feito o dessecamento da pastagem mediante a aplicação de glifosato. Na sequência, foi feita a marcação e abertura das covas, que tinham dimensões de 0,30 m de largura por 0,30 m de profundidade e na sequência foi realizado plantio das mudas. No momento do plantio, as mudas de *A. peregrina* apresentavam altura da parte aérea em torno de 0,50 m, tendo estas sido produzidas no viveiro da Reserva Natural Vale, em Sooretama, ES.

A adubação de plantio foi feita com a adição de 220 g de adubo granulado N-P-K na formulação 02-30-06 por cova. Este formulado continha ainda na sua composição 0,2% de B, 0,2% de Cu e 0,2% de Zn. A manutenção das plantas foi

realizada durante aproximadamente um ano após o plantio, sendo aplicadas as ações de replantio, coroamento ao redor das mudas, roçada manual e adubação de reforço.

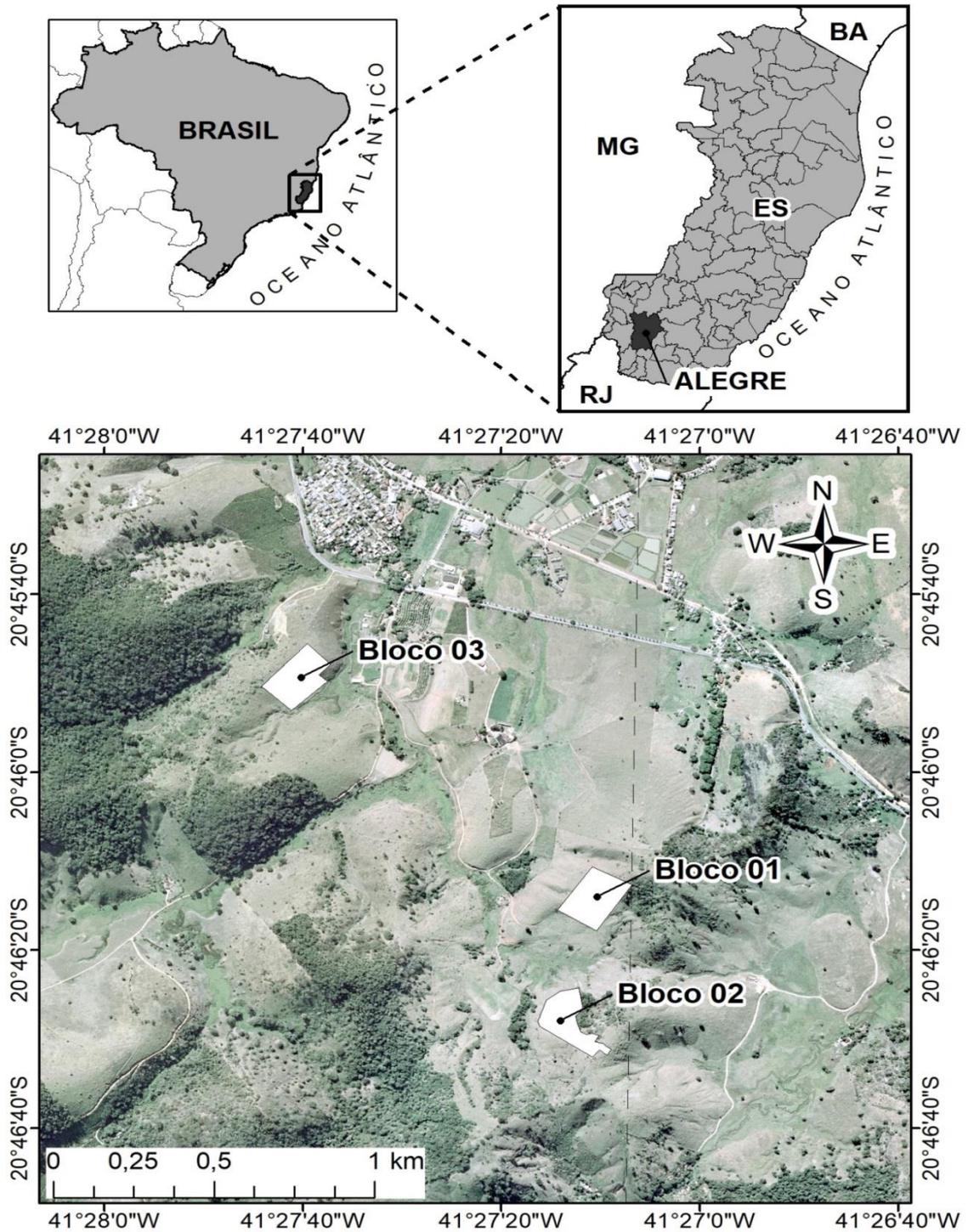
3.2 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes, em Rive, Alegre, ES, Brasil. A área está inserida na bacia hidrográfica do Rio Itapemirim (GASPARINI, 2014) e tem como coordenada geográfica central 20°46'15,46" de latitude Sul e 41°27'13,04" de longitude Oeste. As parcelas com plantio de *A. peregrina* ocupam uma área útil de 6,75 ha e foram distribuídas em 3 blocos (Figura 2).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, marcante pela ocorrência de verão chuvoso e inverno seco (ALVAREZ et al., 2013). A temperatura e precipitação média no período de crescimento das árvores foram de 23,9°C e 1.222 mm, respectivamente, tendo por base os dados da Estação Meteorológica Automática, localizada em Rive, e que foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INEMET).

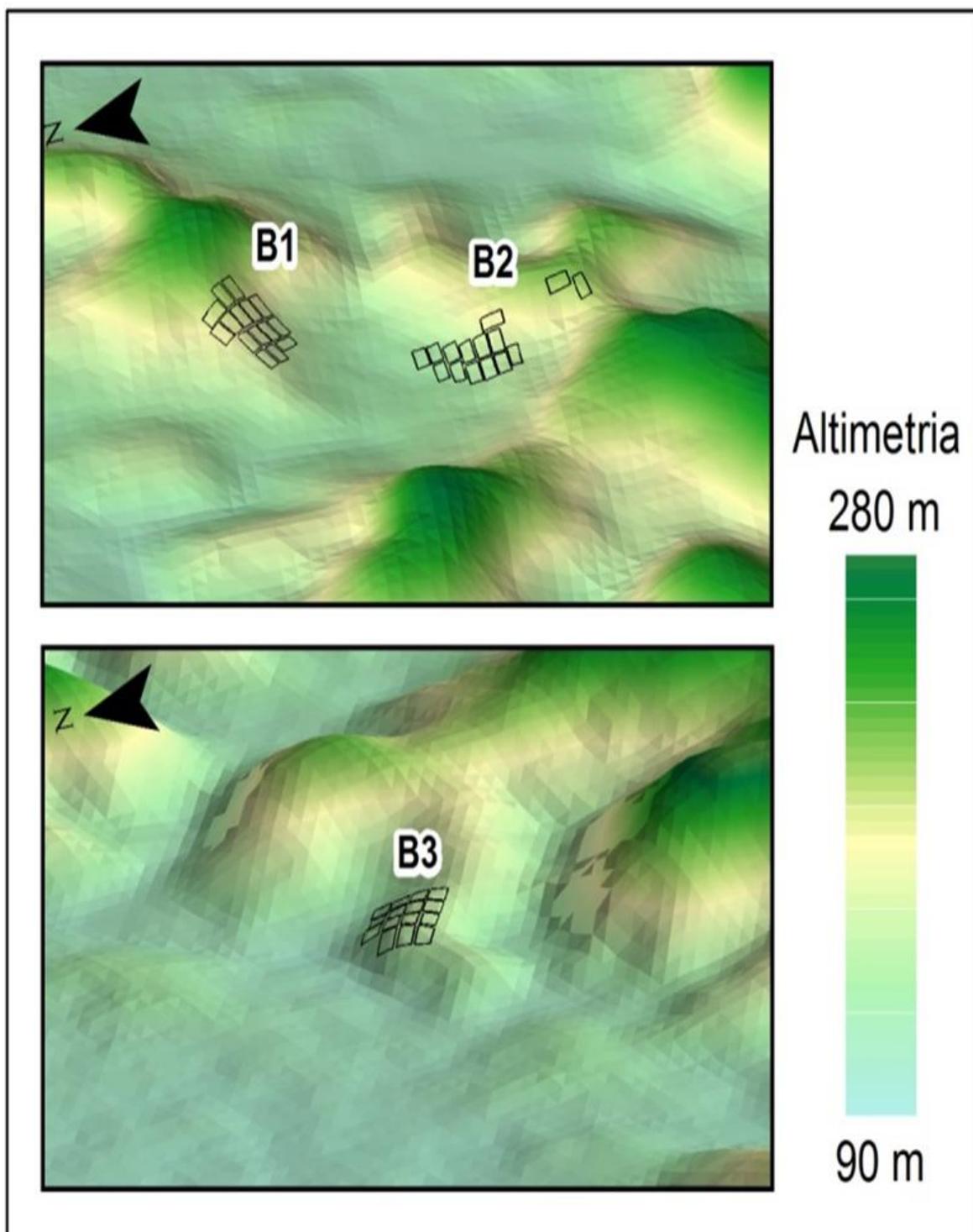
Na região de Rive, distrito de Alegre-ES predomina o relevo do tipo montanhoso, sendo marcante a presença de cadeias de montanhas e de pontões, onde a altitude em relação ao nível do mar pode variar de 90 até 280 m (Figura 3). No local onde foi implantado o experimento, considerando os três blocos, a altitude variou entre 133 e 205 m. O relevo deste local foi classificado como do tipo Faixa de Dobramentos Remobilizados, de acordo com o mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo (IJSN, 2012). Segundo os autores, essas faixas caracterizam-se pelas evidências de movimentos crustais, com marcas de falhas, deslocamentos de blocos e falhamentos transversos, impondo nítido controle estrutural sobre a morfologia atual. Ainda de acordo com IJSN (2012), a porcentagem de área do estado ocupado por este tipo de relevo é de 51%, sendo a maior parte desse total encontrada na região sul e central do estado e uma pequena área na região norte.

Figura 2 – Localização da área de estudo com indicação dos blocos onde foi instalado o experimento com *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

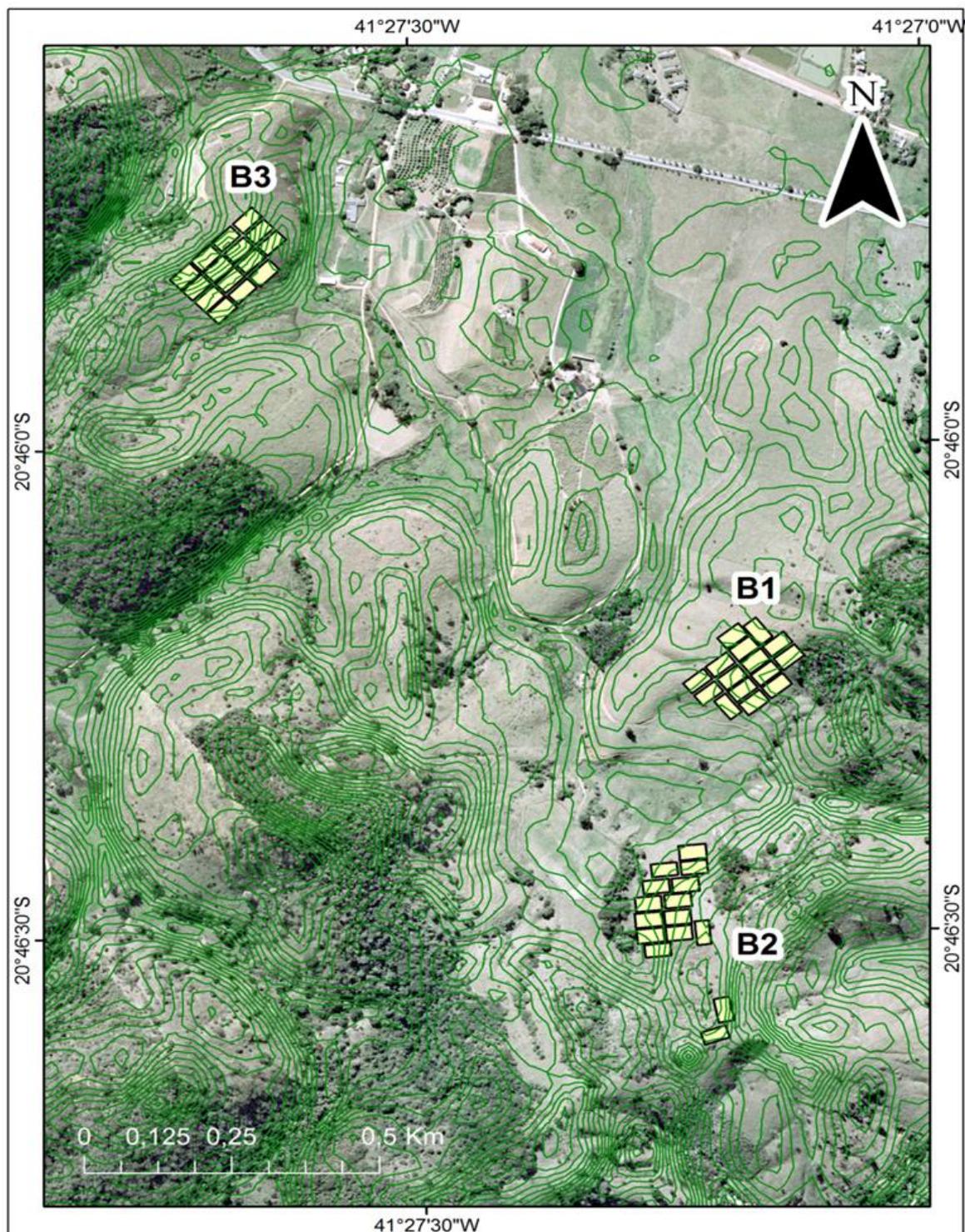
Figura 3 – Modelo digital de elevação com indicação da distribuição espacial das parcelas e a altitude nos três blocos experimentais com plantio de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

Na área do Ifes campus de Alegre ocorrem formações que se caracterizam por declividades acentuadas com ocorrência de áreas úmidas e brejosas nos fundos de vales (Figura 4).

Figura 4 – Modelo digital de elevação com a distribuição espacial das parcelas e das curvas de nível nos três blocos com plantios de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

Não houve alta variação da altitude entre as parcelas no interior de cada bloco, com coeficiente de variação inferior a 10% para todos os blocos. Já a

declividade variou consideravelmente, especialmente no Bloco 3, onde o coeficiente variação foi próximo de 50 %.

De acordo com o mapeamento dos solos do local, realizado pelo Ifes (1984, dados não publicados), com nova nomenclatura dada pela EMBRAPA (2006), o experimento, composto por três blocos, foi instalado em sítios com ocorrência de três classes de solo, sendo: Bloco 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; Bloco 2 - Cambissolo háplico eutrófico e; Bloco 3 - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.

Em setembro de 2010 (nove meses antes da implantação do experimento, sendo este considerado “tempo zero”) foi realizada a retirada de amostras de solo na área para averiguação das características químicas e físicas do mesmo. Os resultados destas análises mostraram que o solo no Bloco 3 possui menor saturação por bases (< 50%) em relação aos blocos 1 e 2, sendo classificado como distrófico. Os valores de saturação por bases nos blocos 1 e 2 foram superiores a 60% (Tabela 1). Com relação à textura, nos três blocos predomina textura argilosa, especialmente na profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 2).

Tabela 1 – Valores médios dos atributos do solo, para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm, aos nove meses (setembro de 2010) antes da implantação do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES

	Profundidade (cm)	pH	S	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H + Al	C	MO	CTC(t)	CTC(T)	SB	V	m	ISNa
		H ₂ O	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			g kg ⁻¹		cmol _c dm ⁻³			%				
Bloco 1	0-20	5,97	3,76	2,00	75,08	4,83	3,50	2,02	0,00	2,92	12,17	20,99	5,73	8,65	5,73	66,22	0,00	0,24
	20-40	5,92	6,00	2,70	39,17	4,92	4,21	2,07	0,00	1,69	5,25	9,06	6,41	8,09	6,41	79,16	0,00	0,26
Bloco 2	0-20	6,01	2,86	1,90	68,59	5,12	4,36	2,26	0,00	2,88	14,39	24,81	6,83	9,71	6,83	70,32	0,00	0,23
	20-40	6,06	4,33	1,94	41,82	6,65	4,70	2,04	0,02	2,06	6,93	11,95	6,89	8,93	6,87	76,95	0,34	0,32
Bloco 3	0-20	5,49	9,09	2,26	66,67	1,83	1,18	1,00	0,20	3,05	12,21	21,04	2,56	5,41	2,36	43,59	7,66	0,15
	20-40	5,28	10,19	2,03	42,08	3,08	0,93	0,80	0,30	2,69	8,41	14,50	2,16	4,55	1,85	40,75	14,10	0,29
		Profundidade (cm)	Fe			Cu			Zn			Mn			B			
			mg dm ⁻³															
Bloco 1	0-20		140,27			2,07			5,52			131,03			0,10			
	20-40		53,53			1,48			2,81			42,64			0,13			
Bloco 2	0-20		113,18			0,84			3,08			71,27			0,13			
	20-40		103,91			0,85			2,26			41,66			0,11			
Bloco 3	0-20		65,03			0,46			3,49			30,13			0,10			
	20-40		48,91			0,39			4,30			18,36			0,13			

pH em água - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator Mehlich-1; Ca - Mg - Al - Extrator KCl - 1 mol L⁻¹; H + Al -- Correlação com pH SMP; B - Extrator água quente; SB - Soma de bases trocáveis; t - Capacidade de troca catiônica efetiva; T - Capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC); V - Índice de saturação em bases; m = Índice de saturação em alumínio; ISNa - Índice de saturação em sódio; C = Carbono orgânico (Oxidação por via úmida); MO - Matéria orgânica (C x 1,724).

Tabela 2 – Valores médios para argila, silte, areia e densidade do solo (DS) na profundidade de 0-20 e de 20-40 cm, aos nove meses (setembro de 2010) antes da implantação do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES

	Profundidade cm	Argila	Silte	Areia	Ds
					g cm ⁻³
Bloco 1	0-20	35,42	13,56	51,02	1,49
	20-40	44,76	12,29	42,95	1,51
Bloco 2	0-20	31,65	11,93	56,42	1,53
	20-40	37,22	13,83	48,95	1,55
Bloco 3	0-20	36,44	7,71	55,85	1,55
	20-40	48,32	4,87	46,80	1,54

Todas as análises de solo no tempo zero, de acordo com os procedimentos descritos pela EMBRAPA (1997), foram realizadas no laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira – DCMF/CCAE da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro, ES.

3.3 Caracterização dendrométrica do povoamento

Como subsídio para a caracterização dendrométrica, entre os meses de fevereiro e março de 2015 (44 meses após o plantio), foi realizado o inventário florestal do povoamento. Por meio de uma fita diamétrica, foi realizada a medição da circunferência a altura de 1,30 m do solo (CAP) de todas as árvores presentes no interior das parcelas, sendo o nível de inclusão CAP \geq 10,0 cm. Para o processamento dos dados do inventário florestal, os valores de CAP foram convertidos em diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) por meio da equação 1 (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011):

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

Em que:

DAP = diâmetro a 1,30 m acima do solo, em cm;

CAP = Circunferência a 1,30 m acima do solo, em cm e;

π = constante (3, 1416).

A medição da altura total (Ht) das árvores foi feita de forma direta com a utilização de uma régua telescópica com extensão máxima de 11,0 m. Foram

medidas 30 árvores em cada unidade amostral, totalizando 270 em cada tratamento. Estas árvores foram selecionadas de forma sequencial nas linhas centrais de cada unidade amostral.

De posse dos pares de dados de DAP e Ht foram ajustados modelos hipsométricos para cada espaçamento de plantio. Os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram selecionados com base no coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e no erro padrão residual (Syx). Os resultados das melhores equações ajustadas para a estimativa da Ht das árvores, em cada espaçamento com seus respectivos valores de $R^2_{aj.}$ e Syx são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Equações ajustadas e suas respectivas estatísticas para a estimativa da Ht das árvores de *A. peregrina*, aos 44 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Equação	$R^2_{aj.}$ (%)	Syx (%)
3 x 2	$Ht = 2,02276 + 0,834053 * DAP - 0,0274464 * DAP^2$	54,17	13,62
3 x 3	$Ht = 8,3655 / (1+EXP ((3,3654 - DAP) / 2,9517))$	60,35	12,74
4 x 3	$Ht = 8,6105 / (1+EXP ((4,1175 - DAP) / 3,2164))$	71,89	12,95
4 x 4	$Ht = EXP (2,27778 - 3,3881 * 1 / DAP)$	64,45	13,36
5 x 5	$Ht = 1,908462 + 0,582306 * DAP - 0,008698 * DAP^2$	71,83	13,00

$R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro padrão residual; Ht = altura total (m) e DAP = diâmetro a 1,30 m do solo.

Fonte: o autor.

Para estimativa da biomassa foram abatidas em campo 45 árvores, sendo 9 indivíduos em cada espaçamento. A seleção das árvores abatidas foi feita de acordo com a distribuição dos diâmetros, considerando a média aritmética acrescida ou reduzida do desvio padrão, conforme utilizado por Valério et al. (2016) (Tabela 4).

Tabela 4 – Critérios de seleção e quantidade de árvores de *A. peregrina* abatidas para a obtenção da biomassa individual

Critério de seleção	Quantidade			
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Total
Árvore igual ao dg	1	1	1	3
Árvore igual ao dg + 1S _d	1	1	1	3
Árvore igual ao dg - 1S _d	1	1	1	3
Total/tratamento				9

dg = diâmetro relativo à área seccional média do tratamento, em cm e S_d = desvio padrão dos diâmetros em cada tratamento.

