

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS
TROPICAIS**

**BIOMASSA, VOLUME E NUTRIENTES DE RAÍZES EM
FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA AMAZÔNIA CENTRAL**

JOSÉ LUIZ PURRI DA VEIGA PINTO

Manaus – AM

Agosto – 2009

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS
TROPICAIS**

**BIOMASSA, VOLUME E NUTRIENTES DE RAÍZES EM FLORESTAS
SECUNDÁRIAS NA AMAZÔNIA CENTRAL**

JOSÉ LUIZ PURRI DA VEIGA PINTO

ORIENTADOR: JOÃO BAPTISTA SILVA FERRAZ, Ph.D.

Fontes Financiadoras: CNPq
INPA

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de mestre em Ciências de Florestas Tropicais, área de concentração em Solos Florestais.

Manaus – AM

Agosto – 2009

Pinto, José Luiz Purri da Veiga

Biomassa, volume e nutrientes de raízes em florestas secundárias na Amazônia Central.

94 p. il.

Dissertação de Mestrado –

1. Raízes finas 2. Solos 3. Capoeiras 4. Carbono 5. Densidade básica

Sinopse:

Estudou-se o estoque de carbono na biomassa de raízes e nos solos, seus nutrientes e sua relação com a profundidade e classe de diâmetro em florestas secundárias localizadas na região de Manaus - AM.

Ao meu pai Luiz Carlos (*in memoriam*)
À minha mãe Roxana
Às minhas irmãs Tatiana e Renata
Aos meus sobrinhos Luiza, Rafael e Giovanni
À toda minha família, minha base, meu mar de amor.

DEDICO

Agradecimentos

- Agradeço à minha família pelo amor, credibilidade e plenas condições de ser feliz.
- Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA/MCT pela oportunidade do mestrado, excelente estrutura humana, ótimo ambiente de trabalho, pela seriedade e profissionalismo de todos. Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos.
- Agradeço ao Dr. João Baptista Silva Ferraz pela orientação, amizade, confiança, incentivo e financiamento deste trabalho.
- Agradeço ao Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais – PDBFF/INPA e ao Smithsonian Tropical Research Institute – STRI, pela disponibilização da área para este estudo. Muito obrigado à Dra. Regina Luizão, Dra. Rita Mesquita, Tony, Henrique, Ari, Roseli, aos motoristas e aos técnicos de campo pelo profissionalismo, simpatia e companheirismo. Obrigado a todos os colegas de trabalho de campo.
- Agradeço a todos os colegas do Laboratório Temático de Solos e Plantas – LTSP/INPA: Giuliano, Marciel, Tatiane, Fabiana, Fabiane, Henrique, Carolina, Alex, Nonato, Tânia, Edivaldo, Beto (obrigado pelo empenho na máquina CN), Marcelo, Orlando, Raimundo, Jonas, Márcio por todo aprendizado e amizade construídas.
- Agradeço a todos os colegas do curso de mestrado do INPA em Ciências de Florestas Tropicais – CFT por todo convívio, alegrias e amizade. Um grande muito obrigado às turmas de 2007 e 2008 pela honra de conhecê-los. Eternos amigos.
- Agradeço aos colegas do Laboratório de Manejo Florestal – LMF/INPA por toda amizade e colaboração, principalmente à Dra. Roseana, ao Adriano e à Fabiana.
- Agradeço aos colegas da turma de Ecologia 2007 e 2008 por toda amizade e convívio destes anos de mestrado, principalmente à Fabiane, pela força na elaboração do plano.
- Agradeço à minha família manauara, Bernardo, Rafael, João, Willian, Guilherme e Bruno por toda amizade, companheirismo, diversão e filosofia vividas. Agradeço também a todos os colegas do Acariquara: Anselmo, Flávio, Leonardo, Thaís, Joana, Aline, Geraldo, Diogo, Mônica, Mayra, André, Ressiliane, Daniela, Camila, Heleno, Roberto, Henrique, Shanna, Jorge, Catarina, André, Carlos dentre outros que formam esta grande nação de estudantes *et al.* com união, companheirismo, amizade e atitude.
- Agradeço aos meus colegas de Viçosa: Daniel, Alexandre e Matheus pela aconchegante recepção em Manaus.
- Obrigado a todos àqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Um grande muito obrigado à natureza, nossa maior riqueza!

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de tabelas	ix
Resumo	x
Abstract	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. <i>Objetivo geral</i>	3
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. <i>FLORESTAS SECUNDÁRIAS</i>	5
3.2. <i>BIOMASSA FLORESTAL</i>	7
3.3. <i>BIOMASSA FLORESTAL SUBTERRÂNEA</i>	11
3.4. <i>NUTRIENTES</i>	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. <i>ÁREA DE ESTUDO</i>	17
4.2. <i>CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO</i>	19
4.2.1. <i>Vegetação</i>	19
4.2.2. <i>Clima</i>	19
4.2.3. <i>Solos</i>	19
4.3. <i>DELINEAMENTO ESTATÍSTICO</i>	20
4.3.1. <i>Delineamento amostral</i>	20
4.3.2. <i>Análise estatística e hipóteses</i>	20
4.4. <i>AMOSTRAGEM DE RAÍZES E SOLOS</i>	20
4.4.1. <i>Amostragem da biomassa subterrânea</i>	29
4.4.2. <i>Amostragem de solos</i>	30
4.5. <i>ANÁLISES QUÍMICAS</i>	30
4.5.1. <i>Análise de solos</i>	31
4.5.2. <i>Análise de raízes</i>	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1. <i>BIOMASSA, VOLUME E DENSIDADE DE RAÍZES</i>	32
5.1.1. <i>Biomassa e volume por transecto</i>	35
5.1.2. <i>Variação da biomassa dentro de cada transecto</i>	36

5.1.3. <i>Densidade básica das raízes</i>	38
5.1.4. <i>Relação da biomassa aérea com a biomassa subterrânea</i>	41
5.1.5. <i>Biomassa subterrânea por camada</i>	47
5.1.6. <i>Percentagem de biomassa de raízes acima do nível do solo</i>	49
5.1.7. <i>Biomassa subterrânea por classe de diâmetro</i>	51
5.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DOS SOLOS	51
5.2.1. <i>Granulometria</i>	52
5.2.2. <i>Análises químicas do solo</i>	58
5.2.3. <i>Estoque de carbono no solo</i>	63
5.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS RAÍZES	63
5.3.1. <i>Nutrientes de raízes por transecto</i>	64
5.3.2. <i>Nutrientes de raízes por camada</i>	67
5.3.3. <i>Nutrientes de raízes por classe de diâmetro</i>	70
5.3.4. <i>Comparações entre os teores de nutrientes nas raízes e nos solos</i>	71
5.4. CRONOSSEQUÊNCIA DE PASTAGENS ABANDONADAS	71
5.4.1. <i>Biomassa, volume e densidade básica das raízes</i>	73
5.4.2. <i>Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, na cronossequência de pastagens abandonadas.</i>	73
5.5. PASTAGENS DE 20 ANOS	73
5.5.1. <i>Biomassa, volume e densidade básica das raízes</i>	75
5.5.2. <i>Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, nas pastagens abandonadas de 20 anos.</i>	75
5.6. CAPOEIRAS DE 25 ANOS	75
5.6.1. <i>Biomassa, volume e densidade básica das raízes</i>	75
5.6.2. <i>Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, nas capoeiras de 25 anos.</i>	77
6. CONCLUSÃO	78
7. BIBLIOGRAFIA	80
Anexo I	90
Anexo II	91
Anexo III	92
Anexo IV	93
Anexo V	94

Lista de figuras

Figura 1.	Mapa global da percentagem de biomassa de raízes encontradas até 30 cm de profundidade. Fonte: Jackson <i>et al.</i> 1996.	14
Figura 2.	Imagem Landsat 2003, TM 5, 4 e 3 da área de estudo (verde escuro: floresta madura; verde claro: vegetação secundária; e vinho: áreas alteradas (pasto e queimada)). (Fonte: PDBFF, 2003). Escala 1: 30.000.	17
Figura 3.	Imagem Landsat 2003 mostrando a localização dos transectos estudados. Em branco, as parcelas de pastagens abandonadas. Em preto, as parcelas de florestas cortadas. (Coordenadas geográficas no anexo II). Escala: 1: 17.000. À esquerda fazenda Dimona (T 14 e T 16), ao centro fazenda Porto Alegre (T 12) e à direita fazenda Colosso (T 01, T 03, T 04, T 05, T 06 e T 07). Setas em azul (capoeiras), setas em vermelho (pastagens).	18
Figura 4.	Distribuição sistemática dos monólitos dentro de cada transecto.	21
Figura 5.	Anel em aço e chapa horizontal.	22
Figura 6.	Desenho esquemático do monólito de solo florestal.	23
Figura 7.	Aspecto das raízes, após mensuração do volume, secando ao sol (dois monólitos).	28
Figura 8.	Retirada das amostras de solos em cada camada.	29
Figura 9.	Volume (cm ³) e Massa (g) de raízes por idade (somatório dos quatro monólitos).	33
Figura 10.	Variação da biomassa (Mg ha ⁻¹) por idade.	34
Figura 11.	Volume (cm ³) e Massa (g) de raízes por transecto.	35
Figura 12.	Relação volume (cm ³) e massa (gramas) de todas as raízes (n = 380).	37
Figura 13.	Distribuição da percentagem de biomassa subterrânea em relação à biomassa total.	39
Figura 14.	Biomassa aérea e subterrânea (Mg ha ⁻¹) nos nove transectos.	39
Figura 15.	Biomassa subterrânea média (Mg ha ⁻¹) por profundidade.	41
Figura 16.	Quantificação da biomassa de raízes por camada em cada transecto.	42
Figura 17.	Quadrados mínimos médios da biomassa (g) de cada camada por transecto.	44
Figura 18.	Variação da biomassa subterrânea (Mg ha ⁻¹) por camada.	44
Figura 19.	Distribuição da biomassa subterrânea (g) nas respectivas camadas nos nove transectos.	45
Figura 20.	Quadrados mínimos médios da densidade básica (kg m ⁻³) das raízes em relação ao perfil do solo.	46

Figura 21.	Distribuição das percentagens de biomassa na camada (S) em relação à própria biomassa subterrânea total em cada transecto.	48
Figura 22.	Valores, percentuais (%), da biomassa de raízes por classe de diâmetro em cada transecto, em relação à biomassa subterrânea total de cada transecto.	49
Figura 23.	Quadrados mínimos médios da densidade básica das raízes (kg m^{-3}) por classe de diâmetro.	50
Figura 24.	Percentagens de areia, argila e silte dos solos de cada transecto.	52
Figura 25.	Teores de nutrientes nos solos (mg kg^{-1}) em cada transecto.	55
Figura 26.	Dispersão dos teores Alumínio e Ferro (mg kg^{-1}) nos solos em cada transecto.	56
Figura 27.	Distribuição dos teores de carbono (dg kg^{-1}) e nitrogênio (g kg^{-1}) nos solos em cada transecto.	56
Figura 28.	Quadrados mínimos médios da relação C:N nos solos em comparação com as idades (a) e na comparação com a profundidade (b).	57
Figura 29.	Valores de estoque total de carbono do solo (Mg C ha^{-1}), até 30 cm de profundidade, em cada transecto.	61
Figura 30.	Quadrados mínimos médios do estoque de carbono no solo (Mg C ha^{-1}) por camada (A = 0-10; B = 10-20; e C = 20-30 cm de profundidade).	62
Figura 31.	Quadrados mínimos médios dos teores de fósforo, cálcio, magnésio e potássio (g kg^{-1}) nas raízes por profundidade.	65
Figura 32.	Quadrados mínimos médios dos teores de Carbono e Nitrogênio (g kg^{-1}) e relação C:N na biomassa de raízes por camada.	66
Figura 33.	Distribuição dos teores de micronutrientes nas raízes: ferro, zinco e manganês (mg kg^{-1}) por classe de diâmetro.	67
Figura 34.	Distribuição dos teores de macronutrientes nas raízes: cálcio, magnésio, potássio e fósforo (g kg^{-1}) por classe de diâmetro.	68
Figura 35.	Quadrados mínimos médios dos teores de Carbono e Nitrogênio (g kg^{-1}) e relação C:N na biomassa de raízes por classe de diâmetro (CD).	69

Lista de tabelas

Tabela 1.	Número do transecto, histórico de uso, idade atual (em 2008), número de queimas (desde 1985) e biomassa aérea (Mg ha^{-1}) das áreas de florestas secundárias.	20
Tabela 2.	Classes de diâmetro estabelecidas para as raízes.	26
Tabela 3.	Discriminação dos transectos por uso do solo, idade, número de queimas documentadas e razão volume de raízes sobre volume do solo (VR / VS).	32
Tabela 4.	Porcentagem de biomassa subterrânea de cada transecto em relação ao total.	34
Tabela 5.	Uso da terra, idade, transecto, coeficiente de determinação, F calculado e probabilidade associada para os quatro monólitos de cada transecto (ANOVA).	35
Tabela 6.	Estatística da densidade básica das raízes e densidade básica média das raízes por transecto.	37
Tabela 7.	Número dos transectos, massa (g), biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}) e porcentagem de biomassa subterrânea em relação à total.	38
Tabela 8.	Biomassa total e respectivas porcentagens em relação ao perfil do solo.	43
Tabela 9.	Transecto, uso do solo, idade, porcentagem de biomassa de raízes superficiais (em relação à própria biomassa subterrânea total) e biomassa correspondente em Mg ha^{-1} para cada transecto.	47
Tabela 10.	Estatísticas da biomassa (Mg ha^{-1}) de raízes MF ($\emptyset < 2 \text{ mm}$); F ($2 \text{ mm} \leq \emptyset < 5 \text{ mm}$); M ($5 \text{ mm} \leq \emptyset < 20 \text{ mm}$); e G ($\emptyset \geq 20 \text{ mm}$).	50
Tabela 11.	Teores de nutrientes nos solos nas capoeiras do PDBFF: estudo sobre biomassa subterrânea.	54
Tabela 12.	Matriz de correlação de Pearson para nutrientes e teor de argila.	55
Tabela 13.	Estoque de carbono no solo (Mg C ha^{-1}) por transecto e por camada.	59
Tabela 14.	Correlação de Pearson entre os teores de nutrientes nas raízes e nos solos.	70
Tabela 15.	Uso e idade da área; biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}); porcentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha^{-1}).	71
Tabela 16.	Número do transecto, biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}); porcentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha^{-1}) das pastagens de 20 anos.	73
Tabela 17.	Matriz de correlação de Pearson para teor de argila; P; Ca; Mg; K; C; N; biomassa subterrânea e superficial (Mg ha^{-1}) e EC (Mg ha^{-1}) no solo das pastagens.	74
Tabela 18.	Número do transecto, biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}); porcentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha^{-1}) das capoeiras de 25 anos.	75
Tabela 19.	Matriz de correlação de Pearson para teor de argila; P; Ca; Mg; K; C; N; biomassa subterrânea e superficial; e estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) das capoeiras.	76

Resumo

As florestas desempenham papel duplo em relação à dinâmica de carbono (C) na biosfera e podem atuar como sumidouro, estocando C na biomassa, ou fonte de CO₂, pela decomposição ou queima da biomassa. O desflorestamento, principalmente na Amazônia, é responsável por cerca de 70 % das emissões brasileiras de gases do efeito estufa. Neste aspecto, conhecer os estoques e a dinâmica de carbono em florestas torna-se crucial para adequadas decisões ambientais e econômicas. Atualmente dispomos de equações alométricas que estimam, com 94 % de confiança, a biomassa total (aérea e raízes grossas) para florestas primárias. No entanto, ainda existe alta escassez de dados e pesquisas sobre a biomassa subterrânea, principalmente em florestas secundárias. O propósito deste trabalho foi justamente prover dados e informações sobre a biomassa subterrânea em florestas secundárias. Estudou-se o estoque de nutrientes nos solos e na biomassa subterrânea de florestas secundárias, em cronosequência de pastagens abandonadas (14, 16, 18 e 20 anos), que apresentaram biomassa radicular de 6,3; 7,0; 11,0; e 11,1 Mg ha⁻¹, respectivamente. As pastagens abandonadas de 20 anos, apresentaram média de 11,1 ± 0,88 Mg ha⁻¹ e as capoeiras de 25 anos, média de 15,0 ± 1,17 Mg ha⁻¹. A densidade básica média geral das raízes foi igual a 0,32 ± 0,009 g cm⁻³, sendo que na camada superficial (S), ocorreu expressiva diminuição dos valores de densidade. A biomassa média de raízes nas camadas (S) e (A), ou até os primeiros 10 cm de profundidade, corresponde a 75,6 % da biomassa total, sendo que a camada (A) respondeu por 54 % deste total. Cerca de 20 % da biomassa de raízes, até 30 cm de profundidade, está acima do solo. Houve diferença significativa nos valores de biomassa entre os tratamentos (ANOVA: r² = 0,165; F = 1,973; p = 0,048) e também em relação à profundidade (ANOVA: r² = 0,314; F = 20,875; p < 0,05). Os solos das pastagens abandonadas de 14, 16 e 18 anos, possuem um estoque total de carbono orgânico, até 30 cm de profundidade, igual a 66,5; 70,3 e 59,2 Mg C ha⁻¹, respectivamente. As pastagens abandonadas de 20 anos possuem média de 62,7 Mg C ha⁻¹ e as capoeiras de 25 anos média de 52,1 Mg C ha⁻¹. Estas florestas secundárias possuem um estoque médio de carbono orgânico no solo de 60,0 ± 6,75 Mg C ha⁻¹. Solos arenosos apresentaram maiores valores de biomassa que solos argilosos, sendo que estes apresentaram maiores valores de teor de nutrientes. As raízes finas e muito finas localizam-se, majoritariamente, na camada (S). Os valores de Estoque de Carbono (EC) no solo, aliados ao EC nas raízes, proporcionam boas estimativas do EC abaixo do solo nestes ecossistemas, as quais podem ser somadas às informações sobre necromassa e biomassa aérea, completando assim o conhecimento científico sobre estoque e dinâmica de carbono em florestas secundárias na Amazônia Central.

Abstract

Forests play a double role in relation to the dynamics of Carbon (C) in the biosphere and can act as a sink, storing C in biomass or source of CO₂, through the decomposition or burning of biomass. Deforestation, especially in the Amazon is responsible for about 70 % of Brazilian emissions of greenhouse gases. In this respect, know the stocks and dynamics of carbon in forests are crucial for appropriate environmental and economic decisions. Currently we have allometric equations that estimate, with 94 % confidence, the total biomass (aboveground biomass and thick roots) for the primary forests. However, there is still high scarcity of data and research on the belowground biomass, mainly in secondary forests. The purpose of this study was mainly precisely provide data and information of the belowground biomass in secondary forests. We studied the stock of nutrients in the soil and belowground biomass of secondary forests on pastures abandoned in chronosequence (14, 16, 18 and 20 years) which had root biomass of 6.3, 7.0, 11.0 and 11.1 Mg ha⁻¹, respectively. Pastures abandoned after 20 years, had a mean of 11.1 ± 0.88 Mg ha⁻¹; and the capoeiras of 25 years old had mean of 15.0 ± 1.17 Mg ha⁻¹. The general average density of roots was equal to 0.32 ± 0.009 g cm⁻³, and in the surface layer (S) it was recorded a significant decrease in density values. The average biomass of roots in layers (S) and (A) (the first 10 cm depth) corresponds to 75.6 % of the total biomass, and the layer (A) accounted for 54 % of the total biomass. About 20 % of root biomass, until 30 cm deep, is aboveground. We recorded significant differences in the biomass between the treatments (ANOVA: $r^2 = 0.165$, $F = 1.973$, $p = 0.048$) and also according depth (ANOVA: $r^2 = 0.314$, $F = 20.875$, $p < 0.05$). The soils of pastures abandoned with 14, 16 and 18 years old have a total stock of organic carbon until 30 cm deep equal to 66.5, 70.3 and 59.2 Mg C ha⁻¹, respectively; the pastures abandoned of 20 years old have in averaged 62.7 Mg C ha⁻¹ and the capoeiras of 25 year old have average of 52, 1 Mg C ha⁻¹. These secondary forests have an average of stock of organic carbon in soil of 60.0 ± 6.75 Mg C ha⁻¹. The sandy soils presented higher biomass than clay soils, and these ones showed higher nutrient content. The fine and very fine roots were located mainly in the layer (S). Values Inventory Carbon (IC) in the soil, combined with the IC in roots, provide good estimates of the IC belowground in these ecosystems, which can be added to information related to necromass and aboveground biomass, completing thus the scientific knowledge of stock and carbon dynamics in secondary forests in Central Amazon.

1. INTRODUÇÃO

Compreender a interdependência dos processos ecológicos em escala espacial e temporal é crucial aos esforços atuais para modelar as respostas dos ecossistemas às variações climáticas globais (Espeleta & Clark, 2007).

Diversos estudos têm sido realizados para se diminuir as incertezas na quantificação da biomassa florestal. (Uhl *et al.*, 1988; Nepstad *et al.*, 1994; Salomão *et al.*, 1996; Higuchi *et al.*, 2005; Trumbore *et al.*, 2006; Silva, 2007; dentre outros). O estudo da biomassa florestal é de grande importância em termos econômicos e ecológicos. A mensuração do estoque florestal produz informações fundamentais, pois com estes valores de volume e biomassa podemos chegar ao estoque de carbono e nutrientes em um determinado ecossistema. Tais informações são de grande importância para a construção de modelos matemáticos de prognose do comportamento dos ecossistemas e suas respostas às mudanças climáticas.

A mensuração dos estoques de carbono nos seus diversos compartimentos, bem como a compreensão e monitoramento de sua dinâmica, são preponderantes para decisões adequadas em relação às políticas públicas ambientais, sociais e econômicas, que governos e sociedade tomarão neste século.

Para Silva (2007), a questão da biomassa florestal acima do nível do solo está praticamente resolvida com os modelos estatísticos existentes, que são bastante consistentes e precisos para estimar a biomassa individual de espécies florestais da Amazônia. No entanto, faltam mais estudos sobre a biomassa subterrânea, principalmente, em florestas secundárias.

As florestas secundárias “capoeiras” sofrem diversos tipos de modificações, tanto na sua composição florística como na fertilidade do solo. Assim, o estudo destes processos no compartimento abaixo do solo, espaço pouco estudado, torna-se especialmente importante para a compreensão da dinâmica de nutrientes nestes ecossistemas tropicais.

De acordo com Vargas *et al.* (2008), em estudos realizados em El Eden no México, para recuperar valores de biomassa similares aos de florestas maduras, a biomassa subterrânea necessita de pouco menos de 19 anos para acumular valores maiores que $20 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que a biomassa aérea requer cerca de 80 anos, com taxas de acumulação próximas a $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O total de biomassa e carbono em florestas secundárias tropicais requer, respectivamente, 70 e 50 anos para recuperarem os valores de florestas maduras. Quando o incremento de biomassa subterrânea não é incluído nos cálculos de crescimento destas florestas, existe uma superestimativa de 10 e 30 anos para a recuperação de biomassa e carbono, respectivamente.

O presente estudo visa gerar conhecimentos sobre o comportamento da biomassa subterrânea e a variabilidade dos teores e estoque de nutrientes de acordo com a profundidade dos solos e com as classes de diâmetro das raízes, em dois tipos de florestas secundárias com estrutura e composição florística diferenciadas (pastagens abandonadas de 14, 16, 18 e 20 anos e floresta cortada de 25 anos). Neste trabalho, definiu-se “Pastagem abandonada” como áreas de floresta secundária onde houve o desflorestamento e a implantação do capim *Brachiaria humidicola* para o pastoreio de gado e queimas alternadas até seu abandono definitivo; e “Capoeira” para áreas de floresta secundária onde houve o desflorestamento e imediato abandono da área. Salomão *et al.* (1996), definem pastagens abandonadas, tecnicamente, como Juquiras.

As variações de biomassa e estoque de nutrientes fornecem informações interessantes em termos ecológicos e de manejo destes ecossistemas. Como por exemplo, o estoque de carbono na biomassa radicular que será emitido gradualmente para a atmosfera, através da decomposição e putrefação deste material, bem como o estoque que será emitido imediatamente, por estar acima do solo, ao se praticar a queima de uma determinada capoeira.

Este estudo também traz informações sobre o estoque de nutrientes e carbono nesses solos. Os valores de estoque de carbono no solo, somados ao carbono contido na biomassa de raízes, proporcionam um bom conhecimento sobre a compartimentalização e estoque de carbono abaixo do solo em florestas secundárias na Amazônia Central. Em algumas hipóteses analisaram-se os dados conjuntamente e em outras houve separação por variáveis categóricas.

Para realizar este estudo utilizou-se um método inédito de coleta de amostras através de um monólito de solo cilíndrico nas dimensões de 30 x 30 cm. Os custos de fabricação e operacionais deste método direto são muito baixos e os resultados obtidos corroboram a literatura sobre biomassa subterrânea em florestas secundárias de regiões tropicais.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo geral:*

Estimar a biomassa, o volume e o estoque de nutrientes nas raízes, até a profundidade de 30 cm, em florestas secundárias de diferentes idades e de uso do solo na Amazônia Central.

2.2 *Objetivos específicos:*

2.2.1. Determinar a biomassa e o volume de raízes muito finas ($\emptyset \leq 2$ mm), finas ($2 \text{ mm} < \emptyset < 5$ mm), médias ($5 \text{ mm} \leq \emptyset < 2$ cm) e grossas ($\emptyset \geq 2$ cm), acima e abaixo do nível do solo, em camadas de 10 cm, até a profundidade de 30 cm.

2.2.2. Estabelecer a percentagem de biomassa de raízes acima do nível do solo.

2.2.3. Determinar a densidade básica média total, por classe de diâmetro e por profundidade das raízes.

2.2.4. Analisar a relação da biomassa subterrânea com a profundidade.

2.2.5. Determinar o estoque de elementos químicos em raízes muito finas, finas, médias e grossas, no gradiente de profundidade e nos respectivos solos.

2.2.6. Analisar a relação entre os estoques de nutrientes encontrados no solo e a biomassa de raízes.

2.2.7. Estimar os estoques de carbono na biomassa de raízes e no solo, até a profundidade de 30 cm.

Hipótese 1

H0: = A biomassa de raízes não tem correlação positiva com a idade da floresta;

H1: = A biomassa de raízes tem correlação positiva com a idade da floresta;

Teste estatístico ANOVA E REGRESSÃO

Hipótese 2

H0: = A biomassa de raízes não varia com o tipo de floresta secundária;

H1: = A biomassa de raízes varia com o tipo de floresta secundária;

Teste estatístico ANOVA

Hipótese 3

H0: = A biomassa de raízes não varia com a profundidade;

H1: = A biomassa de raízes varia com a profundidade;

Teste estatístico ANOVA

Hipótese 4

H0: = A densidade básica das raízes não varia com a profundidade;

H1: = A densidade básica das raízes varia com a profundidade;

Teste estatístico ANOVA E REGRESSÃO

Hipótese 5

H0: = A densidade básica das raízes não varia com a classe de diâmetro das raízes;

H1: = A densidade básica das raízes varia com a classe de diâmetro das raízes;

Teste estatístico ANOVA E REGRESSÃO

Hipótese 6

H0: = Não existe diferença na qualidade química dos solos entre as pastagens abandonadas e as capoeiras;

H1: = Existe diferença na qualidade química dos solos entre as pastagens abandonadas e as capoeiras;

Teste estatístico ANOVA E REGRESSÃO

Hipótese 7

H0: = Os teores de nutrientes nas raízes não variam com a profundidade;

H1: = Os teores de nutrientes nas raízes variam com a profundidade;

Teste estatístico ANOVA E REGRESSÃO

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FLORESTAS SECUNDÁRIAS

Segundo Pereira & Vieira (2001), o conceito de floresta secundária não é um consenso entre os diferentes autores, que divergem, principalmente, com relação à natureza do distúrbio que reinicia a sucessão. No contexto amazônico, as capoeiras podem ser definidas como áreas de crescimento natural de vegetação secundária provenientes do processo de substituição dos ecossistemas florestais naturais por agroecossistemas.

No sistema de produção tradicional da Amazônia, as capoeiras representam o pousio da vegetação na agricultura de corte e queima. Esse tipo de sistema de produção é a base de produção de alimentos de grande parte das 600 mil famílias de pequenos produtores que vivem na Amazônia (Homma *et al.*, 1998). Temos na Amazônia, capoeiras de várias idades, originadas de diferentes usos e diferentes tamanhos (Lima *et al.* 2007).

Estudos realizados por Arima *et al.*, (2005) revelaram que entre 1990 e 2003 o rebanho bovino da Amazônia Legal cresceu 140% e passou de 26,6 milhões para 64 milhões de cabeças. Neste período, a taxa média de crescimento anual do rebanho na região (6,9%) foi dez vezes maior que no restante do País (0,67%). Estas áreas de pastagem, quando exauridas, terminam abandonadas e transformam-se em capoeiras. Necessita-se, portanto, de melhores informações da ecologia destas áreas, pois estão em constante expansão na Amazônia.

De acordo com Brown e Lugo (1990), cerca de 30% das florestas mundiais (conceito FAO), são florestas em regeneração ou capoeiras. Na Amazônia brasileira, 47% da área desmatada até 1996, não estava “em uso”, sendo, portanto, qualificada como capoeiras (Higuchi *et al.*, 2003).

As florestas secundárias, embora constituídas diferentemente das florestas originais, em termos de composição de espécies (Aide *et al.*, 2000; Bellemare *et al.*, 2002; Makana & Thomas, 2006), desempenham importantes funções ecológicas como: crescimento florestal, controle de erosão, conservação de nutrientes, benefícios hidrológicos e manutenção da biodiversidade (Nepstad *et al.*, 1996; Pereira & Vieira, 2001), proteção do solo, ciclagem eficiente de nutrientes e interações mutualísticas e sinérgicas entre os organismos (Brown & Lugo, 1990). Promove, ainda, a absorção de CO₂ da atmosfera pelo acúmulo de biomassa por meio da fotossíntese (Fearnside & Guimarães, 1996). Não só o acúmulo de fitomassa, mas o acréscimo em área basal e o volume de madeira estão relacionados com a idade da capoeira (Brown & Lugo, 1990).

Na Amazônia Central, as espécies do gênero *Vismia* dominam a sucessão em pastos periodicamente queimados (Pastagem abandonada), devido sua rusticidade e capacidade de rebrotamento, enquanto que, em áreas desflorestadas e não queimadas (Capoeiras) são colonizadas, principalmente, por espécies do gênero *Cecropia* (Mesquita *et al.*, 2001).

Os estudos de Laurance *et al.* (1997), verificaram que, em fragmentos florestais, ocorrem distúrbios como; mortalidade e infestação por lianas até cem metros à partir da borda do fragmento. Observou-se uma redução de 36% da biomassa nos primeiros quinze anos após a fragmentação. Assim, os problemas provenientes do desflorestamento não estão restritos somente ao local de ocorrência, mas atingem também, o entorno e proximidades.

Para Walker & Franken (1983), apesar de sua fragilidade, os ecossistemas amazônicos possuem grande potencial de recuperação natural após uso e abandono de áreas cultivadas (Uhl & Jordan, 1984; Uhl *et al.*, 1988).

Nepstad *et al.* (1999) mostraram que a exploração florestal causa severos danos à Amazônia brasileira, cerca de 10.000 a 15.000 km².ano⁻¹, os quais não são incluídos nos mapas e taxas de desflorestamento. De acordo com o estudo, o empobrecimento da floresta se dá por severas secas (episódios de El Nino) e pela exploração florestal convencional, tornando o ecossistema altamente inflamável. Estas áreas, cerca de 270.000 km², por serem de alta inflamabilidade, devido às aberturas de dossel e fortes secas, são extremamente vulneráveis aos incêndios florestais (intencionais e/ou naturais). No caso de aumento dos incêndios na Amazônia, existe grande possibilidade de que estas áreas se tornem capoeiras. Esta mudança de uso do solo, principalmente a conversão da floresta para o uso agrícola, representa a liberação dos estoques de carbono contidos na vegetação e no solo para a atmosfera (Fearnside & Guimarães, 1996).

