



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**SIRLENE DE LIMA CASTRO**

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO E BIOMASSA DE  
RAÍZES FINAS AO LONGO DE UM GRADIENTE  
TOPOGRÁFICO NA FLORESTA DE CAXIUANÃ-PA**

Belém

2013

**SIRLENE DE LIMA CASTRO**

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO E BIOMASSA DE RAÍZES FINAS AO  
LONGO DE UM GRADIENTE TOPOGRÁFICO NA FLORESTA DE  
CAXIUANÃ-PA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a EMBRAPA Amazônia Oriental, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Sócio-ambientais.

Orientador: Prof.Dr. José Henrique Cattanio

Belém

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA - SIB

---

C355e Castro, Sirlene de Lima

Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo e biomassa de raízes finas ao longo de um gradiente topográfico na Floresta de Caxiuanã-PA / Sirlene de Lima Castro; Orientador: José Henrique Cattanio - 2013.

65 f.; il

Dissertação (mestrado em ciências ambientais) – Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2013.

1. Floresta tropical. 2. Floresta primária. 3. Variação topográfica. 4. Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo. 5. Biomassa de raízes. 6. Sazonalidade. 7. Caxiuanã. I. Cattanio, José Henrique, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22º ed.: 577.30913

---

**SIRLENE DE LIMA CASTRO**

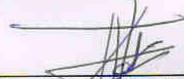
**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO BIOMASSA DE RAÍZES FINAS AO LONGO DE UM GRADIENTE TOPOGRÁFICO NA FLORESTA DE CAXIUNÃ-PA**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Área de Ecossistemas Amazônicos e Dinâmica Sócio-Ambiental

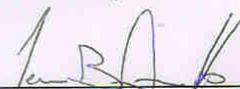
Orientador: Dr. José Henrique Cattanio

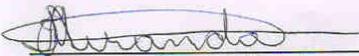
Data de aprovação: 07 / 05 / 2013

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
José Henrique Cattanio  
Universidade Federal do Pará

Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Jean Pierre Henry Balbaud Ometto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

  
\_\_\_\_\_  
Izildinha de Souza Miranda  
Universidade Federal Rural da Amazônia

  
\_\_\_\_\_  
Everaldo Barreiros de Souza  
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho aos meus pais,  
**Silas da Silva Castro** e **Maria José  
de Lima Castro**, e a todos aqueles  
que estiveram presentes nessa etapa  
da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus pela vida, saúde e força que tem me concedido, e por ter me sustentado e me renovado a cada dia para que eu pudesse vencer os obstáculos nas diversas etapas deste trabalho.

Á Universidade Federal do Pará (UFPA), Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Amazônia Oriental pelo curso de mestrado.

Ao orientador Dr. José Henrique Cattanio pela orientação durante o curso de mestrado.

Á Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES pela concessão de bolsa durante dois anos.

Ao projeto Rede de mudanças climáticas e ambientais do Pará: uma perspectiva de estudos integrados com suporte da FAPESPA/CNPq (Processo nº331089/2009) pelo financiamento das viagens a campo e na compra dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi pela concessão do uso do laboratório de análise de solo para a análise de Carbono orgânico do solo.

Ao Projeto Essecafloor, pela disponibilidade dos dados de sua estação automática na Floresta Nacional de Caxiuanã.

Ao técnico do Laboratório de Sedimentologia, Minerais pesados e Paleobiologia da Universidade Federal do Pará, João Lopes, pela amizade e pela disponibilização do equipamento necessário a triagem, secagem e pesagem das raízes.

Aos auxiliares de campo, pelo apoio em todas as viagens de coletas na Estação Científica Ferreira Penna e pelo carinho e amizade.

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim e por me apoiarem incondicionalmente, aos meus irmãos pelo apoio e paciência que a mim dedicaram, ao meu amigo João Reis que durante a preparação desse trabalho foi um grande incentivador, e por estar sempre pronto a me ajudar durante as diversas dificuldades

enfrentadas durante todo o período deste curso, ao meu namorado Marcus Santana por me ajudar na reta final deste trabalho me incentivando e orando por mim .

Aos amigos de classe de mestrado, Carla Daniele, Josy Monteles, Marcela Pompeu, Pedro Pereira pelas pela amizade e companheirismo e em especial a Renata Kelen por ser uma companheira e em diversas etapas deste trabalho, e a Quêsia Leandro de Moura pela amizade e por ter me auxiliado nas análises de solo no Laboratório.