Fonte: o autor.

Com o auxílio de uma suta mecânica, foram selecionadas para o abate as árvores na região central das parcelas que apresentaram o DAP médio o mais próximo do valor obtido na aplicação do critério de desvio-padrão. Na cubagem, foi medido o comprimento total da árvore e do fuste até a inserção da primeira bifurcação que caracterizasse de forma clara a sua subdivisão. Esta medição foi feita por meio de uma trena. O fuste foi então subdividido em seções com comprimento máximo de 1,0 m, sendo o diâmetro do fuste com casca e a espessura da casca no início e final de cada seção mensurados com auxílio de uma suta mecânica e de um paquímetro digital, respectivamente.

As variáveis dendrométricas avaliadas neste estudo foram: número de indivíduos (N); DAP (cm), Ht (m), área basal ($m^2 ha^{-1}$) e volume do fuste com casca ($m^3 ha^{-1}$) conforme a Tabela 5. A estimativa dessas variáveis foi feita conforme sugerido por Soares, paula neto e Souza (2011).

Tabela 5 – Valores médios das variáveis dendrométricas avaliadas no povoamento de *A. peregrina*., aos 44 meses após o plantio, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	N (ind./ha)	DAP (cm)	G ($m^2 ha^{-1}$)	Ht (m)	E_c (cm)	VF ($m^3 ha^{-1}$)
3 x 2	1373	6,57	5,17	6,18	0,21	16,36
3 x 3	844	7,14	4,00	6,28	0,22	12,86
4 x 3	609	7,28	3,06	6,01	0,23	9,67
4 x 4	459	7,42	2,55	5,86	0,26	7,52
5 x 5	383	8,97	2,79	6,33	0,32	9,03
Média	733	7,47	3,52	6,13	0,25	11,09
CV (%)	48,61	10,70	27,41	2,87	16,60	28,50

N = número de indivíduos; DAP = diâmetro a 1,3 m acima do solo; G = área basal; Ht = altura total; E_c = espessura de casca e; VF = volume do fuste com casca.

Fonte: o autor.

A partir dos valores de DAP, Ht e volume do fuste das 45 árvores abatidas foi utilizado o modelo de regressão descrito por Spurr ($Vol = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 * Ht + \varepsilon$) para estimar o volume das demais árvores do povoamento. A equação ajustada por este modelo foi: $Vol = 0,001107 + 0,00003327 DAP^2 * Ht$, apresentando $R^2_{aj.} = 0,95$ e $S_{yx} = 17,03\%$.

O volume do tronco com casca foi calculado utilizando o método de Smalian, conforme a equação 3:

$$V = \frac{(AS_1 + AS_2)}{2} \quad (3)$$

Em que:

V = volume do fuste com casca, em m^{-3} ;

AS_1 = área seccional na extremidade 1 da seção do fuste, em m^2 ;

AS_2 = área seccional na extremidade 2 da seção do fuste, em m^2 .

A distribuição das frequências das árvores do povoamento, por classe de diâmetros e de altura total, respectivamente estão nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6– Distribuição de frequências das árvores do povoamento de *A. peregrina* por espaçamento e por classes de diâmetro, aos 44 meses após o plantio

Centro de classe de diâmetro (cm)	Espaçamento (m x m)				
	3 x 2	3 x 3	4 x 3	4 x 4	5 x 5
4	488	202	152	131	52
6	634	299	202	148	99
8	502	356	229	142	136
10	164	204	158	101	89
12	50	59	61	63	75
14	12	14	15	29	41
16	4	5	5	5	20
18	0	0	0	0	5
Total	1854	1139	822	619	517

Fonte: o autor.

Tabela 7– Distribuição de frequências das árvores do povoamento de *A. peregrina* por espaçamento de plantio e classes de altura total, aos 44 meses após o plantio

Centro de classe de altura (m)	Espaçamento (m x m)				
	3 x 2	3 x 3	4 x 3	4 x 4	5 x 5
3	21	19	38	34	28
5	773	379	294	249	188
7	958	637	432	307	227
9	97	103	54	29	65
11	5	1	4	0	9
Total	1854	1139	822	619	517

Fonte: o autor.

3.4 Amostragem da biomassa acima do solo

Nas 45 árvores abatidas foi quantificada a biomassa dos compartimentos acima do solo (fuste, galhos e folhas). Neste procedimento, as árvores foram pesadas individualmente, considerando cada compartimento separadamente, obtendo-se o peso úmido no campo, em kg, para cada um deles, bem como o peso úmido total de cada árvore.

De cada um desses compartimentos foram retiradas amostras para obtenção da sua massa seca em laboratório. A tomada de amostras foi realizada de acordo com o procedimento adotado por Dallagnol et al. (2011) e por Rondon (2002). Assim, para a amostragem de folhas foram retiradas subamostras na ponta, no meio e na base dos galhos localizados no terço médio da copa. Para a amostragem dos galhos foram retiradas porções no terço inferior, médio e superior da copa da árvore, contendo galhos com diâmetro $\geq 1,0$ cm e englobou, além dos galhos vivos, os galhos secos ou mortos que ainda se encontravam presos à árvore no momento da amostragem.

Para a amostragem da madeira, de cada árvore foram retirados dois discos com aproximadamente 5,0 cm de espessura em cada posição: base, DAP, 1/2 do comprimento do fuste e topo do fuste. Um disco de cada posição foi utilizado para determinação dos teores de carbono e o outro disco foi destinado à determinação da densidade básica da madeira. Para a casca foram retiradas porções em diferentes alturas ao longo do fuste, considerando o terço inferior, médio e superior, para formar uma amostra composta representativa de cada árvore.

Na quantificação da biomassa individual, ou seja, a biomassa de cada árvore abatida, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel pardo, devidamente identificados, e transferidas para o NUPEMASE (Núcleo de Pesquisa Científica e Tecnológica em Meio Ambiente, Silvicultura e Ecologia) da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, em Jerônimo Monteiro, ES, onde foram previamente pesadas em balança portátil com precisão de 0,01 kg para a determinação do peso fresco. Na sequência as amostras foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C, para serem secas até obterem peso constante,

possibilitando a obtenção do teor de umidade e posteriormente da massa seca das mesmas.

No caso das amostras referentes aos discos de madeira do fuste, após a obtenção do peso seco da amostra com casca, estas duas frações foram individualizadas, de modo a obter também o peso seco de casca na amostra e a porcentagem de casca no fuste. A biomassa seca individual para cada árvore amostrada, considerando cada compartimento separadamente (fuste, galhos e folhas), foi calculada por meio da equação 4, utilizada por Soares; Paula Neto; Souza (2011).

$$PS(c) = \frac{PU(c) * PS(a)}{PU(a)} \quad (4)$$

Em que:

$PS(c)$ = biomassa, em kg;

$PU(c)$ = peso total de matéria úmida do compartimento (fuste, folhas, galhos, raízes ou necromassa), em kg;

$PU(a)$ = peso úmido da amostra, em kg;

$PS(a)$ = peso seco da amostra, em kg.

A biomassa de casca do fuste, em cada espaçamento, foi calculada utilizando-se a porcentagem média de casca neste compartimento, por meio da equação 5:

$$Bio\ Casca = \frac{BioFuste \times \% Casca}{100} \quad (5)$$

Em que:

$Bio\ casca$ = biomassa de casca, em kg;

$Bio\ Fuste$ = biomassa do fuste, em kg;

% Casca = porcentagem média de casca no fuste.

A biomassa populacional dos componentes da árvore acima do solo (total e frações), foi estimada a partir dos valores individuais obtidos das 45 árvores abatidas. Para isto, foram testados modelos de regressão que expressam a biomassa em função do DAP e da Ht. O modelo que melhor se ajustou aos dados com base no R^2_{aj} e no Syx e, portanto, adotado nesse estudo, tanto para biomassa total quanto para as frações, foi o descrito por Spurr, cujas estatísticas e equações ajustadas, para cada compartimento, são apresentadas a seguir (Tabela 8).

Tabela 8 – Equações ajustadas para estimativa da biomassa total e dos compartimentos da árvore acima do solo para a população de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Compartimento	Equação ajustada	R ² aj.	Syx (%)
Fuste	$Bio = 1,3085724 + 0,0185399*(DAP^2Ht)$	92,80	18,99
Folhas	$Bio = 1,5169484 + 0,0039595*(DAP^2Ht)$	46,96	47,70
Galhos	$Bio = 0,676983 + 0,022195*(DAP^2Ht)$	74,92	42,04
Casca	$Bio = 0,4311420 + 0,0016197*(DAP^2Ht)$	82,52	23,85
Total	$Bio = 3,561821 + 0,044706*(DAP^2Ht)$	88,60	24,09

R²aj. = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro padrão residual; Bio = biomassa; DAP = diâmetro a 1,30 m do solo e Ht = altura total da árvore.

Fonte: o autor.

3.5 Amostragem da biomassa de raízes e da necromassa

A amostragem da biomassa de raízes foi realizada somente no Bloco 3 e resultou em um total de 15 árvores amostradas, sendo as mesmas três árvores derrubadas para a avaliação da biomassa acima do solo, em cada espaçamento de plantio. Na retirada das raízes foi utilizada uma retroescavadeira pneumática, sendo todas as raízes encontradas, até 1,0 m de profundidade, quantificadas. A escavação se deu na área aproximada da projeção da copa, o que resultou em áreas escavadas variando entre 6,0 e 9,0 m². Após a escavação, as raízes foram separadas do solo por meio de uma peneira com malha de 1,0 x 1,0 cm. Em seguida, as mesmas foram limpas com pano úmido e pesadas em balança portátil para a obtenção do peso úmido total no campo. Não foi possível fazer a separação das raízes por classe de diâmetro.

De cada árvore foi retirada uma amostra representativa do sistema radicular, contendo raízes com diferentes diâmetros, as quais foram lavadas em água corrente, postas para secar ao ar livre para retirar o excesso de água. Em seguida as raízes transferidas para NUPEMASE para realização do procedimento de

obtenção da massa seca, tal como adotado para os componentes da parte aérea da árvore e utilizando a equação 4.

A biomassa populacional de raízes (expresso em Mg ha⁻¹) até 1,0 m de profundidade foi estimada usando os valores médios de três árvores por espaçamento. Primeiramente, foi realizada uma análise de correlação linear simples, ao nível de 5% de significância, para verificar quais as variáveis que melhor se correlacionaram com a biomassa de raízes (BIOR). O produto (DAP x Ht) foi a variável que apresentou a melhor correlação com a variável investigada ($r = 0,70$), sendo esta empregada no ajuste de modelos para a estimativa da BIOR. O modelo que apresentou significância para os coeficientes dos parâmetros da regressão e que melhor se ajustou aos dados, assim como ocorreu para os compartimentos da parte aérea, foi também neste caso, o modelo de Spurr A equação ajustada para estimativa da biomassa de raízes (equação 6), apresentou $R^2_{aj.} = 0,48$ e $S_{yx} = 46,10\%$.

$$Y = -1,5018 + 0,16346 (DAP * Ht) \quad (6)$$

A necromassa ou fração da biomassa morta, neste trabalho, refere-se à massa dos galhos caídos sobre o piso do povoamento. Esse material foi classificado como massa lenhosa fina, onde os galhos apresentavam diâmetro inferior a 5,0 cm (MAAS, 2015). A amostragem deste compartimento foi feita somente no Bloco 3, tal como as raízes, totalizando 15 parcelas amostradas. Esta amostragem feita em uma única coleta em meados do período de menor precipitação (mês de agosto de 2016), empregando-se microparcels de área fixa, demarcadas com um molde vazado (gabarito confeccionada em PVC) com dimensões de 2,0 x 2,0 m.

As microparcels foram alocadas de forma sistemática. Assim, foram feitas três subamostragens por parcela, sendo uma na região central e outras duas nas extremidades da parcela excluindo duas linhas de bordadura. Todos os galhos localizados no interior do gabarito foram pesados com auxílio de uma balança portátil, obtendo-se o peso úmido em campo. Para cada unidade experimental foi retirada uma amostra composta e representativa dos galhos, com diferentes diâmetros para a determinação do peso seco em laboratório. A obtenção da massa seca deste compartimento seguiu o mesmo procedimento dos componentes da parte aérea e das raízes das árvores e foi calculada por meio da equação 4.

Para a estimativa da necromassa, em termos populacional, foram testados modelos que expressassem esta variável em função da área. Entretanto, não se obteve ajuste significativo frente à variável independente. A necromassa populacional (expressa em Mg ha⁻¹) foi realizada levando-se em consideração a média aritmética obtida para cada espaçamento, com 27 repetições por espaçamento.

No Quadro 1 consta um resumo da metodologia utilizada para a retirada das amostras dos compartimentos da árvore acima do solo, das raízes e da necromassa para a obtenção da biomassa.

Quadro 1 – Resumo da metodologia utilizada para a retirada de amostras em campo dos compartimentos da árvore acima do solo, das raízes e da necromassa para determinação da biomassa em *A. peregrina*

Compartimento	Árv./trat.	Total	Procedimento
Folhas	9	45	Subamostras retiradas na ponta, no meio e na base dos galhos localizados no terço mediano da copa.
Galhos	9	45	Subamostras retiradas no terço inferior, médio e superior da copa.
Casca	9	45	Subamostras retiradas na base, à meia altura e na extremidade final do fuste.
Fuste	9	45	Retirada de discos de madeira com espessura de 5,0 cm, na base, no DAP, na metade e no topo do fuste.
Raízes	3	15	Escavação até a profundidade de 1,0 m na projeção da copa e separação das raízes do solo por peneiramento (10 mm de malha).
Necromassa	3*	15*	Coleta de todos os galhos no interior do gabarito.

* Número de parcelas amostradas.

Fonte: o autor.

3.6 Determinação do teor e estimativa do estoque de carbono nos tecidos vegetais

Após a obtenção da massa seca, todas as amostras de tecido vegetal dos compartimentos da biomassa arbórea, acima do solo, raízes e necromassa, foram trituradas em moinho do tipo Wiley, peneiradas em malha de 1,0 mm (20 mesh) e armazenadas em frascos de polietileno devidamente lacrados e identificados. Em seguida, todos estes frascos foram encaminhados para o Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação de Carbono na Biomassa – BIOFIX, localizado no Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, onde foi feita a determinação dos teores de carbono. Foi utilizado nessa determinação um equipamento denominado LECO, modelo C-144 (fabricante). Este equipamento analisa o carbono pela combustão total da amostra, à temperatura de 1.000°C por cerca de 60 segundos, detectando por meio de um sensor interno a quantidade de dióxido carbono (CO₂) gerado, relacionando-o automaticamente com a quantidade de carbono elementar existente na amostra.

De posse dos valores de teor de carbono e da biomassa, foi calculado o estoque de carbono total de cada compartimento amostrado neste estudo, mediante o uso da expressão abaixo (equação 7):

$$EstC = Bio * Tc \quad (7)$$

Em que:

EstC = Estoque de carbono, em kg;

Bio = Biomassa, em kg;

Tc = Teor de carbono, em %.

3.7 Determinação da densidade básica da madeira

A determinação da densidade seguiu a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003). Foram retiradas duas cunhas, de lados opostos, de cada disco, sendo estas imersas em água a fim de se obter o volume saturado (peso fresco). Em seguida estas cunhas foram postas a secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 103 ± 2°C, até peso constante, para obtenção da sua massa seca.

Neste procedimento a densidade básica da madeira foi obtida por meio da equação 8, onde o volume da cunha de madeira equivale ao volume da água deslocada que, por sua vez, é igual à diferença de massa ($m_2 - m_1$), considerando-se a densidade da água como $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

$$db = \frac{m_3}{(m_2) - m_1} \quad (8)$$

Em que:

db = densidade básica da madeira, em g cm^{-3} ;

m_3 = massa da amostra seca em estufa a $(103 \pm 2^\circ\text{C})$, em g;

m_2 = massa do recipiente com água e disco imerso, em g;

m_1 = massa do recipiente com água, em g.

3.8 Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo

Os dados utilizados nesse estudo foram provenientes de 45 árvores-amostra, sendo estas as mesmas árvores utilizadas para amostragem da biomassa da parte aérea. Nesse estudo, a biomassa total acima do solo (folha + galhos + madeira + casca) foi estimada por dois métodos diferentes. No primeiro método a biomassa foi obtida por meio da equação de regressão, sendo esta $Y = 3,561821 + 0,044706 \cdot (DAP^2 \cdot Ht)$, com $R^2_{aj.}$ e Sy_x de 0,89 e 24,09%, respectivamente, (Tabela 9).

O segundo método de estimativa da biomassa total acima do solo testado nesse estudo, foi a utilização do fator de expansão da biomassa (FEB) (equação 9). Conceitualmente, FEB é um fator que serve para extrapolar a massa do fuste da árvore para toda a biomassa acima do solo, considerando-se os galhos e as folhas (SANQUETTA et al., 2014).

$$FEB = \frac{M_{aérea}}{M_{fuste}} \quad (9)$$

Em que:

FEB = fator expansão de biomassa, adimensional;

$M_{aérea}$ = massa seca da parte aérea, em kg;

M_{fuste} = Massa seca do fuste, em kg.

A estimativa do estoque de carbono por meio da FEB, combinado com o volume do fuste, foi feita por meio da equação 9 (SANQUETTA et al., 2014).

$$C = V * Db * FEB * TC \quad (9)$$

Em que:

C = estoque individual de carbono (kg);

V = volume do fuste, em m³;

Db = densidade básica média da madeira, em g.cm³;

FEB = fator de expansão da biomassa, adimensional e;

TC = Teor de carbono médio, em g kg⁻¹.

Na estimativa do estoque de carbono foram utilizados dois teores de carbono diferentes, a saber: 1) teor de carbono determinado em laboratório por meio do LECO (Teor_{Lab}) e 2) teor igual a 50% como indicado Pelo IPCC (2003). Por meio da combinação dos métodos de estimativa da biomassa, incluindo a obtida pela pesagem direta do material (Bio_{ref}), com os teores de carbono, foram avaliados nesse estudo, um total 5 métodos de estimativa do estoque de carbono, conforme apresentado a seguir:

M1 = estoque de carbono igual Bio_{ref} x teor_{50%};

M2 = estoque de carbono igual Bio_{reg} x teor_{Lab};

M3 = estoque de carbono igual Bio_{reg} x teor_{50%};

M4 = estoque de carbono igual Bio_{FEB} x teor_{Lab};

M5 = estoque de carbono igual Bio_{FEB} x teor_{50%}.

3.9 Amostragem do solo

A amostragem do solo foi realizada no mês de fevereiro de 2017 (12 meses após a amostragem da biomassa arbórea), quando o povoamento de *A. peregrina* estava com 68 meses de idade. Os principais objetivos dessa avaliação foram: 1)

estimar o estoque de carbono na camada superficial de solo (0-20 cm) e; 2) avaliar as mudanças no conteúdo de carbono após a introdução das árvores na pastagem e 3) avaliar a contribuição do carbono proveniente das árvores para a formação da matéria orgânica do solo.

A coleta de solo foi realizada nas 45 parcelas do experimento. Em cada parcela, foram coletados solos nas profundidades: 0-5; 5-10 e 10-20 cm em seis diferentes pontos, e uma amostra composta por profundidade foi formada. Esta amostra composta tinha aproximadamente 500 g de solo que foi armazenada em sacos plásticos. A distribuição dos pontos de coleta de solo na área do plantio foi feita com base no diagrama denominado de "Diagrama de Voronoi". Este diagrama consiste na distribuição sistematizada dos pontos de amostragem na área e leva em consideração a distância horizontal em relação a um determinado ponto de referência, que nesse caso foi uma árvore escolhida no interior da parcela experimental.

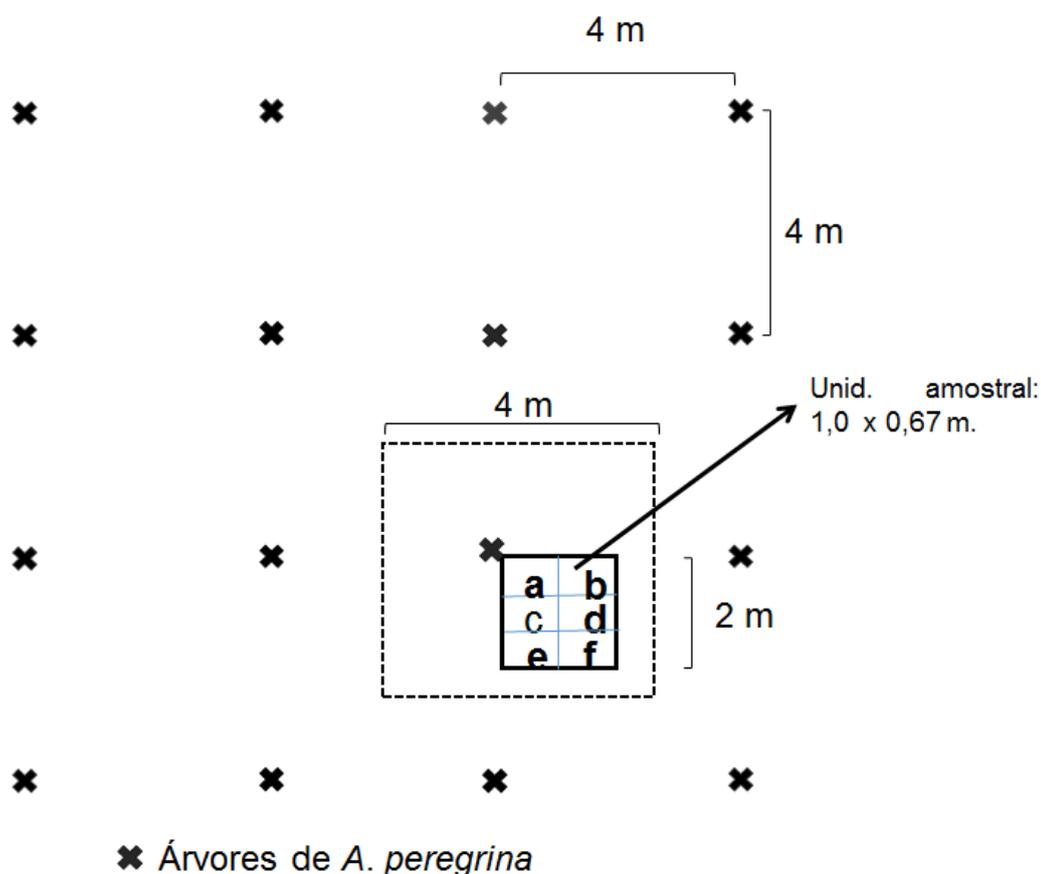
Os pontos de coleta foram distribuídos dentro de uma área equivalente a $\frac{1}{4}$ da área útil de uma planta referência (Figura 5). Cada ponto de coleta de solo teve como referência uma árvore diferente dentro da parcela, respeitando duas linhas de bordadura. As árvores foram escolhidas ao acaso procurando-se obedecer à distribuição em classes de tamanho (árvores pequenas, médias e grandes). Foram evitados locais com presença de fezes de gado bovino, formigueiros e trilhas durante a coleta das amostras de solo. Essa maneira de amostragem permite representar a área da parcela evitando viés nas estimativas de carbono em função, por exemplo, do aporte de folhas ou de exsudados radiculares que tendem a ser maior quanto mais próximo à árvore.