Em termos globais, o desflorestamento tropical, incluindo as conversões permanentes (pastagem e agricultura) e temporárias (exploração seletiva e “quintais agroflorestais”), respondeu por 15 - 35% da emissão anual de combustíveis fósseis durante a década de 90. Nesta mesma década, o desmatamento de florestas tropicais respondeu por 25% do total das emissões antrópicas de gases do efeito estufa (Moutinho & Schwartzman, 2005).

Com a crescente e atual percepção humana da relevância das florestas mundiais, plantadas e naturais, como mitigadoras e/ou potencializadoras do Efeito Estufa, concomitantemente a solidificação do mercado de crédito de carbono, as pressões para se ter maiores certezas sobre a dinâmica do carbono são grandes e partem de diversos segmentos da sociedade.

Existem alguns estudos que enfocam as pastagens, como o realizado por Asner *et al.* (2004) em duas crono-sequências de pastagens, em Santarém (PA), uma sobre solos argilosos e outra sobre solos arenosos, que confirmaram o declínio nos estoques de carbono na biomassa aérea e no solo com a idade das pastagens. Outro estudo de uma dinâmica de pastagens, também em Santarém, mostrou perdas significantes de matéria orgânica e de P-total do solo com a idade das pastagens, em solos já deficientes em P; estas foram atribuídas a mudanças nas comunidades de microrganismos do solo. As perdas de N do solo das pastagens jovens para a atmosfera podem ser substanciais, conforme demonstrado em um estudo comparativo dos fluxos de N₂O em floresta, numa área queimada recente e numa pastagem jovem, todas adjacentes e sobre latossolo amarelo com mais de 70% de argila, em Manaus. Neste estudo, o fluxo anual de N₂O na pastagem aumentou três vezes em relação à floresta (Luizão, 2007).

Malhi *et al.* (2008) trabalharam com 23 modelos climáticos para a Amazônia e avaliaram vários cenários possíveis através da probabilidade de seca. Concluíram que com aumento de fortes secas (declínio de pluviosidade maior que 50%), haverá uma redução da cobertura vegetal (nos moldes atuais de desflorestamento) de 5,4 milhões km² em 2001 ou (87%), para 3,2 milhões km² em 2050 ou (53%) da área total. Estima-se que cerca de 350 milhões de hectares de florestas tropicais tenham sido convertidos e outros 500 milhões de hectares de florestas primárias e secundárias estão degradados. Estima-se, também, que por volta de 300 milhões de pessoas (principalmente agricultores pobres) dependam atualmente destas florestas secundárias para sua subsistência (ITTO, 2002).

Neste contexto, para aproveitar as capoeiras é preciso, antes de tudo, entender sua composição e sua dinâmica, considerando os diferentes usos do solo (agricultura extensiva, pastagem ou cultivo itinerante), a intensidade e a duração dos mesmos.

3. 2. BIOMASSA FLORESTAL

Biomassa florestal ou fitomassa é a quantidade, expressa em unidade de massa, do material lenhoso contido em uma unidade de área de floresta (Araújo *et al.* 1999). Nas regiões tropicais, Klinge e Rodrigues (1973) realizaram um dos primeiros trabalhos de biomassa florestal na região de Manaus e encontraram cerca de 400 Mg ha⁻¹ de biomassa seca.

Segundo o IPCC (2006), a biomassa deve ser estimada, separadamente, considerando os seguintes componentes: (1) biomassa acima do nível do solo, que inclui tronco, galhos grossos e finos, casca, flores, frutos e folhas; (2) a biomassa abaixo do solo ou biomassa de raízes maiores do que 2 mm em diâmetro de base (sugerido) e (3) biomassa de matéria morta ou necromassa, que são todos os materiais vegetais mortos não contidos na serapilheira. Não se inclui raízes menores que 2 mm de diâmetro pela dificuldade de mensuração e separação da necromassa e também porque estas raízes possuem alta taxa de ciclagem, geralmente de acordo com a sazonalidade, não se comportando como um estoque de carbono na biosfera. Todavia, a biomassa de raízes menores que 2 mm de diâmetro tem grande importância na ciclagem e absorção de nutrientes.

Conforme Rennolls & Peace (1986), os modelos de crescimento de florestas são de grande valor quando usados na predição do desenvolvimento futuro do povoamento e, quando usados em conjunto com a análise econômica, ajudam a fornecer ao especialista florestal a base para a escolha de uma política ótima de manejo.

Para a Amazônia, apenas dois modelos estatísticos utilizados são citados por Salomão *et al.* (1996); um proposto por Brown *et al.* (1989) e outro proposto por Uhl *et al.* (1988). Um requer o conhecimento da densidade da madeira de cada indivíduo e o outro é recomendado para florestas secundárias. Além desses, há o modelo de Overman *et al.* (1994), para a floresta amazônica colombiana, desenvolvido principalmente para árvores de pequenos diâmetros. Para a região de Manaus, há o modelo de Higuchi *et al.* (1998) que já foi validado em Tomé-açu (PA) por Araújo *et al.* (1999).

Usando-se os teores de água e carbono, a biomassa florestal pode ser transformada em carbono da vegetação, que é a principal variável considerada na temática de mudanças globais (Silva, 2007).

Em um estudo realizado na Floresta Nacional dos Tapajós, entre 2000 e 2001, Nepstad *et al.* (2002) observaram uma redução de 20% no crescimento radial de troncos de árvores quando se exclui a deposição seca (aerossóis) e úmida (chuvas), sugerindo uma forte correlação do crescimento radial das árvores com a estação chuvosa, lavagem das copas e escorrimento pelo tronco. As estreitas relações e dinamismos da água com a floresta refletem também nos fluxos dos gases do efeito estufa, tornando-se necessário a construção de complexos modelos para a compreensão e monitoramento de florestas tropicais.

Diversos estudos sobre estimativas de biomassa, por meio de equação alométrica, têm sido empregados de maneira crescente objetivando facilitar a avaliação do estoque e até

mesmo da produção florestal de determinado local (Fearnside, 1994; Nogueira *et al.*, 2006; Santos, 1996; Salomão *et al.*, 1996).

O termo Alometria designa as alterações na relação das dimensões de partes do corpo que estão correlacionadas com as mudanças na dimensão total do corpo (Huxley & Teissier, 1936). De acordo com Higuchi *et al.* (2005), alometria é o estudo das variações das formas e dos processos dos organismos, tendo duas aplicações: (1) o crescimento de uma parte do organismo, em relação ao crescimento do organismo inteiro, ou parte dele e (2) no estudo das conseqüências do tamanho sobre as formas e os processos, sendo uma função de potência que relaciona diferentes coisas entre si.

Em termos de metodologia para avaliar a biomassa florestal, podemos citar os trabalhos de Brown & Lugo (1990) e Fearnside (1991), com alguns estudos utilizando o método direto, e outros, apenas as medidas obtidas em inventários florestais (Brown & Lugo, 1990).

Silva (2007) demonstrou que o peso fresco total (biomassa acima do solo e raízes) de floresta primária, pode ser estimado utilizando modelos de simples entrada (diâmetro à altura do peito - DAP - como variável independente) e de dupla entrada (DAP e altura total). O de simples entrada produziu coeficientes de determinação ($r^2 = 94\%$) e o erro padrão de estimativa ($s_{y,x} = 3,9\%$); para o de dupla entrada, estes indicadores foram: $r^2 = 95\%$ e $s_{y,x} = 3,7\%$. A variável altura total acrescentou muito pouco à precisão e confiabilidade do modelo de simples entrada. Uma nova variável como a densidade da madeira, por exemplo, teria também uma margem muito pequena para melhorar o desempenho do modelo de simples entrada. “O desempenho do modelo de simples entrada demonstra que com apenas a medição do diâmetro (ou circunferência) com uma fita métrica de costureira é possível estimar, precisamente, o estoque de carbono da vegetação” (Silva, 2007).

Grandes erros nas estimativas de balanço do carbono terrestre são provenientes de taxas incertas de desflorestamento nas regiões tropicais. As incertezas na quantificação da biomassa de florestas tropicais também contribuem, em muito, para a variação das estimativas das emissões de carbono devido ao desflorestamento (Houghton, 2005).

Apesar de certo número de inventários florestais terem sido realizados em florestas tropicais, existem ainda grandes áreas nos trópicos onde tais inventários são incompletos ou simplesmente inexistentes. Muitas parcelas individuais foram amostradas, mas extrapolar os resultados para toda a região é problemático. A comparação de sete abordagens para o mapeamento da biomassa na Amazônia brasileira, por exemplo, revelou uma vasta gama nas estimativas da biomassa total (Houghton *et al.* 2001).

Vale ressaltar que estas variações nas taxas de desflorestamento e da própria biomassa se devem, principalmente, ao fato da heterogeneidade das florestas tropicais, no tempo e no espaço, dificultando sua mensuração e padronização para o ajuste de modelos matemáticos.

Pois, de acordo com Rossi *et al.* (2007), florestas naturais são ecossistemas complexos para os quais freqüentemente não existem dados e métodos adequados para a descrição do comportamento de modelos de crescimento e produção.

Os modelos clássicos de produção florestal foram desenvolvidos para florestas temperadas e têm, como principais variáveis, o índice de sítio e a idade da árvore ou do povoamento (Sullivan & Clutter, 1972).

Atualmente, existem estimativas de biomassa disponíveis para alguns tipos florestais da Amazônia, utilizando métodos diretos e indiretos (Brown *et al.*, 1989; Lima 2001; Higuchi *et al.*, 1994; e Pinto, 2008) (Anexo I).

Em pastagens abandonadas, na região de Paragominas (PA), as estimativas de biomassa para florestas secundárias variam de 0,2 a 74 Mg ha⁻¹, de acordo com a intensidade do uso do solo (Uhl *et al.*, 1988). Salomão *et al.* (1996), forneceram estimativas de biomassa para florestas secundárias de 5, 10 e 20 anos de 13, 44 e 81 Mg ha⁻¹, respectivamente. Steininger (2000) sugere um incremento médio anual (IMA) de 9-10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas de florestas secundárias jovens até 12 anos de idade na Amazônia.

Vargas *et al.* (2008), Estudaram, em El Eden Ecological Reserve, no México, uma cronosequência de florestas secundárias (de 1 a 29 anos) submetidas ao fogo e calcularam a biomassa aérea e subterrânea incorporada. Em florestas maduras, a taxa de acumulação de carbono pela biomassa subterrânea foi de, aproximadamente 50% do carbono total assimilado pelo ecossistema. Já para as cronosequências de florestas secundárias, esta percentagem sobe para 90%. Estas florestas secundárias possuem um estoque de biomassa total entre 120 e 150 Mg C ha⁻¹, o qual pode ser rapidamente emitido para a atmosfera, em caso de queima.

Estudos enfocando as florestas secundárias e a fragmentação florestal (Mesquita *et al.*, 2001; Ferreira *et al.*, 2005; Laurance *et al.*, 2006; Cramer *et al.*, 2007; Luizão, 2007) vêm sendo realizados, desde a década de setenta, no Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais – PDBFF, um projeto de cooperação bilateral entre o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) do Ministério da Ciência e Tecnologia e o Smithsonian Tropical Research Institution (SI) dos Estados Unidos.

Dentre eles podemos citar os estudos de Bentos (2006) que trabalhou com a fenologia de espécies pioneiras em florestas secundárias e o de Moreira (2003) que usou o sensoriamento remoto para avaliar a dinâmica da sucessão secundária. Encontra-se, também,

ainda em fase de conclusão, mais um estudo de Oliveira (2009) sobre ciclagem de nutrientes em florestas secundárias.

O presente estudo, sobre biomassa e nutrientes de raízes, também foi realizado nas áreas do PDBFF, onde já existiam informações importantes, tais como: idade, uso do solo, número de queimas e biomassa aérea para cada transecto do Projeto Pioneiras, ligado ao PDBFF. O (anexo II) mostra a biomassa aérea dos 21 transectos estabelecidos pelo Projeto Pioneiras. Dentre eles, 9 foram escolhidos para este estudo sobre biomassa subterrânea.

Diversos estudos científicos de pós-graduação vêm sendo realizados nas áreas do PDBFF, como por exemplo, o de dinâmica de serapilheira. Desta forma, existem certezas em relação a algumas informações já publicadas e outros parâmetros ecológicos que surgirão no decorrer destes estudos, possibilitando analisar as diversas relações entre biomassa aérea, subterrânea e necromassa, bem como a interação e dinâmica destes estoques de carbono.

3.3. BIOMASSA FLORESTAL SUBTERRÂNEA

O estudo formal de distribuição de raízes tem, aproximadamente, 250 anos e teve sua origem em estudos com espécies de culturas agrícolas (Hales *apud* Jackson 1996). Porém, por volta de 1950, técnicas de vestígio forneceram poderosas ferramentas para acessar as zonas das raízes funcionais, incluindo radioisótopos, isótopos estáveis e vestígios estáveis (Hall *et al. apud* Jackson 1996).

Os estudos de desenvolvimento de solos a partir dos sistemas radiculares, buscando a compreensão das funções e das influências dos componentes do meio biótico nas propriedades físico-químicas do solo são recentes. A quantidade e a extensão das raízes que se desenvolvem em cada condição ambiental estão diretamente relacionadas com as características físicas e químicas do solo, com os fatores genéticos das plantas, com o balanço da relação entre a parte aérea e a parte radicular, com o manejo do solo e com as práticas culturais adotadas (Valcarcel *et al.*, 2007).

Devido ao importante papel das florestas na regulação dos ciclos de carbono e nutrientes, existe um grande interesse em estimar sua biomassa. Estimativas de biomassa aérea são relativamente abundantes. Porém, estimativas de biomassa subterrânea são muito menos comum (Cairns *et al.* 1997).

Böhm (1979) afirma não ser possível uma classificação única para o estudo de raízes, pois muitos métodos são diferentes em princípio, mas com certa similaridade. A escolha é pessoal e através do bom senso. Os principais métodos utilizados para o estudo de raízes são:

escavação; monólito; trado; vala de perfil; vala de vidro; métodos indiretos; contêiner; dentre outros. Para a amostragem de raízes finas ($\varnothing \leq 3$ mm de espessura), Martins *et al.* (2004), utilizaram uma sonda cilíndrica de aço inoxidável, com 4 cm de diâmetro interno, especialmente fabricada para a coleta de solo. Foram selecionadas quatro árvores médias quanto ao diâmetro à altura do peito (DAP) na área central de cada parcela experimental. Tendo como ponto de partida o tronco de duas árvores, foram retiradas três amostras nas linhas e três amostras nas entrelinhas de plantio em intervalos de 0,50 m.

Valcarcel *et al.* (2007) numa área denominada Costa Verde, distrito da Ilha da Madeira, município de Itaguaí – RJ ($23^{\circ} 55' 07''$ S e $43^{\circ} 50' 35''$ W), coletaram raízes em 10 pontos aleatórios entre árvores no centro de cada parcela permanente (350 m^2), utilizando um anel volumétrico (140 cm^3) nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm. As raízes finas ($\varnothing \leq 2$ mm) foram separadas do substrato por lavagem e secadas ao ar com o auxílio de tamizadores. O material separado foi classificado em vivo ou morto, utilizando critérios visuais (cor, grau de coesão entre a periderme e o córtex) e mecânicos (elasticidade, estabilidade). As raízes foram divididas em muito finas ($\varnothing < 1$ mm) e finas ($1 \leq \varnothing \leq 2$ mm).

Estudos realizados por Silva (2007) mostraram que, em florestas tropicais primárias, a biomassa de raízes corresponde em média a 26% da biomassa total e, para florestas secundárias (capoeira de 14 anos), esta média é de 6,9% da biomassa total.

Jaramillo *et al.* (2003) em estudo realizado na região de Los Tuxtlas, Veracruz, México, encontraram valores totais de biomassa de raízes até 1 metro de profundidade variando entre 19 e 27 Mg ha^{-1} para floresta primária; entre 5,5 e 22,5 Mg ha^{-1} para florestas secundárias de 8, 20 e 30 anos de idade; e de 3,1 a 5,4 Mg ha^{-1} em pastagens abandonadas de 12, 20 e 28 anos de idade. De acordo com o mesmo autor, a biomassa total de raízes até a profundidade de 40 cm representou 60 a 76% para florestas primárias; 77 a 93% para florestas secundárias e 89 a 96% para as pastagens.

Espeleta & Clark (2007) estudaram, durante sete anos, a variação espaço-temporal de raízes finas ($\varnothing \leq 5$ mm) em La Selva – Costa Rica. Verificaram que a biomassa de raízes finas decresceu com o aumento da fertilidade do solo e com o conteúdo de água no solo. Concluíram, também, que houve forte variação do estoque de biomassa de raízes finas, mortas e vivas, durante o mesmo período. Ainda, segundo os mesmos autores, a biomassa de raízes finas variou diferentemente durante os sete anos do período do estudo, tanto na paisagem, quanto no gradiente topográfico desta floresta. Para eles, o estudo é o primeiro a medir o estoque de raízes finas por um período suficientemente longo, permitindo elucidar a complexidade da variação não-linear na biomassa de raízes finas em florestas tropicais.

As raízes finas ($\varnothing \leq 2$ mm) são a “porta de entrada” de água e nutrientes nas plantas, tal como as folhas são para carbono e energia. Raízes finas também são, possivelmente, um sumidouro de carbono adquirido na produtividade terrestre primária (Jackson *et al.* 1997). Todavia, atualmente estudos comprovaram que raízes finas possuem alto “turnover” (Matamala *et al.*, 2003; Hertel *et al.*, 2006; Trumbore *et al.*, 2006; Espeleta & Clark, 2007) de tal maneira que o carbono fixado numa época do ano é liberado em outra, não se comportando em longo-prazo, como um estoque de carbono da biomassa florestal.

Estimativas recentes indicam que a produção de raízes finas contribui com 33 a 67% da produção primária anual em ecossistemas florestais (Matamala *et al.* 2003). Estudos recentes, Hertel *et al.* (2006); Espeleta & Clark (2007), ambos realizados na Costa Rica, têm focado a variação espaço-temporal de raízes finas ($\varnothing \leq 5$ mm) e revelam fortes variações da biomassa subterrânea em termos sazonais e topográficos. De acordo com Pregitzer (2002), avanços na pesquisa de dinâmica de raízes ainda requerem melhores modelos que relacionem a arquitetura de raízes e sua dinâmica. Sendo a morte de raízes, provavelmente um processo não ao acaso, sabe-se ainda muito pouco sobre as causas de morte dessas raízes.

A dinâmica de raízes em florestas secundárias é similar a da floresta primária, com pequenas diferenças no tempo de reposição e na idade média do carbono. Apesar disso, existe alta variação espacial nos valores de ^{14}C em raízes finas ($\varnothing < 2$ mm) mortas e vivas (Trumbore *et al.* 2006). A dinâmica de raízes precisa ser avaliada no contexto de outros fluxos de carbono nos ecossistemas, além de outras relações como, por exemplo, aspectos físico-químicos dos solos. Ambos os dados de radiocarbono e isótopo estável indicam que a decomposição de raízes pode ser a maior fonte de CO_2 , encontrado nos poros do solo até 1 m de profundidade nas florestas maduras. Segundo este estudo, realizado na região de Paragominas-PA, as estimativas de produção de raízes sugerem que 80% do CO_2 produzido entre 1 e 6 m de profundidade é derivado da rizosfera, procedimento este, que retorna o CO_2 para a atmosfera dentro de 1-2 anos.

Jackson *et al.* (1996) compilaram, à nível global, a base de dados de 250 estudos sobre raízes, subdividindo-os em 11 biomas e adequando-os a profundidade (coeficiente β) para os dados de cada bioma (Figura 1). Altos valores de β correspondem a maiores proporções de raízes com o aumento de profundidade. Gale e Grigal (1987) apresentaram o seguinte modelo de distribuição vertical de raízes: ($Y = 1 - \beta^d$), onde: Y = Fração acumulativa de raízes (proporção entre 0 e 1); d = Profundidade (cm); β = Coeficiente ajustado (único parâmetro estimado).

Tundra, floresta boreal e campos temperados mostraram um perfil de raízes mais rasas, com 80 a 90% de raízes até 30 cm de profundidade. Desertos e florestas temperadas de coníferas mostraram maiores valores de β , com somente 50% de suas raízes até 30 cm de profundidade. Florestas tropicais obtiveram a maior massa de biomassa de raízes (5 kg m^{-2}) ou 50 Mg ha^{-1} (Jackson *et al.* 1996).

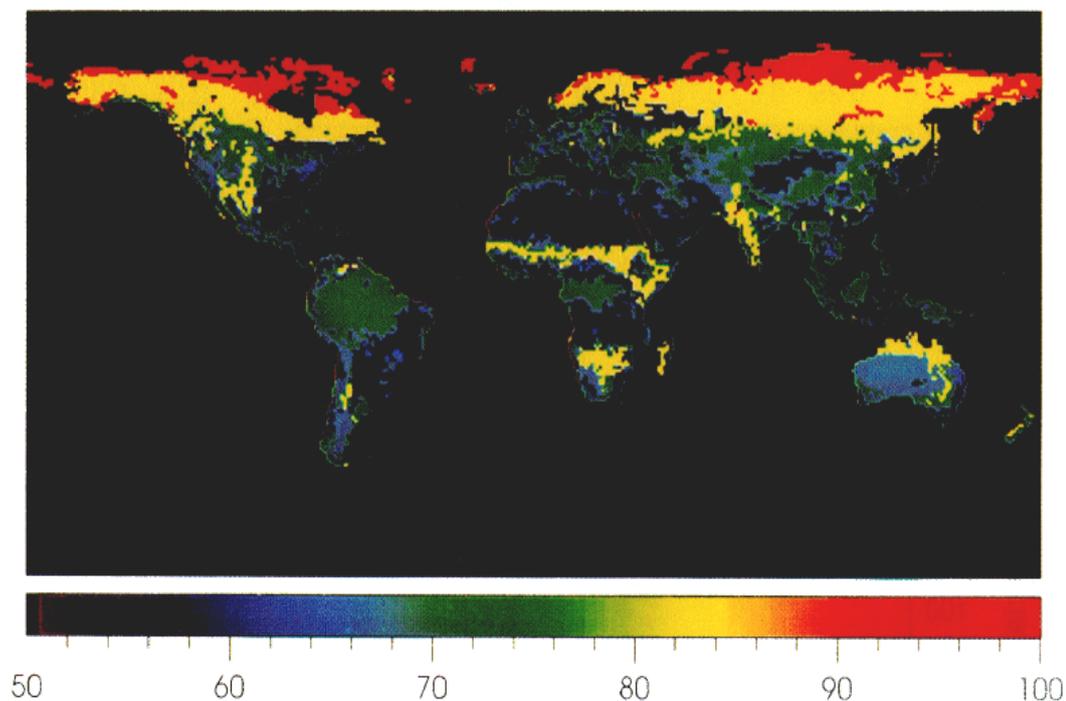


Figura 1. Mapa global da percentagem de biomassa de raízes encontradas até 30 cm de profundidade. Fonte: Jackson *et al.* 1996.

Podemos verificar, na América do Sul (Figura 1), as áreas de Cerrado em azul com valores de biomassa subterrânea variando de $39,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Rodin, 2004) a até $53,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Castro & Kauffman, 1998) e a Amazônia em verde, com estimativas de biomassa subterrânea de $54,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Klinge, 1973) a $122,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Fearnside (1994).

O tempo de permanência do carbono no solo, em se tratando de raízes finas, é um dos aspectos menos compreendidos do ciclo global do carbono. A dinâmica destas raízes finas também é um dos últimos aspectos, ainda incompreendidos, em se tratando das funções da planta. Segundo Strand *et al.* (2008), a maioria dos estudos recentes desta dinâmica subterrânea têm usado isótopos de carbono ou observações diretas com câmeras. De acordo com os mesmo autores, a contribuição das raízes finas para o ciclo global do carbono tem sido subestimada em torno de 60%, devido às estimativas errôneas de isótopos, que são bem conflitantes na literatura. Sobretudo, subestima a taxa com que estas raízes finas são produzidas.

Compreender a dinâmica da biomassa subterrânea, em ecossistemas naturais e alterados, de diversas idades, vem sendo uma grande questão para a ciência florestal. Todavia, estes dados ainda são escassos para os ecossistemas tropicais. A inclusão da variável biomassa de raiz em modelos matemáticos de comportamento de ecossistemas traria muito mais certeza em relação ao estoque de carbono na vegetação, possibilitando afirmações mais fidedignas sobre a questão.

3.4. NUTRIENTES

De acordo com Arnon (1937), os elementos minerais essenciais ao crescimento dos vegetais são: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cloro, ferro, manganês, zinco, cobre, molibdênio e níquel. Além dos elementos minerais essenciais, existem os elementos benéficos, que promovem o crescimento em várias plantas, mas não são absolutamente necessários para que se complete o ciclo de vida da planta. Os elementos benéficos são: sílica, sódio, cobalto e selênio. Outros elementos que foram propostos como candidatos a elemento essencial ou benéfico incluem o cromo, vanádio e titânio, mas ainda faltam evidências suficientemente fortes.

Ainda segundo Arnon (1937), outro grupo é o dos elementos essenciais não minerais, que são os elementos captados como gás ou água. São eles: hidrogênio, oxigênio e carbono.

Jordan (1985) afirma que, para se manterem, os ecossistemas florestais dependem de sua capacidade de ciclar e acumular nutrientes no sistema solo-plantas, bem como, dentro do indivíduo. Desta forma, a ciclagem de nutrientes em um ecossistema consiste no fluxo desses nutrientes e nas transferências entre os ecossistemas.

Os solos da Amazônia são extremamente intemperizados e, geralmente, de baixa fertilidade (Camargo & Falesi, 1975; Jordan, 1985), cuja vegetação depende fortemente da ciclagem de nutrientes contidos na biomassa e nos detritos vegetais (Luizão, 1989).

Essa ciclagem é constituída, basicamente, das fases de absorção, assimilação e armazenamento dos nutrientes na biomassa, os quais retornam ao solo pela serapilheira, através do escorrimento pelo tronco, decomposição da necromassa na superfície do solo e, finalmente, pela mineralização através da microfauna do solo, ficando assim, disponíveis no ecossistema para, novamente, serem assimilados pelas plantas (Haag, 1985).

A extração seletiva de madeira e a fragmentação florestal representam impactos relativamente moderados, se comparados à conversão da floresta tropical densa, altamente diversificada, para cultivos agrícolas muito simplificados (na sua grande maioria,

monoculturas) ou para pastagens com uma só espécie de gramínea, geralmente exótica e implantada em áreas com infra-estrutura precária. Nesses casos, os impactos negativos são esperados e severos, já que os mecanismos básicos de funcionamento do ecossistema natural, com suas efetivas reciclagens de matéria orgânica e nutrientes, são rompidos (Luizão, 2007).

Além disso, alguns nutrientes como: N e S podem ser perdidos em altas proporções, na queimada inicial e/ou nas queimadas posteriores, com um forte potencial de se tornarem limitantes no sistema. No caso de pastagens na Amazônia brasileira, principalmente formadas com a gramínea *Brachiaria humidicola* ou “quicuío-da-Amazônia”, o manejo tem sido quase sempre inadequado e os fatores de degradação do solo e da queda de produção da pastagem evoluem rapidamente e podem levar ao abandono da área em poucos anos.

Consideráveis perdas de nutrientes em ecossistemas florestais podem ocorrer por ações antrópicas tais como: a substituição da floresta por outros tipos de vegetação, extração da biomassa e uso do fogo ou causas naturais de distúrbios ambientais como incêndios naturais e “*Blowdown*”. O tempo necessário para a recuperação da qualidade nutricional do solo nestas áreas vai depender de como a floresta foi removida e do posterior uso da terra. Para tanto, deve-se considerar o tipo e o tempo de uso, após a remoção da vegetação, além da intensidade e o número de queimas a que a área foi submetida (Uhl *et al.*, 1982).

O estoque de nutrientes minerais contidos na biomassa aumenta durante a sucessão secundária na forma de biomassa acumulada. Na sucessão, os nutrientes do solo têm uma relativa e constante taxa de suprimento, disponibilizando outros nutrientes que se acumulam na biomassa (Vitousek & White, 1981). A tendência geral é o aumento da disponibilidade de nutrientes no início da sucessão secundária.

Silva *et al.* (2006) realizaram um experimento numa área de sucessão secundária com seis anos de idade para avaliar a taxa fotossintética de algumas espécies submetidas à adubação. Concluíram que a espécie *Vismia japurensis* foi a mais eficiente no uso dos nutrientes devido suas altas taxas de fotossíntese e baixos teores foliares de P, quando comparada às outras espécies estudadas.

Conforme Magalhães (1999), em muitos casos, levando-se em conta a sazonalidade, os nutrientes mais móveis apresentam concentrações menores quando a amostragem é feita na estação de maior crescimento. De acordo com Sabaté (1995), estes resultados de diluição e fluxo de absorção se referem às espécies de clima temperado. Para as regiões tropicais e subtropicais, onde as estações são mais marcadas pela precipitação e onde a fenologia é bem mais heterogênea existem poucos estudos sobre o assunto (Fife & Nambiar, 1987).

Em clareiras florestais, a disponibilidade de materiais de fácil decomposição, tais como raízes mortas e serapilheira acumulada, aumenta a entrada de nutrientes para o solo. Estes fatores são os principais causadores de maiores concentrações de K, Ca, Mg e Na em clareiras e trilhas de trator após corte seletivo (Ferraz *et al.*, 1997).

O rápido crescimento da vegetação nativa em áreas abandonadas, seja pelo uso intenso (Uhl *et al.* 1988) e/ou uso abusivo de fogo (Zarin *et al.* 2005), práticas muito comuns na Amazônia, possui alta capacidade de reassimilar carbono e o estoque de nutrientes. São, portanto, áreas muito importantes em se tratando de mitigação do efeito estufa através da assimilação fotossintética do CO₂.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na área experimental do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais - PDBFF (Figura 2), localizada a 80 km ao norte de Manaus (2°30'S, 60°W). O PDBFF está inserido no Distrito Agropecuário da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA).

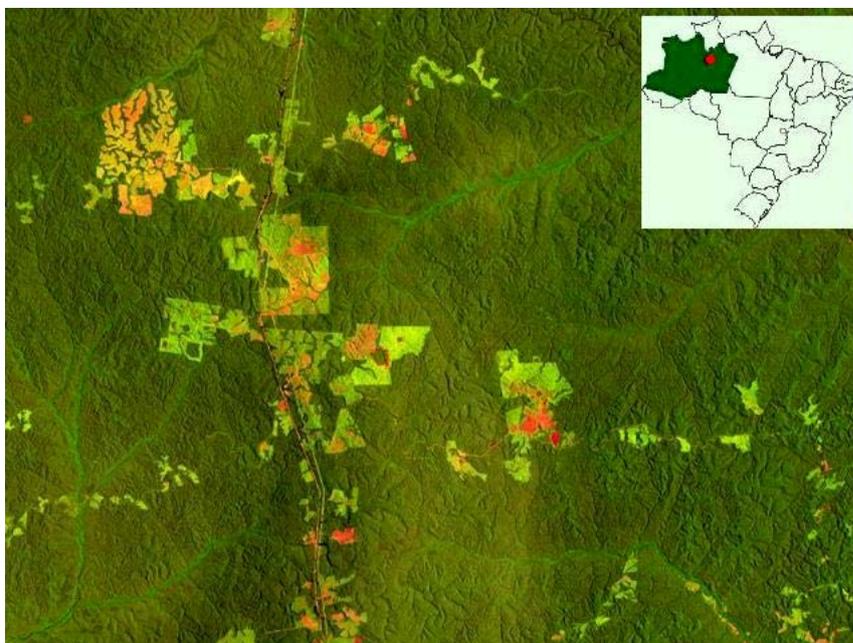


Figura 2. Imagem Landsat 2003, TM 5, 4 e 3 da área de estudo (verde escuro: floresta madura; verde claro: vegetação secundária; e vinho: áreas alteradas (pasto e queimada)). (Fonte: PDBFF, 2003). Escala 1: 30.000.