A todas as pessoas e instituições que direta ou indiretamente colaboraram com o meu trabalho.

*“Feliz é o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire entendimento.”*

(Provérbios 3: 13)

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi entender o papel de pequenas elevações topográficas no efluxo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do solo, comparando diferentes períodos sazonais, na Floresta Nacional de Caxiuanã, Amazônia Oriental. Foram selecionados dois transectos com cerca de 17m de gradiente topográfico, um iniciado próximo à margem de um Igarapé permanente e outro nas proximidades de um Igarapé intermitente, denominados neste trabalho como Transecto1 e Transecto2, respectivamente. Em cada transecto foram selecionados quatro locais para a coleta e medição dos dados denominados de baixo, médio baixo, médio alto e platô. Nesses locais foram feitas leituras do efluxo de CO<sub>2</sub> e da temperatura do solo, também foram feitas coletas de solo para análise de carbono orgânico e para análise de biomassa de raízes finas (<2 mm) em diferentes intervalos de profundidade. Observou-se diferença significativa na concentração do carbono orgânico do solo entre os transectos, quando comparando na camada superficial do solo (0-10 cm) na topografia de baixo, onde o transecto que se inicia à margem do igarapé intermitente teve o teor de carbono orgânico significativamente maior. Foi observado também, uma redução no teor de carbono orgânico do solo com a profundidade, porém não foram encontradas diferenças do teor de carbono orgânico com a variação topográfica. Nos resultados relacionados à biomassa de raízes finas superficiais, encontramos valores médios de 382,47 ± 25,46 g m<sup>-2</sup> para o mês seco e 298,24 ± 23,50g m<sup>-2</sup> para o mês chuvoso, reunindo ambos transectos. De uma maneira geral houve uma redução na biomassa de raízes finas com o aumento da profundidade do solo sendo que na camada superficial (0-30 cm) está concentrada a maior biomassa de raízes, com mais de 80% do total da biomassa de raízes do solo para ambos transectos, sendo que não foram encontradas diferenças significativas na biomassa de raízes entre e dentro dos transectos. Para os mesmos horários foi encontrado maior efluxo na topografia de baixo em comparação ao platô. A sazonalidade também possui efeito no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, tendo o mês de agosto (mês de transição) a maior média de efluxos de CO<sub>2</sub> e o mês de março (mês chuvoso) a menor média de efluxo, independente da posição topográfica.

Palavras-chave: Floresta tropical. Floresta primária. Variação topográfica. Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo. Biomassa de raízes. Sazonalidade. Caxiuanã.

## ABSTRACT

The objective of this research was to understand the role of small topographic elevations in the soil carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) efflux comparing different seasonal period in the National Forest of Caxiuanã, oriental Amazon. Were selected two transects with about 17m topographic gradient, the first initiated near the border of a permanent stream and the second standing near an intermittent stream, denominate in this work as Transect1 and Transect2, respectively. In each transect were selected four locations for the collection and measurement of data called lowland, middle lowland, middle plateau and plateau. At these sites were conducted CO<sub>2</sub> efflux and soil temperature analysis, and soil samples for organic carbon analysis and fine root (<2 mm) biomass studies at different depth intervals. It was observed a significant difference in the soil organic carbon concentration compared in the soil surface layer (0-10 cm) in lowland topography, where the transect that begins in the board of the intermittent stream had the significantly higher organic carbon content. It was also observed a soil organic carbon reduction with depth, but there were no differences in organic carbon content with topographic variation. Bringing together both transects, the results related to superficial fine root biomass, it was found mean values of  $382.47 \pm 25.46 \text{ g m}^{-2}$  for the dry months and  $298.24 \pm 23.50 \text{ g m}^{-2}$  for the rainy months. In general there was a reduction in fine root biomass by increasing the soil depth, and in the surface layer (0-30 cm) is concentrated to greater root biomass with more than 80% of total root biomass for both transects. There were significant differences in root biomass among and within transects. For the same time, it was founded higher CO<sub>2</sub> efflux in the lowland topography compared to the plateau. Seasonal variation also has effect on soil CO<sub>2</sub> efflux, with the month of August (transitional month) having the highest CO<sub>2</sub> effluxes and March (rainy month) the lowest CO<sub>2</sub> efflux, independent of topographic position.