Para avaliar a contribuição das árvores na introdução de carbono do solo, após o seu plantio em área de pastagem, foram realizadas as análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$, sendo que esta representa a razão entre o isótopo ^{13}C e o ^{12}C (MACHADO et al., 2011). Essas análises foram feitas nas amostras de solo coletadas no espaçamento 3 x 3 m (27 amostras de solo). O espaçamento 3 x 3 m foi escolhido para este estudo devido à limitação de recursos financeiros e por este ser um intermediário entre os espaçamentos testados.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo com plantios de *A. peregrina* foram comparados com os valores do solo coberto com pastagem, tendo os dois ambientes o mesmo

histórico de uso. A pastagem de referência é coberta por no mínimo 50 anos com *Brachiaria* sp. Na área de pastagem foram retiradas três amostras compostas para cada profundidade (0-5, 5-10 e 10-20 cm), sendo uma no terço superior do comprimento da encosta, uma no terço intermediário e uma no terço inferior. Cada amostra composta foi formada pela homogeneização de seis amostras simples, coletadas aleatoriamente em cada porção da encosta, num raio de 30 m.

Figura 5 – Esquema de subdivisão da área para a coleta de amostras de solo no povoamento de *A. peregrina*, tomando-se como exemplo o espaçamento 4 x 4 m, em Rive, Alegre, ES



a, b, c, d, e, f = pontos de coleta de solo.

Fonte: o autor.

Para a estimativa da densidade do solo (DS) foi retirada uma amostra simples em cada profundidade especificada anteriormente e considerando somente a posição "f" (Figura 5), em cada unidade amostral. A posição "f" correspondeu ao centro do quadrante formado por quatro árvores do plantio. Por se tratar de solos compactados, foi utilizado neste estudo o método analítico dos anéis volumétricos contendo amostras indeformadas no seu interior (EMBRAPA, 2011).

No total, as análises de solo para a realização desse estudo contabilizou 306 amostras, sendo 135 destinadas à determinação do teor de carbono, 135 para

estimativa da DS e 36 para análises de isótopos de carbono (9 amostras na área de plantio com *A. peregrina* e 3 amostras na área de pastagem).

3.9.1 Obtenção da densidade, teor de carbono e abundância isotópica natural do ^{13}C

Para a determinação da DS os anéis metálicos com volume e peso conhecidos, contendo as amostras de solo no seu interior, foram colocados para secar em estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de 105 ± 3 °C por 72 horas. Após a secagem, os mesmos foram dispostos em dessecadores, e após o resfriamento, eles foram pesados em balança analítica de precisão para a obtenção da massa seca. A DS foi obtida por meio do emprego da seguinte expressão (equação 10):

$$Ds = \frac{Ms}{Vt} \quad (10)$$

Onde:

Ds = densidade do solo, em g cm^{-3} ;

Ms = massa seca do solo, em g;

Vt = volume total do anel, em cm^3 .

As amostras de solo para determinação isotópica foram maceradas em almofariz de porcelana e passadas em peneira de 1,0 mm. Na sequência, elas foram armazenadas em potes de acrílico e encaminhadas para a realização das análises laboratoriais. A limpeza do almofariz entre uma amostra e outra foi feita usando pincel, álcool etílico e papel higiênico.

Os teores de carbono no solo foram determinados por dois métodos diferentes: Método 1 – oxidação química por via úmida (Walkley-Black) e método 2 – combustão seca total (Leco, modelo C-144), de acordo com EMBRAPA (1997) e Sanquetta et al. (2014), respectivamente.

Com o método 1 foi possível estimar as mudanças no estoque de carbono do solo antes (nove meses antes do plantio) e aos 68 meses após o plantio das

árvores. As determinações dos teores de carbono do solo pelo método 1 foram realizadas pelo Laboratório de Recursos Hídricos da UFES/CCAIE/DCMF, em Jerônimo Monteiro, ES, obedecendo à mesma metodologia de análise (EMBRAPA, 1997). Cabe reforçar que a amostragem antes da implantação do povoamento florestal foi realizada obedecendo a uma malha de coordenadas projetada sobre as diferentes áreas no terreno, sendo coletadas amostras em pontos distantes 70 m um do outro e nas profundidades de 0-20 e 20 cm. De acordo com esta configuração foram coletadas 12 amostras na área referentes ao bloco 1, 17 na área referente ao bloco 2 e 12 na área referente ao bloco 3 do experimento. Após a implantação do povoamento florestal o solo foi amostrado em três profundidades (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm), e obedeceu aos diferentes espaçamentos de plantio dentro de cada bloco. Desse modo, a análise das mudanças no estoque de carbono foi possível somente em nível de bloco experimental e para a profundidade de 0-20 cm.

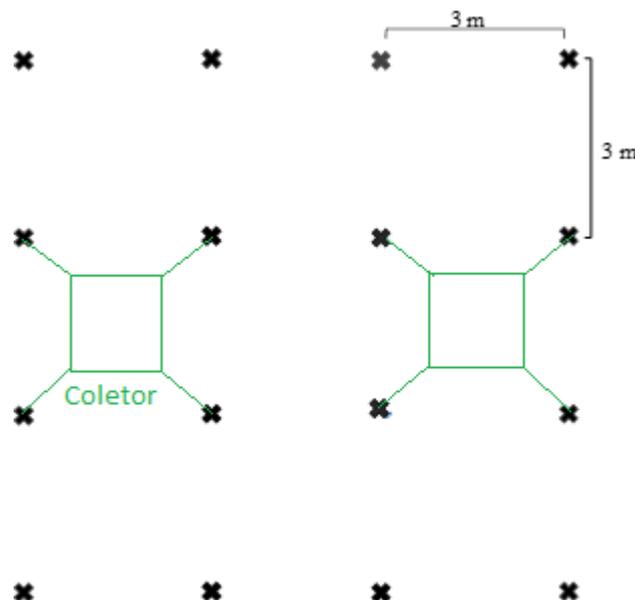
A determinação dos teores de carbono pelo método 2 foi realizada na BIOFIX, em Curitiba, PR, por meio da combustão total no LECO, tal como adotado para os compartimentos da biomassa. Este procedimento possibilitou a comparação do estoque de carbono entre todos os compartimentos da biomassa avaliados nesse estudo.

Para que fosse possível estimar a participação das árvores e da gramínea na MOS, além de ter sido amostrado o solo da pastagem, foi necessário realizar a coleta de amostras de folhas senescentes e a determinação do ^{13}C e do ^{12}C desses dois tipos de vegetação.

Para a coleta de folhas senescentes das árvores de *A. peregrina*, na região central de cada uma das nove parcelas com o espaçamento 3 x 3 m foram instalados dois coletores com dimensões de 1,5 x 1,5 m. Os coletores foram amarrados com cordas entre quatro árvores, a uma altura de 2 m em relação ao solo, sendo estes constituídos em malha de náilon com 2 mm de diâmetro (Figura 6). As folhas senescentes foram recolhidas após duas semanas de instalação dos coletores, originando uma amostra composta para cada parcela. Após a coleta estas folhas foram colocadas em sacos de papel pardo e levadas para estufa com circulação forçada de ar a 65°C de temperatura, até atingirem peso constante. Na sequência, foi feita a moagem em moinho tipo Willey e maceradas em almofariz,

tomando-se o cuidado de fazer a higienização com álcool etílico e pincel do interior do moinho e utensílios utilizados.

Figura 6 – Sistematização dos coletores para coleta de folhas senescentes das árvores de *A. peregrina*, aos 68 meses de idade, em Rive, Alegre, ES.



Fonte: o autor.

Foi necessária ainda nesse estudo, a coleta de folhas da gramínea no interior das parcelas com plantio de *A. peregrina*. Entretanto, a presença de gramíneas nesse povoamento se encontrava de forma muito heterogênea, ou seja, nem todas as parcelas apresentavam gramínea em toda sua extensão. Dessa maneira, a coleta de folhas de gramíneas para estimativa da $\delta^{13}\text{C}$ foi feita em um povoamento de paricá próximo e com a mesma idade do povoamento de *A. peregrina*. Ressalta-se que as $\delta^{13}\text{C}$ médias do paricá e da *A. peregrina* foram próximas, sendo estas, respectivamente, -20,50 e -28,67‰, o que possibilitou a adoção desse procedimento. A porcentagem de carbono derivado das árvores de *A. peregrina* e da gramínea na MOS foi estimada por meio da equação 11. Esta mesma equação foi usada por Balieiro et al. (2008) para estimar a contribuição das árvores de *Eucalyptus grandis* e de *Pseudosamanea Guachapele* no estoque de carbono do solo em área de pastagem reflorestada com estas espécies.

$$C_f = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{associação}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{gramínea}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{floresta}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{gramínea}}} * 100 \quad (11)$$

Em que:

C_f = porcentagem de carbono derivado da floresta na MOS;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{associação}}$ = é o valor da abundância isotópica natural do ^{13}C no solo para a associação árvores-gramíneas;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{gramínea}}$ = é o valor da abundância isotópica natural do ^{13}C no solo para a gramínea pura e;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{floresta}}$ = é o valor da abundância isotópica natural do ^{13}C para a floresta ou árvores (folhas senescentes).

$\delta^{13}\text{C}_{\text{gramínea}}$ = é o valor da abundância isotópica natural do ^{13}C para a gramínea (folhas senescentes).

As análises de $\delta^{13}\text{C}$ foram realizadas no Laboratório de isótopos estáveis do CENA-USP. Foi utilizado para estas análises um espectrômetro de massa acoplado a um analisador elementar automático modelo Anca, com os resultados expressos na forma de delta - $\delta^{13}\text{C}$ (‰), em relação ao padrão internacional PDB (Pee Dee Belemnita) (BALIEIRO et al., 2008; e LOSS et al., 2016).

3.9.2 Estimativa do estoque de carbono no solo

Com os resultados obtidos da DS e os respectivos teores de carbono, foi estimado para cada profundidade de solo amostrada, o estoque de carbono, por meio da equação 12 (MACHADO et al., 2003). O estoque de carbono na profundidade total amostrada (0-20 cm) foi obtido pela soma dos estoques das profundidades individuais.

$$Est = C_{org} * D_s * \frac{e}{10} \quad (12)$$

Em que:

Est = Estoque de carbono orgânico na profundidade específica, em Mg ha^{-1} ;

C_{org} = teor de carbono orgânico da profundidade específica, em g kg^{-1} ;

D_s = Densidade do solo da profundidade específica (média do bloco), em g cm^{-3} e;

e = Espessura da profundidade de solo, em cm.

3.10 Análises dos dados

3.10.1 Teores de carbono entre os diferentes compartimentos da biomassa

A comparação dos teores de carbono entre todos os compartimentos da biomassa arbórea avaliados nesse estudo foi feita levando-se em consideração os dados exclusivamente do Bloco 3 do experimento. Este procedimento foi adotado em função da coleta dos dados referentes às raízes e necromassa ter sido realizada somente nesse bloco, conforme comentado anteriormente. Dessa maneira, foi possível a padronização em 15 observações para todos os componentes.

O desenho experimental para estas análises foi o inteiramente casualizado, com 5 tratamentos e três repetições de cada tratamento, totalizando 15 unidades amostrais. Para realização da análise estatística foi adotado o seguinte modelo estatístico (Equação 13):

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij} \quad (13)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, I$ (I tratamentos);

$j = 1, 2, \dots, J$ (J repetições).

O efeito e_{ij} foi considerado aleatório e t_i de efeito fixo. O esquema da ANOVA, com o teste F, com até 5% de significância, para o teste de igualdade das médias de tratamentos ($H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I$) está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para os dados de biomassa e estoque de carbono nas raízes e na necromassa e para a comparação dos teores de carbono entre os diferentes componentes da biomassa avaliados no povoamento de *A. peregrina*

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento (T)	I – 1	SQT	QMT	QMT / QMR
Resíduo (R)	IJ – I	SQR	QMR	
Total	IJ – 1	SQTotal		

Fonte: o autor.

As médias de tratamentos para estas variáveis, quando necessário, foram comparadas por meio do teste Tukey, em nível de 5% de até significância, cujo valor da diferença mínima significativa foi calculado por meio da equação 13:

$$\Delta = q_{\alpha(I; IJ - I)} \sqrt{\frac{QMR}{J}} \quad (13)$$

Em que α é o nível de significância.

3.10.2 Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo

Os diferentes métodos de estimativa do estoque de carbono foram contrastados com o método de referência (MR), que consistiu do resultado do produto entre a Bio_{Ref} e o $teor_{Lab}$. Nesta avaliação, primeiramente, foi empregado o teste t-pareado, ao nível de 5% de significância, Este teste avalia se diferença média (DM) entre duas medidas ou estimativas de um mesmo indivíduo foi estatisticamente significativa, admitida a relação de dependência entre elas. Neste estudo, foi verificado se a DM entre o método de referência (MR) em relação a cada método de estimativa do estoque total de carbono acima do solo (M_i) foi estatisticamente diferente. A hipótese estatística testada foi $H_0: \mu_D = 0$; $H_1: \mu_D \neq 0$).

Na sequência, foi realizada a análise gráfica dos resíduos. O objetivo dessa análise foi verificar a distribuição dos erros percentuais e a existência de tendências nas estimativas (equação 14) e, por fim, foram utilizadas estatísticas complementares para avaliar a magnitude das tendências nas estimativas.

$$ER = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} * 100 \quad (14)$$

Em que:

ER = Erro relativo (%);

Y_i = estoque de carbono de referência ou observado, em kg;

\hat{Y}_i = estoque de carbono estimado pelos diferentes métodos, em kg.

As estatísticas complementares utilizadas foram viés (V%), média das diferenças (MD%) e raiz do quadrado médio do erro (RQME%), conforme as equações 15, 16 e 17, apresentadas a seguir:

Viés (V):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n} \quad V(\%) = \frac{V}{\bar{Y}} * 100 \quad (15)$$

Média das diferenças absoluta (MD):

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad MD(\%) = \frac{MD}{\bar{Y}} * 100 \quad (16)$$

Raiz do quadrado médio do erro (RQME):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad RQME (\%) = \frac{RQME}{\bar{Y}} * 100 \quad (17)$$

Em que:

n = número de observações;

\bar{Y} = Média dos valores de carbono obtidos pelo método de referência;

Y_i = valores obtidos pelo método de referência, em kg e;

\hat{Y}_i = valores obtidos pelos diferentes métodos de estimativa, em kg.

3.10.3 Densidade básica e teor de carbono da madeira

Inicialmente foi verificado a existência de correlação entre a densidade básica e o teor de carbono da madeira, por meio da aplicação do teste de correlação linear de Pearson. Na sequência foi realizada a ANOVA dos dados, com o teste F. Ambas as análises foram realizadas ao nível de até 5% de significância. Na ANOVA foram considerados dois fatores: o espaçamento de plantio e a posição axial no fuste, seguindo, dessa maneira, o esquema fatorial simples, com três blocos, 5 tratamentos e com 3 repetições (parcelas) de cada tratamento dentro de cada bloco e 4 diferentes posições ao longo do fuste, totalizando 180 observações.

Para realização da ANOVA foi adotado o seguinte modelo estatístico (equação 18): Observa-se que este modelo é o mesmo utilizado no item anterior

acrescido do efeito da posição ao longo do comprimento do fuste como fonte de variação.

$$Y_{ijk} = \mu + ti + bj + pl + e_{ijkl} \quad (18)$$

Em que:

$i = 1, 2, \dots, I$ (I tratamentos);

$j = (1, 2, \dots, J)$ (J blocos);

$l = (1, 2, \dots, L)$ (L posições);

$k = 1, 2, \dots, K$ (K repetições).

Os efeitos b_j e e_{ijkl} foram considerados aleatórios, sendo b_j e e_{ijkl} não correlacionados, com ti de efeito fixo e pl de efeito misto. Por suposição, a interação entre os dois fatores foi considerada nula, ou seja, os fatores espaçamento e posição axial no longo do fuste para as variáveis analisadas atuam de forma independente. O esquema da ANOVA, para o teste de igualdade das médias ($H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I$) é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para análise dos dados de densidade básica e teor de carbono da madeira de *A. peregrina*

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Bloco (B)	$J - 1$	SQB	QMB	--
Tratamento (T)	$I - 1$	SQT	QMT	QMT / QMR
Posição (P)	$L - 1$	SQP	QMP	QMP / QMR
Resíduo (R)	$(IJK - 1) - (I - 1) - (J - 1) - (L - 1) - (K - 1)$	SQR	QMR	--
Total	$IJK - 1$	SQTotal		

Fonte: o autor.

As médias de densidade básica e teor de carbono da madeira, para o tratamento (espaçamento) e para a posição ao longo do fuste, foram comparadas por meio do teste Tukey, ao nível de 5% de significância, quando necessário.

3.10.4 Biomassa e estoque de carbono acima do solo e estoque de carbono no solo

Neste item é apresentado o detalhamento da análise estatística dos dados de biomassa e estoque de carbono para os compartimentos da biomassa acima do solo (fuste, galhos, folhas, casca e total) e também para o estoque de carbono no solo, considerando as profundidades 0 - 5, 5-10, 10-20 e 0-20 cm.

O desenho experimental utilizado na análise destes dados seguiu a mesma configuração adotada no plantio, ou seja, delineamento em blocos casualizados com I tratamentos e J blocos. Para permitir um maior número de graus de liberdade no resíduo, cada tratamento foi repetido K (3) vezes dentro de cada bloco. Este procedimento é indicado quando o número de tratamentos é pequeno, permitindo-se chegar ao número mínimo recomendado de 20 parcelas e 10 graus de liberdade no resíduo (BANZATTO; KRONKA, 1989). Para realização da análise desses dados foi adotado o seguinte modelo estatístico (equação 19):

$$Y_{ijk} = \mu + ti + bj + e_{ijk} \quad (19)$$

Em que:

i = 1, 2, ..., I (I tratamentos);

j = (1, 2, ..., J (J blocos);

k = 1, 2, ..., K (K repetições).

Os efeitos b_j e e_{ijk} foram considerados aleatórios, sendo b_j e e_{ijk} não correlacionados e ti de efeito fixo. O esquema da ANOVA, com o teste F, com até 5% de significância, para o teste de igualdade das médias de tratamentos ($H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I$) está na Tabela 11. Este procedimento foi idêntico ao utilizado por Banzatto e Kronka (1989).

Tabela 11 – Esquema da ANOVA, com o teste F, para o teste de igualdade das médias de biomassa e estoque de carbono dos compartimentos da biomassa acima do solo e para o estoque de carbono no solo

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Bloco (B)	J - 1	SQB	QMB	--
Tratamento (T)	I - 1	SQT	QMT	QMT / QMR
Resíduo (R)	IJK - I - J + 1	SQR	QMR	
Total	IJK - 1	SQTotal		

Fonte: o autor.

As médias de tratamentos, quando necessário, foram comparadas por meio do teste Tukey em nível de 5% de significância, cujo valor da diferença mínima significativa foi calculado por meio da equação 20:

$$\Delta = q_{\alpha}(I; IJK - I - J + 1) \sqrt{\frac{QMR}{JK}} \quad (20)$$

Em que α é o nível de significância.

A comparação entre as profundidades de solo amostradas foi feita por meio da estatística descritiva dos dados de teor de carbono. Foram analisadas as medidas de tendências centrais e de dispersão em torno da média.

3.10.5 Biomassa e estoque de carbono nas raízes e na necromassa

A análise estatística dos dados relativos às raízes e à necromassa foi realizada de forma idêntica aos dados de teores de carbono entre os diferentes compartimentos da biomassa avaliados, conforme descrito no item 3.8.1.