A área onde estão localizadas as reservas do PDBFF apresenta características ambientais que são consideradas típicas para a Amazônia central (Laurance *et al.* 1999). O

PDBFF consiste em reservas isoladas e não-isoladas de formato quadrangular de 1, 10, 100 e 1000 ha, distribuídas em sete diferentes sítios de estudo, ao longo de cerca de 50 km no sentido leste-oeste, rodeadas por extensas áreas de floresta intacta utilizadas como parcelas-controle. Nos sítios Dimona e Colosso os fragmentos florestais foram isolados por meio da derrubada total da vegetação nativa, seguida da utilização de fogo para eliminação da vegetação morta. Nestes dois sítios, foram implantadas pastagens que foram utilizadas intensamente durante os primeiros 4-5 anos e, então, foram gradativamente abandonadas pelos proprietários, devido à baixa produtividade. No entanto algumas destas pastagens localizadas do sítio Diva continuam ativas até os dias atuais (PDBFF, 2003).



Figura 3. Imagem Landsat 2003 mostrando a localização dos transectos estudados. Em branco, as parcelas de pastagens abandonadas. Em preto, as parcelas de florestas cortadas. (Coordenadas geográficas no anexo II). Escala: 1: 17.000. À esquerda fazenda Dimona (T 14 e T 16), ao centro fazenda Porto Alegre (T 12) e à direita fazenda Colosso (T 01, T 03, T 04, T 05, T 06 e T 07). Setas em azul (capoeiras), setas em vermelho (pastagens).

Diversos estudos foram realizados nestas áreas de vegetação secundária, o que fez surgir dentro do próprio PDBFF, um novo grupo de pesquisa, dedicado a estudar os impactos humanos, regeneração e recuperação de áreas degradadas, além de definir estratégias de manejo para estas áreas. Esta nova linha de pesquisa foi denominada: Projeto Pioneiras, no qual este estudo está inserido. O Projeto Pioneiras nasceu como um sub-projeto do PDBFF há cerca de 20 anos e sua proposta inicial era compreender como o histórico de uso da terra

poderia afetar a dinâmica da sucessão secundária da vegetação em florestas da Amazônia Central.

4. 2. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

4.2.1. Vegetação

A vegetação dominante é Floresta Tropical de Terra-Firme, com o dossel alcançando 30-37 m de altura, e árvores emergentes alcançando 45-50 m (Mesquita *et al.*, 2001). A vegetação é classificada como floresta de terra firme sempre verde com dossel fechado (RADAMBRASIL, 1978), tendo as características estruturais da vegetação sucessional apresentadas por Feldpausch *et al.* (2004) e Feldpausch *et al.* (2005), como parte do projeto LBA - Experimento de Grande Escala da Biosfera e Atmosfera na Amazônia.

4.2.2. Clima

O clima para a região é tropical úmido com alta pluviosidade (RADAMBRASIL, 1978). Com média anual nos últimos 5 anos para a Fazenda Dimona de 2.188 mm, Fazenda Porto Alegre 2.269 mm e Fazenda Esteio 2.322 mm (PDBFF, 1999). A temperatura média é de 27,9° C na estação seca e 25,8° C na estação chuvosa e muito raramente pode atingir 17° C. Normalmente o mês de setembro, apresenta menor precipitação durante todo o ano, (60 mm) e temperaturas mais altas (média mensal de 33,1° C) (RADAMBRASIL, 1978). Na classificação de Köppen (1936), o clima da região é do tipo *Am*, com temperatura média de 26 °C (mínima 19 °C e máxima 39 °C) e precipitação anual que varia de 1.800 a 2.800 mm (Luizão & Vasconcelos 2005).

4.2.3. Solos

O solo dominante na área de estudo é o Latossolo Amarelo distrófico, pobre em macronutrientes como P, K, e Ca e altamente lixiviado, formado por argilas com baixa capacidade de troca catiônica, e de moderada a alta acidez (Vitousek & Sanford, 1986). Em áreas mais elevadas (platôs), o solo apresenta alto teor de argila, enquanto os baixios úmidos se caracterizam por altos teores de areia (Laurance *et al.*, 2001; Luizão *et al.*, 2004). A topografia é ondulada, variando de 50 a 150 m de altitude. Conforme Ranzani (1980), os solos predominantes são os Latossolos-amarelos (oxissolos) e os Espodosolos (antigos podzóis).

4.3. DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

4.3.1. Delineamento amostral

Para coletar os dados de biomassa, volume e nutrientes de raízes até a profundidade de 30 cm em áreas de floresta secundária no PDBFF utilizou-se, para o presente estudo, os seguintes transectos do Projeto Pioneiras como unidade amostral conforme a tabela 1:

Tabela 1. Número do transecto, histórico de uso, idade atual (em 2008), número de queimas (desde 1985) e biomassa aérea (Mg ha^{-1}) das áreas de florestas secundárias.

Transecto	Histórico	Idade atual (2008)	Nº de queimas	Biomassa aérea
14	Pastagem	14	7	31,5
16	Pastagem	16	5	34,5
05	Pastagem	18	9	95,3
01	Pastagem	20	3	105
03	Pastagem	20	2	148
04	Pastagem	20	2	173
06	Capoeira	25	0	183
07	Capoeira	25	0	200
12	Capoeira	25	0	133

Fonte: Bentos (2006).

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente ao acaso. Para pastagens abandonadas de 20 anos e capoeiras de 25 anos houve 3 repetições. Já para a cronossequência de pastagens não houve repetições.

- Cronossequência de pastagens de: 14, 16 e 18 anos (4 amostras em cada transecto)
- Pastagem de 20 anos – três repetições (quatro amostras por repetição)
- Capoeira de 25 anos – três repetições (quatro amostras por repetição)

Os monólitos foram distribuídos, previamente, de maneira sistemática dentro de cada transecto. Cada transecto possui 100 m de comprimento. Para este estudo estabeleceu-se uma largura de 20 metros para cada lado do transecto, totalizando uma área igual a 4000 m^2 . As amostras foram demarcadas alternadamente, através de trena, a partir da base do transecto ou distância zero. Do lado direito, a 25 metros da base e 20 metros do transecto, foi instalada a primeira amostra. A segunda, a 50 metros da base e 20 metros a esquerda do transecto, seguindo o mesmo processo para as amostras subseqüentes (Figura 4).

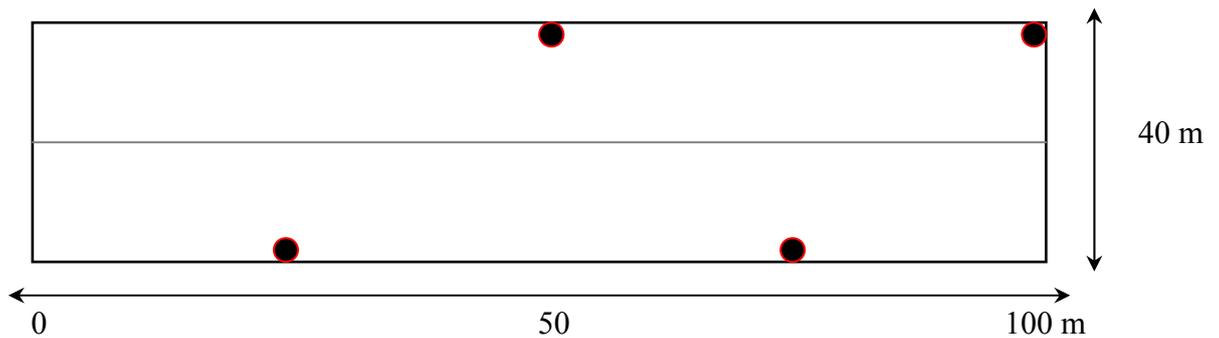


Figura 4. Distribuição sistemática dos monólitos dentro de cada transecto.

Os monólitos foram numerados de 1 a 4 para cada transecto. Os transectos receberam os mesmos números originais do PDBFF (14, 16, 05, 01, 03, 04, 06, 07, 12), totalizando 36 monólitos escavados.

O estudo foi dividido em três tratamentos onde:

T1 = Cronossequência de pastagens abandonadas

T2 = Pastagens abandonadas de 20 anos

T3 = Capoeiras de 25 anos

Para a cronossequência de pastagens abandonadas (14, 16, 18 e 20 anos), utilizou-se a média das três repetições das pastagens de 20 anos. Para analisar as variações de biomassa, volume e nutrientes na cronossequência, foi utilizada a estatística descritiva; para pastagens de 20 anos e capoeiras de 25 anos, aplicou-se a estatística de inferência. Descobriram-se pequenas diferenças físicas e químicas dos solos nas repetições de pastagem de 20 anos e capoeira de 25 anos. Não havia no PDBFF áreas exatamente iguais em termos pedológicos e estas diferenças se refletiram na biomassa subterrânea, fornecendo outros aspectos a analisar, como por exemplo, o controle da idade e uso do solo para observar a variação da biomassa em função das qualidades físicas e químicas do solo.

➤ As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do programa SYSTAT 10.0 (SPSS Inc., 2000).

4.4. AMOSTRAGEM DE RAÍZES E SOLOS

4.4.1. Amostragem da biomassa subterrânea

Uma das principais curiosidades, ao se elaborar este trabalho, foi analisar o comportamento da biomassa de raízes em relação ao gradiente de profundidade no solo. Para

tanto, considerou-se a camada superficial de raízes acima do solo, muito comum em florestas tropicais, e três camadas de 10 cm (altura do anel de aço). Inicialmente, pensou-se uma profundidade de 40 cm para este estudo, mas devido às dificuldades de escavação do monólito (inclui-se o fator econômico) e amparado por estudos que verificaram que a biomassa de raízes em floresta tropicais, até 30 cm de profundidade, corresponde a 75% do total, conforme Jackson *et al.* (1996) e, até 40 cm de profundidade, é de 77 a 93% para florestas secundárias e 89 a 96% para as pastagens abandonadas, Jaramillo *et al.* (2003), adotou-se a profundidade de 30 cm.

As amostras foram retiradas até a profundidade de 30 cm em áreas de florestas secundárias no PDBFF. Foi utilizado um anel de aço afiado em uma extremidade e reforçado na outra (Figura 5), nas dimensões de 30 cm de diâmetro; 10 cm de altura; e 0,3 cm de espessura.



Figura 5. Anel em aço e chapa horizontal.

O anel de aço foi inserido no solo com pancadas de marreta até atingir a profundidade de 10 cm, de tal forma que a extremidade reforçada ficasse no mesmo nível da superfície do solo. Após esta operação, cavou-se um buraco de 50 cm de profundidade num dos lados do monólito que possibilitasse a inserção horizontal de uma chapa de aço nas dimensões de 32 x 32 x 0,3 cm, também com golpes de marreta, de tal forma a perfazer as incisões necessárias para a retirada de 7,07 litros de solo florestal contendo a biomassa de raízes. Retirado o

primeiro estrato de solo, repetiram-se as operações com o anel e chapas de aço até atingir os 30 cm de profundidade (Figura 6).

As possíveis contaminações de cada amostra foram evitadas cobrindo-se, com um isolante apropriado, cada camada no ato da escavação. O objetivo foi obter um volume conhecido de solo florestal e de raízes no gradiente de profundidade.

O monólito de solo florestal foi dividido em uma camada superficial e três camadas, abaixo do solo, de 10 cm de altura cada, as quais foram coletadas, separadas e identificadas individualmente em sacos plásticos para a mensuração das raízes nos acampamentos do PDBFF. O solo revolvido foi devolvido ao seu local de origem. Tratou-se de um experimento de baixo impacto ambiental, devido à rápida recolonização do espaço pela biocenose local.

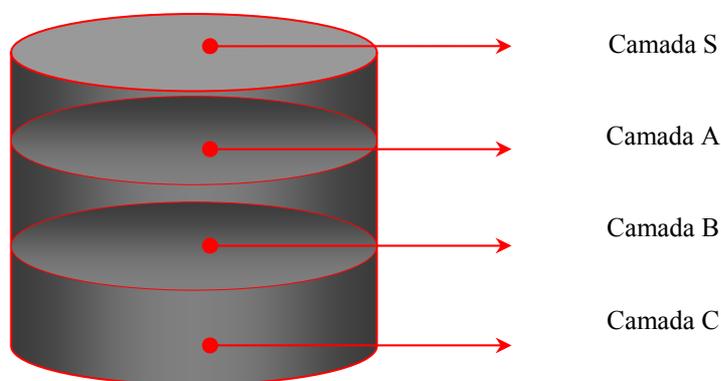


Figura 6. Desenho esquemático do monólito de solo florestal.

Dimensões:

Altura (H) = 30 cm

Diâmetro (D) = 30 cm

Área (AS) = 706,858 cm²

Volume por monólito = 21,21 litros

Volume por camada = 7,07 litros.

Camada S: Superficial: \approx -10 até 0 cm

Camada A: 0 a 10 cm de profundidade

Camada B: 10 a 20 cm de profundidade

Camada C: 20 a 30 cm de profundidade



1. Início da escavação (serapilheira grossa).



2. Camada superficial de raízes.



3. Nível do solo em capoeira.



4. Nível do solo em pastagem.



5. Camada A e chapas: isoladora e horizontal.



6. Camada B.



7. Camada C.



8. Camada C com régua de 40 cm ao lado.



9. Fim da escavação.



10. Visão geral do monólito de solo (camada C).



11. Destorroamento do solo e catação manual das raízes.

O processo de escavação dos monólitos se dava pela manhã, com a retirada das raízes superficiais (juntamente com fragmentos de necromassa, sendo que a serapilheira grossa foi descartada de imediato) para posterior separação, através de flotação, nos acampamentos do PDBFF. Já para as camadas A, B e C a separação de raízes e solo se dava no próprio local da escavação, através do destorroamento e catação manual em superfícies apropriadas (plásticos), acondicionamento e identificação por camada e por monólito.

À tarde, ocorria a separação da camada superficial de raízes da necromassa por flotação e lavagem. Para as camadas A, B e C, apenas as lavagens das raízes para retirada de quaisquer fragmentos de solo e/ou materiais não pertencentes à biomassa de raízes.

Após a limpeza das raízes era realizada a medição, através de paquímetro, e separação em quatro classes de diâmetro (CD), conforme Tabela 2, sendo elas: muito finas; finas; médias; e grossas.

Tabela 2. Classes de diâmetro estabelecidas para as raízes.

Classes de diâmetro das raízes (CD)	
$\varnothing < 2 \text{ mm}$	Raízes muito finas - MF
$2 \text{ mm} \leq \varnothing < 5 \text{ mm}$	Raízes finas - F
$5 \text{ mm} \leq \varnothing < 20 \text{ mm}$	Raízes médias - M
$\varnothing \geq 20 \text{ mm}$	Raízes grossas - G

Após a separação em CD, com o emprego de tesouras, para cada camada, realizou-se a determinação do volume fresco das raízes através da imersão em proveta graduada e medição do deslocamento d'água (princípio de Arquimedes). Foram utilizadas três provetas: uma de 50 ml, uma de 250 ml e uma de 1.000 ml, as quais atenderam as necessidades de cada CD. A leitura do deslocamento d'água se deu pela diferença entre o volume d'água existente antes da imersão e o volume final após a imersão. Sendo 1 ml igual a 1 cm³, a obtenção do volume deu-se de forma direta.



12. Separação por flotação (camada S).



13. Material descartado.

O material descartado continha necromassa e raízes extremamente finas, as quais, dificilmente, seriam separadas pela metodologia aplicada. Portanto, não houve a coleta integral das raízes superficiais. Contudo, trata-se de uma biomassa desprezível, quando comparada ao total desta camada (S).



14. Separação em CD.

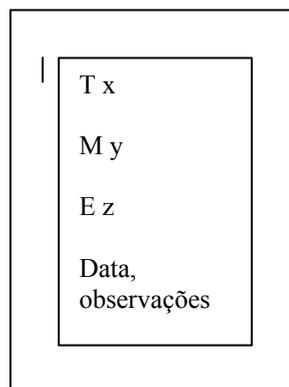


15. Raízes lavadas.



16. Mensuração do volume fresco.

A identificação das amostras se deu através de códigos de letras e números, impressos com caneta no próprio saco plástico, como mostra o esquema a seguir:



Onde:

T = Transecto; M = Monólito; E = Estrato (camada)

Após a mensuração do volume, as raízes foram colocadas para secar levemente ao sol (Figura 7) e acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, para posterior pesagem no Laboratório Temático de Solos e Plantas – LTSP do INPA.



Figura 7. Aspecto das raízes, após mensuração do volume, secando ao sol (dois monólitos).

A biomassa das raízes foi determinada no LTSP-INPA, através de balança de precisão (0,01g) após secagem em estufa a 65 graus Celsius até a obtenção do peso constante. As raízes foram pesadas cerca de 30 minutos após a retirada da estufa e em sala climatizada. Cada amostra foi retirada do seu respectivo saco de papel e colocada sobre uma bandeja, já tarada, sobre a balança, possibilitando uma boa determinação dos valores de massa.

Para a obtenção dos valores de biomassa subterrânea (em $Mg\ ha^{-1}$) utilizou-se o seguinte cálculo:

$$\text{Biomassa} = \text{massa (g) total de cada transecto} * 10^{-6}.$$

$$\text{Área} = 2.827,44\ \text{cm}^2\ (4\ \text{monólitos}) \rightarrow \text{transformada para hectare.}$$

Utilizou-se uma ficha de campo (anexo IV) que serviu tanto para os valores de volume, como para os valores de massa. As datas das coletas de cada monólito encontram-se no (anexo V).

São possíveis 16 dados em cada monólito. No entanto, alguns valores, principalmente os de raízes grossas, foram iguais a zero. Já as raízes MF foram detectadas em todas as camadas de todos os transectos, possibilitando 144 amostras para esta classe. Dos 576 dados possíveis foram encontrados 380 valores não-nulos. Foram realizados diversos cálculos

levando-se em conta as variáveis em questão. Para o cálculo de densidade absoluta utilizou-se $n = 380$. Para outros cálculos que envolviam variáveis categóricas ou tratamentos, realizou-se a separação das variáveis por idade, uso do solo, camada, classe de diâmetro e monólito.

4.4.2. Amostragem de solos

As amostras de solo (Figura 8) foram retiradas nas camadas A, B e C com um anel volumétrico de *Kopeck* (100 cm^3). O material coletado em cada uma das camadas, das quatro amostras (monólitos) de cada transecto, foi devidamente identificado e separado para, posteriormente, formar uma amostra composta por camada por transecto. Ou seja, cada transecto forneceu, inicialmente, quatro amostras para cada camada. Estas quatro amostras formaram uma amostra composta para cada camada, de maneira que cada transecto forneceu três amostras de solos (uma para cada camada) para as devidas análises químicas e físicas.



Figura 8. Retirada das amostras de solos em cada camada.

As amostras compostas de solos (três para cada transecto) continham cerca de 500 g cada e foram colocadas para secar (Terra Fina Seca ao Ar – TFSA) em temperatura ambiente, por dois meses, no Laboratório de Triagem do INPA. Foi utilizada uma peneira de 2 mm para limpeza e preparo das amostras de solo e analisado, física e quimicamente, um total de 27 amostras. As raízes encontradas nos anéis de coleta foram somadas ao montante da biomassa de cada camada no momento da coleta.

O cálculo do estoque de carbono (EC; Mg C ha^{-1}) para uma determinada profundidade se dá da seguinte maneira:

$$EC = C * D_b * p * 10^{-1}$$

Onde: EC = Estoque de Carbono (Mg C ha⁻¹); C = Teor de carbono no solo (g kg⁻¹); D_b = densidade básica ou aparente do solo (g cm⁻³); e p = profundidade (cm).

O estoque de carbono no solo (Tabela 13) foi estimado através dos teores de carbono (valor determinado) em cada camada e com a D_b estimada através da equação:

$$D_b = 1,5544 - 0,0004 * \text{argila} - 0,01 * \text{carbono total} + 0,0067 * \text{SB}$$

Onde: D_b = g cm⁻³; argila = %; carbono total = g kg⁻¹; e SB = Cmolc kg⁻¹

4.5. ANÁLISES QUÍMICAS

4.5.1. Análise química de solos

Foram analisados, nas 27 amostras de solos, os seguintes parâmetros químicos:

- 1) pH_{H2O} e pH_{KCl} utilizando potenciometria, após diluição com água e solução KCl 1N na proporção 1:2,5 (Embrapa, 1999).
- 2) C_{tot} e N_{tot}. Método clássico de DUMAS & PREGL. Combustão a seco seguida de cromatografia gasosa – FISIONS Instruments – VarioMAX CN. (Anderson & Ingram, 1993).
- 3) P_{disp.}, K_{disp.}, Mn, Fe e Zn através da extração pela solução Mehlich 1 (duplo ácido: HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) (Embrapa, 1999). A determinação do P foi realizada no espectrofotômetro UV-VIS-120-01. Os demais elementos foram determinados no espectrofotômetro de absorção atômica, com chama ar-acetileno.
- 4) Ca²⁺, Mg²⁺, e Al³⁺ extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹ (Embrapa, 1999). A determinação de Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (alumínio trocável) foram feitas no espectrofotômetro de absorção atômica, com chama ar-acetileno.
- 5) Matéria orgânica (M.O) estimada a partir do teor de carbono (valor do carbono x 1,724) (Embrapa, 1999).
- 6) Relação C:N determinada a partir da relação dos teores de C e N.
- 7) Soma de bases (SB) a partir da soma dos cátions trocáveis (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺; Embrapa, 1999).

8) Capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_e) determinada a partir da soma de bases (SB) e alumínio trocável.

Realizou-se, também a análise física dos solos estudados através da granulometria. A metodologia utilizada foi a da Embrapa (1997). As análises químicas e físicas dos solos foram realizadas no Laboratório Temático de Solos e Plantas – LTSP/INPA.

4.5.2. Análise química de raízes

Para realizar as análises químicas das raízes fez-se uma amostra composta com os somatórios individuais das classes de diâmetro e das camadas dos 4 monólitos de cada transecto, de tal forma que cada transecto forneceu 16 possíveis dados, 4 por camada (S, A, B e C) e 4 por CD (MF, F, M e G). No entanto, alguns destes valores foram iguais à zero, por não terem sido detectados no experimento, e outros foram insuficientes após a moagem. De um total de 144 possíveis dados para as análises químicas, 117 se fizeram factíveis.

Neste experimento não houve separação das raízes por espécie, podendo ocasionar valores relativos dos teores de um determinado elemento, pois determinadas espécies têm necessidades nutricionais diferentes.

As amostras foram moídas integralmente, no moinho tipo Willye – TE 680, com o propósito de homogeneizar o material e retirar a porção necessária para as análises químicas.

Foram determinados os seguintes elementos químicos nas raízes:

- 1) C e N Combustão a seco seguida de cromatografia gasosa – FISIONS Instruments – VarioMAX CN. (Anderson & Ingram, 1993).
- 2) P pelo método molibdato de amônio. A leitura do P foi no espectrofotômetro UV-VIS-120-01;
- 3) K, Ca, Mg, Fe, Mn, e Zn, obtenção do extrato por via úmida (solução digestora nitroperclórica: HNO_3 e $HClO_4$ concentrados, na relação 2:1). Os teores foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, em chama de ar-acetileno.
 - As análises químicas das raízes foram realizadas no Laboratório Temático de Solos e Plantas – LTSP/INPA.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. BIOMASSA, VOLUME E DENSIDADE DE RAÍZES

5.1.1. Biomassa e volume por transecto

Neste estudo, massa e volume são extremamente correlacionados. Dessa forma, as estimativas foram realizadas utilizando-se a massa como variável dependente, pois esta foi determinada com maior precisão. Para uma mensuração mais precisa do volume seria necessária uma graduação da proveta em décimos de mililitro (decilitros). Por outro lado, a mensuração muito precisa do volume tornar-se-ia inviável devido ao tempo necessário para tais calibrações e à rotina de campo. Este estudo não quantificou, por motivos metodológicos, as raízes pivotantes. Deu-se ênfase às raízes secundárias.

O volume total de raízes encontradas nos 36 monólitos foi igual a 8.932 cm³ (8,9 litros) e o valor total de biomassa subterrânea igual a 2.901 g. O volume total de solo revolvido foi de 21.206 cm³ (somente o volume dos monólitos). Estes valores representam uma razão (volume de raízes / volume de solo) igual a 0,42. Indicando que, aproximadamente 40 % do volume verificado, até a profundidade de 30 cm, correspondem às raízes (Tabela 3). Os volumes totais por transecto foram obtidos através do somatório dos quatro monólitos de cada transecto.

Tabela 3. Discriminação dos transectos por uso do solo, idade, número de queimas documentadas e razão volume de raízes sobre volume do solo (VR / VS).

Transecto	Uso da terra	Idade	Nº de queimas	VR / VS
T 14	Pastagem	14	7	0,24
T 16	Pastagem	16	5	0,28
T 05	Pastagem	18	9	0,35
T 01	Pastagem	20	3	0,46
T 03	Pastagem	20	2	0,40
T 04	Pastagem	20	2	0,34
T 06	Capoeira	25	0	0,71
T 07	Capoeira	25	0	0,67
T 12	Capoeira	25	0	0,34

As queimadas não tiveram, *a priori*, nenhuma relação esperada com a biomassa de raízes. No entanto, esta característica será avaliada na discussão da qualidade química dos solos e raízes. A grande diferença (VR / VS) nas capoeiras também será avaliada adiante.

O volume e a biomassa das raízes (Figura 9) apresentaram alta correlação positiva com as idades ($r^2 = 0,971$ e $0,997$; respectivamente), que são: 14, 16, 18, 20 e 25 anos. Para as repetições de 20 e 25 anos, utilizou-se a média das três, embora as capoeiras de 25 anos tenham o histórico de uso diferente das demais.

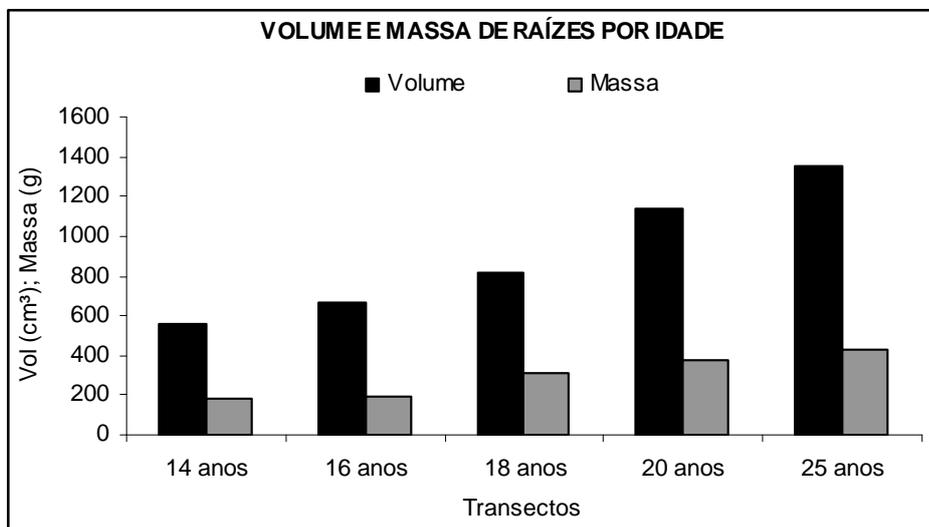


Figura 9. Volume (cm³) e Massa (g) de raízes por idade (somatório dos quatro monólitos).

As variações entre massa e volume (Figura 9), podem acontecer pelos seguintes motivos: características intrínsecas das raízes, que podem apresentar diferentes densidades devido à espécie, ao tipo de solo, ao diâmetro e ao *status quo* em que se encontram (morta, viva, sadia) ou por erros ou imprecisões nas mensurações. Diferentes classes de maturação de raízes foram observadas, desde as mais tenras, até as extremamente suberificadas. As raízes mortas, quando ainda continham biomassa, foram somadas ao estudo, mas as já quase completamente decompostas foram descartadas.

Aspectos interessantes foram observados em campo, como por exemplo, raízes novas se lançando dentro das raízes em decomposição e tomando todo seu interior, refletindo o já conhecido sistema de retroalimentação de florestas tropicais úmidas (Luizão, 2007). Em função do processo de decomposição e lixiviação da serapilheira, os nutrientes são carreados para o solo e novamente absorvidos pelas raízes (Poggiani & Schumacher, 2000).

A percentagem de biomassa subterrânea de cada transecto em relação ao valor total da biomassa de todos os transectos está distribuída conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Percentagem de biomassa subterrânea de cada transecto em relação ao total.

Transecto	Massa (g)	%
T 14	178,2	6,1
T 16	197,7	6,8
T 05	310,1	10,7
T 01	329,3	11,4
T 03	339,1	11,7
T 04	272,6	9,4
T 06	521,1	18,0
T 07	523,3	18,0
T 12	229,6	7,9
Total	2901,02	100,0

Para a biomassa em relação à idade (Figura 10), numa análise conjunta, não houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA: $r^2 = 0,014$; $F = 2,09$; $p = 0,081$). Porém, os valores de biomassa aos 25 anos são quase três vezes maiores que aos 14 anos.

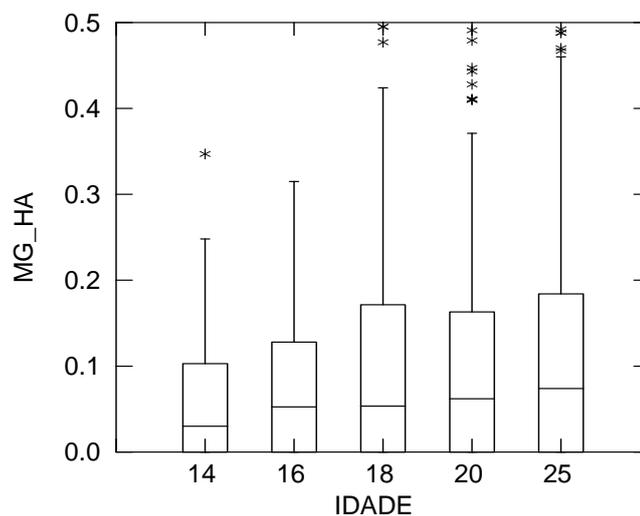


Figura 10. Variação da biomassa (Mg ha^{-1}) por idade.

Existem 28 amostras do banco de dados, num total de 576, que não foram incluídas na figura 10, com o propósito de realçar as medianas, desvio padrão e os quartis de cada transecto. São raízes grossas e médias “outliers”, as quais alcançaram até $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Houve diferença significativa para o volume em relação à idade, para a idade de 25 anos (ANOVA: $r^2 = 0,02$; $F = 2,897$; $p = 0,022$).

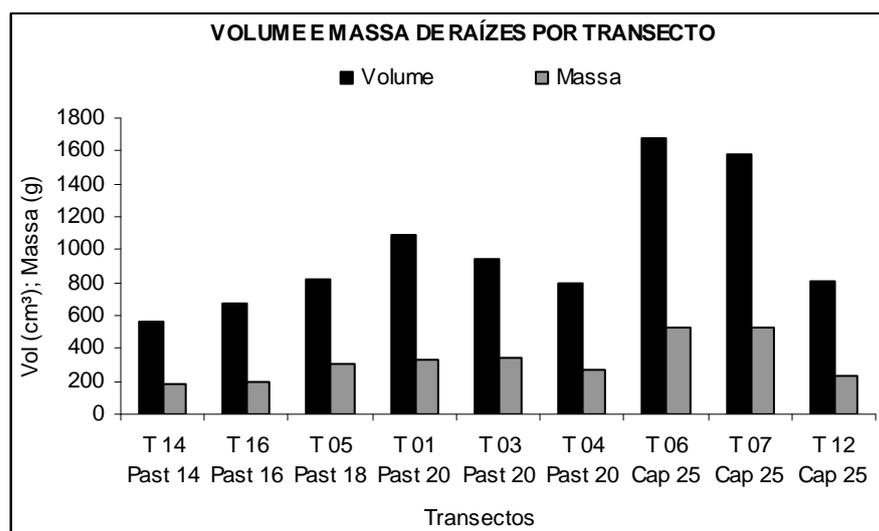


Figura 11. Volume (cm³) e Massa (g) de raízes por transecto.