Keywords: Tropical Forest. Primary Forest. Topographic variation. Soil CO<sub>2</sub> Efflux. Root biomass. Seasonality. Caxiuanã.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 -Ciclo global do carbono com estoques (retângulos em Pg C =  $10^{15}$  g C) nos diferentes compartimentos da terra e fluxos (setas) de carbono (em Pg C ano<sup>-1</sup>). ..... 18
- Figura 2 - Localização da Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço e Portel, Pará. .28
- Figura 3 -Plano amostral indicando os dois transectos analisados, sendo o Transecto 1 em direção ao Igarapé Curuá (sentido leste-oeste) e o Transecto 2 em direção a área periodicamente alagada (sentido norte-sul).....31
- Figura 4 -Esquematização dos locais onde foram as medições em um perfil de declividade na Floresta Nacional de Caxiuanã.....32
- Figura 5 - Etapas da coleta e processamento das amostras de solo para retirada das raízes.....34
- Figura 6- Precipitação mensal do ano de 2011 e janeiro a março de 2012 na FLONA de Caxiuanã (disponibilizado pelo Projeto de Estudo da Seca na Floresta (ESECAFLOR)). As barras cinza e verdes são a precipitação no ano de 2011 e 2012 respectivamente e a linha vermelha é a média climatologica da precipitação de 25 anos. ....36
- Figura 7 - Biomassa de raízes finas ( $\leq 2$  mm) superficiais (0-10 cm) nos Transectos 1 e 2 no mês de novembro de 2012 e março de 2013 nas topografias de baixio (A), médio baixio (B), médio alto (C) e platô (D). ....39
- Figura 8- Biomassa de raízes com diâmetro  $\leq 2$  mm em diferentes profundidades no Transecto 1 (a) e Transecto2 (b) nas topografias de baixio (A), médio baixio (B), médio alto (C) e platô (D) em abril de 2011.....41
- Figura 9 - Histograma do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (a) e temperatura do solo a 10 cm de profundidade (b), para todas as observações durante todo o período coleta (a linha vermelha representa a normalidade).....43
- Figura 10–Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de julho no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da

topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00 às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul). .....44

Figura 11–Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de agosto no Transecto 1 e Transecto 2 partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00 às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul). .....45

Figura 12–Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de outubro no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul). .....46

Figura 13- Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de novembro no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul). .....47

Figura 14–Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de março no Transecto 1 e Transecto 2 partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô. (azul). .....48

Figura 15- Comportamento horário do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no Transecto 1 em um dia no mês de outubro das 9:00h às 18:00h na topografia de baixio (laranja) e platô (azul) em intervalos de 30 minutos. ....50

Figura 16- Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (a), e temperatura do solo a 10 cm de profundidade (b) nas topografias de baixio (-◆-), médio baixio (-□-), médio alto (-▲-) e de platô (-○-). Barras de erro representam ± erro padrão da média. ....51

Figura 17- Dispersão do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo com a temperatura do solo na profundidade de 10 cm.....53

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	17
1.2.1	<b>Objetivos Específicos</b> .....	17
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
2.1	ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO.....	18
2.2	FLUXO DE CO <sub>2</sub> DO SOLO.....	19
2.3	A AMAZÔNIA NO CONTEXTO DO CARBONO.....	20
2.4	RAÍZES FINAS.....	22
2.5	CLIMA DA AMAZÔNIA.....	25
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	28
3.1	CARACTERÍSTICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	28
3.1.1	<b>Localização</b> .....	28
3.1.2	<b>Vegetação</b> .....	29
3.1.3	<b>Clima</b> .....	29
3.1.4	<b>Solo</b> .....	29
3.2	PLANO DE AMOSTRAGEM.....	30
3.3	EFLUXO DE GÁS CARBONO DO SOLO.....	32
3.4	ANÁLISE DE RAÍZES FINAS.....	33
3.5	CARBONO ORGÂNICO DO SOLO.....	35
3.6	ANÁLISE DOS DADOS.....	35
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	36
4.1	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	36
4.2	CARBONO ORGÂNICO DO SOLO.....	37

4.3	AVALIAÇÃO DA BIOMASSA DE RAÍZES.....	39
4.3.1	<b>Variação sazonal.....</b>	39
4.3.2	<b>Variação com a profundidade.....</b>	40
4.4	EFLUXO DE CO <sub>2</sub> DO SOLO.....	42
4.4.1	<b>Valores médios.....</b>	42
4.4.2	<b>Comportamento mensal do efluxo de CO<sub>2</sub>.....</b>	43
4.4.3	<b>Variação do efluxo com os meses em cada bloco, nos diferentes transectos.....</b>	50
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	54
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	55
	<b>APÊNDICES .....</b>	63
	<b>APÊNDICE A - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO1 (BAIXIO-PLATÔ) .....</b>	64
	<b>APÊNDICE B - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 1 (PLATÔ-BAIXIO).....</b>	64
	<b>APÊNDICE C - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 2 (BAIXIO-PLATÔ).....</b>	65
	<b>APÊNDICE D - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 2 (PLATÔ-BAIXIO).....</b>	65