3.10.6 Mudanças no estoque de carbono no solo

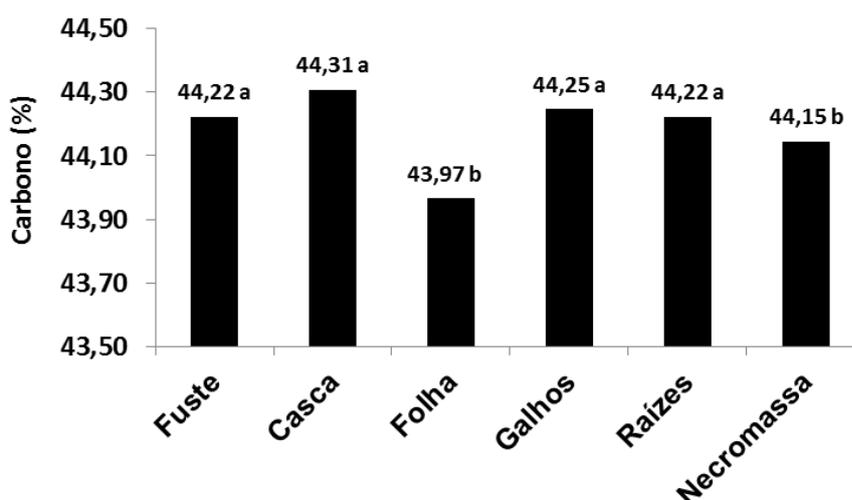
Os dados de estoque de carbono no solo para profundidade total de 0-20 cm, calculados antes e após a implantação do povoamento de *A. peregrina* foram comparados por meio do teste t-pareado, ao nível de 5% de significância. Neste estudo, o emprego do teste t-pareado permitiu verificar se a DM no estoque de carbono do solo antes e após a introdução do povoamento florestal foi estatisticamente diferente. A hipótese estatística testada foi $H_0: \mu_D = 0$; $H_1: \mu_D \neq 0$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teores de carbono nos diferentes compartimentos da biomassa

Os teores de carbono foram significativamente diferentes entre os compartimentos analisados ($p < 0,05$). A análise estatística revelou a separação em dois grupos, sendo os maiores valores para o grupo composto pelo fuste, cascas, galhos e raízes e os menores para o grupo formado pelas folhas e necromassa (Figura 7).

Figura 7 – Teores médios de carbono para os diferentes compartimentos da biomassa avaliados no povoamento de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade (exceto necromassa que foi aos 60 meses de idade), em Rive, Alegre, ES Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, ao nível de 5% de significância pelo teste Tukey.



Fonte: o autor.

O compartimento necromassa (galhos caídos sobre o piso florestal) foi o que apresentou os menores teores de carbono. Este fato pode estar relacionado à decomposição parcial desse material, onde parte do carbono já poderia ter sido transferida para o solo e para a atmosfera. O estado de decomposição pode alterar o teor de carbono do material (Maas, 2015). Esta autora ainda alerta que a utilização de um teor de carbono recomendado para árvores vivas ou árvores mortas em pé na estimativa do estoque de carbono de resíduos lenhosos finos (galhos caídos com diâmetro entre 2 e 10 cm e em estado de decomposição mais avançado que o

material de referência) em Floresta Ombrófila Mista Montana, em São João do Triunfo, PR, geraria uma superestimativas de 12% dessa variável.

Nas folhas foi o compartimento no qual ocorreu a menor alocação de carbono. Este resultado é oposto ao que é normalmente se encontrado na literatura, não sendo possível afirmar com segurança as causas dessa diferença. A justificativa para a maior concentração de carbono nas folhas em relação aos outros componentes arbóreos é porque é nelas que se localiza os estômatos, permitindo a entrada do CO₂, com consequente realização do processo de fotossíntese (DALLAGNOL et al., 2011).

O teor de carbono pode variar entre os diferentes compartimentos da biomassa arbórea (folhas, galhos, inflorescência, casca, madeira do tronco, raízes, necromassa, etc.) devido às funções de cada órgão na planta e à presença de células fisiologicamente especializadas em cada um deles. Os resultados encontrados nesse estudo demonstram essa variação, sendo ela sustentada ainda por outros estudos, tais como: Behling et al. (2014) para três espécies de leguminosas arbóreas (*Acacia mearnsii* De Wild, *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Mimosa scabrella* Benth), com 1 ano de idade; Sanquetta et al. (2013) para árvores de *Cryptomeria japonica*, com 30 anos de idade; e Cubas, Costa; Zaniz (2016) para indivíduos jovens de *pinus taeda* L., em condição de regeneração natural, em Três Barras, SC.

A média geral de teor de carbono entre os compartimentos analisados foi de 44,19% ($\pm 0,09$). Na literatura supracitada foram encontrados valores para esta variável entre 42,00 e 49,45%, para uma variada gama de espécies e idades. Pode-se perceber por estes resultados que os teores de carbono são muito variáveis. Entretanto, todos eles são inferiores ao valor *default* sugerido pelo IPCC (2003) para estimativa do estoque de carbono em espécies lenhosas (50% peso/peso da biomassa).

É recomendável sempre utilizar teores de carbono específicos para cada compartimento da árvore quando se deseja calcular o estoque de carbono com precisão (BEHLING et al., 2014). Entretanto, nem sempre é possível seguir esta recomendação. O teor médio de carbono nas raízes das árvores de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, foi igual ao da madeira (fuste) e também estatisticamente igual ao de galhos e cascas. Este resultado é especialmente interessante, tendo em

vista que a amostragem das raízes é trabalhosa. Assim, esta igualdade nos teores de carbono, em condições semelhantes e idade próxima ao povoamento desse estudo, constitui uma alternativa para estimativa do estoque de carbono desse compartimento com menor custo e dispêndio de tempo.

4.2 Densidade básica e teores de carbono da madeira em função do espaçamento de plantio e da posição axial no fuste

A densidade básica média da madeira das árvores de *A. peregrina* nesse estudo foi de $0,57 \pm 0,08 \text{ g cm}^{-3}$. Esse valor é menor do que o encontrado por Silva, Vale e Miguel (2015) para diferentes espécies do Cerrado no estado do Tocantins ($0,65 \text{ g cm}^{-3}$) e também menor que os relatados por DATABASE (2017) para esta mesma espécie (entre $0,77$ e $1,08 \text{ g cm}^{-3}$) e para a espécie pertencente ao mesmo gênero, *Anadenanthera colubrina* (Vell) Brenan (entre $0,78$ e $0,99 \text{ g cm}^{-3}$). Segundo DATABASE (2017), a densidade da madeira pode variar em função da espécie, da idade do povoamento, das condições do sítio e dos tratamentos silviculturais aplicados.

Estudo realizado por Silva et al. (2015), com 20 espécies de árvores plantadas em área de restauração florestal, em Itutinga, MG, encontraram que o valor médio para densidade básica foi de $0,55 \text{ g cm}^{-3} \pm 0,08$, sendo este valor próximo ao desse estudo. Para a espécie *A. peregrina* (mesma espécie deste estudo) a densidade encontrada por estes autores foi de $0,72 \text{ g cm}^{-3}$, sendo esta muito superior à encontrada nesse estudo. Um dos fatores que certamente motivou a diferença entre o trabalho de Silva et al. (2015) e o presente estudo foi a idade das árvores avaliadas. Nesse estudo as árvores tinham 56 meses de idade, enquanto as árvores amostradas por Silva et al. (2015) tinham 21 anos de idade, apresentando essas possivelmente tecidos mais lignificados.

A análise de correlação de Pearson entre a densidade básica e o teor de carbono da madeira, ao nível de 5% de significância, indicou que estas variáveis não foram significativamente correlacionadas ($r = -0,0251$; $p = 0,738$). Sanquetta et al. (2013) também não encontraram tendência na relação do teor de carbono com a variável densidade básica da madeira, tanto para o compartimento cerne ($r = 0,003$)

quanto para o alburno ($r = 0,250$) em *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don, num povoamento com 33 anos de idade, no Paraná.

A densidade básica da madeira não diferiu significativamente entre os diferentes níveis de espaçamento de plantio testados nesse estudo ($p = 0,7513$). Entretanto, esta diferiu significativamente em função da posição axial no fuste ($p < 0,001$).

O espaçamento de plantio e a idade exercem papéis fundamentais na produção florestal, pois influenciam a taxa de crescimento das árvores e a qualidade da madeira (MOULIN et al., 2017). Árvores que crescem em espaçamentos menos competitivos tendem a apresentar uma menor espessura da parede celular e conseqüentemente uma menor densidade básica da madeira (SHMULSKY; JONES, 2011). O crescimento rápido geralmente está relacionado à densidade relativamente baixa da madeira (DATABASE, 2017). Por outro lado, em espaçamentos excessivamente densos, o crescimento é prejudicado pelos elevados custos de manutenção celular, podendo em casos extremos, grande parte da energia (ou hidratos de carbono) ser alocada para esta atividade (LARJAVAARA, 2010). Por estes motivos, era esperado nesse estudo que nos menores espaçamentos ocorressem maiores valores de densidade básica, entretanto, isto não ocorreu.

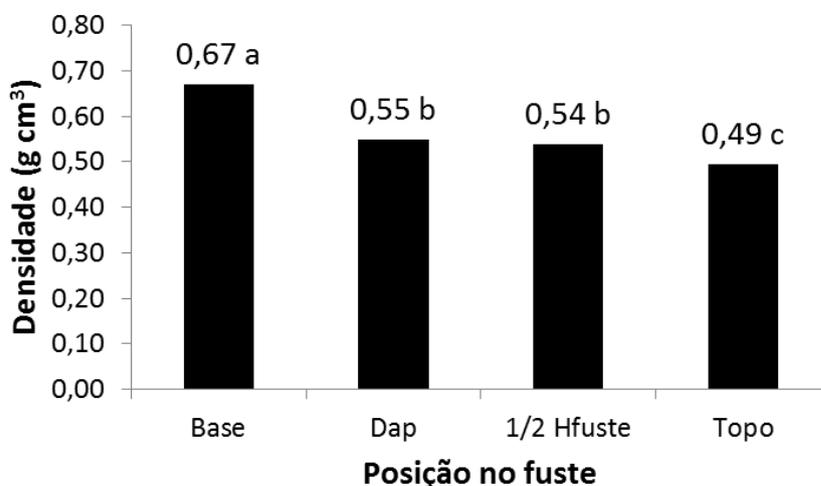
Uma explicação para o fato de não ter ocorrido diferença estatísticas da densidade em relação ao espaçamento, é que até a idade avaliada (56 meses) o povoamento ainda não havia atingido a máxima competição pelos fatores de crescimento, momento em que possivelmente ocorreria o autodesbaste. Segundo Schneider et al. (2015), em plantações florestais homogêneas, ao passo do crescimento das árvores, a competição entre os indivíduos aumenta, culminando com a dominância de algumas árvores e morte de outras, o que é convencionado de autodesbaste.

Apesar da competição entre as árvores no povoamento não ter atingido o ponto de autodesbaste, o desbaste realizado de forma artificial poderia proporcionar a aceleração da taxa de crescimento das árvores remanescentes. Entretanto, deve-se atentar que esta prática pode resultar em redução da densidade básica da madeira, sendo este um efeito indesejável quando se quer obter madeira de alta resistência (SHMULSKY; JONES, 2011). Por outro lado, o desbaste proporcionaria que as árvores remanescentes alcancem maiores diâmetros, o que poderia

umentar o rendimento de madeira serrada. Uma estratégia silvicultural para evitar a redução da densidade básica da madeira seria a realização do desbaste após o período juvenil, que pode variar em função da espécie, idade, local de plantio, dentre outros fatores (SHMULSKY; JONES, 2011).

Quando se observa o comportamento da densidade da madeira em função da posição axial no fuste, na base e no topo ocorreram o maior e o menor valor médio para esta propriedade, respectivamente. As médias densidade nas posições intermediárias (Dap e ½ fuste) foram estatisticamente iguais, entre e diferentes da base e do topo do fuste (Figura 8). A altura do fuste até a inserção da primeira bifurcação (onde a divisão do fuste é evidente) variou entre 3,20 e 3,41 m, considerando que o DAP é referenciado a altura de 1,30 m do solo, as amostras nas duas posições intermediárias (DAP e ½ Fuste) foram retiradas próximas uma da outra, sendo este o fato responsável pela ausência de diferença estatística na densidade da madeira entre estes pontos.

Figura 8 – Densidade básica da madeira de *A. peregrina* ao longo do fuste, aos 56 meses de idade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância



Fonte: o autor.

O acúmulo de massa durante o crescimento da árvore ocorre da base para o topo. Assim, na base são encontrados os tecidos mais velhos e, portanto, mais lignificados e com maior densidade, enquanto que no topo se encontram os meristemas de crescimento e a maior concentração de lenho juvenil. Este fato, possivelmente, foi responsável pelo comportamento da densidade básica das árvores ao longo do comprimento do fuste, apresentado na Figura 8. O crescimento

da parte aérea ocorre pelo processo de alongamento e deposição de células em camadas sucessivas por atividade dos tecidos primários, que estão diretamente relacionados com a altura total da árvore. O crescimento em diâmetro, por sua vez, ocorre principalmente por meio da atividade do câmbio vascular, uma camada de crescimento situada entre o xilema e o floema (PANSHIN; DE ZEEUW, 1964).

Os diferentes espaçamentos de plantio, bem como as diferentes posições axiais no fuste, não exerceram influência significativa sobre o teor de carbono da madeira desse estudo. Este resultado pode estar relacionado ao fato das árvores no povoamento ainda não estarem, ainda, na máxima competição pelos fatores de crescimento, tal como ocorreu com a densidade da madeira.

Em condições em que árvore não esteja sob influência de fatores atípicos ao crescimento, espera-se que as proporções entre os componentes químicos da madeira, inclusive o carbono, obedeçam a relações estequiométricas específicas (LAMLOM; SAVIDGE, 2003; SHMULSKY; JONES, 2011). Estas proporções entre os diferentes componentes químicos da madeira são impulsionadas pelas demandas específicas de cada órgão da árvore, de acordo com a sua atividade metabólica. Assim, se aumenta a demanda metabólica por um determinado nutriente a dos outros nutrientes também aumenta, mantendo-se a estequiometria. Cabe ressaltar que, enquanto a absorção dos demais nutrientes ocorre da solução do solo, a absorção do carbono pelas plantas ocorre diretamente da atmosfera. Porém, em condições atípicas de crescimento, parte do carbono fixado via fotossíntese pode ser dirigida de forma preferencial para determinado(s) órgão da planta, na forma de hidratos de carbono, a fim de compensar o estresse sofrido (LARJAVAARA, 2010).

Quando se compara a média geral da densidade básica ($0,57 \text{ g cm}^{-3}$) e do teor de carbono do fuste (44,20%), com os valores dessas variáveis obtidos exclusivamente na posição do DAP ($0,55 \text{ g cm}^{-3}$ e 44,22%, respectivamente), nota-se uma similaridade entre os valores. Esse resultado é interessante, pois demonstra que para *A. peregrina*, nas condições do presente estudo, a amostragem apenas no DAP seria suficiente para representar todo o fuste em termos destas duas variáveis.

4.3 Exatidão dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo

De modo geral, todos os métodos alternativos resultaram em estimativas com boa exatidão do estoque total de carbono acima do solo, que variou de -6,19% (M4) até 5,79% (M3). O método M2, no qual o estoque de carbono foi obtido por meio da multiplicação da biomassa oriunda da equação de regressão pelo teor de carbono determinado em laboratório (TeorLab) foi o mais exato, tendo este superestimado o estoque de carbono em 0,16% em relação ao método de referência (Tabela 12). Um fato que contribuiu para a exatidão dos métodos foi a utilização de uma equação de regressão ajustada aos dados de campo na estimativa da biomassa (M2 e M3). Outro fato foi a utilização da variável densidade básica da madeira (M4 e M5), que tem a capacidade de inferir na estimativa do fator de expansão da biomassa (FEB) condições ambientais do sítio (SILVA et al., 2015).

Tabela 12 – Estoque de carbono médio (kg) estimado por diferentes métodos para árvores de *A. peregrina*, com 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	MR	M1	M2	M3	M4	M5
3 X 2	9,44	10,72	9,41	10,69	8,58	9,74
3 X 3	7,40	8,42	8,07	9,17	6,88	7,82
4 X 3	11,40	12,95	12,43	14,12	10,12	11,50
4 X 4	12,71	14,45	13,46	15,30	11,81	13,42
5 X 5	21,18	24,12	18,87	21,48	20,92	23,82
Média	12,43	14,13	12,45	14,15	11,66	13,26
CV(%)	70,69	70,74	66,49	66,51	77,61	77,66

Em que: MR = método referência (Bioreal x TeorLab); M1 = Bioreal x Teor50%, M2 = BioSpurr x TeorLab, M3 = BioSpurr x Teor50%, M4 = BioFEB x TeorLab, M5= BioFEB x Teor50%.

Fonte: o autor.

Pode-se perceber pela Tabela 12 que a utilização do teor de carbono de 50% em substituição ao teor de carbono determinado na amostra (média 46,20%) foi o fator que mais impactou no cálculo do estoque de carbono, para um mesmo método de estimativa. Isto demonstra que pequena variação nos teores de carbono (3,8%) podem gerar diferenças significativas na estimativa do estoque dessa variável, considerando que a biomassa foi obtida com alta exatidão.

O estoque de carbono desse estudo, calculado com a utilização do teor de carbono de 50%, foi superestimado em 13,68% (M1), 13,84% (M3) e 6,68% (M5).

Resultado semelhante ao desse estudo foi observado por Silva et al. (2015), que compararam os teores médios de carbono obtidos em laboratório com o fator 0,5 e constataram que este superestimou em 11% o teor de carbono das espécies avaliadas. Com relação aos métodos de estimativa do estoque de carbono analisados, estes autores verificaram que o uso da equação alométrica (equações regionais) e do teor de carbono genérico levaram a superestimativas, respectivamente, de 10% e 12%, concluindo que, o uso do teor determinado na amostra contribuiu para aumentar a precisão das estimativas de estoque de carbono.

É comum encontrar na literatura trabalhos de quantificação que utilizam de forma generalizada o teor de carbono igual a 50% para conversão da biomassa em estoque desse elemento, conforme sugerido pelo IPCC em 2003, sendo uma vantagem da adoção desse teor, a facilidade no cálculo do estoque de carbono e na ausência de custo com as análises de laboratório (SILVA et al., 2015). Porém, esta utilização pode introduzir erros nas estimativas, sendo das fontes de erro a alta variabilidade na densidade da madeira, que pode levar a um teor de carbono menor que 50% (AMARO et al., 2013). Outra fonte de erro é o uso de equações desenvolvidas para outras espécies, locais ou vegetações diferentes da realidade investigada, em vez da utilização de uma equação ajustada aos dados medidos no povoamento, tal como realizado no presente estudo, obtendo-se menor precisão das estimativas do estoque de carbono (KOEHLER et al., 2005).

O método M4 resultou em subestimativas do estoque de carbono. Ao contrário desse método, todos os outros geraram superestimativas para esta variável. No método M4 a biomassa foi estimada por meio da FEB que é a dada pela razão entre a massa da parte aérea e a massa do fuste. Como o povoamento florestal de *A. peregrina* objeto desse estudo é novo (56 meses) ainda há uma maior massa de copa em relação ao fuste, especialmente de galhos. Isto resultou em menores valores para a FEB (variou de 2,26 a 2,81, com média de 2,44) e, conseqüentemente, contribuiu para a subestimativa do estoque de carbono por este método. Na caracterização dendrométrica das 45 árvores utilizadas nesse estudo para a quantificação da biomassa e do estoque de carbono de referência (Tabela 13) é possível notar que a altura do fuste (H_c) foi aproximadamente metade do valor

da altura total da árvore (Ht), destacando a menor participação do fuste em relação à parte aérea.

Tabela 13 – Valores médios para as variáveis dendrométricas das 45 árvores de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos e aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES, para a comparação dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo

Espaçamento (m x m)	BIOA (kg)	DAP (cm)	Ht (m)	Hc (m)	VF (m ³)	FEB
3 X 2	21,44	6,86	7,66	3,34	0,014	2,40
3 X 3	16,83	6,27	7,30	3,20	0,012	2,26
4 X 3	25,90	7,76	7,86	3,25	0,019	2,39
4 X 4	28,90	8,20	7,84	3,40	0,022	2,30
5 X 5	48,23	9,66	8,28	3,41	0,031	2,81
Média	28,26	7,75	7,79	3,32	0,020	2,44
CV (%)	19,99	30,32	17,53	23,96	73,68	23,43

Em que: BIOA = biomassa acima do solo; DAP= diâmetro à altura do peito; Ht = altura total; Hc = altura comercial; VF = volume do fuste com casca; e FEB = fator de expansão da biomassa.

Fonte: o autor.

O método M2 foi o único que não diferiu estatisticamente do método de referência (MR), de acordo com teste t-pareado, ao nível de 5% de significância (Tabela 14). A equação de regressão ajustada aos dados de campo e utilizando o modelo de Spurr apresentou ajuste satisfatório ($R^2_{aj.} = 0,89$ e $S_{yx} = 24,09\%$). Isto levou a estimativas mais precisas da biomassa empregada no método M2. Este fato associado à utilização do teor de carbono determinado na amostra, foram os responsáveis pela maior exatidão do M2.