Analisando-se os transectos (Figura 11), os de número T 06 e T 07 foram significativamente diferentes (ANOVA: $r^2 = 0,033$; $F = 2,445$; $p = 0,013$) em relação ao volume. Para biomassa, também houve diferença nos transectos T 06 e T 07. (ANOVA: $r^2 = 0,027$; $F = 1,973$; $p = 0,048$).

5.1.2. Variação da biomassa dentro de cada transecto

Não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, na comparação para o conjunto dos quatro monólitos (amostras) em todos os transectos (Tabela 5). As diferenças das médias podem estar associadas ao método de amostragem, talvez monólito não seja o método mais eficaz para se avaliar a biomassa subterrânea de florestas tropicais ou estas diferenças dentro de cada transecto ocorreram devido à própria complexidade e heterogeneidade destes ecossistemas.

Tabela 5. Uso da terra, idade, transecto, coeficiente de determinação, F calculado e probabilidade associada para os quatro monólitos de cada transecto (ANOVA).

Transecto	r^2	F	p
Pastagem 14 T 14	0,023	0,467	0,707
Pastagem 16 T 16	0,092	2,030	0,119
Pastagem 18 T 05	0,029	0,596	0,620
Pastagem 20 T 01	0,034	0,710	0,550
Pastagem 20 T 03	0,017	0,344	0,794
Pastagem 20 T 04	0,038	0,790	0,504
Capoeira 25 T 06	0,046	0,954	0,420
Capoeira 25 T 07	0,040	0,823	0,486
Capoeira 25 T 12	0,029	0,604	0,615

Embora o método de escavação completa das raízes determine, com exatidão, a biomassa em ecossistemas florestais, seu custo e o impacto ambiental são elevados. Segundo Silva (2007), já existem modelos alométricos que estimam com precisão ($r^2 = 95\%$) a biomassa total de florestas maduras. No entanto, para florestas secundárias, esta precisão está em torno de 72%.

Monólitos menores, e em maior número, poderiam resultar numa melhor padronização das amostras dentro de cada transecto. Contudo, a mensuração da biomassa seria mais trabalhosa e minuciosa, necessitando de materiais e equipamentos mais precisos. Além disso, mesmo ao somar os quatro monólitos, as camadas mais profundas apresentaram menores quantidades de biomassa. Este fato gerou problemas para a mensuração, principalmente do volume, e também na preparação do material para as análises químicas. Algumas amostras foram insuficientes para tais análises.

O monólito de 30 cm de diâmetro por 30 cm de altura possibilitou uma qualidade das amostras por captar um volume adequado, manuseável e mensurável de raízes, além de permitir a inclusão e retirada das raízes mais grossas. Aliado a estas características, possibilitou uma escavação diária exeqüível para uma pessoa e representou um baixo custo, tanto de fabricação, como operacional.

Não houve um padrão na quantidade de biomassa de raízes encontradas nos monólitos, nem mesmo em relação à seqüência das escavações, que duravam quatro dias (um monólito por dia) para perfazer um transecto. De modo geral, detectaram-se os maiores valores de biomassa nos monólitos de nº 4 (último de cada transecto). Não se encontrou uma explicação lógica para este comportamento que parece ser um evento ao acaso.

5.1.3. Densidade básica das raízes

As variações entre volume e massa se refletem nas densidades básica e específica das raízes. Estas variações na densidade parecem ser realmente devido à própria heterogeneidade do material encontrado, raízes tenras, lignificadas, finas ou grossas, pois houve uma alta correlação entre massa e volume ($r^2 = 0,945$ e $s_{y,x} = 8,529\%$), através da regressão linear.

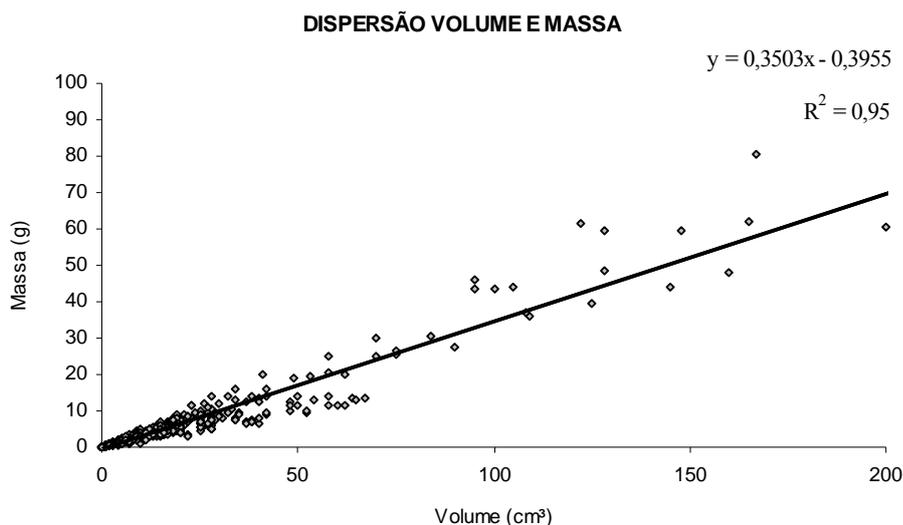


Figura 12. Relação volume (cm³) e massa (gramas) de todas as raízes (n = 380).

A análise de variância pelo programa Systat também mostrou alta correlação entre massa e volume (ANOVA: $r^2 = 0,995$; $F = 125,796$; $p < 0,05$).

A densidade básica média das raízes (Tabela 6) foi de $0,32 \pm 0,009 \text{ g cm}^{-3}$, descartando-se os valores iguais a zero de massa e volume (n = 380). Esta densidade é muito semelhante a que Rolim & Ferreira (1974) determinaram para o caule da *Araucaria angustifolia*, de $0,33 \text{ g cm}^{-3}$.

Tabela 6. Estatística da densidade básica das raízes e densidade básica média das raízes por transecto.

	n	380	Transecto	Densidade básica média (g cm ⁻³)
Mínimo		0.080	Pastagem 14 T 14	0,32
Máximo		0.510	Pastagem 16 T 16	0,29
Média		0.318	Pastagem 18 T 05	0,38
95% IC superior		0.327	Pastagem 20 T 01	0,30
95% IC inferior		0.310	Pastagem 20 T 03	0,36
Desvio Padrão		0.084	Pastagem 20 T 04	0,34
Variância		0.007	Capoeira 25 T 06	0,31
CV		0.263	Capoeira 25 T 07	0,33
			Capoeira 25 T 12	0,28

Volume e biomassa total de cada transecto também tiveram comportamentos muito semelhantes, exceto algumas discrepâncias, como no caso dos transectos T 05 e T 03, que apresentaram as maiores densidades (Tabela 6). Investigando-se os porquês destas diferenças observou-se que ambos os transectos apresentaram comportamentos semelhantes, com as maiores biomassas na CD de raízes médias. Isto explica, em parte, a maior variação entre massa e volume, pois as raízes da CD média apresentaram maior densidade.

5.1.4. Relação da biomassa aérea com a biomassa subterrânea

Outra maneira de se avaliar a coerência dos dados obtidos em campo, neste trabalho, pode ser verificada com os dados de outros estudos sobre estas mesmas capoeiras.

Moreira (2003) estimou as idades e o histórico de uso destas capoeiras e, Bentos (2006), estudou a fenologia e estimou a biomassa aérea destas áreas. Através destes dados podemos comparar a biomassa aérea e subterrânea, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Número dos transectos, massa (g), biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}) e percentagem de biomassa subterrânea em relação à total.

Nº	Biomassa de raízes (g)	Subterrânea	Aérea	Total	Percentagem
T 14	178,2	6,3	31,5	37,8	16,7
T 16	197,7	7,0	34,5	41,5	16,8
T 05	310,1	11,0	95,3	106,3	10,3
T 01	329,3	11,6	104,8	116,4	10,0
T 03	339,1	12,0	147,9	159,9	7,5
T 04	272,5	9,6	172,6	182,2	5,3
T 06	521,1	18,4	183,2	201,6	9,1
T 07	523,3	18,5	200,5	219,0	8,5
T 12	229,6	8,1	132,7	140,8	5,8

No transecto 14 temos: 178,2 g em 2.827,44 cm^2 . Com uma regra de três simples e as devidas transformações de unidades, de cm^2 para hectare e gramas para toneladas, chegamos ao valor de 6,302 Mg ha^{-1} . Os valores de biomassa subterrânea, até 30 cm de profundidade, para estas idades de florestas secundárias, são condizentes com a literatura existente. Jaramillo *et al.* (2003); Laurance *et al.* 1999); Lima (2007); Silva (2007); Uhl *et al.* (1988); Salomão *et al.* (1996); Vargas *et al.* (2008).

Esperava-se que o estoque de biomassa de raízes fosse semelhante nas três repetições de pastagens de 20 anos e capoeiras de 25 anos. Contudo, verificaram-se algumas diferenças dentro destas repetições, as quais podem ser explicadas pelas características intrínsecas dos solos, que diferem em sua qualidade química e granulométrica, e conseqüentemente, na biomassa subterrânea. As variações de biomassa dentro das repetições serão analisadas e discutidas após a apresentação dos resultados químicos e físicos de solos e raízes.

Deve-se levar em conta, nestas comparações entre biomassa aérea e subterrânea, a diferença de tempo das respectivas medições. A biomassa aérea foi estimada por Bentos (2006) em 2005 e a subterrânea, objeto deste estudo, em 2008.

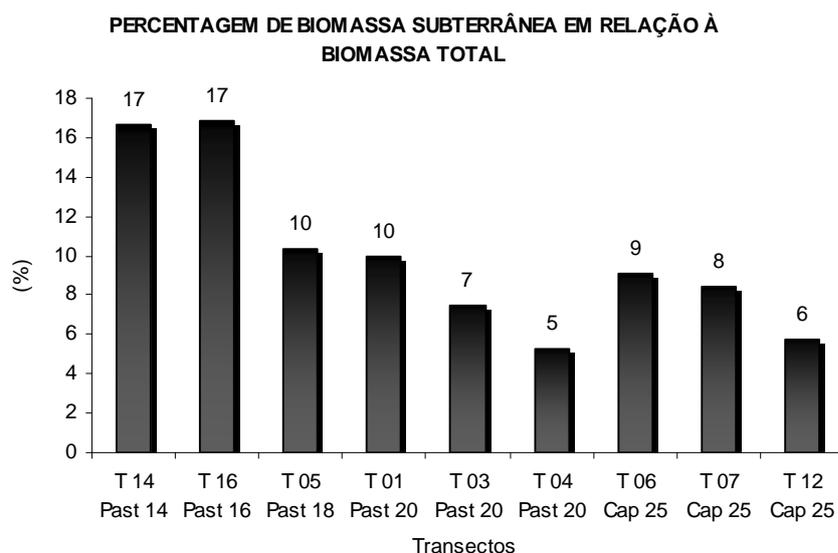


Figura 13. Distribuição da percentagem de biomassa subterrânea em relação à biomassa total

As pastagens abandonadas há menos tempo apresentaram um maior percentual de biomassa subterrânea (Figura 13). As pastagens de 14 e 16 anos apresentaram, aproximadamente, 15% de biomassa subterrânea. As pastagens de 20 anos em torno de 7, 6% (médias das três repetições) e as capoeiras de 25 anos, média de 7,8%. A média geral de biomassa subterrânea, neste estudo, desconsiderando-se as idades e o uso do solo da cada transecto, foi de 10% em relação à biomassa total e corrobora com a literatura existente sobre biomassa radicular em capoeiras.

A regressão linear dos valores de biomassa aérea com os valores de biomassa subterrânea foi igual a 0,789 ($F = 11,543$; $p = 0,011$) e a regressão da biomassa total com a biomassa de raiz igual a 0,814 ($F = 13,771$; $p = 0,008$).

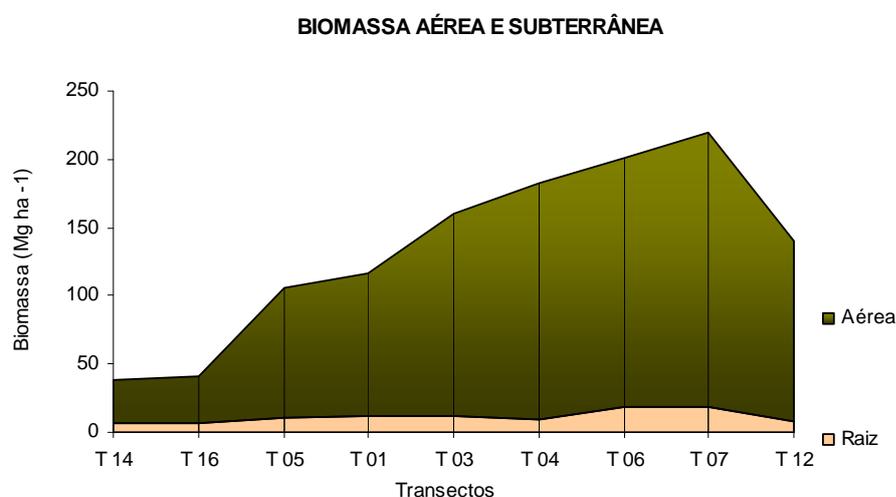


Figura 14. Biomassa aérea e subterrânea ($Mg\ ha^{-1}$) nos nove transectos.

Para efeitos de comparação com outros ecossistemas, conforme Castro & Kauffman (1998); Rodin (2004), o Cerrado brasileiro é frequentemente caracterizado como uma “floresta invertida”, em que a biomassa subterrânea é maior do que a aérea. Este padrão também é observado em outras savanas mundiais Jackson *et al.* (1996). A relação raiz/parte aérea para o Cerrado é de 2,7. Na Amazônia esta relação varia entre 0,17 (Klinge & Herrera, 1978) e 0,25 (Malhi *et al.* 1999) para florestas maduras de terra-firme. No presente estudo sobre a biomassa subterrânea em florestas secundárias a média, para os nove transectos, desta relação raiz/parte aérea, foi de 0,11.

Segundo Vieira *et al.* (2003), capoeiras de 6 anos de idade localizadas próximo à Belém, possuem um rápido incremento da área foliar e vegetação não-lenhosa, alcançando valores maiores que 50% em comparação com floresta madura. Contudo, possuem apenas 20% da biomassa em relação às florestas maduras. Portanto, o investimento em biomassa depende fortemente do estágio sucessional e sazonal de um determinado ecossistema.

Dependendo das condições climáticas e edáficas, como época chuvosa ou seca, as plantas investem, preferencialmente, no crescimento da parte aérea ou das raízes (Vargas *et al.* 2008). Este investimento preferencial ocorre também em relação às idades das florestas secundárias. Segundo esses mesmos autores, para recuperar valores de biomassa similares aos de florestas maduras, a biomassa subterrânea necessita de pouco menos de 19 anos, com taxas maiores que $20 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que a biomassa aérea requer cerca de 80 anos, com taxas de acumulação próximas a $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Este comportamento pode explicar um maior percentual de biomassa subterrânea nas pastagens abandonadas mais recentemente. Existe, num primeiro momento, o investimento na biomassa subterrânea para posterior incremento em biomassa aérea. A Figura 14 ilustra bem esta variação que aumenta após a idade de 16 anos.

Neste sentido, seria interessante investigar áreas de capoeira mais jovens para compreender melhor este processo. Tais áreas de capoeiras jovens foram sugeridas e pensadas para este trabalho, mas não havia no PDBFF, um estudo formal sobre idades e uso do solo para áreas mais recentemente abandonadas. Estas informações somente seriam validadas se houvesse estudos prévios, como os de Bentos (2006) e Moreira (2003), para averiguar tais características e possibilitar a inclusão destas áreas de capoeiras jovens neste estudo sobre biomassa subterrânea. Seria oportuno, portanto, que futuros estudos sobre biomassa de raízes levassem em consideração as áreas de florestas secundárias abandonadas há menos tempo.

5.1.5. Biomassa subterrânea por camada

Os valores de biomassa total por camada foram obtidos pelo somatório das CD nas quatro camadas de cada um dos nove transectos. Os valores totais de cada camada (em gramas) foram convertidos para toneladas por hectare, através da área dos 36 monólitos (2,5447 m²). Desconsiderou-se, para esta análise, o uso da terra e a idade dos ecossistemas.

Os valores (Figura 15) correspondem, também, à biomassa média de cada camada. A média da biomassa subterrânea dos nove transectos foi igual a 11,4 Mg ha⁻¹.

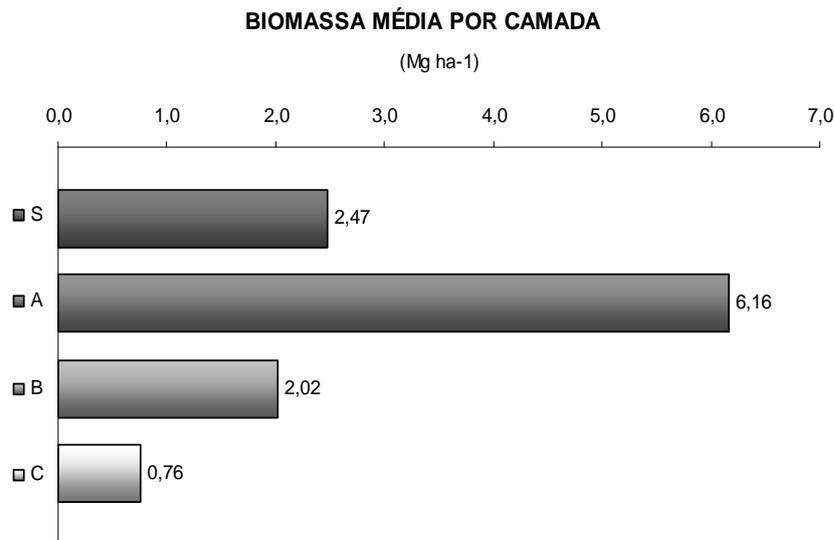


Figura 15. Biomassa subterrânea média (Mg ha⁻¹) por profundidade (camadas S, A, B e C).

As áreas de pastagem abandonadas há menos tempo apresentaram um menor percentual de biomassa acima do solo (Figura 16). Esta variação de biomassa superficial entre os transectos pode estar relacionada com a disponibilidade de serapilheira, que por sua vez, está relacionada com a sucessão ecológica. Um estudo sobre a dinâmica de nutrientes, ainda em andamento, que está sendo realizado nestas mesmas áreas pode, futuramente, explicar a possível correlação entre a disponibilidade de serapilheira e a biomassa superficial de raízes. Devemos considerar também, a variação sazonal da serapilheira (Luizão, 1989) e a variação sazonal da biomassa de raízes (Vargas *et al.* 2008; Trumbore *et al.* 2006).

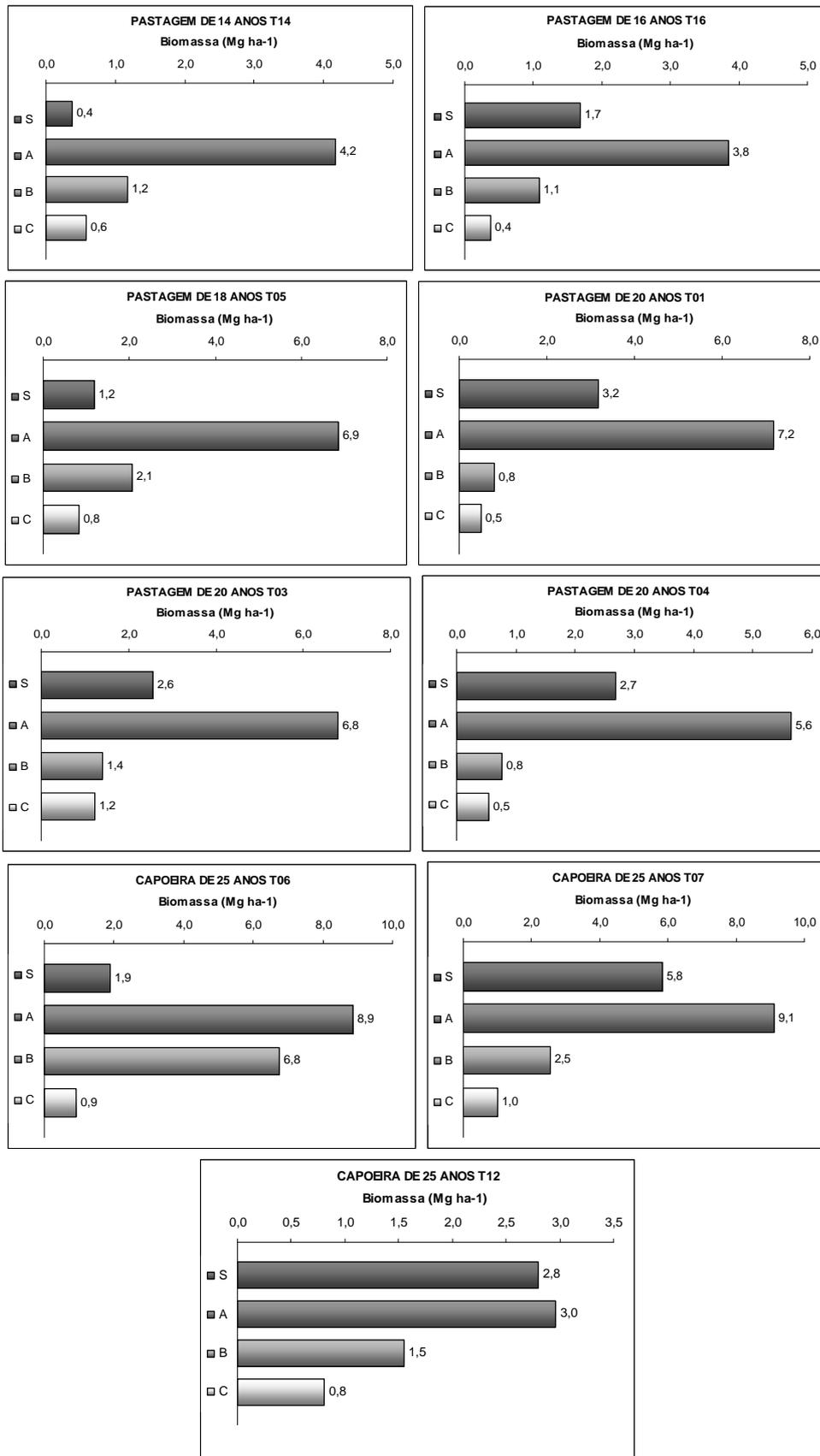


Figura 16. Biomassa de raízes por camada em cada transecto.

De acordo com Telles *et al.* (2003), em solos florestais da Amazônia oriental, as raízes finas correspondem a mais de 50% do total de carbono encontrado nos primeiros 10 cm de profundidade. Apesar de a biomassa subterrânea encontrar-se, em grande parte, perto da superfície do solo, Nepstad *et al.* (1994) encontraram raízes ativas se estendendo a profundidades maiores que 15 m em florestas de transição (florestas sazonalmente secas).

A biomassa média de raízes nas camadas (S) e (A), ou até os primeiros 10 cm de profundidade, corresponde a 75,6% da biomassa total, sendo que a camada (A) respondeu por 54% deste total (Tabela 8). A vegetação concentrou seu desenvolvimento radicular nas camadas mais superficiais do perfil do solo, provavelmente porque os solos amazônicos concentram seus nutrientes nas camadas superficiais, induzindo o sistema radicular a desenvolver-se nestas camadas. Este comportamento reflete o mecanismo de retroalimentação de florestas tropicais, Luizão (1989); Poggiani & Schumacher (2000).

Tabela 8. Biomassa total e respectivas percentagens em relação ao perfil do solo.

Camada	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	%
S	2,47	21,6
A	6,16	54,0
B	2,02	17,7
C	0,76	6,6
Total	11,38	100,0

Numa análise conjunta entre todos os transectos, a biomassa variou fortemente entre as camadas (ANOVA: $r^2 = 0,099$; $F = 20,87$; $p < 0,05$). Portanto, a profundidade está influenciando direta e inversamente na quantidade de biomassa subterrânea de todas as capoeiras estudadas. Os dados quantitativos nos dão a magnitude destas variações.

As capoeiras de 25 anos apresentaram maior valor médio de biomassa subterrânea na camada (B). Nas camadas (C) houve pouca variação na biomassa subterrânea para todos os transectos, indicando pouca influência da idade e do uso do solo para esta profundidade.

Least Squares Means

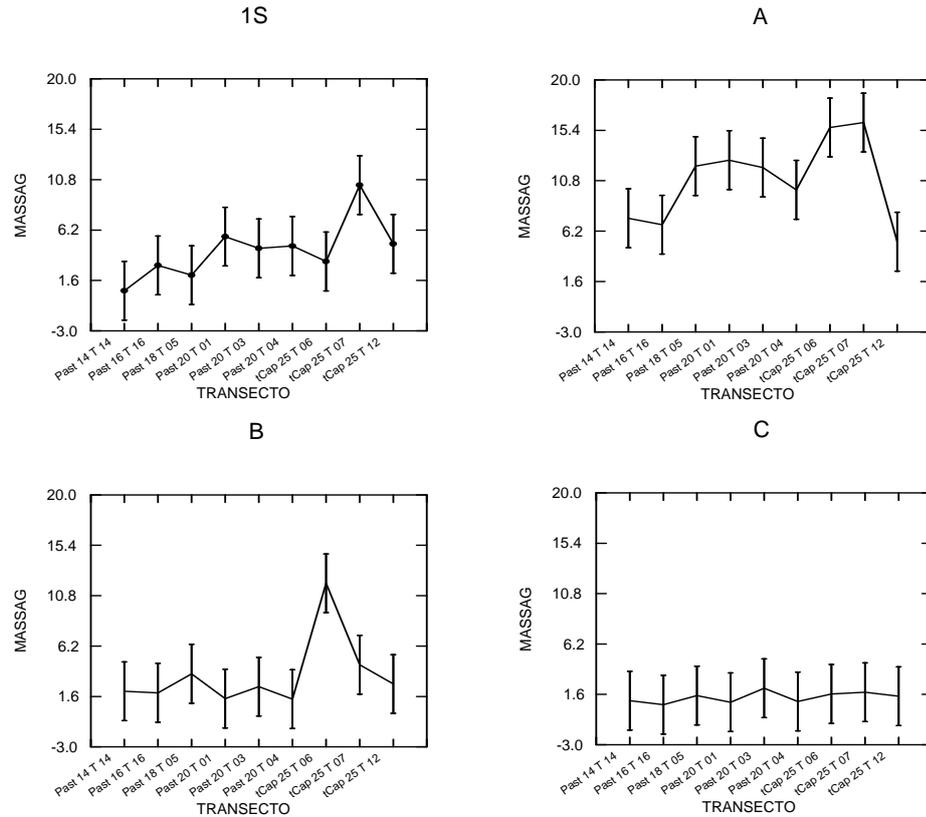


Figura 17. Quadrados mínimos médios da biomassa (g) de cada camada por transecto.

Não houve diferença de biomassa entre as camadas na comparação entre os transectos (ANOVA: $F = 0,819$; $p = 0,713$), sugerindo o mesmo comportamento das raízes em relação ao perfil do solo para todas as áreas (Figura 17).

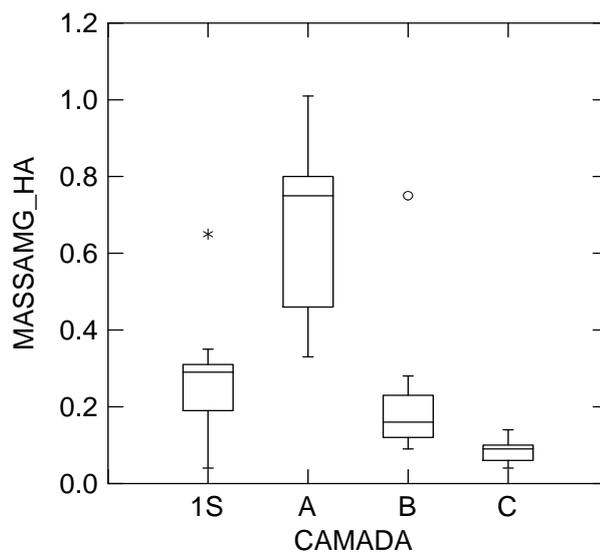


Figura 18. Variação da biomassa subterrânea (Mg ha^{-1}) por camada.

A biomassa de raízes foi significativamente diferente entre as camadas S; A; B; e C para todos os transectos (ANOVA: $r^2 = 0,794$; $F = 18,211$; $p < 0,05$). Através da mediana (Figura 18) percebe-se que na camada (B) ocorreram os maiores valores de biomassa individual (maiores CD). Nas demais camadas, a maior parte das amostras é de menores CD.

Least Squares Means

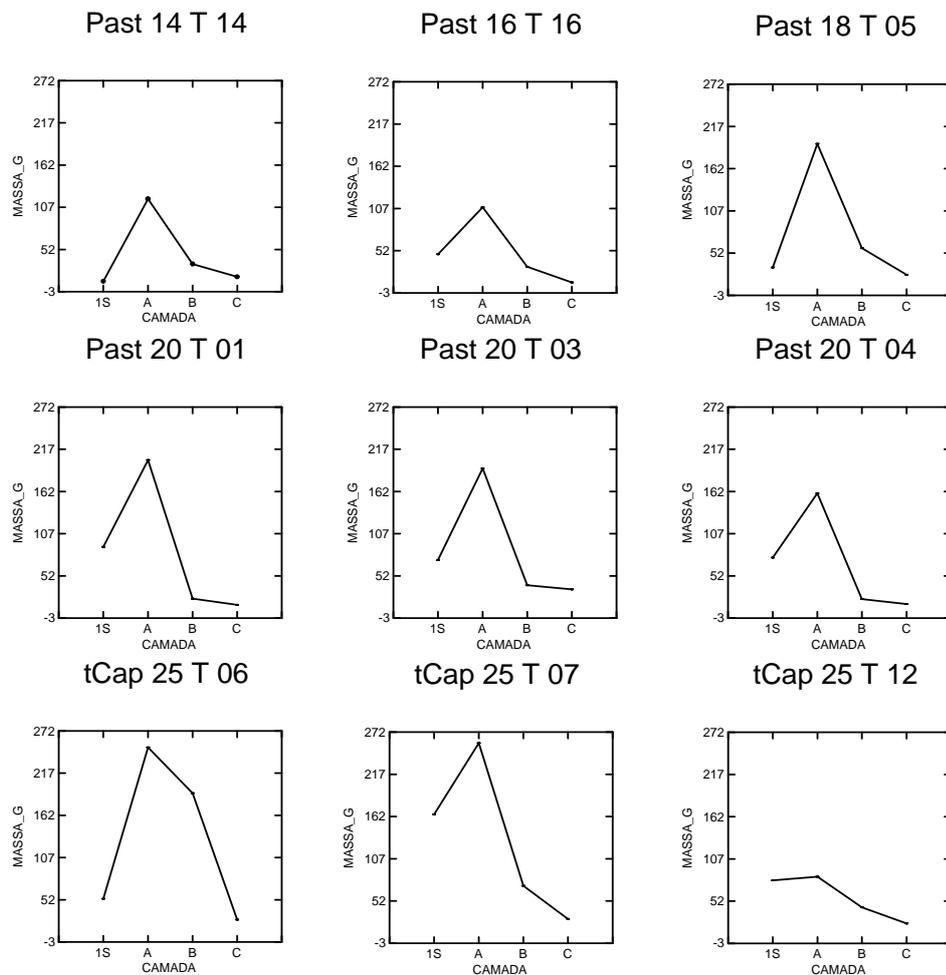


Figura 19. Distribuição da biomassa subterrânea (g) nas respectivas camadas nos nove transectos.