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o interesse em estudar o ciclo do carbono tem aumentado entre os pesquisadores devido à importância do gás dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuja concentração tem aumentado em proporções nunca registradas devido a ações antrópicas, esse aumento ocasiona a intensificação do efeito estufa, cujo resultado é um aquecimento global, conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2008).

O armazenamento global do carbono orgânico do solo na camada a cima de 3m de profundidade é 2.344 Pg C (JOBÁGY; JACKSON, 2000), ou seja, pequenos aumentos ou diminuição na quantidade de carbono nos solos ocasionados pela mudança do uso da terra pode ter um grande impacto sobre a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (TRUMBORE; CHADWICK; AMUNDSON, 1996). A Amazônia vem sendo submetida a pressões ambientais de origem antrópica crescentes nas últimas décadas e a estabilidade climática, ecológica e ambiental das florestas tropicais amazônicas está ameaçada por crescentes perturbações (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2007). Grande parte dos modelos de mudanças climática global preveem uma perda de carbono dos solos, com a elevação da temperatura média global (SCHIMMEL et al., 1994; SCHLESINGER; ANDREWS, 2000). Assim, a compreensão dos mecanismos e dos fatores da dinâmica do carbono orgânico no solo da floresta são importantes para identificar e valorizar sumidouros naturais para o sequestro de C, de forma a mitigar as mudanças climáticas (LAL, 2005).

Desta forma diversos autores mostram o papel dos ambientes terrestres como fonte ou sumidouro desse gás, dentre os quais temos o ecossistema de floresta tropical (GRACE et al., 1995; MALHI et al. 1998; MALHI; BALDOCHIE; JARVIS, 1999; HOUGHTON et al., 2000; NOBRE; NOBRE, 2002; NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2007). Especificamente, a Amazônia tem sido alvo de pesquisa por diversos projetos, como por exemplo, o Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (sigla em inglês LBA), que tem como um dos focos de pesquisa encontrar as relações entre as mudanças climáticas e o ciclo do carbono na Amazônia e entender o papel da floresta no clima global. Em um artigo de revisão de diversos estudos do projeto LBA, Ometto et al. (2005) concluíram que apesar do grande número de estudos ainda não se pode definir o papel da Amazônia no fluxo de carbono para a atmosfera. No entanto, estes autores afirmaram que em grande

parte dos estudos foi mostrada a Amazônia como um importante sumidouro do gás CO<sub>2</sub> atmosférico.

Neste contexto, o solo possui um papel fundamental na dinâmica do carbono, pois o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera representa um dos mais importantes fluxos do ciclo global do carbono, e pequenas mudanças na respiração do solo pode causar impactos significativos na atmosfera (SCHLESINGER; ANDREWS, 2000). Com o provável aumento da temperatura média do ar no planeta, por consequência aumentarão a temperatura e a respiração do solo em cerca de 2 vezes a cada aumento de 10°C na temperatura atmosférica (SCHIMEL et al., 1994; MCGUIRE et al., 1995; RAICH; SCHLESINGER, 1992). Pesquisas sugerem que com o aumento da temperatura média do planeta, as maiores perdas de carbono do solo poderiam ocorrer em regiões tropicais (MCGUIRE et al., 1995; TRUMBORE; CHADWICK; AMUNDSON, 1996). No entanto, o efeito do aumento da temperatura na bioquímica do solo ainda não é claro, podendo ser diferente entre as regiões temperadas e tropicais (SOTTA et al., 2006).

O CO<sub>2</sub> liberado pelo solo é resultado da respiração microbiana através do processo de decomposição da liteira e matéria orgânica do solo, bem como da respiração das raízes (SILVER et al., 2005). Além das funções importantes para os vegetais, as raízes exercem um papel importante para o ecossistema, participando dos ciclos biogeoquímicos (NADELHOFFER; RAICH, 1992; JACKSON; MOONEY; SCHULZE, 1997; GORDON; JACKSON, 2000; REUBENS et al., 2007).