Tabela 14 – Resultado do teste t-pareado para comparação dos métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo para árvores de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

	DM	t	p-valor
MR vs M1	-1,704	-9,324	<0,001
MR vs M2	-0,021	0,048	0,481
MR vs M3	-1,725	-3,650	<0,001
MR vs M4	4,534	0,766	<0,001
MR vs M5	-0,831	-2,887	<0,001

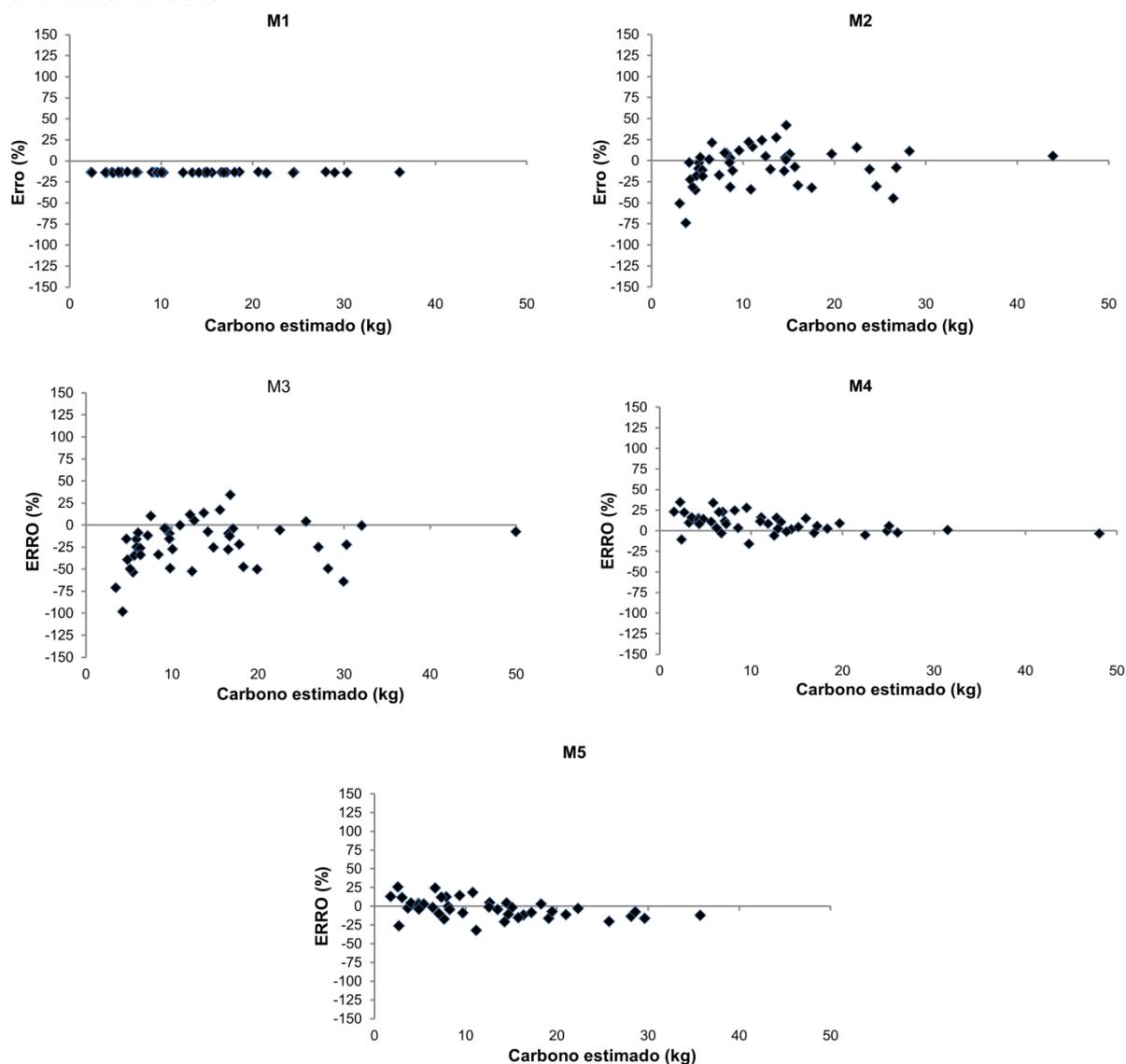
Em que: DM = Diferença média, M1 = estoque de carbono igual $Bio_{real} \times teor_{50\%}$, M2 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{Lab}$, M3 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{50\%}$, M4 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{Lab}$, e M5 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{50\%}$.

Fonte: o autor.

O melhor desempenho do M2 em relação aos demais métodos de estimativa do estoque total de carbono acima do solo foi confirmado pela análise de distribuição dos resíduos (Figura 9). O M2 apresentou boa distribuição dos resíduos, com os erros ocorrendo sua maioria no intervalo $\pm 50\%$. No M1, M3 e M5 o teor de carbono

utilizado na estimativa do estoque foi igual a 50% e, por isto, houve um direcionamento de mais pontos para a parte negativa do eixo. Devido à subestimativa dos valores, no método M4, a maioria dos pontos se concentrou na parte positiva do eixo. Suscintamente, é possível afirmar com base na análise gráfica de distribuição dos resíduos, que o método M2 foi o menos tendencioso entre os métodos comparados neste estudo.

Figura 9 – Distribuição dos resíduos para o estoque de carbono total acima do solo, estimado por diferentes métodos



Em que: M1 = estoque de carbono igual $Bio_{real} \times teor_{50\%}$, M2 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{Lab}$, M3 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{50\%}$, M4 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{Lab}$, e M5 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{50\%}$.

Fonte: o autor.

O estoque total de carbono acima do solo estimado pelo método M2 (utilizou a biomassa estimada pela regressão e TeorLab) foi 0,16% mais alto do que o MR

(obtido pela multiplicação da pesagem direta da massa da árvore e o TeorLab). Já o método M4 (utilizou a FEB e TeorLab) resultou em valores de estoque de carbono acima do solo 6,19% mais baixos que o MR. Nota-se que estes dois métodos (M2 e M4) utilizaram o mesmo teor de carbono, ou seja, a diferença na estimativa do estoque foi devida exclusivamente em função das diferenças nos valores da biomassa. Ao compará-los, é possível notar que a regressão gerou estimativas menos discrepantes em relação ao MR do que o método M4.

Este resultado difere dos resultados encontrados por Sanquetta et al. (2014) que compararam dois métodos indiretos na estimativa do estoque individual de carbono para a *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze, com diferentes idades, no estado do Paraná. Estes autores, utilizando o teor de carbono determinado diretamente na amostra em ambos os métodos, não encontraram diferença estatística entre o método que estimou o carbono por meio de uma equação de regressão ajustada aos dados de campo e o método que estimou o carbono a partir da FEB combinada com o volume do fuste.

As diferenças entre os resultados obtidos para *A. peregrina* neste estudo e os resultados encontrados por Sanquetta et al. (2014) têm como principal motivo as diferenças de idade e características dendrométricas das espécies. *A. peregrina* apresentava, aos 56 meses de idade, valor médio para DAP de 7,75 cm, Ht de 7,79 m e FEB de 2,44, enquanto *A. angustifolia* tinha idade média de 21,67 anos e apresentava valores médios, respectivamente, para DAP, Ht e FEB igual a 24,69 cm, 16,69 m e 1,39. A idade do povoamento florestal pode provocar mudanças nos padrões de alocação da biomassa em face do crescimento das árvores, porém, são escassos os estudos que desenvolveram fatores de expansão para locais com idade mais jovens (JAGODZIŃSKI et al., 2017).

A menor exatidão para o método no qual o estoque de carbono foi estimado por meio da FEB, em comparação ao método que utilizaram a equação de regressão ajustada aos dados de campo, pode ser explicada pela relação entre as variáveis que compõem os modelos (Tabela 15). A regressão utilizou como variáveis independentes somente o DAP e a Ht das árvores. Já no outro método, o estoque foi estimado por meio da multiplicação direta entre as variáveis densidade básica (Db), volume do fuste (VF), teor de carbono (TC) e o fator de expansão da biomassa (FEB).

A análise de correlação de Pearson, ao nível de 5% de significância, indicou que o DAP e Ht foram fortemente associadas com a biomassa acima do solo (BIOA), apresentando coeficiente de correlação $r = 0,927$ e $0,747$, respectivamente, acarretando em estimativas mais precisas para os métodos que estimaram o estoque de carbono usando a biomassa oriunda da regressão do que os métodos que estimaram este parâmetro por meio da FEB. A correlação entre as características FEB e DAP, FEB e Ht e entre FEB e VF foram todas não significativas.

Tabela 15 – Matriz de correlação de Pearson entre as características dendrométricas das árvores de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

VAIVA	Ht	Hc	DAP	VF	FEB	BIOA	TC
Ht	1	0,521 ^{ns}	0,805*	0,790*	0,077 ^{ns}	0,747*	0,024 ^{ns}
Hc		1	0,372 ^{ns}	0,552 ^{ns}	-0,554 ^{ns}	0,323 ^{ns}	-0,094 ^{ns}
DAP			1	0,935*	0,224 ^{ns}	0,927*	-0,058 ^{ns}
VF				1	0,033 ^{ns}	0,934*	-0,063 ^{ns}
FEB					1	0,329 ^{ns}	0,083 ^{ns}
BIOA						1	-0,085 ^{ns}
TC							1

Em que: Ht = altura total, Hc = altura comercial, DAP = diâmetro a 1,30 m acima do solo, VF = volume do fuste, FEB = fator de expansão da biomassa, BIOA = biomassa da parte aérea, TC = teor de carbono, * significativo ao nível de 5% de significância e ^{ns} não significativo ao nível de 5% de significância, pelo teste de correlação de Pearson.

Fonte: o autor.

O melhor desempenho das equações alométricas também foi constatado por Soares e Tomé (2004), para *Eucalyptus globulus*, com idades variando entre 4 e 24 anos. Estes autores afirmaram que o uso de equações alométricas para estimativa do estoque de carbono são preferíveis em relação aos fatores de expansão, mas quando elas não estão disponíveis, pode-se lançar mão de fatores de expansão específicos para diferentes faixas etárias dos povoamentos florestais. Sanquetta et al. (2014) não encontraram diferença na estimativa do estoque de carbono quando confrontaram um método que utilizou a regressão e um método que utilizou a FEB e a razão de raízes (R), justificando que isto foi fruto da inexistência de dependência entre FEB e R com a idade e também com o porte das árvores (DAP e Ht). Estes autores, diante dos resultados por eles encontrado, ainda criticam as argumentações de Soares e Tomé (2004), afirmando que elas são pertinentes quando se

consideram povoamentos com grandes amplitudes etárias e que, todavia, nas idades mais jovens, ocorrem as maiores variações de FEB e R, devido às taxas de crescimento mais aceleradas e à diferença na alocação da biomassa aos distintos órgãos, com a maturação da planta.

É importante frisar que nos trabalhos supracitados neste item, as estimativas do estoque de carbono com base na FEB levaram em consideração também a razão de raízes, de modo que os resultados refletem o carbono total armazenado acima e abaixo do solo, diferentemente do estudo com *A. peregrina*, que não levou em consideração o R. Portanto, as estimativas aqui refletem o estoque de carbono somente na parte aérea das árvores.

Optou-se nesse estudo por contrastar cada método alternativo de estimativa do estoque de carbono diretamente com método de referência para toda a área do povoamento, onde foram amostradas 45 árvores, subdividas igualmente pelos três blocos. Outra opção metodológica que permitiria a comparação dos métodos para toda a biomassa (acima e abaixo do solo) seria a extrapolação da razão de raízes média (0,31) encontrada com base em apenas 15 árvores amostradas para os demais blocos do experimento. Entretanto, isto poderia incluir outros erros às estimativas.

Pela as estatísticas complementares, o método M2 e M4 foram os que apresentaram os melhores resultados. O M2 foi o menos viesado e o M4 apresentou os menores valores para a média das diferenças e para a raiz quadrada do erro. O método M1 foi o menos exato, apresentando os maiores valores para todas as estatísticas complementares analisadas (Tabela 16).

Tabela 16 – Estatísticas complementares para avaliação da precisão dos métodos de estimativa do estoque de carbono acima do solo para árvores de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Estatística	M1	M2	M3	M4	M5
<i>V</i> (%)	-13,70	-0,16	-13,88	6,17	-6,69
<i>MD</i> (%)	-13,70	16,17	20,88	8,53	11,07
<i>RQME</i> (%)	16,82	23,60	28,79	10,92	16,76

Em que: M1 = Estoque de carbono igual $Bio_{real} \times teor_{50\%}$, M2 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{Lab}$, M3 = estoque de carbono igual $Bio_{reg} \times teor_{50\%}$, M4 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{Lab}$, e M5 = estoque de carbono igual $Bio_{Feb} \times teor_{50\%}$, *V* = viés, *MD* = média das diferenças e *RQME* = raiz quadrada média do erro.

Fonte: o autor.

O interesse na medição precisa da biomassa florestal aumentou notavelmente nas décadas que se seguiram aos acordos feitos na Convenção-

Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, particularmente devido ao papel da biomassa florestal no armazenamento de carbono (DI COSMO; GASPARINI; TABACCHI, 2016). Dessa maneira, o presente estudo, vem contribuir com esta temática, aumentando a base de dados disponíveis na literatura mundial.

Considerando conjuntamente as estatísticas e a análise gráfica dos resíduos, o método M2, no qual o estoque de carbono foi estimado por meio da multiplicação entre a biomassa obtida pela equação de regressão ajustada aos dados de campo e teor de carbono determinado na amostra, foi igual estatisticamente ao método de referência e foi ele também o método que apresentou a maior exatidão. Portanto, o mais indicado na estimativa dessa variável. A sequência em ordem decrescente de exatidão das estimativas do estoque total de carbono acima do solo pelos métodos testados nesse estudo foi $M2 > M4 > M5 > M3 > M5$.

4.4 Biomassa e estoque de carbono acima do solo

Houve efeito significativo do espaçamento de plantio sobre todas as frações da biomassa acima do solo (Tabela 17). A biomassa total em $Mg\ ha^{-1}$ foi praticamente duas vezes mais alta no espaçamento $3 \times 2\ m$ ($1666\ árvores\ ha^{-1}$) do que no espaçamento $5 \times 5\ m$ com $400\ árvores\ ha^{-1}$. Valores mais baixos de biomassa para todos os componentes foram encontrados no espaçamento $4 \times 4\ m$, embora eles não tenham sido diferentes estatisticamente ($p < 0,05$) dos valores de biomassa observados nos espaçamentos $4 \times 3\ m$ e $5 \times 5\ m$. De modo geral, houve tendência de maior quantidade de biomassa nos espaçamentos mais adensados ($3 \times 2\ m$ e $3 \times 3\ m$) em relação aos espaçamentos maiores.

Os espaçamentos 3×2 e $3 \times 3\ m$ não diferiram estatisticamente entre si, sendo estes os que apresentaram os maiores valores para a biomassa total. Esse resultado indica que, para a idade estudada, nos espaçamentos menores predominam árvores com menor crescimento, sendo esta produção individual compensada pela densidade de indivíduos na área.

Tabela 17 – Biomassa total acima do solo e de seus componentes para o povoamento de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Biomassa acima do solo (Mg ha ⁻¹)				
	Total	Fuste com casca	Galhos	Folhas	Casca*
3 x 2	24,83 ± 7,63 a	10,07 ± 3,15 a	10,83 ± 3,72 a	3,85 ± 0,78 a	1,31 ± 0,30 a
3 x 3	19,03 ± 9,13 ab	7,75 ± 3,75 ab	8,53 ± 4,01 ab	2,70 ± 1,07 b	0,94 ± 0,40 b
4 x 3	14,26 ± 7,31 bc	5,81 ± 3,01 bc	6,41 ± 3,48 bc	1,99 ± 0,82 bc	0,70 ± 0,31 bc
4 X 4	11,05 ± 6,89 c	4,51 ± 2,84 c	4,99 ± 3,33 c	1,53 ± 0,72 c	0,54 ± 0,28 c
5 x 5	12,93 ± 7,08 bc	5,30 ± 2,93 bc	6,00 ± 3,49 bc	1,61 ± 0,65 c	0,58 ± 0,26 c
Média	16,42	6,69	7,35	2,34	0,81
CV (%)	111,01	44,73	65,81	19,29	6,36

CV = coeficiente de variação, * biomassa de casca no fuste. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância, pelo teste Tukey.

Fonte: o autor.

Resultado semelhante ao do povoamento de *A. peregrina* desse estudo foi observado por Eloy et al. (2015a) para *Mimosa scabrella*, com 36 meses de idade, no município de Frederico Westphalen, RS. Estes autores encontraram que o espaçamento de plantio com maior densidade de árvores (2,0 x 1,0 m) foi o que apresentou a maior quantidade de biomassa em comparação ao espaçamento mais amplo (3,0 x 1,5 m). Em outro estudo, na mesma área e idade e confrontando os mesmos tamanhos de espaçamento de plantio do estudo anterior, porém para a espécie *Acacia mearnsii* De Wild., Eloy et al. (2015b) encontraram o mesmo resultado.

Os resultados obtidos nesse estudo foram opostos aos encontrados por Rondon (2002), que confrontou a biomassa com sete espaçamentos, que contemplavam área vital variando de 2,25 até 16 m², e verificou que o maior espaçamento resultou em quantidade superior de biomassa para *S. amazonicum*, com 60 meses de idade. A diferença entre os resultados encontrados por Rondon (2002) e os deste estudo indica que para *S. amazonicum* a competição pelos fatores de crescimento, principalmente nos espaçamentos mais adensados, foi maior do que para *A. peregrina*, considerando que as idades de avaliação dos dois povoamentos foram próximas. Além disso, há que ressaltar que os espaços vitais de *A. peregrina* foram maiores do que os de *S. Amazonicum*, que variaram entre 6,0 e 25 m².

O crescimento diferenciado entre espécies dos gêneros *Anadenanthera* e *Schizolobium* foi reforçada pelos resultados do trabalho de Nascimento et al. (2012). Esses autores verificaram que o crescimento, aos 22 meses de idade, da espécie *Schizolobium parayba* foi muito superior ao da *Anadenanthera colubrina* (pertencente ao mesmo gênero da espécie objeto deste trabalho), sendo esta diferença para o diâmetro à altura do solo (DAS), aproximadamente o dobro do valor. Foi constatado ainda pelos autores que o espaçamento de plantio interferiu significativamente no crescimento das árvores das duas espécies, tendo os espaçamentos mais amplos (2 x 2 e 3 x 2 m) fornecido os maiores valores de DAS em relação aos espaçamentos mais reduzidos (1 x 1 e 1,5 x 1,5 m).

Ao comparar os valores médios de DAP para a população de *A. peregrina* apresentados na caracterização dendrométrica do povoamento (Tabela 5), e o estoque de biomassa, nota-se que estes tiveram relação inversa, ou seja, à medida que o espaçamento foi aumentado, os valores médios de DAP também aumentaram, enquanto a biomassa populacional diminuiu. Resultado semelhante foi encontrado por Vidaurre et al. (2015) que observaram que quanto maior foi o espaçamento em um povoamento de *Eucalyptus benthamii*, com 5 anos de idade, maior foi o DAP médio apresentado pelas árvores, afirmando que este já era um comportamento esperado.

Os valores populacionais de área basal e volume, normalmente, são menores em espaçamentos mais amplos, sendo este comportamento inverso ao das variáveis altura e diâmetro para árvores individuais. A área basal e o volume, e consequentemente a biomassa por hectare, são obtidos pelo somatório dos valores individuais de cada árvore. Assim, maior quantidade de indivíduos na área, mesmo com pequenos diâmetros, pode resultar em maiores valores para estas variáveis.

Com relação ao comportamento das variáveis dendrométricas, Schneider et al. (2015) alertam que o número de árvores provoca um aumento da área basal por hectare. Entretanto, quando a competição entre as árvores no povoamento é demasiadamente alta, inicia-se a mortalidade natural de árvores, o que pode alterar a área basal. Dessa maneira, é de se esperar que a quantidade de biomassa no povoamento de *A. peregrina* seja alterada à medida que as árvores crescem e é de se esperar também que esta alteração se inicie pelos espaçamentos mais reduzidos.

Os resultados obtidos nesse estudo para a *A. peregrina* indicam que espaçamentos mais reduzidos são os mais indicados em termos de estocagem de biomassa e captura de carbono da atmosfera. Entretanto, outros fatores devem ser considerados, tais como os custos de implantação e manutenção, a finalidade da produção e a facilidade de uso de máquinas.

Analisando os resultados da Tabela 17, observa-se que a biomassa total acima do solo foi a que apresentou a maior variação entre os espaçamentos (acima de 100%). Esta variação foi gerada principalmente pela quantidade de árvores e pela variação nos valores de biomassa do fuste e de galhos, que juntos responderam por aproximadamente 75% da massa seca total. Estes dois componentes apresentaram coeficiente de variação acima de 40%, sendo estes valores considerados altos. As folhas e a casca apresentaram baixos valores para o coeficiente de variação (< 20%).

Ainda na Tabela 17, nota-se que o valor da biomassa total não representa exatamente a soma direta dos valores das frações, com diferença após a segunda casa decimal. Esta diferença foi devida ao fato da biomassa total e os seus componentes terem sido estimados por meio de equações independentes, conforme apresentado anteriormente na Tabela 8. Uma alternativa a esse problema de mensuração é a utilizar ajuste de equações simultâneas. Segundo Coutinho et al. (2017), este procedimento evita possíveis distorções nas estimativas e permite aditividade aos modelos. Ressalta-se que não foi objetivo deste estudo comparar métodos de ajustamento de modelos para estimativa da biomassa. Além disso, o ajuste por meio de equações independentes utilizado neste estudo, para biomassa total, foi considerado satisfatório, conforme comentado anteriormente (Tabela 8).

A ordem de participação dos componentes na biomassa total acima do solo encontrada nesse estudo foi: galhos (44,99%), fuste (40,77%), folhas (13,99%) e casca (4,90%). Estes resultados são diferentes dos relatados na literatura quando se trata da participação individual de cada componente na biomassa total estocada na parte aérea das árvores, onde o fuste é, geralmente, o maior contribuinte desse compartimento, a exemplo de Ribeiro et al. (2015) que encontraram para clones de *Eucalyptus grandis*, com 54 meses de idade, na região central de MG, a seguinte ordem de participação: fuste (82%), casca (8%), galhos (7%) e folhas (3%).