O transecto T 07 (capoeira de 25 anos) apresentou os maiores valores de biomassa nas camadas: (S) e (A). O transecto 06, também capoeira de 25 anos, apresentou a maior biomassa na camada B. Já na camada (C), houve pouca variação da biomassa. Contudo, o transecto 03 (pastagem de 20 anos) apresentou os maiores valores desta camada. O T 06 é especialmente interessante quando comparado ao T 07. Constituem-se áreas próximas, com o mesmo tipo de solo, mesmo uso da terra, mesma idade, biomassa aérea e subterrânea semelhantes. No entanto, percebe-se uma inversão dos valores de biomassa entre as camadas (S) e (B). Teria sido esta uma singela “estratégia” das espécies arbóreas, destes tão semelhantes ecossistemas,

de alocação da biomassa de raízes em função da disponibilidade de nutrientes? Serapilheira ou solução do solo?

A profundidade influenciou na densidade básica das raízes (Figura 20), principalmente em relação à camada (S): (ANOVA: $r^2 = 0,211$; $F = 5,812$; $p = 0,001$). A biomassa da camada superficial apresentou menor densidade, provavelmente por não haver a resistência física do solo, receber menos tensão e pressão físicas e constituir-se majoritariamente de raízes muito finas, as quais têm menor densidade devido à constante citocinese envolvida no processo de crescimento destas.

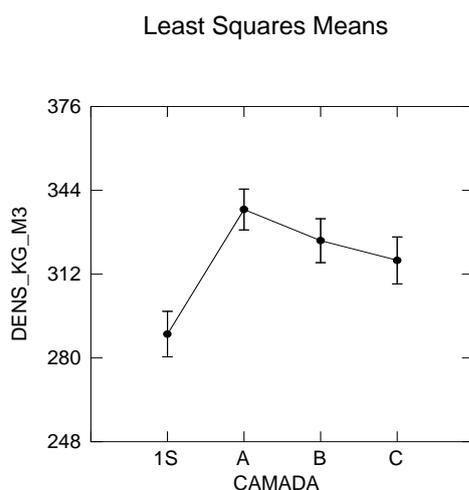


Figura 20. Quadrados mínimos médios da densidade básica (kg m^{-3}) das raízes em relação ao perfil do solo.

As raízes da camada (A) têm maior densidade provavelmente por estarem suportando, em grande parte, o peso do indivíduo. Estando sujeitas, portanto, às forças de pressão e tração, que as impelem ao desenvolvimento de uma estrutura lenhosa mais resistente. A densidade decresce a partir do nível do solo.

As raízes MF apresentaram densidades básicas significativamente menores (ANOVA: $r^2 = 0,543$; $F = 52,345$; $p < 0,05$) por se constituírem de material juvenil, em expansão e com pouca pressão agindo sobre as mesmas no caso da camada (S). Outro fator que afeta esta densidade é a alocação desta CD em relação ao perfil do solo, as raízes MF são bem mais abundantes na camada (S). Os dados de densidade estão em kg m^{-3} para melhor visualização no gráfico.

Ao analisar ecossistemas naturais, deve-se considerar sempre a interatividade e dinamismo dos fenômenos e processos envolvidos. Assim, o decréscimo da densidade básica das raízes, em função da profundidade do solo, pode estar ligado à escassez de nutrientes nestas camadas mais profundas (Mooney & Sombroek, 1992) (Luizão *et al.* 2007), de forma

que as raízes nestas camadas tenham como função maior, a captação de água com menos soluto e conseqüente maior potencial hídrico. Esta função torna-se essencial em épocas mais secas (Espeleta & Clark, 2007); (Jackson *et al.* 1997); (Nepstad *et al.* 2002). Por terem maior potencial hídrico e suportarem pouco peso, tais raízes são mais tenras e, conseqüentemente, menos densas.

5.1.6. Percentagem de biomassa de raízes acima do nível do solo

Para calcular a biomassa por hectare utilizou-se a regra de três simples, somando as áreas dos 36 monólitos e transformando-as em hectare, bem como a transformação de gramas para toneladas. Este valor médio tem como finalidade determinar a biomassa de raízes que se encontra acima do solo. Através desta análise, em florestas secundárias de 14 a 25 anos na Amazônia Central, cerca de 20% da biomassa de raízes está acima do solo (Tabela 9). Esta biomassa seria queimada no ato de um determinado incêndio, liberando imediatamente os gases da combustão, dentre eles o dióxido de carbono. Já o restante da biomassa o liberaria gradualmente, no processo de putrefação das raízes. Tais valores deveriam ser computados para cálculos de emissão de CO₂ ou para redução da emissão (Redução de Emissões para o Desmatamento e Degradação – REDD). No caso do Brasil, com mais de 70% das emissões de CO₂ provenientes do desflorestamento, estes números se tornam muito relevantes. No entanto, o IPCC não considera a biomassa de raízes menores que 2 mm de diâmetro.

Tabela 9. Transecto, uso do solo, idade, percentagem de biomassa de raízes superficiais (em relação à própria biomassa subterrânea total) e biomassa correspondente em Mg ha⁻¹ para cada transecto.

Transecto	Uso do solo	Idade	% camada S	Mg ha ⁻¹
T 14	Pastagem	14	5,9	0,37
T 16	Pastagem	16	24,1	1,69
T 05	Pastagem	18	10,8	1,18
T 01	Pastagem	20	27,2	3,17
T 03	Pastagem	20	21,4	2,57
T 04	Pastagem	20	27,9	2,69
T 06	Capoeira	25	10,2	1,88
T 07	Capoeira	25	31,5	5,83
T 12	Capoeira	25	34,5	2,80

O valor de biomassa na camada superficial depende da disponibilidade de necromassa, tanto em quantidade como em qualidade, das características físicas e químicas do solo e do

estádio sucessional da vegetação. Estas características ambientais governam a produção e alocação da biomassa subterrânea.

A biomassa na camada (S) pode ser analisada em relação à própria biomassa subterrânea total e em relação à camada (S) dos outros transectos. Os valores da Tabela 9 correspondem à percentagem da camada (S) em relação às outras camadas (A), (B) e (C). Neste contexto, as capoeiras de 25 anos e as pastagens de 20 anos apresentaram, em média, maiores valores de biomassa na camada (S) em relação ao total de biomassa subterrânea, indicando maior disponibilidade de necromassa, devido à maior produção de serapilheira.

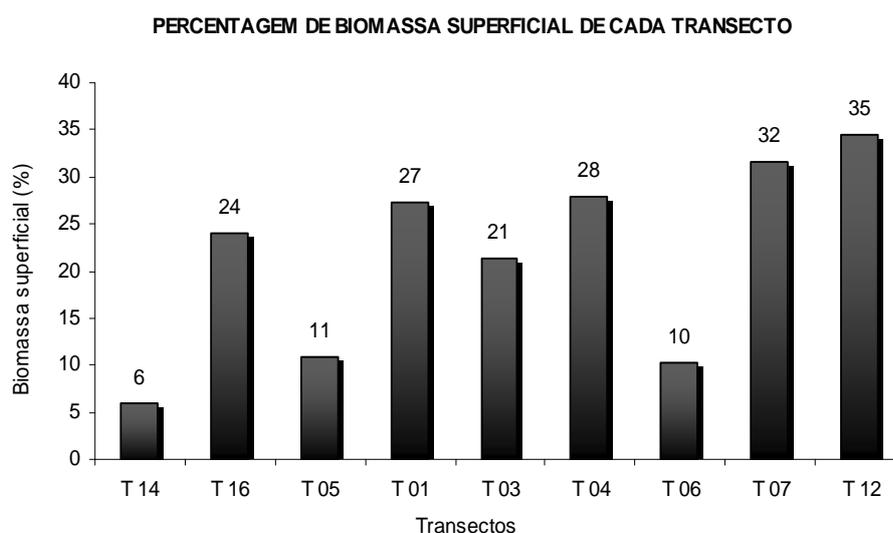


Figura 21. Distribuição das percentagens de biomassa na camada (S) em relação à própria biomassa subterrânea total em cada transecto.

O T 14, pastagem mais jovem das áreas estudadas, obteve pequenos valores de biomassa na camada (S), tanto em relação à sua própria biomassa subterrânea total quanto na comparação com os valores das outras camadas superficiais (Figura 21). Este resultado era esperado devido a pouca biomassa aérea deste transecto, refletindo em pouca necromassa acumulada na superfície, oriunda da senescência natural da vegetação. O comportamento da dispersão das percentagens de biomassa na camada (S), em relação à biomassa subterrânea total de cada transecto e em relação às camadas (S) de cada transecto é bem semelhante. Exceto no caso do T 12, que apresentou menor biomassa na camada (S) quando comparado às outras capoeiras de 25 anos (T 06 e T 07). Porém, em relação à própria biomassa subterrânea total, obteve o maior valor de biomassa superficial (35%). Em relação à biomassa superficial total, o T 07 (capoeira de 25 anos) obteve o mais alto valor: 5,83 Mg ha⁻¹.

5.1.7. Biomassa subterrânea por classe de diâmetro

A separação das raízes em classes de diâmetro (Figura 22) permitiu observar, neste aspecto, o comportamento da biomassa nos respectivos sítios estudados. Observa-se que as raízes grossas não ocorreram no T 14, T 03 e T 12. Para o T 14 era esperado a inexistência de raízes grossas devido à sua pouca idade desde o abandono. O T 03 não apresentou raiz grossa, mas em compensação, apresentou um alto valor de biomassa para as raízes médias. Novamente, parece haver uma “estratégia”, por parte da vegetação, de alocação da biomassa em função das suas necessidades nutricionais, concomitantemente aos fatores pedológicos.

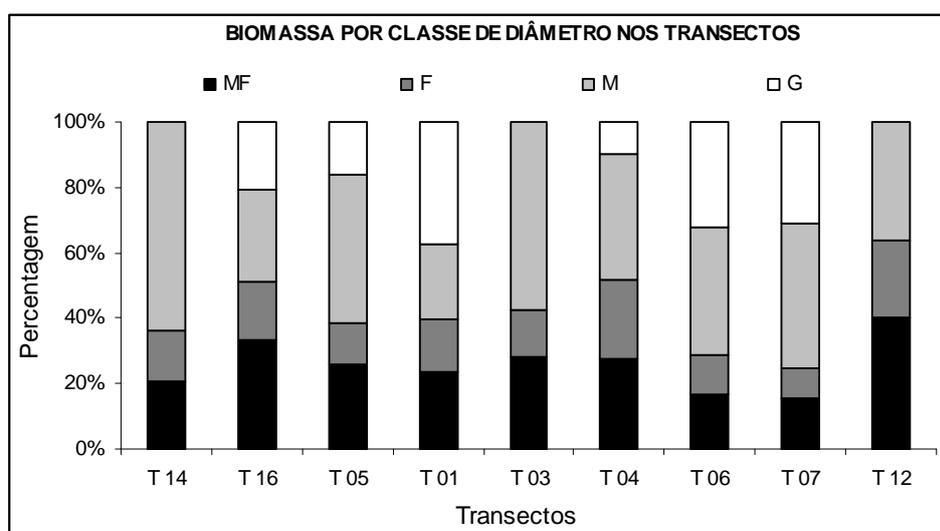


Figura 22. Valores, percentuais (%), da biomassa de raízes por classe de diâmetro em cada transecto, em relação à biomassa subterrânea total de cada transecto.

Os transectos T 16, T 01 e T 04 apresentaram uma boa distribuição da biomassa em função da classe de diâmetro (Figura 22). Os transectos T 06, T 07 e T 12 (capoeiras de 25 anos) apresentaram maiores valores de biomassa nas classes de diâmetro média e grossa, comportamento esperado em função da idade e do uso da terra, exceto no T 12, onde diferenças físicas dos solos explicam a menor biomassa. Este aspecto está relacionado ao tipo de solo e será abordado após a apresentação das qualidades químicas e físicas dos solos de cada transecto.

Tabela 10. Estatísticas da biomassa (Mg ha^{-1}) de raízes MF ($\emptyset < 2 \text{ mm}$); F ($2 \text{ mm} \leq \emptyset < 5 \text{ mm}$); M ($5 \text{ mm} \leq \emptyset < 20 \text{ mm}$); e G ($\emptyset \geq 20 \text{ mm}$).

Estimadores	MF	F	M	G
n	144	136	87	13
Mínimo	0,001	0,001	0,001	0,012
Máximo	0,050	0,044	0,285	0,417
Σ	2,449	1,542	4,251	2,018
Média	0,017	0,011	0,049	0,155
95% IC superior	0,019	0,013	0,061	0,234
95% IC inferior	0,015	0,010	0,037	0,076
Desvio Padrão	0,013	0,009	0,058	0,130
Variância	0,000	0,000	0,003	0,017
CV	0,738	0,804	1,182	0,840

As raízes muito finas somaram $2,45 \pm 0,29 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esta foi a única CD que ocorreu em todas as camadas de todos os transectos. A densidade básica média das raízes MF foi igual a $0,26 \pm 0,011 \text{ g cm}^{-3}$.

As raízes finas somaram $1,54 \pm 0,29 \text{ Mg ha}^{-1}$ e a densidade básica média desta classe foi igual a $0,35 \pm 0,013 \text{ g cm}^{-3}$.

Raízes médias somaram $4,25 \pm 1,73 \text{ Mg ha}^{-1}$, obtendo os maiores valores de biomassa no geral. A densidade básica média foi igual a $0,36 \pm 0,014 \text{ g cm}^{-3}$.

Raízes grossas somaram $2,02 \pm 11,37 \text{ Mg ha}^{-1}$, com valores de densidade básica média iguais a $0,35 \pm 0,035 \text{ g cm}^{-3}$.

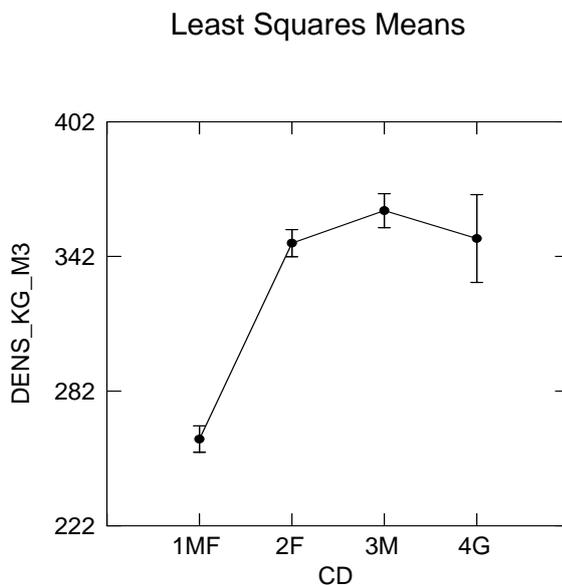


Figura 23. Quadrados mínimos médios da densidade básica das raízes (kg m^{-3}) por classe de diâmetro.

Estes valores de biomassa e densidade de raízes permitem, através dos teores de carbono na vegetação e no solo, estimar o estoque deste elemento abaixo do nível do solo em florestas secundárias na Amazônia Central.

Esperava-se que raízes M e G apresentassem menores densidades, pois tais classes de diâmetro possuem os vasos do xilema já bem estruturados, com mais espaço vazio para o fluxo de água e nutrientes, tornando-as, teoricamente, menos densas que as demais classes de diâmetro, o que de fato não ocorreu. O T 05, onde ocorreram nove queimas desde 1985, apresentou as maiores densidades para as classes MF e M.

5.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO

5.2.1. Granulometria

Os solos dominantes da Amazônia Central são latossolos arenosos a argilosos, derivados de depósitos aluviais do terciário fortemente lixiviados, tipicamente ácidos, com elevada concentração de alumínio e pobre em fósforo, cobre e potássio (Chauvel et al. 1987).

Os mapas do RADAMBRASIL classificam os solos das reservas do PDBFF como Latossolos Amarelos Álicos, similares aos Oxissolos na taxonomia de solos dos EUA e “Ferralsols Haplic ou Xanthic” no sistema FAO/UNESCO. A classificação como um Latossolo relaciona-se ao tipo de minerais de argila presente no solo. As quantias relativas, presentes na fração argila, de minerais como silicato (caolinita), ferro (goetita) e alumínio (gibbsite) determinam a estabilidade estrutural, a fertilidade natural e o efeito da aplicação de fertilizantes (Sombroek *et al.* 1966).

A análise granulométrica foi realizada, pelo método da dispersão total (EMPRAPA 1997), nas 27 amostras de solo (três profundidades para cada um dos nove transectos). Para a comparação entre os transectos, utilizou-se a média dos valores percentuais de areia, argila e silte das três profundidades (Figura 24). O teor de argila aumentou, com relação à profundidade, em todos os transectos.

De acordo com a classificação de textura de solo (triângulo de Feret) temos: T 14 – Clay; T 16 – Clay; T 05 – Clay; T 01 – Clay Loam; T 03 – Clay; T 04 – Clay; T 06 – Sandy Clay Loam; T 07; Sandy Loam; T 12 – Clay.

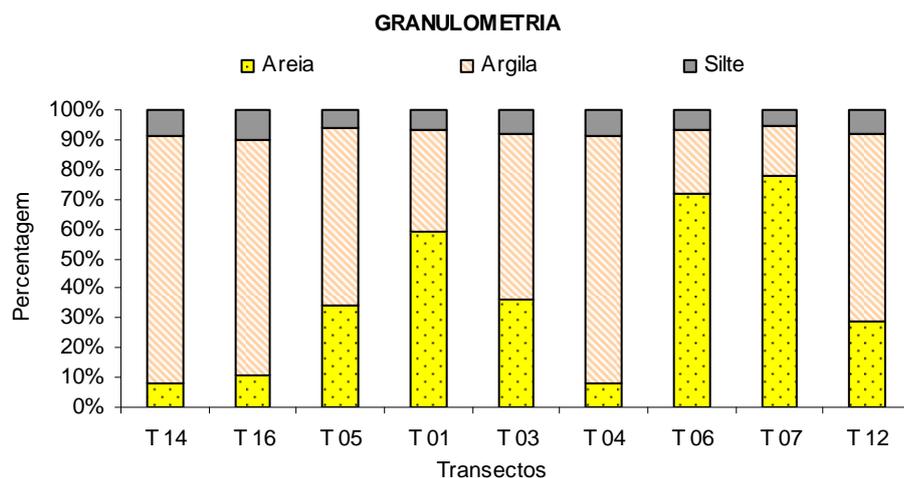


Figura 24. Percentagens de areia, argila e silte dos solos de cada transecto.

Podemos classificar os solos argilosos deste estudo, como Latossolos Amarelos Álicos e os arenosos como Espodosolos (Podzol). A classificação precisa necessitaria de observações no horizonte B, o qual, muitas vezes, encontra-se em camadas bem mais profundas do que 30 cm. Observa-se, contudo, para os solos arenosos, um aumento do teor de argila em profundidade mesmo entre as camadas de 10 cm, configurando a percolação da argila e a formação do horizonte B espódico ou textural, característico dos Espodosolos.

A razão volume de raiz / volume de solo teve correlação positiva com a idade e negativa com o teor de argila (Pearson: 0,765 e -0,938) respectivamente, conforme esperado.

Marques *et al.* (2007), identificaram, pedologicamente, três tipos de solos em uma topossequência de floresta madura na Amazônia Central, em áreas muito próximas ao PDBFF. Sendo eles: Latossolo (Platô), Argissolo (Vertente) e Espodosolo (Baixio). De acordo com os mesmos autores, a textura, a densidade e a macroporosidade apresentaram forte influência do carbono contido no solo. Em solos arenosos, como o Espodosolo, ocorre um decréscimo acentuado de carbono abaixo da profundidade de 25 cm, em decorrência do baixo teor de argila; entretanto, na superfície, há uma grande concentração de carbono orgânico.

5.2.2. Análises químicas do solo

Outro método de classificação de solos diz respeito às suas características químicas, as quais dependem de características físicas, como o teor de argila, por exemplo.

As argilas silicatadas (esmectitas e caolinitas), características de regiões temperadas e as argilas óxido-hidratadas de ferro e de alumínio (gibsitais e goetitais), as mais comuns nos

solos intemperizados de regiões tropicais e semi-tropicais, possuem partículas coloidais (micelas) que são, em geral, menores do que 1 micrômetro (Sombroek, 1984). Estas micelas, com cargas negativas, retêm cátions como o H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} , principalmente as argilas expansivas do tipo 2:1 ou filossilicatos, onde características das lâminas do mineral (duas tetraédricas e uma octaédrica) permitem uma maior substituição isomórfica, onde Si^{4+} é substituído por Al^{3+} nos tetraedros e Al^{3+} substituído por Mg^{2+} ou Fe^{2+} nos octaedros de sílica, resultando em mais carga negativa, e conseqüente maior atração de cátions (Novais & Smyth, 1999). Em geral, os Latossolos e Espodosolos da Amazônia Central possuem baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e baixos valores de pH. Nos Espodosolos estes valores decaem ainda mais, devido à maior proporção de areia. Através dos valores da CTC (Tabela 11) podemos classificar os filossilicatos deste estudo como argilas 1:1.

As cargas eletrostáticas das partículas coloidais tornam o solo capaz de reter íons e de trocá-los. Esses nutrientes armazenados nos colóides, reflexo das interações eletromagnéticas, junto com o fenômeno da fotossíntese, são tão importantes que se atribui a eles a responsabilidade da existência de vida na terra (Sengik, 2003).

Pedologicamente os solos deste estudo são considerados como “Tb”, com argilas de baixa atividade. Nos Espodosolos não se aplica o cálculo da CTC_e. Porém, o mesmo foi realizado a título de informação (Tabela 11).

Tabela 11. pH, matéria orgânica (M.O) e teores de macro e micronutrientes nos solos nas capoeiras do PDBFF.

NUTRIENTES NO SOLO - PDBFF																	
Nº e uso	Anos	cm	H ₂ O	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			Cmolc kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			Cmolc kg ⁻¹
Transecto	Idade	Profundidade	pH	M.O	C	N	C:N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Fe	Mn	Zn	SB	CTC _e
T 14 Pastagem	14	0-10	4,2	97	56,5	3,1	18,2	3,4	0,130	0,130	0,403	2,100	125	10,2	2,2	0,66	2,76
		10-20	4,3	34	19,8	1,74	11,4	1,1	0,052	0,021	0,066	1,454	122	3,0	1,2	0,14	1,59
		20-30	4,2	22	13,0	1,28	10,2	0,5	0,031	0,009	0,030	1,181	130	2,4	1,0	0,07	1,25
T 16 Pastagem	16	0-10	4,0	85	49,0	3,04	16,1	3,9	0,090	0,225	0,111	2,464	88	3,6	2,0	0,43	2,89
		10-20	4,0	34	19,5	1,64	11,9	1,8	0,062	0,021	0,040	1,520	98	2,1	0,9	0,12	1,64
		20-30	4,2	24	13,9	1,08	12,9	0,8	0,028	0,009	0,019	1,307	88	1,7	0,8	0,06	1,36
T 05 Pastagem	18	0-10	4,1	55	31,9	2,41	13,3	3,0	0,072	0,027	0,066	1,670	183	1,9	1,5	0,17	1,83
		10-20	4,6	25	14,4	1,31	11,0	1,8	0,076	0,009	0,070	1,000	166	1,7	1,1	0,16	1,15
		20-30	4,3	18	10,2	0,85	12,0	0,6	0,031	0,008	0,016	1,137	134	1,7	0,7	0,06	1,19
T 01 Pastagem		0-10	4,1	59	34,3	2,07	16,6	4,3	0,055	0,025	0,037	1,563	91	2,6	1,1	0,12	1,68
		10-20	4,3	24	13,7	0,94	14,6	2,2	0,035	0,005	0,021	1,036	150	1,6	0,5	0,06	1,10
		20-30	4,5	18	10,5	0,92	11,4	1,2	0,031	0,004	0,014	0,979	161	1,4	0,7	0,05	1,03
T 03 Pastagem	20	0-10	4,0	84	48,7	3,11	15,7	3,7	0,075	0,032	0,041	2,240	90	3,4	1,1	0,15	2,39
		10-20	4,1	30	17,7	1,44	12,3	1,5	0,043	0,005	0,017	1,289	187	1,7	0,7	0,07	1,35
		20-30	4,3	23	13,2	1,02	12,9	1,0	0,026	0,004	0,014	1,134	129	1,6	0,6	0,05	1,18
T 04 Pastagem		0-10	3,9	92	53,3	3,39	15,7	3,0	0,124	0,195	0,308	2,552	108	6,7	1,8	0,63	3,18
		10-20	4,0	32	18,7	1,73	10,8	1,3	0,046	0,011	0,034	1,669	120	2,5	0,7	0,09	1,76
		20-30	4,1	26	15,0	1,22	12,3	1,0	0,030	0,006	0,024	2,139	109	1,9	0,6	0,06	2,20
T 06 Capoeira		0-10	3,5	103	60,0	3,75	16,0	4,9	0,082	0,040	0,062	1,221	91	1,6	1,3	0,18	1,40
		10-20	3,9	23	13,5	0,82	16,4	1,1	0,025	0,005	0,011	1,186	128	1,1	0,7	0,04	1,23
		20-30	4,0	17	10,1	0,7	14,4	0,8	0,021	0,004	0,007	0,951	134	1,1	0,7	0,03	0,98
T 07 Capoeira	25	0-10	3,8	32	18,5	1,16	16,0	2,1	0,034	0,010	0,008	0,874	90	1,3	1,0	0,05	0,93
		10-20	4,0	24	14,1	0,92	15,3	1,4	0,025	0,005	0,012	1,123	132	1,1	0,9	0,04	1,16
		20-30	4,1	16	9,0	0,64	14,1	0,8	0,017	0,003	0,007	0,906	205	1,3	0,7	0,03	0,93
T 12 Capoeira		0-10	3,7	77	44,5	3,43	13,0	4,7	0,092	0,085	0,074	2,358	132	2,0	1,6	0,25	2,61
		10-20	4,2	32	18,4	1,61	11,4	2,3	0,070	0,013	0,027	1,674	106	1,5	1,1	0,11	1,78
		20-30	4,0	26	15,3	1,16	13,2	1,5	0,043	0,008	0,021	1,432	123	1,8	0,9	0,07	1,51

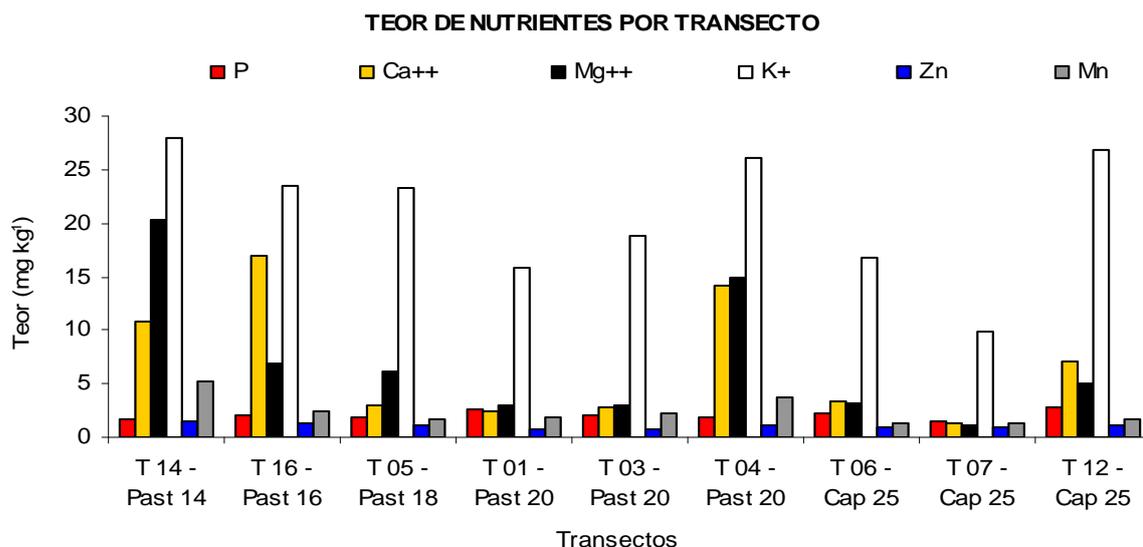


Figura 25. Teores de nutrientes nos solos (mg kg^{-1}) em cada transecto.

Para analisar as relações entre os transectos utilizou-se a média dos teores de nutrientes encontrados em cada camada: (A), (B) e (C), com as respectivas profundidades (0-10; 10-20; e 20-30 cm). Um detalhe interessante pode ser observado na correlação negativa entre argila e fósforo. Os Latossolos brasileiros, em especial os Latossolos Amarelos, têm “fome” de fósforo (Novais & Smyth, 1999), pois este nutriente é facilmente adsorvido nas micelas de argila, tornando-se não-lábil para as plantas. Estes solos comportam-se, portanto, como um dreno, e as causas deste fenômeno se devem aos oxidróxidos, aluminossilicatos, matéria orgânica e reações de precipitação (Novais, 1977). Talvez este fenômeno seja mais um motivo para o estabelecimento e evolução do processo de retroalimentação em florestas tropicais.

A Capacidade de Troca Catiônica efetiva (CTC_e) também apresentou correlação positiva com a argila (Pearson: 0,521), corroborando com a teoria de que as micelas de argilas comportam-se como grandes ânions (Tabela 12), onde os cátions estão frouxamente retidos (Novais & Smyth, 1999; Sengik, 2003).

Tabela 12. Matriz de correlação de Pearson para nutrientes e teor de argila.

	Argila	P	Ca	Mg	K	Zn	Mn	C	N
Argila	1,000								
P	-0,145	1,000							
Ca	0,316	0,567	1,000						
Mg	0,346	0,417	0,749	1,000					
K	0,327	0,747	0,778	0,835	1,000				
Zn	0,261	0,696	0,847	0,803	0,897	1,000			
Mn	0,417	0,365	0,694	0,960	0,766	0,742	1,000		
C	0,091	0,886	0,752	0,687	0,870	0,834	0,655	1,000	
N	0,202	0,878	0,717	0,623	0,882	0,820	0,581	0,972	1,000

Não houve diferença significativa na comparação entre os transectos, ao nível de 5% de probabilidade, para nenhum dos teores de nutrientes do solo.

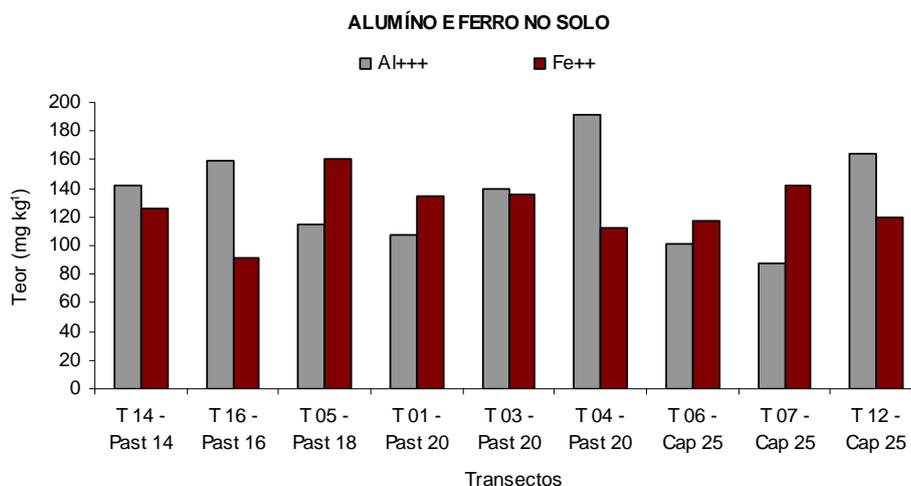


Figura 26. Distribuição dos teores Alumínio e Ferro (mg kg^{-1}) nos solos em cada transecto.