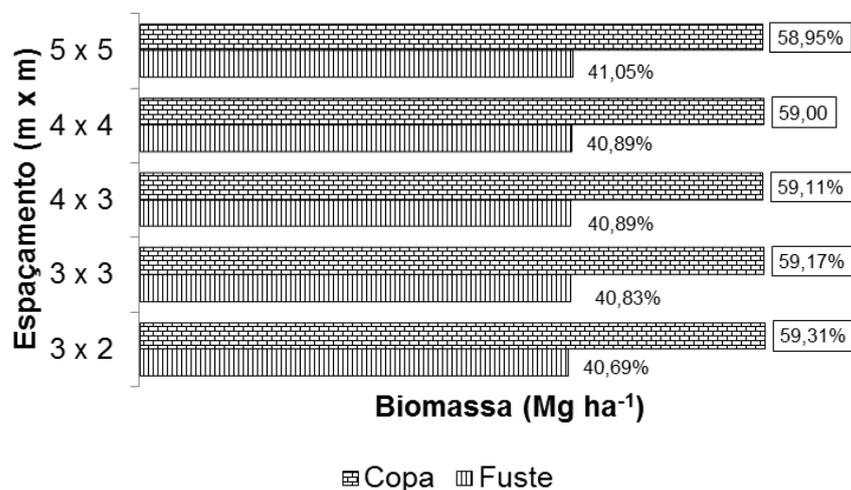
As diferenças quanto à participação dos componentes na biomassa total acima do solo encontrada nesse estudo e a encontrada por Ribeiro et al. (2015) pode ser explicada também pela arquitetura da copa das espécies, que pode afetar as proporções entre os componentes da biomassa. Naturalmente, *A. peregrina* é uma espécie que apresenta copa frondosa, do tipo simpodial, enquanto que a maioria das espécies do gênero *Eucalyptus* é reconhecida como possuidoras de copas ralas e de menor volume, do tipo monopodial. Todavia, não deve ser descartada a possibilidade de alteração nas proporções da biomassa entre os componentes com o aumento da idade das árvores. Além disso, estas proporções também podem ser influenciadas por tratamentos silviculturais, tais como desbaste e desrama.

Na condução do povoamento de *A. peregrina* não foi realizada a desrama artificial. A superioridade da fração galhos encontrada neste estudo em relação às demais, indica que, até os 56 meses de idade, não ocorre de forma expressiva, a queda natural dos galhos no povoamento. A desrama natural normalmente se intensifica com o aumento da competição entre as árvores do povoamento pelos fatores de crescimento, principalmente luminosidade. Quando a competição por luz no interior do povoamento é alta, os galhos localizados na porção inferior da copa das árvores são normalmente os mais afetados, com consequente redução da taxa fotossintética. Esta restrição à luz pode, pode desencadear um processo que vai culminar com a abscisão dos galhos do tronco da árvore, sendo este fenômeno conhecido como desrama natural.

Quando se compara a biomassa da copa (soma das frações folhas e galhos) com a biomassa do fuste com casca, a diferença entre esses dois compartimentos se torna ainda maior (Figura 10). A copa representou 58,98% da quantidade total de biomassa estocada na parte aérea, enquanto o fuste representou em média 40,77% desse total. Participação relativa de copa e fuste com casca próxima a desse estudo foi encontrada por Caldeira et al. (2000), para um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild, com 28 meses de idade em Butiá, RS. Neste estudo a copa (composta por folhas + galhos) contribui com 59,02% da matéria seca total da parte aérea, enquanto o fuste contribui com apenas com 40,8%. As árvores amostradas por Caldeira et al. (2000) tinham a metade da idade das árvores de *A. peregrina*

amostradas no presente estudo. Esta comparação indica que os fatores espécie e idade tem influência direta na partição da biomassa da parte aérea da árvore.

Figura 10 – Participação dos componentes copa (folhas + galhos) e fuste com casca na biomassa total acima do solo do povoamento de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

A quantificação da massa de casca da *A. peregrina* é um fator importante para esta espécie, tendo em vista que este componente da árvore é rico na concentração de taninos (LORENZI, 2000). A casca pode ser utilizada como insumo na indústria de curtume, gerando melhor aproveitamento de resíduos e servindo como uma fonte de renda adicional para o silvicultor que se interessar pelo plantio dessa espécie para fins comerciais (SARTORI et al., 2014).

A relação entre o teor de carbono e o de taninos constitui-se em objeto interessante de pesquisa. Uma das propriedades dos taninos na planta é a proteção ao ataque de fungos e insetos, por meio da liberação de substâncias com sabor adstringente, sendo esta proteção de alto custo de manutenção celular e com consumo de hidratos de carbono (MONTEIRO; ALBUQUERQUE; LIMA, 2005). A evidência da relação entre o carbono e o tanino na planta foi demonstrada por Furlan, Domingos e Salatino (1999) citados por Monteiro, Albuquerque e Lima, (2005). Estes autores constataram que a espécie *Tibouchina pulchra* Cogn. quando submetida a altas taxas de poluição atmosférica apresentou decréscimo de compostos fenólicos nas folhas, devido, provavelmente, ao baixo ganho de carbono.

O estoque de carbono representa a porção da biomassa ocupada exclusivamente por este elemento. Assim, o comportamento dessa variável seguiu a

tendência encontrada para biomassa, ou seja, os maiores valores ocorrem nos menores espaçamentos testados, diminuindo na medida em que o espaçamento foi ampliado (Tabela 18). Pequena distorção desta tendência foi apresentada entre os três últimos espaçamentos (4 x 3, 4 x 4 e 5 x 5 m), tal como ocorreu para a biomassa. Apesar de não ter havido diferença estatística significativa entre o 4 x 3 e o 5 x 5 m, o espaçamento 4 x 4 m foi o que apresentou menores valores médios populacionais para o estoque de carbono (total e frações). Este resultado pode ser atribuído ao maior diâmetro médio encontrado para as árvores no espaçamento 3 x 3 m em relação 4 x 4 m, que foram respectivamente, 7,42 e 7,28 cm. Outro fator que contribuiu para este resultado foi a maior sobrevivência apresentada pelo espaçamento 5 x 5 (95%) em comparação com 4 x 4 m (73%).

Tabela 18 – Estoque de carbono total acima do solo e de seus componentes para o povoamento de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Carbono acima do solo (Mg ha ⁻¹)				
	Total	Fuste	Galhos	Folhas	Casca
3 x 2	10,90 ± 3,37 a	4,43 ± 1,39 a	4,76 ± 1,65 a	1,69 ± 0,34 a	0,58 ± 0,13 a
3 x 3	8,36 ± 4,01 ab	3,41 ± 1,65 ab	3,75 ± 1,90 ab	1,19 ± 0,47 b	0,41 ± 0,17 b
4 x 3	6,26 ± 3,22 bc	2,56 ± 1,33 bc	2,82 ± 1,53 bc	0,88 ± 0,36 bc	0,31 ± 0,14 bc
4 X 4	4,85 ± 3,02 c	1,99 ± 1,26 c	2,19 ± 1,46 c	0,67 ± 0,31 c	0,24 ± 0,12 c
5 x 5	5,68 ± 3,11 bc	2,33 ± 1,29 bc	2,63 ± 1,53 bc	0,70 ± 0,29 c	0,26 ± 0,12 c
Média	7,21	2,94	3,23	1,03	0,36
CV (%)	48,74	19,65	20,55	8,50	2,79

CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância, pelo teste Tukey.

Fonte: o autor.

De acordo com os valores médios apresentados na Tabela 18, a ordem decrescente de participação dos componentes individuais no estoque de carbono foi: galhos (44,88%), fuste (40,78%) e folhas (14,29%). O estoque de carbono relativo às cascas já está incluído no percentual do fuste. Esta sequência coincide com a ordem de participação desses componentes na biomassa total da parte aérea, uma vez que o estoque foi calculado por meio da multiplicação direta dos teores de carbono de cada componente, pela sua respectiva biomassa. Uma explicação para a maior estocagem de carbono na copa em relação ao fuste pode ser atribuída à idade das

árvores amostradas. Como o povoamento ainda é novo (56 meses) é comum encontrar maior quantidade de carbono estocada na copa das árvores, em relação ao tronco, como por exemplo, Cotta et al. (2008) que encontraram o mesmo tipo de ordem de participação dos componentes no estoque de carbono em árvores de cacau, com 6 anos de idade.

Ordem diferente de participação dos componentes na biomassa e no estoque de carbono foi encontrada por Melo et al. (2014), para árvores de *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC. (Caixeta), no qual o fuste representou a maior porcentagem para a biomassa (38%). Depois do fuste, os maiores percentuais foram para os compartimentos galhos (33%), casca (18%), raízes (9%) e folhas (2%), tendo ainda esta mesma sequência se repetido na participação do estoque de carbono. O principal motivo para a diferença entre os resultados desta pesquisa e a de Melo et al. (2014) é as idades dos povoamentos, onde as árvores de *A. peregrina* tinham 56 meses, enquanto o povoamento de caixeta tinha idade aproximada de 30 anos, além de se tratarem de espécies diferentes.

4.5 Biomassa e estoque de carbono nas raízes

A caracterização dendrométrica das árvores amostradas para a estimativa da biomassa de raízes (Tabela 19) mostrou que os valores médios dos atributos encontrados para os espaçamentos com dimensões próximas 3 x 2 e 3 x 3 m foram discrepantes, principalmente com relação à BIOA e BIOR, indicando alta variabilidade nos dados individuais. A variação nos teores de carbono das raízes foi inferior a 1% para todos os espaçamentos, não sendo estes, portanto, os responsáveis pela variação das outras variáveis analisadas nesse estudo. É possível que a principal causa da alta variação tenha sido a forma de seleção das árvores, pois, estas foram selecionadas em três classes diferentes de diâmetros (DAP médio e $DAP \pm$ desvio padrão), dentro da cada tratamento.

Tabela 19 – Valores médios para a caracterização dendrométrica das quinze árvores amostradas para o estudo da biomassa e do estoque de carbono nas raízes no povoamento de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Variável	Espaçamento (m x m)				
	3 X 2	3 x 3	4 X 3	4 x 4	5 x 5
DAP (cm)	8,58 (17,87)	6,35 (26,77)	11,26 (7,60)	9,02 (22,92)	8,62 (10,56)
Ht (m)	8,91 (9,19)	7,93 (1,19)	9,00 (2,28)	9,39 (23,32)	9,09 (23,35)
BIOA (kg)	35,36 (36,52)	16,37 (48,26)	56,96 (46,57)	42,71(46,54)	50,10 (43,90)
BIOR (kg)	6,24 (28,47)	5,22 (39,57)	17,72 (36,84)	13,56 (30,37)	15,28 (53,70)
Razão de raízes (R)	0,20 (37,62)	0,33 (9,31)	0,34 (37,41)	0,37 (31,23)	0,31 (21,26)
Carbono na raiz (%)	44,11 (0,01)	44,16 (0,14)	44,33 (0,07)	44,14 (0,11)	44,18 (0,27)

DAP = diâmetro à altura do peito, Ht = altura total da parte aérea, BIOA = biomassa total da parte aérea e BIOR = biomassa total de raízes. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação, em porcentagem.

Fonte: o autor.

A média geral para a razão de raízes (R) foi igual a 0,31, oscilando entre 0,20 e 0,37. Os coeficientes de variação foram superiores a 30% para os espaçamentos 3 x 2, 4 x 3 e 4 x 4 m, demonstrado que a biomassa teve variação relativamente alta entre os indivíduos para cada espaçamento de plantio. O valor encontrado nesse estudo está próximo ao valor geral *default* (padrão) sugerido pelo IPCC (2006), em seu Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, que é igual a 0,37 para florestas tropicais. Para florestas tropicais secas, com biomassa acima do solo maior ou igual a 20 t ha⁻¹ o valor *default* sugerido pelo IPCC para R é igual a 0,28, sendo este mais próximo ainda do encontrado nesse estudo.

A biomassa acima do solo e das raízes, e por consequência a relação entre estes fatores, são muito variáveis nos ecossistemas florestais, pois dependem da espécie, idade, características do solo e do clima, dentre outros fatores. Os próprios valores de referência sugeridos IPCC (2006) demonstram que os valores de R podem ser muito variáveis. Por exemplo, para florestas tropicais úmidas, com BIOA < 125 Mg ha⁻¹, o valor sugerido é de 0,20, variando de 0,09 a 0,25 e para florestas tropicais secas, com BIOA < 20 Mg ha⁻¹ o valor sugerido para R é de 0,56, variando de 0,28 a 0,68. Para florestas subtropicais são sugeridos pelo IPCC valores para R que podem variar de 0,20 até 0,71.

Os valores de R desse estudo foram superiores ao encontrados por Sanquetta et al. (2014), em *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze., com idades aproximadas de 16 e 34 anos, na região sul do Brasil, que variaram de 0,03 a 0,12. Estes autores afirmaram que esta variação nos valores de R foi expressiva.

A razão de raízes para *A. peregrina* foi próxima às encontradas por Ribeiro et al. (2015), para clones de eucalipto aos 66 meses de idade, que vararam entre 0,10 a 0,25, sendo a média igual a 0,17 e o coeficiente de variação médio igual a 27,47%, afirmando estes autores, que esta variável foi relativamente estável. Valores próximos ao desse estudo, (a partir dos valores apresentados para biomassa de raízes e da parte aérea das árvores) também foram encontrados por Paixão et al. (2006) para eucalipto, com 60 meses de idade, e por Forster e Melo (2007) para árvores nativas, com idades entre 5 e 36 anos, em área de restauração no vale do Paranapanema, SP, sendo estes 0,31 e 0,25, respectivamente. Como a idade é um fator que pode interferir na alocação da biomassa e considerando que as árvores de *A. peregrina* avaliadas nesse estudo eram jovens, é esperado que a relação raízes/parte aérea seja alterada na medida em que as árvores forem se desenvolvendo.

A alteração na razão entre a massa de raízes e da parte aérea na medida do crescimento das árvores e por consequência do povoamento florestal, encontra embasamento no trabalho realizado por Ratuchne et al. (2016). Estes autores, a partir dos valores de biomassa da parte aérea e das raízes encontrados por Watzlawick et al. (2003), em uma Floresta Ombrófila Mista em General Carneiro, PR, encontraram valores, decrescente para R, sendo estes 0,55, 0,24 e 0,09 para os estágios inicial, médio e avançado da vegetação, respectivamente. Ao serem observados os valores *default* sugeridos pelo IPCC (2006), para um mesmo tipo de domínio florestal, os valores sugeridos para razão de raízes são menores à medida que a idade e o estágio de desenvolvimento do povoamento aumentam. Esta diminuição nos valores *default* se dá em função do maior estoque de biomassa acima do solo na área em função do desenvolvimento das árvores.

A biomassa e o estoque de carbono das raízes, em nível populacional, seguiram a mesma tendência da parte aérea do povoamento. Não houve uma separação muito evidente entre as médias populacionais para a alocação de biomassa e carbono das raízes. A separação mais nítida das médias ficou por conta dos espaçamentos 3 x 2 e 5 x 5 m, tendo nestes ocorrido o maior e o menor valor para estas variáveis, respectivamente. O espaçamento 5 x 5 m foi estatisticamente igual aos espaçamentos 4 x 3 e 4 x 4 m (Tabela 20). Pode-se inferir por esses resultados que a competição entre as árvores pelos fatores de crescimento,

especialmente luminosidade, até os 56 meses de idade, não foi excessiva no povoamento. Dessa maneira, as diferenças encontradas entre os espaçamentos foram causadas pela densidade de árvores no plantio, tendo em vista que esta, até certo ponto, é capaz de compensar o menor crescimento das árvores individuais nos espaçamentos mais reduzidos.

Tabela 20 – Comparação das médias populacionais para biomassa acima do solo, biomassa de raízes e estoque de carbono das raízes de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Biomassa acima do solo*	Biomassa de raízes*	Estoque de carbono das raízes*
	----- (Mg ha ⁻¹)		
3 x 2	33,15 ± 4,46 a	9,97 ± 1,11 a	4,40 ± 0,49 a
3 x 3	26,92 ± 1,21 ab	7,95 ± 0,08 ab	3,51 ± 0,03 ab
4 x 3	18,71 ± 3,77 b	5,40 ± 1,09 bc	2,39 ± 0,48 bc
4 x 4	19,79 ± 2,62 b	5,34 ± 0,52 bc	2,36 ± 0,23 bc
5 x 5	18,62 ± 3,62 b	4,72 ± 0,74 c	2,08 ± 0,32 c
Média	23,44	6,68	2,95
CV (%)	28,35	14,29	6,29

* Referente somente ao Bloco 3 do experimento. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: o autor.

A proporção média entre as estimativas populacionais para biomassa de raízes e a biomassa da parte aérea desse estudo foram, respectivamente, 22,18% e 77,82%. Esses valores foram próximos aos encontrados por Forster e Melo (2007) para um conjunto de 44 espécies de árvores nativas plantadas em área de restauração e com idades variando entre 5 e 36 anos, que foram iguais a 20,10 e 69,90% para biomassa de raízes e biomassa da parte aérea, respectivamente. Entre as espécies analisadas por Forster e Melo (2007), *Anadenanthera falcata* (Benth.) Speg, pertencente ao mesmo gênero botânico da espécie desse estudo, *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg, apresentou participação de 23,0% para biomassa de raízes e 77,0% para biomassa da parte aérea, sendo estas proporções também compatíveis com as encontradas no presente estudo.

A biomassa encontrada acima do solo e de raízes nesse estudo foi inferior aos valores encontrados por Torres et al. (2013), para espécies arbóreas em um

fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, em Viçosa, MG. Estes autores, ao utilizarem equações alométricas regionais, encontraram 80,41 Mg ha⁻¹ para a biomassa acima do solo e 14,80 Mg ha⁻¹ para a biomassa abaixo do solo. Ao utilizarem uma equação geral sugerida pelo IPCC (2006), a biomassa acima e abaixo do solo foram, respectivamente, 72,80 e 14,54 Mg ha⁻¹. Valores de biomassa e estoque de carbono superiores ao desse estudo também foram encontrados por Amaro et al. (2013) para outro fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, também no município de Viçosa, MG, que foram 158,91 Mg ha⁻¹ para biomassa da parte aérea, 29,25 Mg ha⁻¹ para biomassa de raízes, 76,04 Mg ha⁻¹ para o estoque de carbono na parte aérea e 13,97 Mg ha⁻¹ para o estoque de carbono nas raízes.

Em comparação com estudos realizados em ambientes de florestas inequiâneas, a exemplo de Torres et al. (2013) e Amaro et al. (2013) citados acima, a biomassa de raízes encontrada no povoamento de *A. peregrina*, até os 56 meses de idade e nas condições em que foi realizada a amostragem, pode ser considerada pequena. Entretanto, esta diferença tende a diminuir com o aumento da idade das árvores de *A. peregrina*. Deve-se ressaltar ainda que, apesar da quantidade de raízes encontrada nesse estudo ser considerada pequena, elas têm alta participação na produtividade dos ecossistemas florestais, uma vez que ela influencia no estoque de carbono no solo e que devido a este fato, as raízes, que frequentemente são excluídas dos estudos de biomassa, recentemente, passaram a ter maior atenção por parte dos pesquisadores (PRESCOTT et al., 2016).

4.6 Necromassa

A Necromassa, representada nesse estudo pela biomassa de galhos caídos sobre o piso florestal, e o estoque de carbono desse compartimento não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$) entre os diferentes espaçamentos de plantio. A média geral para necromassa e para estoque de carbono foi, respectivamente, 1,71 e 0,76 Mg ha⁻¹ e o coeficiente de variação médio para estas duas variáveis foi de aproximadamente 36% (Tabela 21). Apesar de existente, o nível baixo de competição entre as árvores no povoamento,

principalmente por luz, pode ter sido a principal razão para a não diferenciação da necromassa entre os espaçamentos de plantio.

Tabela 21 – valores médios de necromassa e estoque de carbono da necromassa no povoamento de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos, aos 60 meses de idade em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Necromassa (Mg ha ⁻¹)	Estoque de carbono (Mg ha ⁻¹)
3 x 2	1,91 ± 0,72	0,84 ± 0,32
3 x 3	2,31 ± 0,65	1,02 ± 0,29
4 x 3	1,56 ± 0,18	0,69 ± 0,08
4 x 4	1,57 ± 0,26	0,69 ± 0,20
5 x 5	1,21 ± 0,29	0,53 ± 0,10
Média	1,71	0,76
CV (%)	36,19	36,18

CV = coeficiente de variação.

Fonte: o autor.

Valores próximos ao desse estudo foram encontrados por Mota e Torezan (2013) em uma área de reflorestamento com espécies nativas da Mata Atlântica, com espaçamento 3 x 2 m e seis anos idade, no Paraná. Estes autores encontraram valor de necromassa de galhos caídos sobre o piso florestal (diâmetro ≥ 1,0 cm e < 5,0 cm) igual a 2,26 Mg ha⁻¹. Ainda nesse estudo, eles encontram para áreas com quatro e oito anos de idade valores para esse compartimento igual a 3,46 Mg ha⁻¹, e 13,26 Mg ha⁻¹, respectivamente, sendo estes maiores do que os encontrados para *A. peregrina*.

Os teores de carbono da necromassa também não diferiram estatística entre os espaçamentos de plantio testados, variando entre 440,5 e 442,9 g kg⁻¹, com média geral igual a 440,5 g kg⁻¹ (P > 0,05). Como o tipo de material analisado para determinação dos teores de carbono se refere ao mesmo órgão da árvore (galhos), e apesar de não ter sido objeto de avaliação nesse estudo, aparentavam estágio de decomposição próximo, era esperado que os teores de carbono não fossem significativamente afetados. O estoque de carbono foi obtido pela multiplicação dos valores de necromassa pelos respectivos valores de teor de carbono determinado na amostra. A não diferenciação estatística para estas duas variáveis quando analisadas isoladamente levou, conseqüentemente, à ausência de diferença estatística para o estoque de carbono entre os espaçamentos de plantio.