Os teores de Ferro e Alumínio apresentaram correlação negativa (Pearson: -0,397). Este aspecto mostra como as características físicas do solo interferem nos teores destes minerais, sendo que em solos mais argilosos e franco-argilosos há o predomínio do Alumínio, como podemos observar através da Figura 26 e da correlação positiva (Pearson: 0,537) do teor de alumínio com a percentagem de argila. Observa-se, também a correlação positiva entre o teor de argila e o teor de alguns nutrientes em cada transecto (Tabela 12).

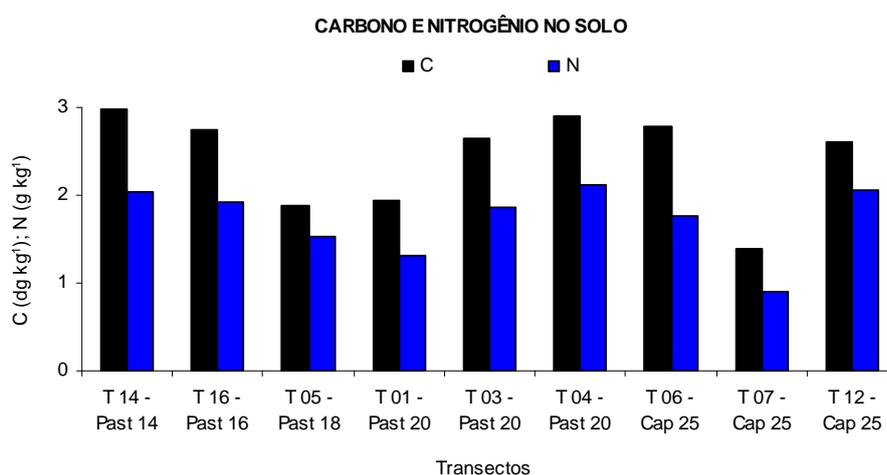


Figura 27. Distribuição dos teores de carbono (dg kg^{-1}) e nitrogênio (g kg^{-1}) nos solos em cada transecto.

Para analisar as relações entre os transectos utilizou-se a média dos teores de carbono e nitrogênio encontrados em cada profundidade (0-10; 10-20; e 20-30 cm). A correlação entre as

médias dos teores de C e N de cada transecto foi: (Pearson: 0,942), indicando um padrão comportamental e a estreita relação entre estes elementos no solo.

Para os solos arenosos houve correlação negativa com todos os nutrientes, reforçando o fato da argila reter nutrientes mais eficientemente que os solos arenosos. Este comportamento também explica a maior biomassa subterrânea em solos arenosos, quando comparados sob a mesma idade e uso do solo. Na escassez de nutrientes, a planta necessita de maior área de contato com o solo para absorvê-los de maneira satisfatória.

Analisando-se somente os teores da camada (A), a relação C:N apresentou alta correlação com a biomassa superficial de raízes (Pearson: 0,803).

Os baixos valores de C e N no solo do T 07 explicam, em parte, a maior biomassa superficial de raízes neste transecto em comparação com o T 06, corroborando a teoria de retroalimentação de florestas tropicais, onde: na escassez de nutrientes na solução do solo, ocorre o investimento na biomassa superficial para aproveitamento nutricional da serapilheira.

Os valores da relação C:N estão adequados aos solos de florestas secundárias na Amazônia Central (Sombroek, 1984; Luizão, 1989; Luizão *et al.* 2007). A menor relação C:N ocorreu na camada (C) da pastagem de 14 anos (T 14), e a maior, na camada (A) do mesmo transecto. Esta alta relação C:N nas camadas mais superficiais está associada à alta disponibilidade de carbono oriundo da serapilheira.

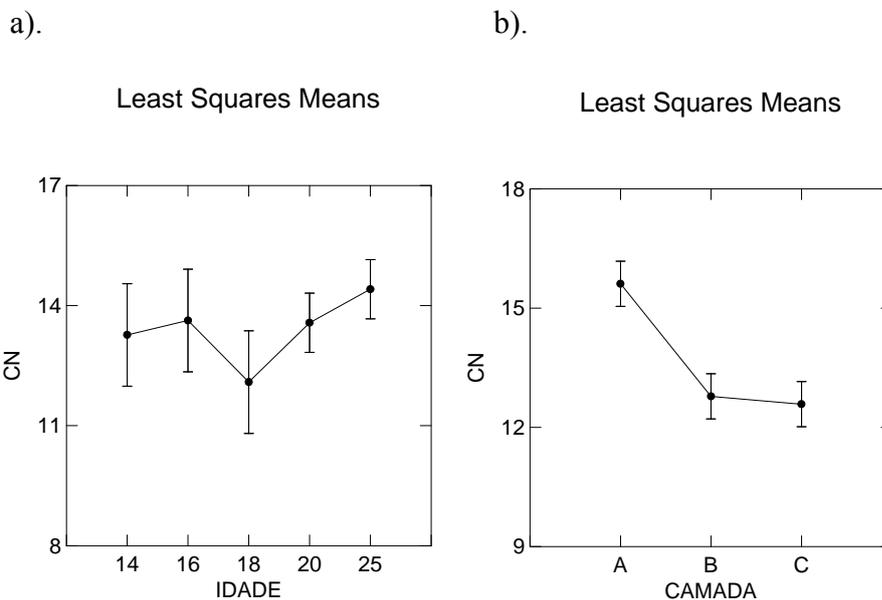


Figura 28. Quadrados mínimos médios da relação C:N nos solos em comparação com as idades (a) e na comparação com a profundidade (b).

Não houve diferença significativa da relação C:N com a idade das capoeiras. (ANOVA: $r^2 = 0,327$; $F = 0,659$; $p = 0,627$). A Pastagem abandonada de 18 anos, onde houve nove

queimas, apresentou a menor média da relação CN (Figura 28 – a). Este resultado pode estar relacionado com a transferência de carbono e nitrogênio da biomassa para a atmosfera, através da volatilização. A menor relação CN nesta pastagem abandonada deve-se ao menor teor de carbono (Figura 28).

Em relação à profundidade, a camada (A) foi significativamente diferente ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA: $r^2 = 0,653$; $F = 8,90$; $p = 0,001$). A maior relação C:N, na camada (A) pode ser explicada pela queda de serapilheira, e o mesmo raciocínio pode ser aplicado em comparação à idade, ou seja, florestas secundárias mais velhas possuem maior biomassa, contribuindo para o aumento da queda de liteira e conseqüente aumento do teor de carbono, principalmente nas camadas mais superficiais dos solos.

A matéria orgânica (M.O.) apresentou grande diferença para todos os transectos, principalmente nas camadas (A) em relação à profundidade (ANOVA: $r^2 = 0,882$; $F = 41,966$; $p < 0,05$). O número de queimas, considerando-se somente as pastagens, teve correlação negativa com os teores de P; C; N; relação C:N; M.O; e biomassa superficial (Pearson: -0,436; -0,509; -0,233; -0,732; -0,508; e -0,841, respectivamente), indicando o antagonismo entre uso do fogo e bom manejo do solo nesta região. A alta correlação negativa entre biomassa superficial e número de queimas pode ser explicada pela devastação que estas causam à biota do solo (macro, meso e microfauna), principalmente nas camadas mais superficiais do solo, dificultando ainda mais, a resiliência do ambiente perturbado.

5.2.3. *Estoque de carbono no solo.*

O carbono do solo se encontra em diferentes compartimentos com diferentes taxas de transformação. De acordo com Machado (2005), o Protocolo de Quioto está essencialmente interessado nos fluxos de carbono, ou seja, mais nas mudanças nos níveis de carbono que nos teores ou estoques de carbono num determinado compartimento do solo. Entretanto, a avaliação dos diferentes compartimentos de carbono no solo, bem como suas dinâmicas, é imprescindível para a identificação de usos e manejos do solo que promovam o seqüestro de carbono.

Temos, no presente estudo, o teor de carbono orgânico no solo e a profundidade. A determinação da densidade do solo (densidade aparente) é dispendiosa, laboriosa e atualmente dispõe-se de equações de pedotransferência, com as quais podemos estimar tais densidades, através de parâmetros físicos e químicos do solo, com mais de 70 % de confiabilidade.

Benites *et al.* (2007), trabalharam com 1002 amostras de solo e desenvolveram modelos de regressão ou funções de pedotransferência para a maioria dos solos brasileiros. Latossolos contribuíram com 134 perfis de solo. Foram desenvolvidos vários modelos de regressão, cada qual com suas especificidades. Os modelos se baseiam em propriedades dos solos de simples medição, tais como: teor de argila, SB, M.O., relação C:N, dentre outras. A densidade básica (D_b) dos solos brasileiros foram de $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ e variaram de $0,13$ até $2,25 \text{ g cm}^{-3}$. Para estimar a densidade do solo (D_b), até 30 cm de profundidade, a melhor equação tem um coeficiente de determinação ($r^2 = 0,74$) e um erro padrão da estimativa ($s.yx = 0,10$).

Tabela 13. Estoque de carbono no solo (Mg C ha^{-1}) por transecto e por camada.

Nº e Uso	Anos	cm	g kg^{-1}	g cm^{-3}	Mg C ha^{-1}
Transecto	Idade	Profundidade	C	D_b	EC*
T 14 Pastagem	14	0-10	56,5	0,435	27,6
		10-20	19,8	1,272	18,4
		20-30	13,0	1,277	17,9
T 16 Pastagem	16	0-10	49,0	0,615	32,5
		10-20	19,4	1,165	24,2
		20-30	13,9	1,257	19,4
T 05 Pastagem	18	0-10	31,9	0,877	33,4
		10-20	14,4	1,236	21,2
		20-30	10,2	1,314	16,4
T 01 Pastagem		0-10	34,3	0,821	34,4
		10-20	13,7	1,252	20,9
		20-30	10,4	1,324	16,5
T 03 Pastagem	20	0-10	48,7	0,587	32,2
		10-20	17,7	1,179	24,2
		20-30	13,2	1,262	19,7
T 04 Pastagem		0-10	53,3	0,444	27,9
		10-20	18,7	1,138	25,3
		20-30	14,9	1,205	22,0
T 06 Capoeira		0-10	59,9	0,281	20,7
		10-20	13,5	1,249	21,5
		20-30	10,1	1,322	17,1
T 07 Capoeira	25	0-10	18,5	0,812	34,8
		10-20	14,1	1,242	22,0
		20-30	9,0	1,353	15,1
T 12 Capoeira		0-10	44,5	0,565	31,7
		10-20	18,3	1,132	26,1
		20-30	15,3	1,216	22,0

* Valores de EC estimados a partir do teor de carbono no solo e da D_b estimada.

C = Teor de carbono; D_b = Densidade básica; EC = Estoque de carbono.

Os menores valores de D_b na profundidade de 0 a 10 cm (Tabela 13) se devem à ação da macrofauna do solo, revolvendo e escavando galerias, promovendo mudanças físicas e

químicas neste espaço. Outro fator importante é a dinâmica da biomassa subterrânea, que se encontra majoritariamente na camada de 0-10 cm, como visto no presente estudo, promovendo a aeração destes solos através de seu crescimento e morte.

Os solos das pastagens de 14, 16 e 18 anos, possuem um estoque total de carbono orgânico, até 30 cm de profundidade (Figura 29), igual a 66,5; 70,3 e 59,2 Mg C ha⁻¹, respectivamente. As pastagens de 20 anos (média das 3 repetições) possuem 62,7 e as capoeiras de 25 anos 52,1 Mg C ha⁻¹. Estas florestas secundárias possuem um estoque médio de carbono orgânico no solo de 60,03 ± 6,75 Mg C ha⁻¹. Não houve diferença significativa de estoque de carbono entre os transectos (ANOVA: $r^2 = 0,342$; $F = 0,299$; $p = 0,957$). Contudo, notam-se, claramente, diferenças entre as médias. A rejeição da hipótese alternativa, neste caso, deve-se ao baixo valor amostral ($n = 3$) para cada transecto.

Em geral, 39-70% do carbono orgânico total na camada de 0-100 cm de solo mineral está presente nos primeiros 30 cm e 58-81% nos primeiros 50 cm. Perdas ou aportes de carbono do solo são maiores no horizonte superficial, 0-15 cm (Machado, 2005).

Jobbagy & Jackson (2000), encontraram percentagens de carbono orgânico do solo, nos primeiros 20 cm de profundidade (relativo ao primeiro metro de profundidade), de 33%, 42% e 50% para ecossistemas arbustivos, savanas e florestas, respectivamente.

Marques *et al.* (2007) encontraram estoques de carbono em profundidade variando entre 0,24 kg.C m⁻² ± 0,02 e 0,61 kg.C m⁻² ± 0,05 no Latossolo; 0,26 kg.C m⁻² ± 0,03 e 0,49 kg.C m⁻² ± 0,10 no Argissolo e 0,24 kg.C m⁻² ± 0,02 a 1,62 kg.C m⁻² ± 0,25 no Espodossolo. Esses valores, associados ao somatório do estoque nas camadas de 0-30 cm (0,92 kg.C m⁻² Latossolo; 0,95 kg.C m⁻² Argissolo; e 1,62 kg.C m⁻² Espodossolo) demonstraram um estoque de carbono em profundidade significativo nesses solos.

Novaes Filho *et al.* (2007), encontraram a média de 59,74 ± 10,30 Mg C ha⁻¹, até a profundidade de 60 cm, para quatro microbacias na região de Juruena-MT.

De acordo com Batjes e Dijkshoorn (1999), as principais classes de solos da Amazônia são os Argissolos e Latossolos, que representam 24,8 e 24,6% da área total, com média do estoque de carbono do solo (profundidade de 0-30 cm) de 44,0 e 50,5 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Os valores de estoque de carbono encontrados no presente trabalho corroboram com a literatura científica existente.

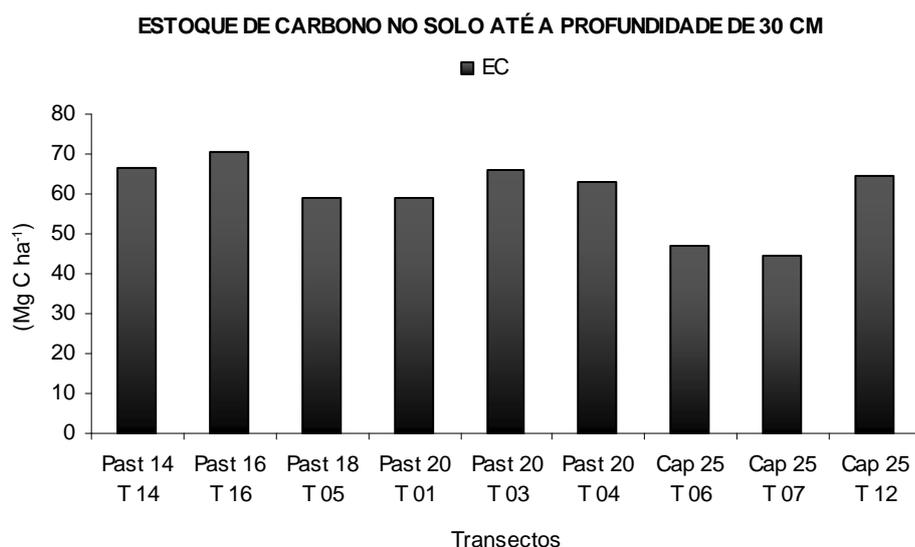


Figura 29. Valores de estoque total de carbono do solo - EC (Mg C ha⁻¹), até 30 cm de profundidade, em cada transecto.

As diferenças entre os estoques totais de carbono no solo, até 30 cm de profundidade (Figura 29), se dão por alguns fatores, dentre eles as condições físico-químicas dos solos e o teor de carbono de cada unidade amostral (transecto). A relação C:N, por exemplo, teve correlação positiva com a percentagem de areia (Pearson: 0,424) e correlação negativa com a percentagem de argila (Pearson: -0,483). Por outro lado, a matéria orgânica obteve a maior correlação positiva (Pearson: 0,809) com a percentagem de silte. Analisando-se conjuntamente os transectos, a biomassa (Mg C ha⁻¹) da camada (S) teve alta correlação positiva (Pearson: 0,902) com a relação C:N, e também com a biomassa aérea (Pearson: 0,696), indicando a influência da maior biomassa aérea na maior produção de serapilheira, refletindo em maior produção de biomassa radicular superficial.

O baixo estoque de carbono orgânico no solo do T 06 pode ser explicado pela menor D_b na camada (A) deste transecto (Tabela 13), o que, por sua vez, força ao estabelecimento de raízes que sustentam fisicamente os indivíduos na camada (B). Este pode ser outro fator que promoveu o comportamento ambíguo entre as camadas (S) e (B) dos transectos T 06 e T 07, em termos de alocação da biomassa subterrânea.

Os maiores valores de EC nas camadas mais superficiais do solo (Tabela 13) devem-se ao aprisionamento do carbono, oriundo do processo de crescimento e decomposição da vegetação. Este processo de fixação do CO₂ no solo, através da rizosfera e da queda da serapilheira, foi estudado por Swift (2001) e Trumbore *et al.* (2006).

As camadas (A; B; e C) possuem estoque total de carbono orgânico (média de todos os transectos) de, respectivamente: 24,5; 20,0; e 15,6 Mg C ha⁻¹ (Figura 30).

Em relação às diferentes profundidades de solos houve grande diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA: $r^2 = 0,718$; $F = 12,748$; $p < 0,05$).

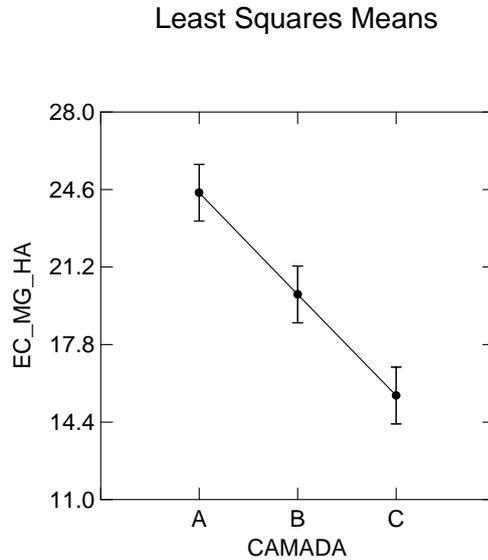


Figura 30. Quadrados mínimos médios do estoque de carbono no solo (Mg C ha^{-1}) por camada (A = 0-10; B = 10-20; e C = 20-30 cm de profundidade).

De acordo com Batjes (1996), em solos tropicais (área abrangendo as latitudes $23,5^\circ \text{ S}$ e $23,5^\circ \text{ N}$), existe um estoque global de carbono orgânico de 201-213 Pg C até a profundidade de 30 cm e de 384-403 Pg C até a profundidade de 100 cm. Batjes & Sombroek (1997), estimaram $10,5 \text{ kg C m}^{-2}$ (ou 105 Mg C ha^{-1}) para solos de florestas tropicais, até a profundidade de 100 cm, valores estes, corroborados por este trabalho.

O EC no solo está positivamente correlacionado com os teores de silte e argila (Pearson: 0,583; e 0,377) e negativamente correlacionado com o teor de areia (Pearson: -0,421), demonstrando que solos mais argilosos têm maior capacidade de estocar carbono, conforme Swift (2001) e Liang *et al.* (2006), possivelmente devido às interações eletrostáticas das micelas e colóides destes solos, possibilitando melhor agregação, em comparação com os solos arenosos. Assim, o revolvimento de solos argilosos na Amazônia Central, seja para agricultura ou obras de infra-estrutura, pode liberar cerca de 30% a mais de CO_2 para a atmosfera do que solos arenosos.

5.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS RAÍZES

5.3.1. Nutrientes de raízes por transecto

Algumas amostras de Ferro apresentaram altos valores para as raízes. Observou-se uma alta correlação dos teores do solo com o material vegetal em questão, indicando que houve consumo de luxo ou contaminação deste material, mesmo com os processos de lavagem. Pequenas frações do solo (solos com alto teor de ferro) são suficientes para grandes contaminações nas amostras. Todavia, retirando-se estes “*outliers*”, os valores médios são de cerca de 200 g kg⁻¹ e estão dentro dos teores padrões para florestas secundárias na Amazônia Central (Silva *et al.* 2006).

Os valores médios dos teores de Zinco nas plantas são, em média, 33 vezes maiores do que os teores nos solos; e os teores de manganês, 38 vezes, indicando uma padronização da disponibilidade do micronutriente no solo e seu acúmulo na raiz, visto que os teores de manganês e de zinco são proporcionais nos solos e nas raízes.

Ferro e Manganês não foram significativamente diferentes entre os transectos, ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA: $r^2 = 0,210$; $F = 0,626$; $p = 0,755$) e (ANOVA: $r^2 = 0,311$; $F = 1,449$; $p = 0,184$), respectivamente. Os maiores teores de ferro nas raízes estão associados aos maiores teores deste elemento nos solos arenosos.

O manganês mostrou correlação negativa com o número de queimas, sendo este o único padrão de comportamento relacionado a este elemento.

Os valores Zinco foram significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade, para o T 12 (ANOVA: $r^2 = 0,378$; $F = 2,249$; $p = 0,029$).

Dentre os macronutrientes, somente o fósforo não apresentou diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, entre os transectos (ANOVA: $r^2 = 0,322$; $F = 1,565$; $p = 0,144$). Cálcio, magnésio e potássio apresentaram as seguintes diferenças (ANOVA, Ca: $r^2 = 0,562$; $F = 6,239$; $p < 0,05$); (ANOVA, Mg: $r^2 = 0,642$; $F = 9,462$; $p < 0,05$); e (ANOVA, K: $r^2 = 0,509$; $F = 4,730$; $p < 0,05$). Os teores de cálcio variaram bastante em torno da média, apresentando alto coeficiente de variação.

Para os cátions: Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, houve grande diferença dos transectos (T 14, T 16, T 04 e T 12) para os transectos (T 05, T 01, T 03, T 06 e T 07), sendo que o primeiro conjunto possui solos bem argilosos em relação ao segundo. Podemos inferir, portanto, que florestas secundárias estabelecidas sobre solos argilosos na Amazônia Central, têm teores de cálcio

cerca de 60% maiores do que as estabelecidas em solos arenosos. A maior disponibilidade e conseguinte consumo destes cátions se deve aos maiores valores de CTC_e dos solos argilosos.

5.3.2. Nutrientes de raízes por camada.

O comportamento dos teores de ferro nas raízes, em relação à profundidade, pode ser explicado pela própria disponibilidade deste micronutriente no gradiente de profundidade do solo. Nas análises de variância por transecto e profundidade, percebe-se claramente a correlação positiva com a profundidade, principalmente nos solos mais arenosos, indicando que existe uma correlação positiva entre teor de ferro no solo e teor de ferro na raiz, em relação à profundidade. Nos Espodossolos existe um expressivo aumento dos teores de ferro em relação à profundidade, tanto no solo, como nas raízes.

Os teores de ferro estabeleceram correlação positiva com a profundidade e os de manganês, correlação negativa. Ambos foram significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade, em relação à profundidade (ANOVA, Fe: $r^2 = 0,284$; $F = 3,315$; $p = 0,023$) e (ANOVA, Mn: $r^2 = 0,603$; $F = 21,527$; $p < 0,05$).

A correlação negativa dos teores de manganês nas raízes, em relação à profundidade, pode ser explicada pela correlação positiva deste elemento com a M.O. Grande parte do manganês está complexado à compostos orgânicos que, por sua vez, encontram-se nas camadas mais superficiais no solo florestal. Outro fator que pode explicar este comportamento está vinculado à fisiologia. O manganês está relacionado com o alongamento e divisão celular, processo este bem mais ativo nas raízes superficiais.

Para o zinco não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, em relação à profundidade (ANOVA: $r^2 = 0,135$; $F = 0,703$; $p = 0,552$).

Não foi encontrada nenhuma relação dos teores de zinco nas raízes com relação às outras variáveis deste estudo. Porém, percebem-se maiores teores nas raízes superficiais, os quais podem ser explicados pelas mesmas razões do elemento manganês, ou seja, alta correlação positiva do zinco com a M.O., formando complexos, e sua função no metabolismo do RNA e DNA, na divisão celular e na síntese de proteínas, essenciais ao desenvolvimento das raízes superficiais.

Com relação aos macronutrientes, todos foram significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade, em relação à profundidade (ANOVA, P: $r^2 = 0,297$; $F = 3,639$; $p = 0,015$); (ANOVA, Ca: $r^2 = 0,436$; $F = 8,865$; $p < 0,05$); (ANOVA, Mg: $r^2 = 0,472$; $F = 10,770$; $p < 0,05$) e (ANOVA, K: $r^2 = 0,415$; $F = 7,816$; $p < 0,05$). Este comportamento sugere que a

maior parte de entrada de nutrientes no sistema advém da serapilheira, corroborando com diversos estudos sobre a ciclagem, quase que exclusivamente fechada, de nutrientes em florestas tropicais (Luizão, 1989; Ferreira *et al.*, 2005; Machado, 2005).

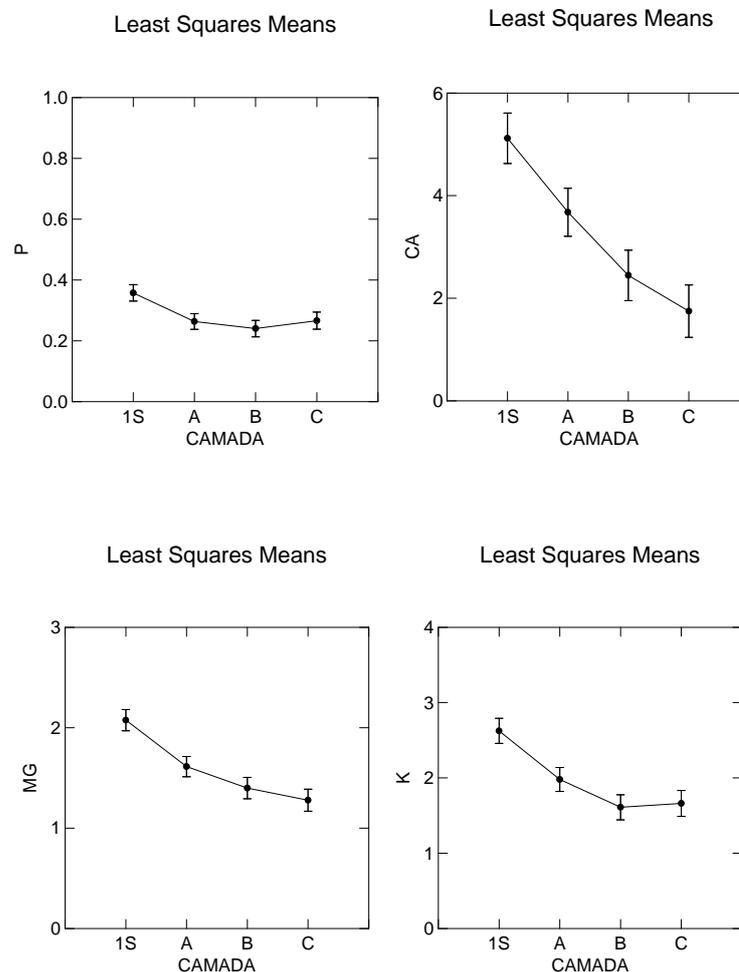


Figura 31. Quadrados mínimos médios dos teores de fósforo, cálcio, magnésio e potássio (g kg^{-1}) nas raízes por profundidade.

Os dados de nutrientes em raízes revelaram que os maiores teores estão localizados na biomassa das camadas mais superficiais do solo (Figura 31), exceto para o ferro. Os dados de biomassa de raízes também revelaram que cerca de 70% desta biomassa está nas camadas superficiais (S) e (A). Portanto, queimar estes ecossistemas pode acarretar numa alta exportação dos nutrientes, seja por volatilização, lixiviação ou vento. Os maiores teores de nutrientes na camada (S) são provenientes da queda e decomposição da serapilheira, com consecutivo aproveitamento pelas plantas.

Os teores de carbono na biomassa de raízes não foram significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade, com relação ao gradiente de profundidade (ANOVA: $r^2 = 0,093$; $F = 0,329$; $p = 0,804$), o qual também não afetou significativamente os teores de nitrogênio

(ANOVA: $r^2 = 0,127$; $F = 0,615$; $p = 0,607$). Os maiores valores médios dos teores de nitrogênio na biomassa de raízes da camada (S) indicam a maior atividade fisiológica da biomassa desta camada, em relação à biomassa abaixo do nível do solo. Deve-se levar em conta, a interação com os fungos micorrizos, altamente ativa nesta camada, cooperando na absorção e retranslocação das diversas formas moleculares do nitrogênio.

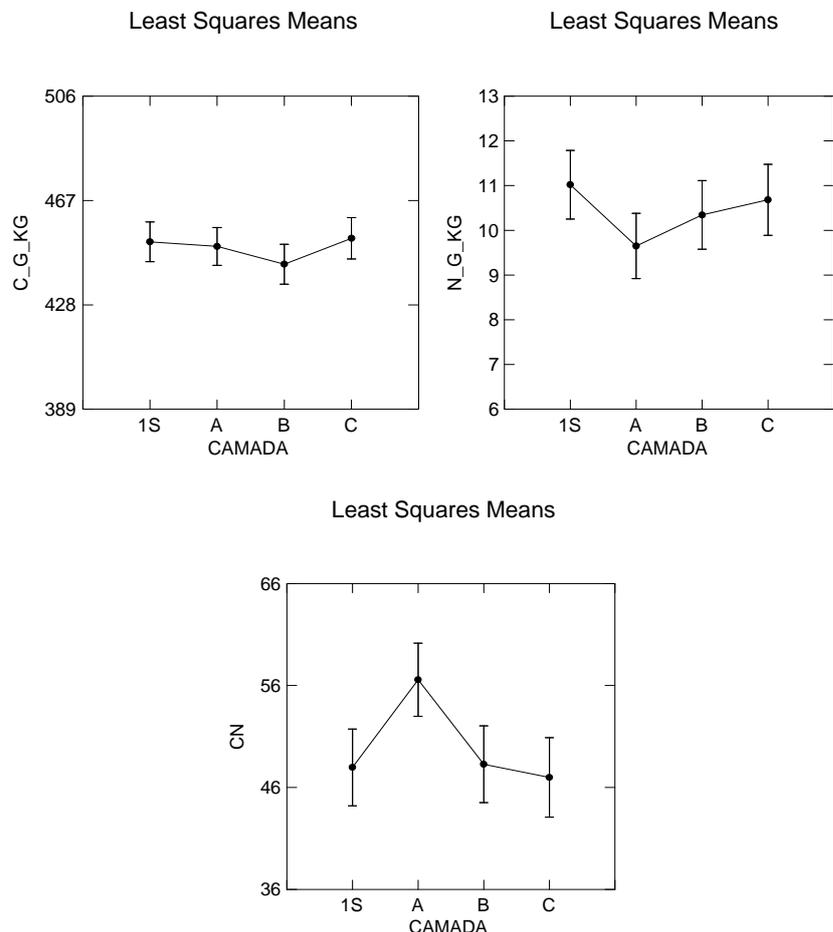


Figura 32. Quadrados mínimos médios dos teores de Carbono e Nitrogênio (g kg^{-1}) e relação C:N na biomassa de raízes por camada.

Os maiores valores da relação C:N na camada (A) estão intimamente associados aos menores teores de nitrogênio nesta mesma camada (Figura 32). Contudo, não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, da relação C:N na biomassa de raízes em relação ao gradiente de profundidade (ANOVA: $r^2 = 0,038$; $F = 1,483$; $p = 0,223$). O maior valor médio da relação C:N na camada (A) pode estar associado à necessidade física destas raízes em investimento na parede celular para obtenção de uma estrutura lenhosa mais forte, condicionando maior resistência às forças físicas que agem sobre uma árvore. Esta maior relação C:N na biomassa de raízes da camada (A) também parece estar intimamente associada

ao solo, que obteve o mesmo padrão da relação C:N; indicando a estreita relação da solução do solo com o teor de nutrientes na planta, através dos processos osmóticos. Outro fator que amplifica esta discrepância da relação C:N na camada (A) é o maior teor de M.O. nos solos desta camada.