Com menor área disponível para a árvore crescer, era esperado que nos espaçamentos mais reduzidos fossem encontradas maiores quantidades de necromassa em relação aos espaçamentos mais amplos. Porém isso não ocorreu nesse estudo. A explicação para este resultado pode estar associada às características ecológicas da espécie e à época de coleta dos dados, pois *A. peregrina* é uma espécie decídua (LORENZI, 2009), caracterizada pela perda das folhas e galhos finos em condições de déficit hídrico. A amostragem da necromassa foi realizada em uma única etapa, na estação seca, tendo os galhos amostrados diâmetro inferior a 5,0 cm. A época da coleta pode ter influenciado, de forma generalizada, na quantidade de necromassa do povoamento, mascarando o efeito da competição por espaço vital.

A necromassa e o estoque de carbono desse compartimento variaram consideravelmente entre os espaçamentos, com coeficientes de variação acima de 35%. Já o teor de carbono foi estável, com coeficiente de variação inferior a 1%. O teor de carbono é uma característica química com valores mais ou menos constantes para cada órgão da planta. Vários fatores podem ser causas de variação no estoque de necromassa e carbono, tais como: quantidade de radiação que atinge o piso florestal, umidade, taxa de decomposição dos resíduos e idade do povoamento. Dessa maneira, mais estudos na área, que avaliem de forma qualitativa e quantitativa e em diferentes épocas de amostragem, são necessários para explicar melhor as variações encontradas para este compartimento neste ensaio experimental.

4.7 Estoque de carbono no solo

O estoque de carbono no solo não diferiu estatisticamente entre os diferentes espaçamentos de plantio para nenhuma das profundidades (0-5, 5-10 e 10-20 cm), bem como para a profundidade total de solo avaliada nesse estudo (0-20 cm), de acordo com o teste F ($p > 0,05$). Na Tabela 22 são apresentadas as médias com os respectivos desvios padrão em cada espaçamento de plantio e profundidades avaliadas.

Tabela 22 – Estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}) do povoamento de *A. peregrina*, em diferentes espaçamentos e aos 68 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

Espaçamento (m x m)	Profundidade de solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	0-20
3 x 2	13,04 ± 3,50	10,25 ± 2,32	16,61 ± 3,48	39,97 ± 2,60
3 x 3	12,57 ± 4,14	9,57 ± 2,86	18,29 ± 6,04	40,48 ± 3,62
4 x 3	11,89 ± 3,98	9,51 ± 2,01	18,10 ± 4,57	39,55 ± 3,63
4 x 4	12,55 ± 2,56	9,65 ± 1,99	16,28 ± 3,94	37,55 ± 3,12
5 x 5	11,49 ± 3,02	10,83 ± 3,33	18,58 ± 5,68	40,97 ± 3,51

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: o autor.

A média geral para o estoque de carbono na profundidade de 0-20 cm do solo foi $39,52 \text{ Mg ha}^{-1}$. Considerando a mesma profundidade de amostragem, esses valores estão dentro da faixa de carbono orgânico no solo citadas na literatura para a maioria dos estudos, para a uma ampla variação de locais, tipos e idades de vegetação (Tabela 23). Estoques de carbono orgânico do solo são influenciados pelo uso da terra e gestão das atividades que afetam as taxas de entrada e de saída desse elemento do sistema. As entradas são controladas por decisões que impactam na produção de biomassa e ou na sua manutenção como cobertura morta sobre o solo. As saídas são influenciadas, principalmente, por decisões que afetem a atividade microbiana e a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, como por exemplo, a intensidade de preparo e erosão do solo (IPCC, 2007).

O maior estoque de carbono foi encontrado nas camadas superficiais do solo. Isto se deve à maior concentração de raízes nestas camadas, especialmente raízes finas, que promovem a entrada de carbono por meio da liberação de exsudados e da sua decomposição no processo de renovação radicular. Além disso, o maior aporte de resíduos orgânicos em função de senescência de galhos e folhas se encontra nas camadas mais superficiais do solo. Vários trabalhos na literatura evidenciam que o estoque de carbono no solo é maior nas camadas mais superficiais (ANDRADE; BROOK; IBRAHIM, 2008; CARDOSO et al., 2010; PULROLNIK et al., 2009; SALTON et al., 2011; ROSA; SANO; ROSENDO, 2014). Todos os trabalhos associam este fato ao maior aporte de resíduos orgânicos em superfície.

Tabela 23 – Estoque total de carbono orgânico no solo para a profundidade de 0-20 cm, em diferentes locais, tipos e idades de vegetação

Vegetação/espécie	Idade (anos)	Local	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Referência
<i>Eucalyptus urophylla</i>	20	Itamarandiba, MG	45,80	(PULROLNIK et al., 2009)
<i>Mata nativa semidecidual</i>	-	Nhecolândia-MS	38,87	(CARDOSO et al., 2010)
<i>Pinos, gramíneas, arbustos, alfafa, áreas em regeneração natural, floresta nativa e eucalipto</i>	-	China, Argentina, Espanha e Brasil	13,30 a 43,14	(NASCIMENTO et al., 2011)
<i>Cerrado nativo</i>	-	Rio Verde-GO	37,89	(D'ANDRÉA et al., 2004)
<i>Brachiaria decumbens</i>	>15	Rio Verde-GO	40,61	(D'ANDRÉA et al., 2004)
<i>Plantio direto com milho</i>	>15	Rio Verde-GO	40,16	(D'ANDRÉA et al., 2004)
<i>Plantio convencional de longa duração</i>	>15	Rio Verde-GO	34,06	(D'ANDRÉA et al., 2004)

Fonte: o autor.

A correlação linear de Pearson, ao nível de 5% de significância, entre o estoque de carbono no solo (profundidade 0-20 cm) e biomassa total da parte aérea foi altamente não significativa ($r = 0,0757$; $p = 0,621$). A falta de correlação entre essa variável e biomassa da parte aérea pode ter sido atribuída, em parte, à incorporação de carbono no solo advindo da decomposição da matéria morta da brachiaria que antes da implantação florestal era a vegetação que fazia a cobertura do solo e que foi gradativamente desaparecendo da área à medida que as árvores desenvolveram.

A maioria das espécies de gramíneas, a exemplo da brachiaria, é altamente exigente à incidência de luz solar. Na medida que o povoamento florestal se desenvolve e ocorre o aumento da área de solo coberta pela copa das árvores, a gramínea tende a ser suprimida da área. Com o sombreamento, a gramínea reduz gradativamente a sua atividade fotossintética e a partir daí inicia-se um processo de senescência, que irá contribuir com aporte de resíduos orgânicos sobre o solo.

Outro fator que pode ter afetado a correlação entre o estoque de carbono no solo e biomassa aérea é o fato da *A. peregrina* ser uma espécie leguminosa e que apresenta potencial de fixação de nitrogênio disponível na atmosférica, influenciando na taxa de crescimento das árvores, tendo em vista que este é o nutriente mais demandados pelos vegetais, principalmente na fase inicial. Segundo Prado, Turetta e Andrade (2010) diversos estudos têm demonstrado que a fixação biológica de nitrogênio é um dos principais processos para incrementar o balanço positivo desse nutriente nos sistemas agrícolas. Cabe ressaltar que resíduos de plantas fixadoras de nitrogênio apresentam menor relação C/N, o que favorece o processo de decomposição e emissão de CO₂ para a atmosfera.

4.8 Mudanças no estoque de carbono do solo após a introdução das árvores

As médias de estoque de carbono no solo para a profundidade de 0-20 cm foram estatisticamente diferentes para as amostras coletadas antes (9 meses antes do plantio) e após a implantação do povoamento de *A. peregrina* (68 meses de idade) de acordo com o teste t-pareado ($p > 0,05$). No período de avaliação desse estudo (9 + 68 = 77 meses), em média, o estoque de carbono do solo, para a profundidade 0-20 cm, diminuiu em 22,72% (Tabela 24).

Tabela 24 – Estoque de carbono no solo, para a profundidade 0-20 cm, antes e após a implantação do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES

Bloco	Estoque de carbono no solo (Mg ha ⁻¹)			
	Antes	Após	DM	DM (%)
1	36,26 ± 7,03	26,45 ± 7,14	- 9,81	- 27,04
2	43,92 ± 8,96	33,22 ± 5,12	- 10,71	- 24,38
3	37,81 ± 3,46	31,49 ± 5,23	- 6,33	- 16,73
Média	39,33 ± 6,48	30,38 ± 5,83	- 8,95	- 22,72

Em que: DM = diferença entre média.

Fonte: o autor.

O estoque de carbono orgânico do solo (COS) é bastante alterado após a mudança do uso da terra (SHI et al., 2016). Estes autores realizaram uma meta-análise global, relativa ao período de 1993 a 2015, e constataram que a implantação

de florestas em áreas ocupadas por culturas agrícolas promoveu um acréscimo de 26,8% de COS e em áreas onde antes não havia cobertura vegetal (áreas degradadas) o aumento de COS foi de 50,6%. Em locais antes dominados com pastagem, os autores constaram que COS foi reduzido em 2,6% após a implantação florestal, sendo esta alteração não significativa e inferior à encontrada no presente estudo.

No local onde foi instalado o povoamento predomina o clima é do tipo tropical com inverno seco, podendo ocorrer até seis meses sem chuvas. Nestas condições, a produtividade da biomassa arbórea diminui, por outro lado, a decomposição e a mineralização da matéria orgânica do solo aumenta, acarretando em redução no estoque de carbono do solo. Gatto et al. (2010) compararam solos de cinco locais na região centro-leste de Minas Gerais com plantio de eucalipto. Estes autores constataram que as variáveis climáticas, em especial o *déficit* hídrico, tiveram influência no estoque de carbono do solo, afirmando que esta condição favoreceu maior mineralização da matéria orgânica.

Outro motivo que diretamente contribuiu para a diferença nos estoques de carbono antes e após o plantio foram os menores valores de densidade do solo encontrados aos 68 meses de idade do povoamento (Tabela 25).

Tabela 25 – Densidade média do solo (g cm^{-3}) para a profundidade 0-20 cm, antes e após a implantação do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre-ES

Bloco	Antes	Após
1	1,49	1,23
2	1,53	1,27
3	1,55	1,23
Média	1,52	1,25
CV(%)	7,25	4,79

Fonte: o autor.

À medida que o sistema radicular da árvore se desenvolve, uma maior camada de solo é explorada pelas raízes, promovendo a desagregação das partículas e um aumento da umidade, em contrapartida, a densidade do solo diminui. Além disso, com o desenvolvimento do sistema radicular ocorre a maior exsudação de compostos no solo, que favorece a atividade microbiana, a decomposição e a mineralização mais rápida da matéria orgânica. O estoque de carbono no solo nesse estudo foi calculado por meio da multiplicação direta da DS

pelo teor de carbono e pela espessura da camada (Equação 12). Assim, a redução da DS irá diretamente levar a um menor estoque de COS.

Uma melhor compreensão das alterações no estoque de carbono do solo em função da conversão da área de pastagem para floresta pode ser feita por meio da análise de abundância natural dos isótopos de carbono. A abundância isotópica natural do ^{13}C expresso em $\delta^{13}\text{C}$, encontrada nesse estudo foi igual $-28,67\text{‰}$ (partes por mil) para a serapilheira foliar das árvores de *A. peregrina* (plantas com metabolismo fotossintético do tipo C_3) e $-13,92\text{‰}$ para as folhas senescentes da pastagem (plantas com metabolismo fotossintético do tipo C_4). Esses resultados foram compatíveis com o padrão internacional V-PDB (Vienna-Pee Dee Belemite), o qual menciona valores de $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -22 e -33‰ para plantas com metabolismo C_3 e entre -9 e -16‰ plantas com metabolismo C_4 (Deimes, 1980 citado por BALIEIRO et al., 2008).

Além do padrão V-PDB, os resultados do fracionamento isotópico encontrados nesse estudo encontram respaldo no trabalho realizado por Pereira et al (2007), que citam que para plantas com metabolismo do tipo C_3 , em média a abundância isotópica do carbono é de $-27,8\text{‰}$. Como resultado da investigação das razões isotópicas em um grupo formado por 104 espécies vegetais, Smith e Epstein (1971) encontram valores de $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -24 a -34‰ e entre -6 a -19‰ , respectivamente, para plantas do tipo C_3 e C_4 .

Essa diferenciação ocorre pelo fato que plantas C_4 fazem a fixação do CO_2 capturado da atmosfera durante o processo fotossintético por meio da enzima *Phosphoenolpyruvato Carboxilase* (PEP-Carboxilase), que discrimina menos o ^{13}C em comparação à *Ribulose 1-5-Biphosphato Carboxilase* (RUBISCO), que é enzima que faz a fixação do CO_2 durante a fotossíntese das árvores, que são plantas de metabolismos do tipo C_3 . Desse modo, plantas C_4 são mais enriquecidas com ^{13}C em relação a plantas C_3 , o que faz com que elas apresentem um valor menos negativo para a relação $\delta^{13}\text{C}/\delta^{12}\text{C}$ (O'LEARY, 1981).

O solo sob a pastagem apresentou $\delta^{13}\text{C}$ média igual a $-16,49\text{‰}$, sendo este valor menos negativo do que o apresentado pelo solo sob o povoamento de *A. peregrina* $-19,59\text{‰}$ (Tabela 26). Esse resultado indica que na área da pastagem a composição da MOS é influenciada pela gramínea (C_4), enquanto que na área sob o

povoamento florestal, aos 68 meses após o plantio, uma fração da MOS inicial foi substituída pelo carbono oriundo das árvores plantadas.

Tabela 26 – Abundância isotópica natural do ^{13}C do solo da pastagem e do solo do povoamento de *A. peregrina*, aos 68 meses após a implantação e até 20 cm de profundidade, em Rive, Alegre, ES

Profundidade	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) <i>A. peregrina</i>	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) Pastagem
0—5	-20,04	-15,65
5—10	-19,06	-16,35
10—20	-19,66	-17,47
Média	-19,59	-16,49

Fonte: o autor.

Os resultados desse estudo demonstram que a conversão da área de pasto para floresta, ao final dos 68 meses, provocou modificações na relação isotópica do carbono. Machado et al. (2011) citam que quando há a substituição de uma espécie dominante do tipo C_4 por outra(s) do tipo C_3 , ou vice-versa ocorre alterações na relações isotópicas e que essas alterações têm sido úteis para compreender a dinâmica da MOS após a conversão de áreas de pastagens por plantios florestais.

Esses resultados podem ser explicados pelo tipo de material vegetal aportado na superfície do solo. Na medida do desenvolvimento das árvores no povoamento, uma menor quantidade de luminosidade chega até o piso florestal, ocasionando a supressão gradativa da gramínea na área, pois esta é altamente exigente em luz para realização dos processos metabólicos. Com a dominância das árvores no sistema, ocorre o aporte de material vegetal com menor $\delta^{13}\text{C}$ (mais negativo), caracterizando a entrada de carbono oriundo de plantas C_3 na composição da MOS.

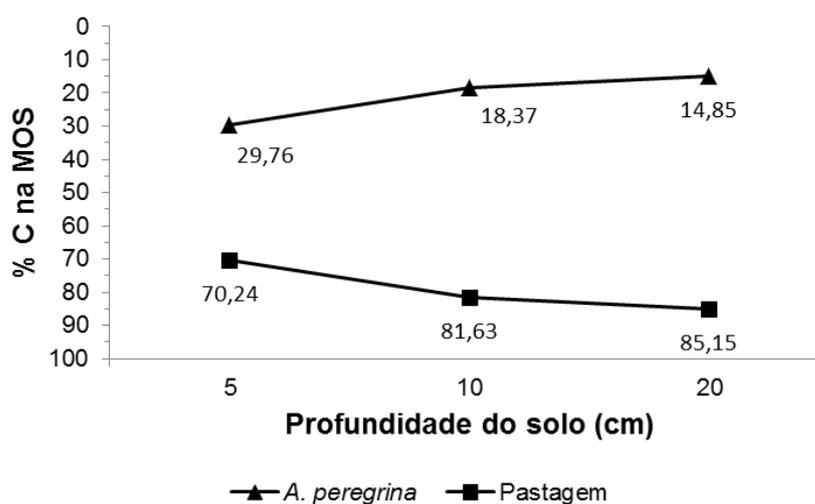
Na área do povoamento de *A. peregrina*, o efeito da substituição do carbono do solo oriundo da gramínea pelo carbono oriundo das árvores é mais pronunciado na profundidade superficial do solo (0-5 cm), sendo que nesta profundidade os valores $\delta^{13}\text{C}$ foram mais negativos do que nas profundidades inferiores. Na área de pastagem (referência) percebe-se uma inversão dos valores, ou seja, na profundidade superficial do solo ocorre valores menos negativos, com tendência deles serem mais negativos à medida que se aprofunda no perfil do solo (Tabela 26).

Todavia, a camada superficial do solo é a que promove maior interação com os fatores relacionados à decomposição da matéria orgânica (temperatura, umidade

e fauna decompositora). Por este motivo, esta camada responde mais rapidamente às alterações no ecossistema em comparação com as camadas subsuperficiais. Segundo Coutinho et al. (2010), em profundidades maiores (abaixo de 40 cm) a dinâmica do carbono é mais lenta. Além disso, é na superfície do solo que ocorre o aporte dos resíduos orgânicos da vegetação e é nesta camada também que ocorre a maior concentração e renovação de raízes finas, processo que contribui de forma relevante no estoque de carbono do solo.

Em termos quantitativos, a contribuição das árvores de *A. peregrina* no estoque de carbono do solo variou de 14,85 a 29,76% (média 20,99%). Na pastagem esta contribuição variou de 70,24 a 85,15% (média de 79,01%) (Figura 11).

Figura 11 – Participação relativa das *A. peregrina* e da pastagem na matéria orgânica do solo, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

É importante destacar que a substituição da gramínea por árvores contribuiu para a redução do estoque total de carbono no solo, Aliado a isto, *A. peregrina* é uma espécie leguminosa e, portanto, com potencial de fixação de N_2 da atmosfera, o que pode resultar no aporte de resíduos vegetais com menor relação C/N e, conseqüentemente, potencializar as perdas de carbono pela maior velocidade de decomposição desse material (COUTINHO et al., 2010).

Considerando o estoque médio de carbono no solo ($30,39 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tabela 26) e contribuição média das árvores de *A. peregrina* na MOS (20,99%), o povoamento florestal, aos 68 meses de idade, adicionou ao solo uma quantidade de carbono de $6,38 \text{ Mg ha}^{-1}$, A substituição do carbono do solo oriundo da planta C_4 em

função da conversão da área para floresta também foi verificada por Coutinho et al. (2010), que constataram para a profundidade até 1,0 m e após 35 anos de regeneração da floresta, que houve grande contribuição do carbono derivado das raízes das plantas arbóreas, com substituição praticamente total do carbono derivado da pastagem.

A contribuição das árvores de *A. peregrina* no estoque total de carbono foi pequena, comparada aos resultados encontrados por Coutinho et al. (2010). Entretanto, o povoamento objeto desse estudo apresentava idade próxima de 6,5 anos, enquanto a floresta regenerada naturalmente estudada por estes autores tinha 35 anos de idade. Dessa maneira, espera-se que a contribuição da *A. peregrina* no estoque de carbono no solo aumente com o passar dos anos e o desenvolvimento das árvores.

Foi demonstrada anteriormente que a conversão da área de pasto para floresta, promoveu uma redução média no estoque de carbono de 22,72%, num período de 77 meses (Tabela 26). Sob a ótica das mudanças climáticas, a princípio, esse resultado pode levar à interpretação equivocada de que esta conversão não é uma prática interessante. Entretanto, os resultados do presente estudo demonstram que esta conversão promoveu alterações na relação isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do solo, de modo que o ^{13}C oriundo da pastagem está sendo gradativamente substituído pelo ^{13}C oriundo das árvores.

4.9 Estoque total de carbono no povoamento de *A. peregrina* após 68 meses de plantio

Neste item procurou-se estimar a quantidade total de carbono estocado na área do povoamento. Os resultados foram considerados sob duas abordagens diferentes, de acordo com a coleta dos dados.

Na primeira abordagem foi estimado o estoque total de carbono para toda a área plantada (Bloco 1, Bloco 2 e Bloco 3), considerando apenas os compartimentos da biomassa total da parte aérea da árvore e o solo (profundidade 0-20 cm). Na

segunda abordagem, foi estimado o estoque total de carbono para os quatro compartimentos analisados (parte aérea total da árvore, solo, raízes e necromassa), sendo os dados dessa segunda abordagem oriundos somente do Bloco 3 do experimento. Com a primeira abordagem objetivou-se conhecer qual a quantidade de créditos de carbono, na forma de Certificado de Emissões Reduzidas – CERs, o povoamento poderia gerar no mercado de créditos de carbono. Na segunda abordagem o objetivo foi verificar a participação de cada compartimento no estoque total de carbono do povoamento.

1ª abordagem – Estoque total de carbono na área do povoamento

O estoque total de carbono estimado no povoamento florestal, considerando os compartimentos acima do solo e o solo, foi de 316,67 Mg (7,21 Mg ha⁻¹). O solo foi responsável pela a estocagem de 84,63% desse total, enquanto que a parte aérea das árvores contribuiu com 15,37% (Tabela 27).

Tabela 27 – Estoque total de carbono, considerando a parte aérea das árvores de *A. peregrina* e o solo do povoamento, em Rive, Alegre, ES

	Parte aérea*	Solo**	Total
Carbono (Mg)	48,67 (7,21)	267,99 (39,70)	316,67 (46,97)
CO _{2eq} (Mg)	178,47 (26,24)	982,65 (145,58)	1161,12 (172,02)
CV (%)	55,61	20,26	19,73

* = 56 meses de idade, ** = 68 meses após implantação do povoamento, CO_{2eq} = carbono equivalente, CV (%) = coeficiente de variação. Valores entre parênteses referem-se ao estoque de carbono em Mg ha⁻¹.

Fonte: o autor.