5.3.3. Nutrientes de raízes por classe de diâmetro.

Para realizar as análises de nutrientes por classes de diâmetro (CD) fez-se a média dos teores de nutrientes das raízes através do somatório das CD de cada camada. Para a CD de raízes médias e grossas esta média foi realizada de acordo com as amostras disponíveis. No caso de apenas uma amostra por transecto, por exemplo, utilizou-se o próprio valor integral.

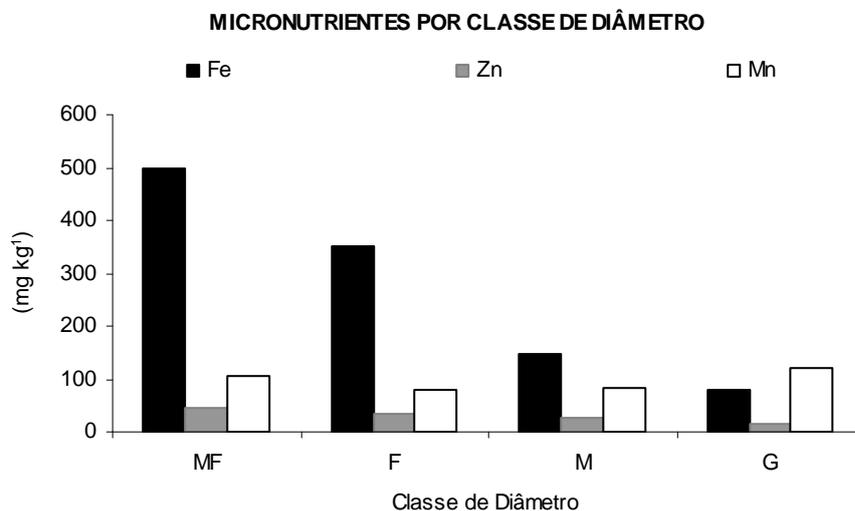


Figura 33. Distribuição dos teores de micronutrientes nas raízes: ferro, zinco e manganês (mg kg⁻¹) por classe de diâmetro.

O teor de ferro decresceu com o aumento das CD. As raízes MF apresentaram teores cinco vezes maiores do que as G (Figura 33). Estes altos teores de ferro nas raízes MF podem estar associados à formação de nódulos de fixação biológica do N₂ (leghemoglobina), por parte de algumas leguminosas e à maior necessidade desta CD em expandir-se (citocinese), necessitando, portanto, de maiores teores de ferro para suprir as atividades de respiração (citocromos), síntese de proteínas e potencial redox. Além disso, as raízes MF estão majoritariamente nas camadas superficiais. As da camada (S), por exemplo, estão expostas ao O₂, necessitando de alta atividade da catalase (dismutase), realizando a conversão da H₂O₂ em água e oxigênio.

Outra possibilidade para esta discrepância pode estar associada à contaminação das raízes MF por fragmentos de solo, contendo altos teores de ferro. Estes minúsculos fragmentos são de difícil remoção, mesmo realizando três seqüências de lavagem do material. Esta CD possui uma superfície específica bem maior, propiciando maior contato com o solo. Contudo, a maior atividade fisiológica das raízes MF preconiza maiores teores de ferro.

Os teores de ferro e zinco foram significativamente diferentes entre as classes de diâmetro (ANOVA, Fe: $r^2 = 0,866$; $F = 28,979$; $p < 0,05$) e (ANOVA, Zn: $r^2 = 0,813$; $F = 18,900$; $p < 0,05$). Para manganês, não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, em relação às CD (ANOVA, Mn: $r^2 = 0,283$; $F = 0,840$; $p = 0,483$). As raízes F e M apresentaram os menores valores médios de teores de manganês.

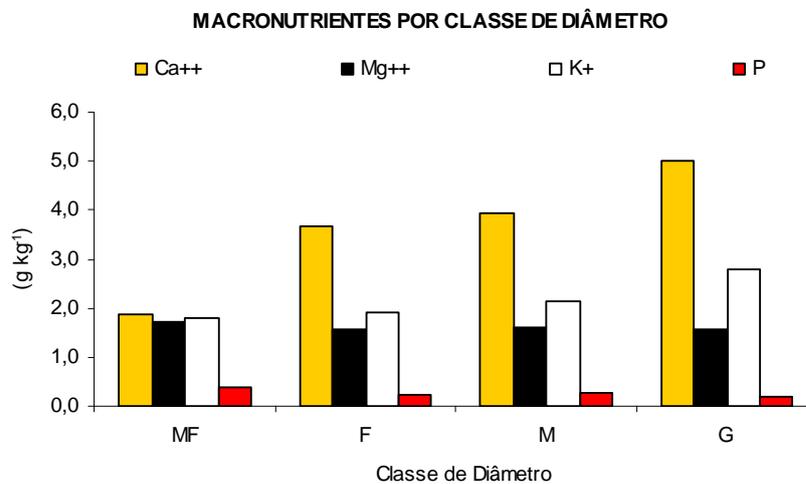


Figura 34. Distribuição dos teores de macronutrientes nas raízes: cálcio, magnésio, potássio e fósforo (g kg⁻¹) por classe de diâmetro.

Os teores de cálcio aumentaram com as CD (Figura 34), mas não diferiram significativamente, ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA, Ca: $r^2 = 0,455$; $F = 2,527$; $p = 0,077$). Os maiores teores de cálcio nas raízes G podem estar associados à formação do xilema (tubos crivados e elementos de vaso), com maior necessidade de investimento em parede celular, por parte dos vegetais, através de substâncias como os pectatos de cálcio. A pouca mobilidade deste elemento dentro da planta também pode estar influenciando no aumento do seu teor através do tempo, indicando o acúmulo deste elemento nas raízes mais velhas.

Os teores de magnésio e potássio nas raízes não foram significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade, entre as CD (ANOVA, Mg: $r^2 = 0,124$; $F = 0,152$; $p = 0,928$) e (ANOVA, K: $r^2 = 0,396$; $F = 1,794$; $p = 0,170$). Mas para fósforo houve diferença significativa entre as CD (ANOVA, P: $r^2 = 0,682$; $F = 8,408$; $p < 0,05$), principalmente para a CD de raízes

MF, onde a constante expansão das raízes tenras exige gasto energético, envolvendo pirofosfatos, fosfolipídios e fosfato inorgânico. A alta disponibilidade deste nutriente na serapilheira (antes de ser adsorvido pelas micelas de argila) também pode estar influenciando nos maiores valores do seu teor nas raízes MF (Figura 34). A maior área de contato desta CD pode ser outro fator contribuinte para maiores teores de fósforo.

Com relação à classe de diâmetro (CD) houve diferenças bastante significativas, ao nível de 5% de probabilidade, para os teores de carbono (ANOVA: $r^2 = 0,321$; $F = 4,318$; $p = 0,006$), nitrogênio (ANOVA: $r^2 = 0,527$; $F = 14,466$; $p < 0,05$) e relação C:N (ANOVA: $r^2 = 0,633$; $F = 25,248$; $p < 0,05$).

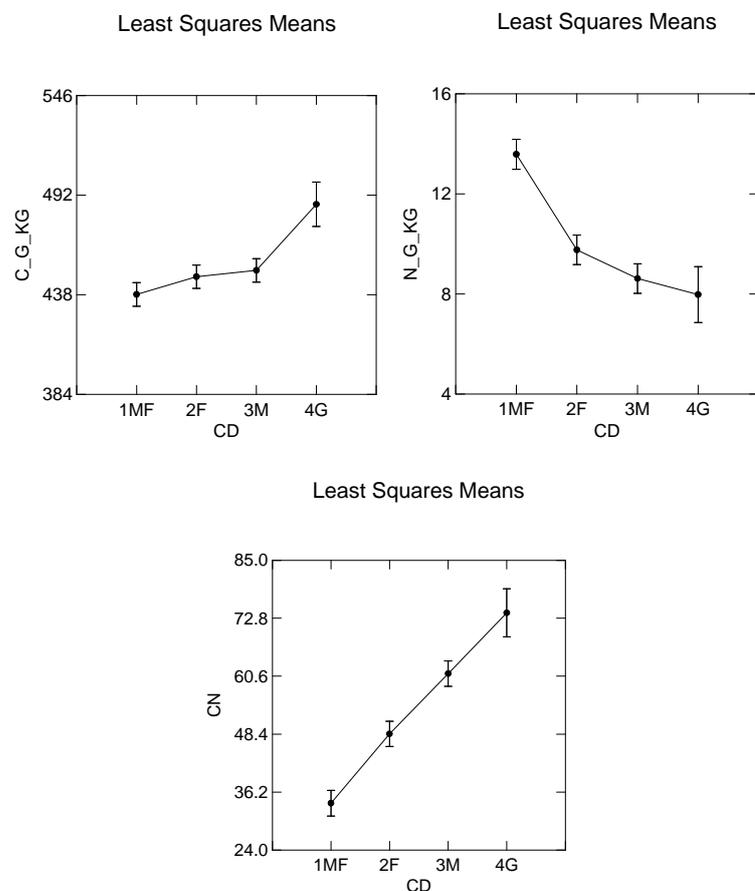


Figura 35. Quadrados mínimos médios dos teores de Carbono e Nitrogênio (g kg^{-1}) e relação C:N na biomassa de raízes por classe de diâmetro (CD).

Raízes grossas apresentaram maiores teores de carbono em sua biomassa (Figura 35), pois exercem função de um tecido xilemático, servindo como condutor de solutos, com menor atividade fisiológica e maior estruturação física através das cadeias de celulose, hemicelulose e pectatos de cálcio. De maneira análoga e contrária, comportaram-se os teores de nitrogênio na biomassa de raízes, onde raízes muito finas e finas estão em maior atividade de crescimento e

fisiologicamente bem mais ativas que as grossas. Outro fator que contribui para os maiores teores de nitrogênio nas raízes MF é a maior superfície específica desta CD e sua estreita relação com fungos micorrizos. A relação antagônica dos teores de carbono e nitrogênio na biomassa de raízes, em função da CD, é potencializada pela relação C:N, onde raízes G possuem cerca de duas vezes mais carbono que nitrogênio na sua composição, em comparação com as raízes MF (Figura 35).

5.3.4. Comparações entre os teores de nutrientes nas raízes e nos solos.

Para analisar as relações entre o teor de nutrientes nas raízes e o teor de nutrientes no solo elaborou-se um banco de dados desconsiderando-se a camada (S). A comparação foi realizada utilizando-se as médias dos teores de nutrientes por CD para cada camada, permitindo a comparação dos teores de nutrientes das raízes e do solo por camada (A), (B) e (C) em cada transecto. A unidade dos teores de ferro, zinco, manganês, cálcio, potássio, magnésio e fósforo (do solo e das raízes) utilizada nos cálculos foi (mg kg^{-1}).

Tabela 14. Correlação de Pearson entre os teores de nutrientes nas raízes e nos solos.

	Fe (r)	Zn (r)	Mn (r)	Ca (r)	Mg (r)	K (r)	P (r)
Fe (s)	0,293	-0,096	-0,238	-0,447	-0,359	-0,306	0,160
Zn (s)	-0,231	0,178	0,668	0,722	0,565	0,312	0,085
Mn (s)	-0,129	0,046	0,543	0,529	0,471	0,305	-0,028
Ca (s)	-0,263	0,106	0,522	0,754	0,560	0,326	0,099
Mg (s)	-0,202	0,116	0,520	0,556	0,466	0,272	0,038
K (s)	-0,395	0,170	0,626	0,624	0,497	0,210	-0,008
P (s)	-0,386	0,176	0,668	0,483	0,427	0,333	0,107

Nota-se (Tabela 14) a correlação positiva entre os teores de nutrientes nas raízes e no solo, principalmente para cálcio, indicando o equilíbrio dinâmico entre a solução do solo e o citosol, através do processo osmótico.

O teor de ferro teve correlação negativa com os outros nutrientes, tanto nas raízes como no solo. Este comportamento pode estar relacionado com a física do solo, de tal maneira que os teores de ferro são maiores nos solos arenosos. Desta forma, existe uma influência indireta, pois solos argilosos têm maiores teores de cátions trocáveis. Portanto, raízes estabelecidas em solos arenosos estão sujeitas a um déficit nutricional, em relação às estabelecidas em solos argilosos. Outro fato que corrobora para este comportamento pode ser observado na correlação positiva que ferro no solo teve com fósforo na raiz. O fósforo, em solos arenosos, está menos

sujeito à adsorção e mais prontamente disponível para as plantas, refletindo num consumo de luxo, em se tratando de solos tropicais distróficos.

5.4. CRONOSSEQUÊNCIA DE PASTAGENS ABANDONADAS

Com o propósito de analisar a variável categórica (uso do solo) influenciando nos estoques de carbono no solo e na biomassa subterrânea nestas florestas secundárias, elaborou-se um banco de dados contemplando esta variável.

5.4.1. Biomassa, volume e densidade básica das raízes.

Para analisar a variação da biomassa na cronossequência de pastagens abandonadas de: 14, 16, 18 e 20 anos, utilizou-se, para esta última idade, a média das três pastagens de 20 anos. Os solos das pastagens com idades de 14 e 16 anos são bem argilosos, enquanto que o solo da pastagem de 18 anos e a média das pastagens de 20 anos são um pouco menos argilosos, mitigando, dentro do possível, o efeito edáfico da cada sítio.

Tabela 15. Uso e idade da área; biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}); percentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha^{-1}).

Número	Mg ha^{-1}			%	Mg ha^{-1}
	Subterrânea	Aérea	Total	S:T%	Camada S
Pastagem 14	6,3	31,5	37,8	16,7	0,372
Pastagem 16	7,0	34,5	41,5	16,8	1,687
Pastagem 18	11,0	95,3	106,3	10,3	1,188
Pastagem 20	11,1	141,8	152,8	7,6	2,822

Existe um decréscimo na percentagem de biomassa subterrânea, em relação à biomassa total, de acordo com a idade das pastagens abandonadas (Tabela 15). A correlação é negativa (Pearson: -0,941), indicando que, em pastagens abandonadas de 14 a 18 anos, na Amazônia Central, está ocorrendo um investimento majoritário na biomassa da parte aérea. Seria interessante comparar este comportamento numa cronossequência maior, englobando pastagens abandonadas há menos tempo e também as mais antigas, conhecendo melhor os “pulsos” de investimento em biomassa subterrânea e aérea.

Outros valores que corroboram com um maior investimento de biomassa na parte aérea podem ser verificados na biomassa superficial, em relação à biomassa subterrânea total, que

aumentou com a idade das pastagens: 14 anos = 5,9%; 16 anos = 24,1%; 18 anos = 10,8%; e 20 anos = 25,5%. Maior biomassa aérea, em florestas tropicais, geralmente implica em maior queda de serapilheira, que induz a uma maior biomassa superficial de raízes, conforme o sistema de retroalimentação em florestas tropicais úmidas. A percentagem de biomassa superficial média para a cronosequência foi de 13,6%, em relação à biomassa subterrânea total. Fatores edáficos também podem explicar a variação da biomassa superficial, como por exemplo, os teores de nutrientes no solo.

A pastagem de 18 anos apresentou maior biomassa, em relação ao volume, pois foi constatada a maior densidade básica das raízes neste transecto, devido à grande quantidade de raízes médias encontradas. Não houve diferença significativa de biomassa entre a cronosequência de pastagens abandonadas (ANOVA: $r^2 = 0,139$; $F = 1,658$; $p = 0,177$). Porém, observa-se claramente que pastagens de 18 e 20 anos têm quase o dobro de biomassa subterrânea do que as pastagens de 14 e 16 anos.

O T 05 (pastagem de 18 anos) apresentou menores teores de C, N e Ca no solo em relação às pastagens de 14 e 16 anos, provavelmente por ser um solo mais arenoso, comparativamente, induzindo ao crescimento da biomassa superficial para assegurar as necessidades nutricionais dos vegetais. Neste transecto também ocorreu o maior número de queimas (9). Os incêndios, juntamente com a característica arenosa, explicam os menores teores de nutrientes deste transecto.

O fósforo apresentou correlação negativa com o teor de argila e pode estar associado à capacidade de adsorção do P pelas micelas de argila. Percebe-se também, nos solos mais argilosos, a maior capacidade intrínseca em reter e trocar cátions.

A biomassa superficial obteve altíssima correlação negativa com o EC no solo, sugerindo o investimento de biomassa nesta camada quando da escassez de nutrientes no solo.

Além das idades, pequenas diferenças nos teores de nutrientes no solo podem provocar comportamentos e valores diferentes da biomassa radicular. Em solos quimicamente mais ricos verifica-se pouca biomassa superficial.

A diferença de biomassa foi altamente significativa, ao nível de 5% de probabilidade, na camada (A) para a cronosequência de pastagens (ANOVA: $r^2 = 0,466$; $F = 23,248$; $p < 0,05$). Para as outras camadas não houve diferença significativa.

5.4.2. *Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, na cronossequência de pastagens abandonadas.*

A cronossequência de pastagens apresentou biomassa subterrânea média de $8,83 \pm 0,12$ Mg ha⁻¹, densidade básica média de $0,31 \pm 0,011$ g cm⁻³ e teor médio de carbono de 0,4409. Existe um estoque de 3,89 Mg C ha⁻¹ na biomassa subterrânea e um estoque de 72,37 Mg C ha⁻¹ nos solos, somando um estoque, até a profundidade de 30 cm, de 76,26 Mg C ha⁻¹.

5.5. PASTAGENS DE 20 ANOS

5.5.1. *Biomassa, volume e densidade básica das raízes.*

O propósito de analisar três pastagens de 20 anos foi justamente poder fixar a idade e uso da terra para avaliar o comportamento da biomassa subterrânea em relação às diferenças edáficas. Contudo, constatadas as diferenças edáficas entre estas áreas, perde-se a padronização e, conseqüentemente, o poder de repetição das mesmas. Apesar do imbróglcio estatístico, podemos retirar interessantes conclusões da relação da biomassa subterrânea com o tipo de solo em que se estabeleceram.

Tabela 16. Número do transecto, biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha⁻¹); percentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha⁻¹) das pastagens de 20 anos.

Número	Mg ha ⁻¹			%	Mg ha ⁻¹
	Subterrânea	Aérea	Total	S:T	Camada S
T 01	11,6	104,8	116,4	10,0	3,168
T 03	12,0	147,9	159,9	7,5	2,566
T 04	9,6	172,6	182,2	5,3	2,689

As variações de biomassa subterrânea (Tabela 16) podem ser explicadas, em parte, pela física do solo, onde o T 01 é arenoso, T 03 é intermediário e T 04 é argiloso (Figura 24). Solos argilosos possuem maior CTC_e e podem reter e fornecer, mais e continuamente, os nutrientes essenciais. Desta forma, as raízes mantêm mais contato com os nutrientes e não têm a necessidade de se expandirem à procura dos mesmos. A maior disponibilidade de água nos solos argilosos, nas estações mais secas, também contribui para o menor crescimento da biomassa subterrânea.

Houve uma pequena diminuição da biomassa subterrânea na seqüência dos transectos, de mesma idade e uso do solo, mesmo havendo um incremento contínuo na biomassa aérea. Pode-se inferir, portanto, através da análise granulométrica que, em solos argilosos, há maior capacidade de sustentação em termos nutricionais da biomassa aérea.

Volume e biomassa não foram significativamente diferentes entre as três capoeiras de 20 anos (ANOVA: $r^2 = 0,066$; $F = 0,413$; $p = 0,662$) e (ANOVA $r^2 = 0,042$; $F = 0,167$; $p = 0,846$) respectivamente. No entanto, houve correlação negativa do volume e biomassa em relação ao teor de argila (Pearson = $-0,668$). A alta correlação negativa entre P e teor de argila reforça a capacidade destes solos em adsorver o fósforo, tornando-o não-lábil. Já para os outros nutrientes, a correlação é positiva, indicando a melhor CTC_e em solos argilosos. Biomassa subterrânea total e biomassa superficial também se correlacionaram negativamente com o teor de argila (Tabela 17), indicando que em solos argilosos, as raízes não necessitam de tanta superfície de contato, pois os nutrientes existem em maiores concentrações estão prontamente disponíveis.

Tabela 17. Matriz de correlação de Pearson para teor de argila; P; Ca; Mg; K; C; N; biomassa subterrânea e superficial (Mg ha^{-1}) e EC (Mg ha^{-1}) no solo das pastagens.

	ARGILA	P	CA	MG	K	C	N	MASSA_MG	MASSA_S_MG
ARGILA	1.000								
P	-0.763	1.000							
CA	0.847	-0.312	1.000						
MG	0.780	-0.701	0.564	1.000					
K	0.928	-0.868	0.669	0.888	1.000				
C	0.731	-0.439	0.681	0.568	0.524	1.000			
N	0.897	-0.617	0.787	0.724	0.742	0.954	1.000		
MASSA_MG	-0.765	0.394	-0.826	-0.616	-0.762	-0.250	-0.487	1.000	
MASSA_S_MG	-0.567	0.690	-0.250	-0.591	-0.729	0.022	-0.261	0.643	1.000
EC_MG_HA	-0.130	0.348	0.122	-0.620	-0.422	0.201	0.023	0.290	0.696

A biomassa superficial teve correlação negativa com os íons trocáveis, principalmente potássio, indicando a necessidade de investimento em biomassa superficial quando não há estoque de nutrientes nos solos. Podemos inferir, portanto, que em solos arenosos de pastagens abandonadas acerca de 20 anos na Amazônia Central, existe uma tendência ao desenvolvimento de biomassa superficial. Este fenômeno acontece devido à escassez de nutrientes nestes solos arenosos, forçando a vegetação ao desenvolvimento de estratégias nutricionais alternativas, conforme o sistema de retroalimentação destes ecossistemas.

A diferença de biomassa entre as camadas foi altamente significativa, ao nível de 5% de probabilidade, na camada (A) para as pastagens de 20 anos (ANOVA: $r^2 = 0,375$; $F = 10,258$; $p < 0,05$). A Camada (S) também diferiu das demais.

5.5.2. Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, nas pastagens abandonadas de 20 anos.

As pastagens de 20 anos apresentaram biomassa subterrânea média de $11,10 \pm 0,88 \text{ Mg ha}^{-1}$, densidade básica média de $0,33 \pm 0,015 \text{ g cm}^{-3}$ e teor médio de carbono de 0,4522. Existe um estoque de $5,01 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na biomassa subterrânea e um estoque de $74,41 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nos solos, somando um estoque, até a profundidade de 30 cm, de $79,42 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

5.6. CAPOEIRAS DE 25 ANOS

5.6.1. Biomassa, volume e densidade básica das raízes.

As capoeiras de 25 anos também possuem diferenças na granulometria dos solos. A diferença é marcante no T 12 que se revelou bastante argiloso. Novamente a biomassa subterrânea apresentou menores valores em relação aos solos mais arenosos.

Tabela 18. Número do transecto, biomassa subterrânea, biomassa aérea e biomassa total (Mg ha^{-1}); percentagem de biomassa subterrânea em relação à total (S:T%) e biomassa superficial (Mg ha^{-1}) das capoeiras de 25 anos.

Número	Mg ha^{-1}			%	Mg ha^{-1}	
	Transecto	Subterrânea	Aérea	Total	S:T	Camada S
T 06		18,4	183,2	201,6	9,1	1,88
T 07		18,5	200,5	219,0	8,5	5,83
T 12		8,1	132,7	140,8	5,8	2,80

Os menores valores de biomassa subterrânea no T 12 (Tabela 18) confirmam a tendência de menor investimento em biomassa superficial e total por parte desta vegetação estabelecida em solos argilosos. O T 06 e T 07 são especialmente interessantes, pois possuem o mesmo tipo de solo e biomassas, aéreas e subterrâneas, bem semelhantes. Porém, observa-se grande redução de biomassa superficial no T 06 em relação ao T 07. Por outro lado, o T 07 apresentou altos valores de biomassa nas camas (A) e (B). O principal motivo da inversão de valores de biomassa entre as camadas (S) e (B) destes transectos parece estar associado à

menor disponibilidade de nutrientes no T 07. Este transecto também obteve quase a metade da matéria orgânica e quase o dobro de relação C:N na camada (A) em relação ao T 06.

Não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, para volume (ANOVA: $r^2 = 0,138$; $F = 1,804$; $p = 0,167$) e biomassa (ANOVA: $r^2 = 0,149$; $F = 2,133$; $p = 0,121$) entre as capoeiras de 25 anos. Apesar da grande diferença entre as médias (Tabela 18), os valores iguais a zero (que devem ser inclusos nas análises), principalmente da CD de raízes grossas, forçaram à homogeneidade dos dados.

Tal como nas pastagens de 20 anos, a biomassa subterrânea em solos mais argilosos nas capoeiras de 25 anos apresentou menores valores, provavelmente pelo mesmo motivo de maior disponibilidade nutricional destes solos.

Tabela 19. Matriz de correlação de Pearson para teor de argila; P; Ca; Mg; K; C; N; biomassa subterrânea e superficial; e estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) das capoeiras.

	ARGILA	P	CA	MG	K	C	N	MASSA_MG	MASSA_S_MG
ARGILA	1.000								
P	0.832	1.000							
CA	0.966	0.947	1.000						
MG	0.888	0.994	0.977	1.000					
K	0.950	0.964	0.998	0.987	1.000				
C	0.409	0.846	0.630	0.783	0.674	1.000			
N	0.372	0.824	0.599	0.758	0.644	0.999	1.000		
MASSA_MG	-0.905	-0.518	-0.765	-0.609	-0.727	0.018	0.057	1.000	
MASSA_S_MG	-0.385	-0.832	-0.610	-0.767	-0.655	-1.000	-1.000	-0.043	1.000
EC_MG_HA	0.730	0.229	0.529	0.334	0.479	-0.325	-0.362	-0.951	0.349

Novamente evidencia-se a correlação positiva entre cátions, estoque de carbono e teor de argila (Tabela 19). Em contramão, o fósforo também apresentou correlação positiva com o teor de argila. A maior disponibilidade de P nas capoeiras de 25 anos pode ter relação com a inexistência de queimas nestas capoeiras. Sucessivas queimadas volatilizam o nitrogênio, tornando-o limitante no ecossistema e interferindo na assimilação dos demais nutrientes. Outro fator importante é a maior biomassa aérea, contribuindo para a formação da serapilheira.

De acordo com Kato *et al.* (2000), a baixa fertilidade dos solos amazônicos, sobretudo quanto ao teor de fósforo, é agravada pelo sistema tradicional de preparo da área, via derruba e queima, onde cerca de 27% a 47% do P é perdido, principalmente através do vento que dispersa as cinzas.

O estoque de carbono no solo, até 30 cm de profundidade, teve correlação positiva com o teor de argila, indicando a capacidade de dreno ou sumidouro de carbono em solos mais argilosos. Todavia, Gill *et al.* (2002), sugerem que a limitação passiva do sequestro de carbono

nos solos pode ter sido historicamente importante, mas a capacidade do solo para continuar como sumidouro é limitada.

Os teores de carbono e nitrogênio no solo apresentaram correlação extremamente negativa com a biomassa superficial, reforçando a capacidade dos solos argilosos, em comparação com os arenosos, de disponibilizar nutrientes para a vegetação. Esta correlação negativa foi mais forte ainda devido ao menor teor de nutrientes no solo do T 07, que por consequência, obteve o maior valor de biomassa superficial.

T 06 e T 07 apresentaram os maiores valores de biomassa porque foram detectadas raízes com altos valores de biomassa individual (raízes M e G), as quais alcançaram até 118 g. Estes valores elevaram a média de biomassa destas capoeiras, mas não foram suficientes para ocasionar a diferença estatística. Todavia, as capoeiras de 25 anos estabelecidas sobre solos arenosos (Figura 24) possuem mais que o dobro de biomassa subterrânea do que as estabelecidas sobre solos argilosos (Tabela 18).

A diferença de biomassa foi significativamente maior, ao nível de 5% de probabilidade, na camada (A) para as capoeiras de 25 anos (ANOVA: $r^2 = 0,262$; $F = 4,627$; $p = 0,004$). A Camada (S) também diferiu das demais.

5.6.2. Estoque de carbono abaixo do solo, até a profundidade de 30 cm, nas capoeiras de 25 anos.

As capoeiras de 25 anos possuem biomassa subterrânea média de $15,02 \pm 1,17 \text{ Mg ha}^{-1}$, densidade básica média de $0,30 \pm 0,012 \text{ g cm}^{-3}$ e teor médio de carbono de 0,4523. Existe um estoque de $6,79 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na biomassa subterrânea e um estoque de $70,37 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nos solos, somando um estoque, até a profundidade de 30 cm, de $77,16 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

6. CONCLUSÃO

O método do monólito de solo utilizado neste estudo mostrou-se adequado para a amostragem de biomassa subterrânea em florestas secundárias, pois não foi constatada diferença significativa no conjunto dos quatro monólitos dentro de cada transecto, indicando uma padronização das amostras dentro de cada transecto. O método também pode ser aplicado para estimar a biomassa subterrânea em plantios onde a rizosfera não ultrapasse os 30 cm de profundidade. A escavação completa de raízes em florestas tropicais, até um metro de profundidade, de acordo com a metodologia do IPCC, é um método trabalhoso e caro, mas necessário em se tratando de determinar a biomassa de raízes grossas ($\varnothing \geq 2$ cm) e raízes pivotantes. Porém, para as raízes finas, as quais raramente ocorrem abaixo de 50 cm de profundidade, o método do monólito de solo se mostra viável pelo baixo custo de fabricação e operacional, produzindo informações sobre biomassa subterrânea, em florestas secundárias, condizentes com a literatura científica.

A densidade básica das raízes apresentou valores bem menores na camada superficial, pois esta biomassa não é afetada pela resistência física do solo, está em constante crescimento e constitui-se, majoritariamente, de raízes muito finas, portanto, menos lenhosas. Em relação à classe de diâmetro, as raízes muito finas apresentaram os menores valores e as raízes médias os maiores valores de densidade básica.

A cronosequência de pastagens apresentou biomassa subterrânea média de $8,83 \pm 0,12$ Mg ha⁻¹, as pastagens de 20 anos apresentaram biomassa subterrânea média de $11,10 \pm 0,88$ Mg ha⁻¹ e as capoeiras de 25 anos possuem biomassa subterrânea média de $15,02 \pm 1,17$ Mg ha⁻¹. A média do estoque de carbono nos solos da cronosequência de pastagens abandonadas foi de $72,37$ Mg C ha⁻¹, para as pastagens abandonadas de 20 anos este valor foi de $74,41$ Mg C ha⁻¹ e para as capoeiras de 25 anos este valor foi de $70,37$ Mg C ha⁻¹.

Podemos retirar interessantes conclusões da relação da biomassa subterrânea com o tipo de solo em que se estabeleceram. Em média, cerca de 20% da biomassa de raízes está acima do solo. Em solos arenosos de pastagens abandonadas acerca de 20 anos na Amazônia Central, existe uma tendência ao desenvolvimento de biomassa superficial. Os dados também revelaram que cerca de 70% da biomassa subterrânea localiza-se nas camadas superficiais (S) e (A). Portanto, queimar estes ecossistemas pode acarretar numa alta exportação dos nutrientes, seja por volatilização, lixiviação ou vento. Desta forma, o revolvimento de solos argilosos na Amazônia Central, seja para agricultura ou obras de infra-estrutura, pode liberar cerca de 30% a mais de CO₂ para a atmosfera do que solos arenosos. A capacidade de dreno ou sumidouro de

carbono é maior em solos mais argilosos. Os solos argilosos também mostraram maior capacidade, em comparação com os arenosos, de disponibilizar nutrientes para a vegetação. Em solos menos férteis existe uma tendência ao desenvolvimento de biomassa superficial e esta biomassa é constituída, em grande parte, por raízes muito finas. A biomassa de raízes muito finas decresce com a profundidade do solo e está mais presente na camada (S).