Para a madeira do tronco sem casca de um povoamento de *Tectona grandis* L. f., com nove anos de idade no sudoeste de Mato Grosso, Roquette, Drescher e Pelissari (2012) encontraram um estoque total de carbono igual a 2463,69 Mg (79,81 Mg ha⁻¹). Paixão et al. (2006) para um povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com 72 meses de idade em espaçamento de 3 x 2 m, em Viçosa, MG, encontraram um estoque total de carbono igual a 71,13 Mg ha⁻¹. Desse total, 47,70 Mg ha⁻¹ estavam retidos na parte aérea das árvores.

Os valores encontrados para os dois trabalhos citados acima são superiores aos encontrados nesse estudo. Essas diferenças foram devidas as características das espécies estudadas, idades, locais de plantio e forma de seleção das árvores-

amostra empregadas em cada estudo. Torres et al. (2013) reforçam que na quantificação da biomassa e do carbono é necessária a realização de mais estudos, em diferentes tipologias florestais para que haja uma padronização das metodologias, o que aumentaria os bancos de dados e as bases comparativas entre os estudos.

Uma das possibilidades de negócio quando se quantifica o estoque de carbono nas florestas plantadas é a possibilidade de inserção no mercado voluntário de créditos de carbono, na forma de CERs, prevista no Protocolo de Kyoto. A conversão do carbono estocado em CO_{2eq} pode ser feita multiplicando-se o total de carbono pelo fator 3,6667, que corresponde à razão entre o peso molecular do CO₂ e o peso atômico do carbono, ou seja, 44/12 (IPCC, 2006).

De acordo com os valores apresentados na Tabela 27, o carbono total estocado no povoamento equivale a 1161,12 toneladas de CO_{2eq} (1 Mg equivale a 1 tonelada) retiradas da atmosfera, sendo 178,47 toneladas desse total referente à parte aérea das árvores. Considerando que todo o carbono estocado pudesse ser convertido em créditos de carbono, ou seja, que a linha de base do projeto fosse o solo, sem carbono estocado sobre ele e assumindo o valor médio de US\$ 10,00 para a tonelada de carbono fixada no mercado de créditos, tal como foi o procedimento adotado por Paixão et al. (2006), o povoamento de *A. peregrina* desse estudo acarretaria no valor monetário bruto de US\$ 1784,70, aos 56 meses de idade, o que equivale a US\$ 56,70 ha⁻¹ano⁻¹ ou R\$187,67 ha⁻¹ano⁻¹ (cotação em 03 nov. 2017).

O valor monetário auferido no povoamento de *A. peregrina* (R\$ 187,68 ha⁻¹ano⁻¹) é muito inferior aos encontrados por Fajardo e Timofeiczuk Junior (2015) para uma área de floresta nativa manejada no estado do Ceará, aos preços e custos do ano de 2012, que foram: R\$ 1336,00 se vendido no mercado NZ ETS e, se vendido no mercado VCS geraria R\$ 2138,00 de renda. Entretanto, no MDL, este valor gerado seria de -R\$ 702,50 (o valor negativo se deve ao maior custo do projeto no MDL), sendo o projeto viável no mercado voluntário e inviável no mercado regulado.

O valor auferido para o povoamento de *A. peregrina*, visando somente a comercialização de créditos no mercado de carbono, é muito pequeno, tornando a atividade pouco atrativa. Entretanto, na venda de créditos de carbono a receita é auferida no início do projeto, o que representa uma grande vantagem (PAIXÃO et

al., 2006). A valoração econômico-ecológica é um procedimento mais adequado do que a valoração da floresta somente pela ótica ambiental, pois o primeiro procedimento considera pressupostos mais realistas sobre o comportamento e a capacidade humana na avaliação de recursos naturais, o que conduz a proposições metodológicas de valoração bem mais complexas (RODRIGUES, 2014). Assim, devem-se considerar ainda na avaliação do povoamento de *A. peregrina*, além dos serviços ambientais prestados, outras atividades consorciadas com a floresta, como por exemplo, a apicultura e o aporte financeiro com a venda da madeira no final da rotação.

2ª abordagem – participação dos compartimentos no estoque total de carbono do ecossistema

Os dados coletados no ensaio experimental (Bloco 3) permitiram estimar a participação de cada compartimento (parte aérea, raízes, necromassa e solo) no estoque global de carbono do ecossistema. O solo foi o que estocou a maior quantidade de carbono, seguido pela parte aérea e depois pelas raízes. A necromassa foi o componente que estocou a menor quantidade de carbono (Tabela 28 e Figura 12).

Tabela 28 – Estoque médio de carbono da parte aérea, raízes, necromassa e solo para no Bloco 3 do povoamento de *A. peregrina*, aos 56 meses de idade, em Rive, Alegre, ES

	Parte aérea	Raízes	Necromassa	Solo*	Total
Estoque de carbono (Mg ha ⁻¹)	10,30	2,95	1,71	34,28	49,24
CV (%)	28,45	32,01	38,37	13,29	13,08

* Profundidade de 0 - 20 cm e aos 68 meses após o plantio das árvores.

Fonte: o autor.

Figura 12 – Participação relativa individual dos componentes no estoque total de carbono do ecossistema, para no Bloco 3 do povoamento de *A. peregrina*, em Rive, Alegre, ES



Fonte: o autor.

A ordem decrescente de participação dos compartimentos no estoque total de carbono na área encontrada nesse estudo foi semelhante à encontrada por Mass (2015). Esta autora encontrou para um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Paraná, para um total de 256 Mg Cha^{-1} , que o solo participou com 50%, seguido da árvore (parte aérea + raízes) (46%) e depois pela necromassa (4%).

A raiz é o componente arbóreo da biomassa localizado abaixo da superfície do solo e tem como principais funções a absorção de água e de nutrientes. Já a necromassa, segundo Parron et al. (2015), é o material caído no chão da floresta e que não faz parte da serapilheira, com diâmetro superior a 2 cm. Estes dois compartimentos tiveram uma pequena magnitude de participação no estoque total de carbono (3 e 6%, respectivamente). Entretanto exercem papel importante no ecossistema, pois contribuem para a redução na quantidade de CO_2 na atmosfera e, além da absorção feita pelas raízes, atuam indiretamente no crescimento das árvores, tendo em vista a liberação de nutrientes para o solo durante o processo de decomposição.

Os resultados desse estudo apontaram no solo foi o local que acumulou maior quantidade de carbono. Segundo Swift (2001), os solos contêm mais carbono do que as quantidades totais combinadas da vegetação e da atmosfera, sendo conseqüentemente, um importante reservatório de carbono e o componente principal do ciclo desse elemento no ecossistema terrestre. Se forem considerados apenas os compartimentos relativos à vegetação, ou seja, desconsiderando o solo, o carbono da parte aérea, sozinho, representa 64,5% (10,30 Mg ha⁻¹) e o das raízes 18,5% (2,95 Mg ha⁻¹) do total estocado para o Bloco 3 do povoamento de *A. peregrina*.

Participação relativa no estoque de carbono, quando se considera somente a parte aérea e as raízes, semelhante a esse estudo foi encontrada por Torres et al. (2013), para um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, onde 81,26% do carbono estavam contidos na parte aérea e 15,6% nas raízes das espécies. Paixão et al. (2006) também encontraram resultados semelhantes ao desse estudo para uma plantação de eucalipto com seis anos de idade, sendo 67,06% do carbono estavam estocados na parte aérea das árvores e 20,68% nas raízes. Ambos os estudos foram realizados no município de Viçosa, MG.

Percentuais não muito discrepantes ao desse estudo foram encontrados por Amaro et al. (2013), em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual de 17 ha, também no município de Viçosa, MG, onde a parte aérea e as raízes representaram, respectivamente, 85,8% e 14,2% do estoque total de carbono. Segundo estes autores, a maioria dos trabalhos estima somente o estoque de carbono de árvores vivas acima do solo, e que a inclusão de outros compartimentos, além de fornecer estimativas mais precisas, permite um melhor conhecimento da dinâmica do ciclo de carbono.

5 CONCLUSÕES

O grupo formado pelo fuste, cascas, galhos e raízes apresentou os maiores teores de carbono, entre os compartimentos da biomassa avaliados nesse estudo, enquanto o grupo formado pelas folhas e necromassa apresentou os menores teores.

Não houve correlação entre os teores de carbono do fuste e a densidade básica da madeira. Os teores de carbono e a densidade básica da madeira não foram influenciados pelo espaçamento de plantio.

A posição axial no fuste não afetou os teores de carbono. Entretanto, esta afetou significativamente a densidade, sendo os maiores e os menores valores encontrados, respectivamente, próximo à base e próximo à extremidade do fuste.

O método M2, obtido por meio da multiplicação da biomassa estimada via regressão pelo teor de carbono determinado na amostra, foi estatisticamente igual ao método de referência na estimativa do estoque total de carbono acima do solo, sendo ele o método que apresentou maior exatidão.

Os espaçamentos mais adensados foram responsáveis pelos maiores valores de biomassa e estoque de carbono acima e abaixo do solo, inclusive para os componentes: fuste, galhos, folhas e casca, separadamente.

A necromassa e o seu estoque de carbono não foram influenciados pelo espaçamento de plantio.

O espaçamento de plantio não exerceu influência sobre o estoque de carbono do solo, para nenhuma das profundidades avaliadas.

Após 68 meses de implantação do povoamento florestal em área de pastagem, houve redução no estoque de carbono do solo. Porém, uma parcela representativa do carbono presente no solo, nesta idade, foi oriunda das árvores, em substituição ao carbono oriundo da gramínea.

A quantidade total de carbono estocada em toda a área do povoamento florestal, considerando o solo e a parte aérea das árvores, corresponde a 1161,12 toneladas de CO_{2eq} sequestrada da atmosfera.

A participação relativa dos compartimentos do estoque total de carbono para uma quantidade total de 49,24 Mg ha⁻¹ foi: solo 70%, parte aérea 21, raízes 6% e necromassa 3%.

Anadenanthera peregrina (L.) Speg. mostrou-se promissora em estocagem de carbono, principalmente em espaçamentos mais reduzidos (3 x 2 ou 3 x 3 m). Na implantação de povoamentos puros com esta espécie deve-se considerar a associação com outras culturas e atividades produtivas a fim de tornar o empreendimento mais atrativo do ponto de vista financeiro.

6 REFERÊNCIAS

ADDO-DANSO, S. D.; PRESCOTT, C. E.; SMITH, A. R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 332–351, 2016.

AMARO, M. A. et al. Estoque volumétrico de biomassa e de carbono em uma floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 849–857, 2013.

AMUNDSON, R. The carbon budget in soils. **Earth and Planetary Sciences**, v. 29, n. 5, p. 535–562, 2001.

ANDRADE, H. J.; BROOK, R.; IBRAHIM, M. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. **Plant and Soil**, v. 308, p. 11–22, 2008.

BALIEIRO, F. C. et al. Soil carbon and nitrogen in pasture soil reforested with *Eucalyptus* and *Guachapele*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1253–1260, 2018.

BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59–68, 2003.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. D. N. **Experimentação Agrícola**. Jaboticabal-SP: FUNEP, 1989.

BEHLING, A. et al. Teores de carbono orgânico de três espécies arbóreas em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 13–19, 2014.

BENOMAR, L.; DESROCHERS, A.; LAROCQUE, G. R. The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. **Trees**, v. 26, n. 3, p. 939–949, 2012.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Ciclagem de nutrientes em *Acacia mearnsii* DE WILD. Quantificação do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea de *Acacia mearnsii* DE WILD. procedência australiana. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 977–982, 2000.

CARDOSO, E. L. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 1028–1035, 2010.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília DF: Embrapa Informações Tecnológica; Colombo: Embrapa Floresta, 2003.

CASSOL, H. L. G.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Inventário de carbono em fragmento de floresta ombrófila mista por detecção remota. **Floresta**, v. 44, n. 4, p. 697–708, 2014.

COSTA, R. B.; CONTINI, A Z.; MELO, E. S. P. Sistema reprodutivo de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg e *Vochysia haenkiana* (Spreng.) Mart. em fragmento de cerrado na Chapada dos Guimarães - MT. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 305–310, 2003.

COTTA, M. K. et al. Quantificação de biomassa e geração de créditos de emissões reduzidas no consórcio seringueira-cacau. **Revista Árvore**, v. 32, n. 8, p. 969–978, 2008.

COUTINHO, R. P. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p.195-203, 2010.

COUTINHO, V. M. et al. Equações tradicionais e simultâneas para biomassa de compartimentos aéreos de *Cryptomeria japonica* (L.f.) d. don. **Revista Brasileira de Biomassa**, v. 35, n. 1, p. 58–75, 2017.

CUBAS, R.; COSTA, E. A.; ZANIZ, V. Carbon contents and modelling of total organica carbon for *Pinus taeda* L. from natural regeneration. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 661–668, 2016.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179–186, 2004.

DALLAGNOL, F. S. et al. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410–416, 2011.

DATABASE. **Ecological, Tree Functional and Atributes**. Disponível em: <<http://db.worldagroforestry.org/wd>>. Acesso em: 13 set. 2017.

DI COSMO, L.; GASPARINI, P.; TABACCHI, G. A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 269–276, 2016.

ELOY, E. et al. Capacidade energética da madeira e da casca de acácia-negra em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 163, 2015a.

ELOY, E. et al. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de *Mimosa scabrella* Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Science)**, v. 6, n. 1, p. 38–46, 2015b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

- EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. 306 p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. Dados eletrônicos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- FAJARDO, A. M. P.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Avaliação financeira do sequestro de carbono na Serra de Baturité, Brasil, 2012. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 391–399, 2015.
- FORSTER, H. W.; MELO, A. C. G. de. Biomassa aérea e de raízes em árvores de reflorestamentos heterogêneos no vale do Paranapanema, SP. **IF Série Registros**, n. 31, p. 153–157, 2007.
- GALVÃO, A. P. M. Árvores fixadoras de nitrogênio no programa nacional de pesquisa florestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p.13-20, 1984.
- GALVÃO, F. G. et al. **Caracterização ecológica da *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. em uma área de transição cerrado floresta, Macapá**, VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS. **Anais...**Recife: 2014.
- GASPARINI, K, A. C. **Regionalização de vazões para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 78 f. 2014.
- GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1069–1079, 2010.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ**, 2016. 100 p. Disponível em: <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN**. Mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo. Nota Técnica 28, Vitória, 2012. 19 p. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/bibliotecaonline/Record/21115>>. Acesso em: 7 mar. 2018
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; et al. (Ed.); **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**, v. 177, 2003. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. EGGELSTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.); **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 4, 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Alley, R. et al. **Mudanças do clima 2007: a base das ciências físicas. Quarto relatório do GT1 do IPCC**. 2007.

Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

JAGODZIŃSKI, A. M. et al. Biomass conversion and expansion factors for a chronosequence of young naturally regenerated silver birch (*Betula pendula* Roth) stands growing on post-agricultural sites. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 208–220, 2017.

KOEHLER, H. S. et al. Fontes de erros nas estimativas de biomassa e carbono fixado na Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, v. 2, n. 1, p. 69–77, 2005.

KÖHL, M. et al. Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 21–34, 2015.

LAMLON, S. H.; SAVIDGE, R. A. A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 4, p. 381–388, 2003.

LARJAVAARA, M. Maintenance cost, toppling risk and size of trees in a self-thinning stand. **Journal of Theoretical Biology**, v. 265, n. 1, p. 63–67, 2010.

LIPINSKI, E. T. et al. Dinâmica da biomassa e carbono arbóreo entre 1995-2012 em Floresta Ombrófila Mista Montana. **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 197–206, 2017.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. Nova Odessa: Plantarum, 2000. v. 1. 352p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. Nova Odessa: Plantarum, 2009. v. 2. 384p.

MACHADO, D. N. et al. Enriquecimento e alocação de ^{13}C em plantas de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 857-866, 2011.

MAAS, G. C. B. **Compartimentação do estoque de carbono em Floresta Ombrófila Mista**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. 2015, 169 f.

MELO, L. C. de. et al. Estimativa de biomassa e carbono total para árvores de caixeta no Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 21–29, 2014.

MONTEIRO, J. M.; ALBUQUERQUE, U. P. de; LIMA, E. de. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 892–896, 2005.

MOTA, M. C.; TOREZAN, J. M. D. Necromassa em reflorestamentos com espécies nativas da Mata Atlântica com 4, 6 e 8 anos de implantação. **Hoehnea**, v. 40, n. 3, p. 499–505, 2013.

MOULIN, J. C. et al. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–10, 2017.

- NASCIMENTO, D. F. do. et al. Crescimento inicial de seis espécies florestais em diferentes espaçamentos. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 159–165, 2012.
- NASCIMENTO, J. J. V. R. do. et al. Balanço de carbono, aquecimento global e recuperação áreas degradadas. **Revista Verde**, v. 6, n. 2, p. 14–29, 2011.
- NJANA, M. A. et al. Procedures for quantification of belowground biomass of three mangrove tree species. **Wetlands Ecol Manage**, v. 23, p. 749–764, 2015.
- ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988, 434 p.
- O'LEARY, M.H. Carbon isotope fractionation in plants. **Phytochemistry**, v. 20, n. 4,
- PAIVA, H. N.; VITAL, B. R. **Escolha da espécie florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 42p.
- PAIXÃO, F. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 411–420, 2006.
- PANSHIN, A.; DE ZEEUW, A. J. **Textbook of wood technology**. 2. ed. 1964.674p.
- PARRON, L. M. et al. **Serviços Ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília: recurso eletrônico, 2015.
- PEREIRA, A. L.; BENEDITO, E. de. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. **Revista Biociências**, v. 13, n. 1-2, p. 16-27, 2007.
- PINHO, D. S. et al. Evaluation of the physiological quality of *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. seeds during storage. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 27–33, 2009.
- PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: 2010. 486p.
- PREECE, N. D. et al. Modelling the growth of young rainforest trees for biomass estimates and carbon sequestration accounting. **Forest Ecology and Management**, v. 351, p. 57–66, 2015.
- PRESCOTT, C. et al. Introduction to forests, roots and soil carbon. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 321, 2016.
- PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125–1136, 2009.

RATUCHNE, L. C. et al. Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 450–462, 2016.

REFLORA. **Flora do Brasil 2020**. Disponível em: <<http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/ConsultaPublicaUC/ResultadoDaConsultaNovaConsulta.do#CondicaoTaxonCP>>. Acesso em: 25 out. 2017.

RIBEIRO, S. C. et al. Above and below ground biomass and carbon estimates for clonal Eucalyptus tree in southeaste Brazil. **Revista Árvore**, v. 39, n. 2, p. 353–363, 2015.

ROCHA, R. B. et al. Teste de procedência e progênies de Angico Vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg) visando o estabelecimento de pomar de sementes. **MG.BIOTA**, v. 2, n. 4, p. 4-19. 2009.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke sob diferentes espaçamentos na região de Mata. **Revista Árvore**, v. 26 n. 5, p. 573–576, 2002.

RODRIGUES, E. (Coord.) . **Serviços ecossistêmicos e bem-estar humano na reserva da biosfera do cinturão verde da cidade de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: 2014. 17p.

ROQUETTE, J. G.; DRESCHER, R.; PELISSARI, A. L. Estoque de carbono na madeira dos troncos de um povoamento de *Tectona grandis* L.f. no sudoeste de Mato Grosso, Brasil. **Multitemas**, n. 42, p. 7–12, 2012.

ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. D. S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 2, p. 333–351, 2014.

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

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MAAS, G. C. B. The role of forests in climate change. **Quebracho**, v. 19, n. 1,2, p. 58–75, 2011.

SANQUETTA, C. R. et al. Efeito do espaçamento de plantio em reflorestamentos II. *Pinus taeda* L. em Jaguariaíva-PR. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 55–61, 2003.

SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2014.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; SILVA, F. DA. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for Pinus in Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 6, n. 1, p. 6, 2011.

- SANQUETTA, M. N. I. et al. Teores de carbono e densidade básica da madeira de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f) D. Don em povoamentos no município de Rio Negro - PR. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 2450–2458, 2013.
- SARTORI, C. J. et al. Teores de fenóis totais e taninos nas cascas de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*). **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 394–400, 2014.
- SCHNEIDER, P. R. et al. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de Acácia-negra (*Acacia mearnsii* Drae Wild.). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 391–402, 2005.
- SCHNEIDER, PR. et al. Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 119–126, 2015.
- SHI, S. et al. A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation. **Plant Soil**, v. 407, p. 323-340, 2016.
- SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products e wood science**. 6. ed. Ames: WILEY-BLACKWELL, 2011. 477p.
- SILVA, C. J. DA; VALE, A. T. DO; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63–75, 2015.
- SILVA, H. F. et al. Estimativa do estoque de carbono por métodos indiretos em área de restauração florestal em Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 943–953, 2015.
- SILVA, J. DE C. **Manual prático do fazendeiro florestal: produzindo madeira com qualidade**. Viçosa-MG: UFV, 2011. 106p.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa-MG: UFV, 2011. 272p.
- SOARES, P.; TOMÉ, M. Biomass expansion factors for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. **Forest Systems**, v. 21, n. 1, p. 141-152, 2012.
- SOCHACKI, S. J. et al. Accuracy of tree root biomass sampling methodologies for carbon mitigation projects. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 264–274, 2017.
- SMITH, B.N.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. **Plant Physiol.**, v. 47, P. 380-384, 1971.
- SUBEDI, K. D.; MA, B. L.; LIANG, B. C. New method to estimate root biomass in soil through root-derived carbon. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 2212–2218, 2006.

SWIFT, R. S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 858–871, 2001.

TORRES, C. M. M. E. et al. Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma floresta estacional semidecidual, no parque tecnológico de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 647–655, 2013.

VALÉRIO, A. F. et al. Estimativa da biomassa e estoque de carbono em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. na região sul do Brasil. **Revista Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 27, n. 1, p. 39-54, 2016.

VIDAURRE, G. B. et al. Tensão de crescimento no lenho de *Eucalyptus benthamii* e sua relação com características dendrométricas em diferentes espaçamentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 408–415, 2015.