Solos arenosos apresentaram maiores valores de biomassa subterrânea que solos argilosos, quando fixadas idade e uso da terra, sendo que os argilosos apresentaram maiores valores de teor de nutrientes. A escassez de nutrientes nos solos parece estar mais relacionada à física destes solos do que ao número de queimas ocorridas, pois o T 07 (capoeira de 25 anos onde não houve queima) apresentou os menores valores de teor de nutrientes no solo, enquanto que o T 05 (pastagem abandonada de 18 anos onde houve 9 queimas) apresentou valores de teor de nutrientes dentro da média. No entanto, o T 07 possui o solo mais arenoso dentre os estudados.

Para os cátions: Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , houve grande diferença dos transectos (T 14, T 16, T 04 e T 12) para os transectos (T 05, T 01, T 03, T 06 e T 07), sendo que o primeiro conjunto possui solos bem argilosos em relação ao segundo. Podemos inferir, portanto, que florestas secundárias estabelecidas sobre solos argilosos na Amazônia Central, têm aporte de teores de cálcio no solo cerca de 60% maiores do que as estabelecidas em solos arenosos. A maior disponibilidade e conseguinte consumo destes cátions se deve aos maiores valores de CTC_e dos solos argilosos.

A alta discrepância de dados relacionados à biomassa florestal, principalmente em florestas tropicais, certamente está associada a não-inclusão de dados referentes à biomassa subterrânea nos modelos matemáticos de estoque e dinâmica do carbono na biosfera.

A definição de uma metodologia única para estimar a biomassa subterrânea na Amazônia, apesar de padronizar e organizar a coleta de dados representa um alto custo operacional e ambiental. Além disso, devido à heterogeneidade edáfica, topográfica e climática deste ecossistema, tornam-se necessárias amostras pontuais para sua compreensão e modelagem. Extrapolar os dados de uma determinada região para todo o bioma é complicado. De tal maneira que o estudo de raízes finas na Amazônia necessita de mais atenção. Estas raízes têm muita importância em relação à ciclagem de nutrientes nos ecossistemas e também são relevantes, apesar do alto “*turnover*”, para os estudos da dinâmica do estoque de carbono na biomassa subterrânea.

7. BIBLIOGRAFIA

- Aide, T.M.; Zimmerman, J.K.; Pascarella, J.B.; Rivera, L; Marcano-Veja, H. 2000. Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: implications for restoration ecology. *Restoration Ecology* 8 (4): 328-338.
- Anderson, J.M & Ingram, J.S.I. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. CAB International, Wallingford. 221p.
- Arnon, D.I. 1937. Ammonium and nitrate nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogenion concentration, manganese, copper, and oxygen supply. *Soil Science*. 44: 91 - 114.
- Araújo, T. M.; Higuchi, N.; Carvalho Jr., J. A. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v.117, p.43-52.
- Arima, E.; Barreto, P.; Brito, M. 2005. Pecuária na Amazônia: tendências e implicações para a conservação ambiental. Belém, *Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia - IMAZON*.
- Asner, G.P.; Keller, M.; Pereira Jr., R.; Zweede, J.C.; Silva, J.N.M. 2004. *Ecological Applications*, n. 14, p. 280-298.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47 (2). P. 151-163.
- Batjes, N.H & Dijkshoorn, J.A. 1999. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma*, v.89, p.273-286.
- Batjes, N.H & Sombroek, W.G. 1997. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology*, 3, 161-173.
- Bellemare, J., Motzkin, G. & Foster, D.R. 2002. Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *Journal of Biogeography*. 29, 1401–1420.
- Benites, V.M; Machado, P.L.O.A; Fidalgo, E.C.C; Coelho, M.R; Madari, B.E. 2007. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma* n. 139, p. 90-97.
- Bentos, T.V. 2006. Estratégias reprodutivas de espécies pioneiras na Amazônia Central: Fenologia e sucesso no estabelecimento de plantas. 76 p.: il. *Dissertação (mestrado)* – INPA/UFAM.

- Brown, S.; Lugo, A.E. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6: 1-32.
- Brown, S.; Lugo, A.E.; Gillespie, A.J.R. 1989. Biomass estimation methods of tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4): 881-902.
- Cairns, M.A.; Brown, S.; Helmer, E.H.; Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111. p. 1-11.
- Camargo, M.N. & Falesi, I. 1975. Suelos del Planalto Central y la carretera Transamazônica del Brasil. Manejo de suelos en la América Tropical. Raleigh, N. C., USA, *North Carolina State University*. p. 24-44.
- Castro, E.A; & Kauffman, J.B. 1998. Ecosystem structure in Brazilian Cerrados: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*. n. 14. p. 263-283.
- Chauvel, A; Lucas, Y; & Boulet, R. 1987. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus. Central Amazonia, Brazil. *Experientia*, n. 43. p. 234-241.
- Cramer, J.M.; Mesquita, R.C.G.; Williamson, G.B. 2007. Forest fragmentation differentially affects seed dispersal of large and small-seeded tropical trees. *Biological Conservation*, n. 137, p. 415-423.
- EMBRAPA. 1997. Manual de Métodos de Análises de Solo. Centro Nacional de Pesquisas de Solos – CNPS. *Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro*. 1997. 212p.
- EMBRAPA. 1999. Sistema brasileiro de classificação de solos. *Brasília: Embrapa*, 412p.
- Espeleta, J.F. & Clark, D.A. 2007. Multi-scale variation in fine-root biomass in a tropical rainforest: a seven-year study. *Ecological Monographs*, 77 (3), pp. 377-404. *Ecological Society of America*.
- Fearnside, P.M. 1991. Forest Biomass in Brazilian Amazonia; comments on the by Brown and Lugo. *Interciência*, n.p.
- Fearnside, P.M. 1994. Biomassa das florestas Amazônicas brasileiras. p. 95-124. In: Anais do Seminário Emissão x Seqüestro de CO₂. Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Rio de Janeiro, Brasil. 221p.
- Fearnside, P.M. & Guimarães, W.M. 1996. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*. v. 80: 35-46.
- Fearnside, P.M.; Leal Filho, N. 2002. Solo e Desenvolvimento na Amazônia: Lições do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais. INPA/MCT.

- Feldpausch, T.R.; Riha, S.J.; Fernandes, E.C.M.; Wandelli, E.V. 2005. Development of forest structure and leaf area in secondary forests regenerating on abandoned pastures in central Amazonia. *Earth Interactions*, 9: 1-21.
- Feldpausch, T.R.; Rondon, M.; Fernandes, E.C.M.; Riha, S.J.; Wandelli, E.V. 2004. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. *Ecological Applications*, 14(4): S164-S176.
- Ferraz, J.; Higuchi, N.; Santos, J. dos; Biot, Y.; Marques, F.; Baker, K.; Baker, R.; Hunter, I.; Proctor, J. 1997. Distribuição de nutrientes nas árvores e exportação de nutrientes pela exploração seletiva de madeira. *Projeto BIONTE*. Relatório final. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, 133-149.
- Ferreira, S.J.F.; Luizão, F.J.; Miranda, S.Á.F.; Silva, M.S.R.; Vital, A.R.T. 2005. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. *Acta Amazônica*, parte do projeto Bionte, 1993.
- Fife, D.N. & Nambiar, E.K.S. 1987. Accumulation and retranslocation of Mineral Nutrients in Developing Needles in Relation to Seasonal Growth of Young Radiata Pine Trees. *Annals of Botany*. n. 50, p. 817 - 829, 1987.
- Gale, M.R & Grigal, D.F. 1987. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Can J for Res*, 17: 829-834.
- Gill, R.A; Polley, H.W; Johnson, H.B; Anderson, L.J; Maherali, H. & Jackson, R.B. 2002. Nonlinear grassland responses to past and future atmospheric CO₂. *Nature* n. 417, p. 279-282.
- Haag, H. (coord.). 1985. Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais. Campinas: *Fundação Cargill*, 144p.
- Hertel, D; Hölscher, D; Köhler, L; Leuschner, C. 2006. Changes in Fine Root System Size and Structure During Secondary Succession in a Costa Rican Montane Oak Forest. *Ecological Studies*, Vol. 185. p. 283-297. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Higuchi, N.; dos Santos, J.; Imanaga, M.; Yoshida, S. 1994. Aboveground biomass estimate for Amazonian dense tropical moist forests. *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Kagoshima*, 30(39):43-54.
- Higuchi, N.; dos Santos, J.; Ribeiro, J.R.; Minette, L.; Biot, Y. 1998. Biomassa da parte aérea da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazonica*, 28 (2):153-166.

- Higuchi, N.; dos Santos, J.; Sampaio, P.T.B.; Marengo, R.A.; Ferraz, J.; Sales, P.C.; Saito, M.; e Matsumoto, S. 2003. *Projeto Jacaranda Fase II: pesquisas florestais na Amazônia Central*. 252p.
- Higuchi, N.; dos Santos, J.; Tribuzy, E.S.; Lima, A.J.N.; Teixeira, L.M.; Carneiro, V.M.C.; Felsemburg, C.A.; Pinto, F.R.; Silva R.P.; Pinto, A.C.M. 2005. *Noções Básicas sobre Manejo Florestal*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. CPST/LMF. Manaus (AM) – Brasil.
- Homma, A.K.O.; Walker, R.T.; Scatena, F.M.; Couto, A.J. Carvalho, R.A.; Ferreira, C.A.P.; Santos, A.I.M. 1998. Redução do desmatamento na Amazônia: política agrícola ou ambiental. *EMBRAPA-CPATU*, Belém, p. 119-141.
- Houghton, R.A. 2005. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. Woods Hole Research Center. *Global Change Biology* 11, 945–958.
- Houghton, R.A.; Lawrence, K.T.; Hackler, J.L. 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, 7, 731–746.
- Huxley, J.S & Teissier, G. 1936. Terminology of Relative Growth. *Nature* n. 137. p. 780-781.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. site: <www.ipcc.ch> acessado em junho 2008.
- ITTO (International Tropical Timber Organization). 2002. Guidelines for the Restoration, Management and Rehabilitation of Degraded and Secondary Tropical Forests. (ITTO, Yokohama, Japan, 2002).
- Jackson, R.B.; Canadell, J.; Ehleringer, J. R.; Mooney H.A.; Sala, O.E.; Schulze E. D. 1996. A Global Analysis of Root Distributions for Terrestrial Biomes. *Oecologia*, n. 108, p. 389-411.
- Jackson, R.B.; Mooney, A.H.; & Schulze, E.D. 1997. A Global Budget for Fine Root Biomass, Surface Area, and Nutrient Contents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Ecology*. Vol. 94, pp. 7362 - 7366.
- Jaramillo, V.J.; Hernández, R.A.; & Kauffman, J.B. 2003. Root Biomass and Carbon in a Tropical Evergreen Forest of Mexico: changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Journal of Tropical Ecology* n. 19, p. 457-464.
- Jobbagy, E.G; & Jackson, R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), p. 423– 436

- Jordan, C.F. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. Principles and their application in management and conservation. *John Wiley & Sons*, New York.
- Kato, O.R; Kato, M.S.A; Denish, M; Folster, H. & Vlek, P.L.G. 2000. Dinâmica de nutrientes na solução do solo em sistema de cultivo sem o uso do fogo no preparo de área no Nordeste Paraense. *Seminário sobre manejo da Vegetação Secundária para a Sustentabilidade da Agricultura Familiar da Amazônia Oriental. Anais* ,83-84, Belém-PA.
- Klinge, H; & Herrera, R. 1978. Biomass studies in Amazon caatinga forest in southern Venezuela: standing crop of composite root mass in selected stands. *Tropical Ecology*. n. 19: p. 93-100.
- Klinge, H. e Rodrigues, W.A. 1973. Biomass estimation in a Central Amazonian rain forest. *Acta Cientia Venezuelana*. n. 24: p. 225-237.
- Laurance, W.F; Cochrane, M.A.; Bergen, S.; Fearnside, P.M.; Delamônica, P.; Barber, C.; D'angelo, S.; Fernandes, T. 2001. The Future of the Brazilian Amazon. *Science*. V. 291. n. 5503, p. 438-439.
- Laurance, W.F; Fearnside, P.M; Laurance, S.G; Delamonica, P; Lovejoy, T.E; Merona, J.M.R; Chambers, J.Q; Gascon, C. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*. n. 118. p. 127-138.
- Laurance, W.F.; Laurance, S.G.; Ferreira, L.V.; Rankin-de Merona, J.M.; Gascon, C.; Lovejoy, T.E. 1997. Biomass Collapse in Amazonian Forest Fragments. *Science* 278, 1117 (1997).
- Laurance, W.F.; Nascimento, H.E.M.; Laurance, S.G.; Andrade, A.C.; Fearnside, P.M.; Ribeiro, J.E.L.; & Capretz, R.L. 2006. Rain forest fragmentation and the proliferation os successional trees. *Ecology*, n. 87 (2), p. 469-482.
- Liang, B; Lehmann, J; Solomon, D; Kinyangi, J; Grossman, J; O'Neill, B; Skjemstad, J.O; Thies, J; Luizão, F.J. 2006. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America*. p. 1719–1730.
- Lima, A.J.N. 2001. Análise da estrutura e do estoque de fitomassa de florestas secundárias, resultantes de corte raso seguido de queimada, da região de Manaus (AM). Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, Amazonas, 71p.

- Lima, A.J.N.; Teixeira L.M.; Carneiro, V.M.C.; Santos, J.S.; Higuchi, N. 2007. Análise da estrutura e do estoque de fitomassa de uma floresta secundária da região de Manaus AM, dez anos após corte raso seguido de fogo. *Acta Amazonica* Vol. 37(1): 49-54.
- Luizão, F.J. 1989. Litter production and mineral element input to the forest floor in a Central Amazonian forest. *GeoJournal*, 19(4): 407-417.
- Luizão, F.J. 2007. Ciclos de Nutrientes na Amazônia: Respostas às Mudanças Ambientais e Climáticas. Mudanças Climáticas/Artigos. 4 NT SBPC 20.qxd 6/15/07 12:23 PM Page 31.
- Luizão, F.J; Luizão, R.C.C; Proctor, J. 2007. Soil acidity and nutrient deficiency in central Amazonian heath forest soils. *Plant Ecology*. n. 192. p. 209–224.
- Luizão, F.J. & Vasconcelos, H.L. 2005. Floresta Tropical Úmida (Manaus) - Site 1.
- Luizão, R.C.C.; Luizão, F.J.; Paiva, R.Q.; Monteiro, T.F.; Souza, L.S. & Kruijt, B. 2004. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. *Global Change Biology*, n. 10. p. 592-600.
- Machado, P.L.O. de A. 2005. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. Embrapa Solos – RJ. *Química Nova*, Vol. 28, n. 2. p. 329-334.
- Magalhães, L.M.S. 1999. Concentração e distribuição de nutrientes nas folhas de espécies florestais na Amazônia Central. *Floresta e Ambiente* v. 6 n. 1, p. 127 – 137.
- Makana, J. R. & Thomas, S.C. 2006. Impacts of selective logging and agricultural clearing on forest structure, floristic composition and diversity, and timber tree regeneration in the Ituri Forest, DR Congo. *Biodiversity and Conservation*. 67-68.
- Malhi, Y; Baldocchi, D.D; Jarvis, P.G. 1999. The carbon balance of Tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*. n. 22. p. 715-740.
- Malhi, Y.; Roberts, J.T.; Betts, R.A.; Killen, T.J.; Li, W.; Nobre, C.A. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science* 319, 169.
- Marques, J.D.O; Luizão, F.J; Luizão, R.C.C; Neto, A.S. 2007. Variação do carbono orgânico em relação aos atributos físicos e químicos do solo ao longo de uma topossequência na Amazônia Central. *Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil*, Caxambu – MG.
- Martins, L.F.S; Poggiani, F.; Oliveira R.F.; Guedes, M.C.; Gonçalves, J.L.M. 2004. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de bio-sólido. *Scientia Forestalis* nº 65, p. 207 – 218, jun. 2004.

- Matamala, R.; González-Meler, M.A.; Jastrow, J.D.; Norby, R.J.; Schlesinger, W.H. 2003. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science*, v. 302. p. 1385.
- Mesquita, R.C.G.; Ickes, K.; Ganade, G.; & Williamson, G.B. 2001. Alternative successional pathways in the Amazon Basin. *Journal of Ecology*. 89:528-537.
- Mooney, H.A.; & Sombroek, W.G. 1992. Chapter 9. Terrestrial Systems. *International Soil Reference and Information Centre*. Cambridge Univ. USA. p. 173-186.
- Moreira, M.P. 2003. O uso de sensoriamento remoto para avaliar a dinâmica de sucessão secundária na Amazônia central. INPA/UFAM. 103 p. Dissertação de mestrado.
- Moutinho, P. & Schwartzman, S. 2005. Tropical deforestation and climate change - Belém - Pará - Brasil: IPAM - Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia; Washington DC - USA : Environmental Defense, 2005.
- Nepstad, D.C.; De Carvalho, C.R.; Davidson, E.A. et al. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycle of Amazonian forests and pastures. *Nature*, n. 372, p. 666–669.
- Nepstad, D.C.; Moutinho, P.; Dias-Filho, M.B.; Davidson, E.; Cardinot, G.; Markewitz, D.; Figueiredo, R.; Vianna, N.; Chambers, J.; Ray, D.; Guerreiros, J.B.; Lefebvre, P.; Sternberg, L.; Moreira, M.; Barros, L.; Ishida, F.Y.; Tohlver, I.; Belk, E.; Kalif, K.; Schwalbe, K.. 2002. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, N. D 20, 8085.
- Nepstad, D.C.; UHL, C.; Pereira, C.A.; Silva, J.M.C. 1996. A comparative study of tree establishment in abandoned pasture and mature forest of eastern Amazonia. *Oikos*, 76: 25-39.
- Nepstad, D.C.; Veríssimo, A.; Alencar, A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potterk, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M.; Brooks, V. 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*. v. 398. 8 april 1999.
- Nogueira, E.M.; Nelson, B.W.; Fearnside, P.M. 2006. Volume and biomass of trees in central Amazonia: influence of irregularly shaped and hollow trunks. *Forest Ecology and Management*, 227:14–21.
- Novaes Filho, J.P.; Selva, E.C; Couto, E.G; Lehmann, J; Johnson, M.S; Riha, S.J. 2007. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.31, n.1, p.83-92.

- Novais, R.F. 1977. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Tese de Doutorado, North Carolina State University, Raleigh. 153p.
- Novais, R.F. & Smyth, T.J. 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 399 p.
- Oliveira, F.L. 2009. Dinâmica de nutrientes em florestas secundárias de terra firme na Amazônia Central. Dissertação de mestrado. INPA – UFAM.
- Overman, J.P.M.; Witte, H.J.L.; Saldarriga, J.G. 1994. Evaluation of Regression Models for Above-ground Biomass Determination in Amazonia Rainforest. *Forest Ecology and Management*, v.10, p.207-218.
- PDBFF, 1999. Dados de pluviosidade das reservas. Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais. Amazonas, Manaus.
- PDBFF, 2003. Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais – convênio INPA & SI.
- Pereira, C.A.; Vieira, I.C.G. 2001. A importância das florestas secundárias e os impactos de sua substituição por plantios mecanizados de grãos na Amazônia. *Interciência*, 26(8): 337-341.
- Pinto, F.R. 2008. Estimativa dos estoques de biomassa e nutrientes em florestas secundárias na Amazônia central. Dissertação de mestrado – INPA/UFAM. 162 p.
- Poggiani, F. & Schumacher, M.V. 2000. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p. 287-308.
- Pregitzer, K.S. 2002. Fine roots of trees – a new perspective. *New Phytologist*, n.154, p. 267–270.
- RADAMBRASIL, 1978. Levantamento de recursos naturais. Folha AS 20, Manaus, p. 261. Ministério de Minas e Energia: Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro.
- Ranzani, G. (1980) Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica*, 10, 7–41.
- Rennolls, K. & Peace, A. Flow models of mortality and yield for unthinned forest stands. *Forestry, London*, v. 59, n. 1, p. 47-58, 1986.
- Rodin, P. 2004. Distribuição da biomassa subterrânea e dinâmica de raízes finas em ecossistemas nativos e em pastagem plantada no cerrado do Brasil Central. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil.
- Rolim, M.B. & Ferreira, M. 1974. Variação da densidade básica da madeira produzida pela *Araucaria angustifolia* em função dos anéis de crescimento. IPEF n. 9, p. 47 – 55.

- Rossi, L.M.B.; Koehler, H.S.; Sanquetta, C.R.; Arce, J.E. 2007. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. *Floresta – Curitiba, PR*, vol. 37, n. 2.
- Sabaté, S.; Sala, A.; Gracia, C.A. 1995. Nutrient content in *Quercus ilex* canopies: Seasonal and spatial variation within a catchment. *Plant and Soil*, v. 168/169, p. 297 – 304.
- Salomão, R.P.; Nepstad, D.C.; Vieira, I.C.G. 1996. Como a biomassa de florestas tropicais influi no efeito estufa. *Ciência Hoje*, v.21, n.122, p. 38-47.
- Santos, J. dos. 1996. Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. Doctor's Thesis, Universidade de Viçosa. Viçosa-MG. 121p.
- Sengik, E.S. 2003. Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas. 22p. Disponível em: <www.nupel.uem.br/nutrientes-2003.pdf> Acesso em: novembro de 2008.
- Silva, C.E.M.; Gonçalves, J.F.C.; Feldpausch, T.R.; Luizão, F.J.; Morais, R.R.; Ribeiro, G.O. 2006. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia Central. *Acta Amazônica* vol. 36(4) 2006: 503 – 512.
- Silva, R.P. 2007. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de doutorado – INPA/UFAM. 151p.
- Sombroek, W.G; Sutmoller, P ; Vahia de Habreu, A.C; Grift, V.J. 1966. Mineral imbalances in cattle in the Amazon Valley. *Royal Tropical Institute Amsterdam*, Amsterdam, v. 53.
- Sombroek, W.G. 1984. Soils of the Humid Tropics; state of knowledge and research priorities. 1º Simpósio do Trópico Úmido, CPATU, Belém – PA, Brasil.
- Steininger, M.K. 2000. Secondary Forest Structure and Biomass Following Short and Extended Land-use in Central and Southern Amazonian. *Journal of Tropical Ecology*, 16: 689-708.
- Strand, A.E; Pritchard, S.G; McCormack, M.L; Davis, M.A; Oren, R. 2008. Irreconcilable differences: fine-root life spans and soil carbon persistence. *Science* 319, p. 456.
- Sullivan, A.D.; Clutter, J. L. 1972. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. *Forest Science*. 18: 76-86.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of Carbon by Soil. *Soil Science*. Vol. 166. n. 11. p. 858-871.

- Telles, E.D.C; Camargo, P.B; Martinelli, L.A et al. 2003. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, n. 17, p. 10-40.
- Trumbore, S; Costa, E.S; Nepstad, D.C; Camargo, P.B; Martinelli, L.A; Ray, D; Restom, T; Silver, W. 2006. Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration. *Global Change Biology*. n. 12, p. 217–229.
- Uhl, C.R. Buschbacher, F.A.S. Serrão. 1988. Abandoned pastures in eastern Amazônia. I. Patterns of plant succession. *Journal of Ecology*, 76:663-681.
- Uhl, C. R.; Clark, H.; Clark, K.; Marquirino, P. 1982. Sucessional petterns associated with slash-andburn agriculture in the upper Rio Negro Region of the Amazon Basin. *Biotropica*, 14: 249-254.
- Uhl, C.R. & Jordan, C.F. 1984. Succession and nutrient dynamics following forest cutting and burning in Amazonia. *Ecology* 65: 1476-1490.
- Valcarcel, R.; Valente, F.D.W.; Morokawa, M.J.; Cunha Neto, F.V.; Pereira, C.R. 2007. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo submetida a diferentes composições de espécies. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.31, nº5, p.923-930.
- Vargas, R.; Allen, M.F.; Allan, E.B. 2008. Biomass and carbon accumulation in fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology*. n. 14, 109-124.
- Vieira, I.C.G; Almeida, A.S.A; Davidson, E.A; Stoneb, T.A; Carvalho, C.J.R; Guerrero, J.B. 2003. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. *Remote Sensing of Environment*. n. 87, p. 470–481.
- Vitousek, P. M.; Sanford, R. L. Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology and Syatematics*. 17: 137 – 167.
- Vitousek, P.M.; White, P.S. 1981. Process studies in succession. In: Forest succession, concepts and application. D.C. West, H.H. Shugart and D.B. Botkin (eds.), 267-276. Springer Verlag, New York.
- Walker, I.; Franken, W. 1983. Ecosystemas frágeis: a floresta da terra firme da Amazônia Central. *Ciencia Interamericana*, 23: 9-21.
- Zarin, D.; Davidson, E.; Brondizio, E.; Vieira, I.C.; Sa´, T.; Feldpausch, T.; Mesquita, R.; Moran, E.; Delamonica, P.; Ducey, M.; Salimon, C.; Denich, M. 2005. Legacy of

fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Front. Ecol. Environ.* 3, 365–369.

Anexo I

Estimativas de biomassa em diferentes tipologias na Amazônia (Mg ha⁻¹).

Localidade	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Fonte	Ano
<i>Fazenda Dimona, Manaus, AM</i>	265,0	Fearnside	1994
<i>Reserva Egler, Manaus, AM</i>	357	Fearnside	1994
<i>Projeto Jari, AP</i>	438	Fearnside	1994
<i>UHE Samuel, RO</i>	387,9	Fearnside	1994
<i>UHE Belo Monte, PA</i>	186,1	Fearnside	1994
<i>UHE Babaquara, PA ciliar densa</i>	297,4	Fearnside	1994
<i>UHE Babaquara, PA terra-firme Manaus, AM</i>	198,3	Fearnside	1994
<i>Jari, AP</i>	368,9	Fearnside	1994
<i>Paragominas, PA</i>	336	Fearnside	1994
<i>Sul do Pará, PA</i>	228	Higuchi <i>et al.</i>	1994
<i>Sul de Roraima, RR</i>	185	Higuchi <i>et al.</i>	1994
<i>ZF-2, Manaus, AM</i>	349,8	Higuchi <i>et al.</i>	1998
<i>UHE Balbina, AM</i>	252,1	Irmão e Higuchi	1999
<i>Trombetas, PA</i>	241,7	Irmão e Higuchi	1999
<i>Rio Arinos, MT</i>	179,2	Irmão e Higuchi	1999
<i>PDRI/Acre, AC</i>	243,8	Irmão e Higuchi	1999
<i>CEAM, AM</i>	218,8	Irmão e Higuchi	1999
<i>Autazes, AM</i>	163	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Barreirinha, AM</i>	260	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Boa V. do Ramos, AM</i>	49	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Borba, AM</i>	223	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Maués, AM</i>	191	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Nova O. do Norte, AM</i>	209	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Parintins, AM</i>	280	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Urucurituba, AM</i>	89	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Tarumã mirim, AM</i>	250,2	Lima <i>et al.</i>	1999
<i>Manacapuru, AM</i>	286,7	Lima <i>et al.</i>	2005
<i>Auati Paraná, AM</i>	317,3	Lima <i>et al.</i>	2005
<i>Resex Jutaí, AM</i>	320,3	Lima <i>et al.</i>	2005

Fonte: Pinto (2008).

Estimativas de biomassa em florestas secundárias na Amazônia (Mg ha⁻¹).

Localidade	Biomassa (Mg ha ⁻¹)
<i>Manaus</i>	64,2
<i>Alto Rio Negro</i>	43,9
<i>Paragominas</i>	59,9
<i>Altamira</i>	47,5
<i>Distrito Agropecuário</i>	14,0

Fonte: Lima (2001).

Anexo II – Pontos de GPS dos transectos (100 m comprimento x 40 m largura) nas áreas de capoeira do PDBFF. Estudo sobre biomassa de raízes.

Transecto	Local	Nome do ponto (GPS)	Coordenadas (UTM) - Norte			Coordenadas (UTM) - Leste		
			0m	50m	100m	0m	50m	100m
T14	Fazenda Dimona	106-107-108	9742612	9742646	9742691	0823326	0823353	0823387
T16	Fazenda Dimona	103-104-105	9741493	9741532	9741582	0823155	0823164	0823181
T05	Florestal	144-145-146	9734822	9734794	9734776	0182394	0182439	0182483
T01	Colosso	135-136-137	9733963	9733917	9733876	0181059	0181036	0181013
T03	Cabo Frio	150-151-152	9733926	9733926	9733933	0178475	0178541	0178594
T04	Cabo Frio	147-148-149	9734153	9734104	9734052	0179671	0179683	0179698
T06	Florestal	138-139-140	9735207	9735202	9735191	0182312	0182270	0182216
T07	Florestal	141-142-143	9735099	9735106	9735105	0182258	0182215	0182176
T12	Fazenda Porto Alegre	116-117-118	9737761	9737740	9737721	0169898	0169938	0169978

Fonte: PDBFF. Foram realizadas três medidas através do GPS ao longo do transecto (0 – 50 – 100 m).

Anexo III

Número do transecto (Projeto Pioneiras - PDBFF), idade da capoeira (anos desde a queima), biomassa (Mg ha^{-1}), número de indivíduos (1000 m^2), número de espécies (1000 m^2) e DAP mínimo empregado (cm).

Transecto	Idade atual	Biomassa	Nº de indivíduos	Nº de espécies	DAP mínimo
T1	20	104,79	248	54	2
T2	13	44,69	2260	200	1
T3	20	147,91	615	165	2
T4	20	172,57	680	130	2
T5	18	95,31	316	42	2
T6	25	183,17	290	157	3
T7	25	200,47	350	200	3
T8	18	96,67	364	54	2
T9	17	60,64	312	36	2
T10	11	35,66	352	68	2
T11	17	79,15	464	56	2
T12	25	132,69	390	183	3
T13	25	149,99	317	197	3
T14	14	31,52	1490	60	1
T15	18	132,31	460	28	2
T16	16	34,52	1370	140	1
T17	26	101,94	333	140	3
T18	11	8,28	280	6	Ind. > 1,5 m
T19	13	63,10	203	27	3
T20	16	144,02	132	42	3
T21	13	72,26	273	62	3

Fonte: Moreira (2003).

Anexo IV

Ficha de campo utilizada para coleta dos dados (volume e massa).

Monólito	Camada	MF	F	M	G
1	S				
	A				
	B				
	C				
2	S				
	A				
	B				
	C				
3	S				
	A				
	B				
	C				
4	S				
	A				
	B				
	C				

Anexo V

Data das escavações dos monólitos nas áreas do PDBFF: estudo sobre biomassa de raízes.

Transecto	Monólito	Data da escavação
T 14	1	09/10/2008
T 14	2	10/10/2008
T 14	3	11/10/2008
T 14	4	12/10/2008
T 16	1	01/11/2008
T 16	2	02/11/2008
T 16	3	03/11/2008
T 16	4	04/11/2008
T 05	1	09/08/2008
T 05	2	10/08/2008
T 05	3	16/08/2008
T 05	4	17/08/2008
T 01	1	12/09/2008
T 01	2	13/09/2008
T 01	3	14/09/2008
T 01	4	15/09/2008
T 03	1	23/11/2008
T 03	2	24/11/2008
T 03	3	25/11/2008
T 03	4	26/11/2008
T 04	1	18/11/2008
T 04	2	19/11/2008
T 04	3	20/11/2008
T 04	4	22/11/2008
T 06	1	08/09/2008
T 06	2	09/09/2008
T 06	3	10/09/2008
T 06	4	11/09/2008
T 07	1	18/08/2008
T 07	2	19/08/2008
T 07	3	20/08/2008
T 07	4	21/08/2008
T 12	1	07/08/2008
T 12	2	16/09/2008
T 12	3	17/09/2008
T 12	4	18/09/2008