As raízes finas são importantes para os ciclos biogeoquímicos, devido sua elevada concentração de nutrientes e uma baixa concentração de lignina celulose, hemicelulose e taninos, o que facilita a decomposição e a disponibilização de nutrientes no solo (SILVER; MIYA, 2001; DORNBUSH; SHISENHART; RAICH, 2002).

As taxas de respiração microbiana e de raízes são influenciadas por diversos fatores tais como tipo de vegetação, clima da região, umidade e nutrientes do solo (TIAN, 1998; ADUAN; VILELA; KLINK., 2003; D'ANDRÉA, 2004; SOTTA et al., 2006, LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2010). Além dessas variáveis, Sotta et al. (2006,) também revelaram variações do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo relacionadas à textura do solo e a posição topográfica na floresta. Poucas informações existem em relação

ao aspecto da variação topográfica na análise do fluxo de carbono na Amazônia, e sabe-se que, apesar da floresta aparentar uma cobertura uniforme e contínua, existe variações em relação à topografia que podem influenciar tanto a biomassa florestal como o armazenamento e a ciclagem de C (LUIZÃO et al., 2004; CASTILHO et al., 2006).

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Objetiva-se, de forma geral, entender o papel de pequenas elevações topográficas no efluxo do CO<sub>2</sub> do solo em diferentes períodos sazonais na Flona de Caxiuanã (PA).

### 1.2.1 Objetivos Específicos:

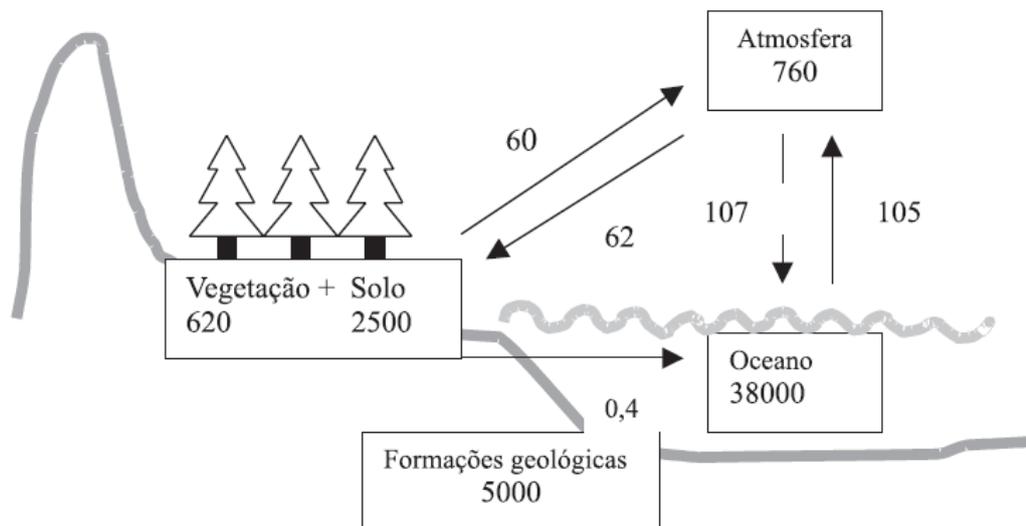
- ✓ Avaliar o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em áreas periodicamente inundadas (baixio), e em três alturas topográficas na Floresta Umbrófila densa (médio baixio, médio alto e platô);
- ✓ Caracterizar o solo em termos de biomassa radicular até a profundidade de 2 m nas alturas topográficas acima citadas;
- ✓ Associar os efluxos de CO<sub>2</sub> do solo com a sazonalidade da precipitação e como a temperatura do solo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

Os solos possuem um papel importante no estoque e nos fluxos de C (Figura 1), sendo o terceiro maior compartimento de C da terra (2.500 Pg C), inferior apenas ao reservatório presente no oceano (38.000 Pg C) e em formações geológicas (5.000 Pg C) (MACHADO, 2005), com estimativas de carbono orgânico armazenado no primeiro metro de solo na faixa de 1.220 a 1.550 Pg (SCHLESINGER, 1997; POST et al., 1982; SCHLESINGER, 1984). As florestas são responsáveis por mais de 75 % do carbono armazenado nos ecossistemas terrestres e aproximadamente 40% da troca de carbono entre atmosfera e a biosfera terrestre a cada ano (SCHLESINGER, 1997).

Figura 1 - Ciclo global do carbono com estoques (retângulos em Pg C =  $10^{15}$  g C) nos diferentes compartimentos da terra e fluxos (setas) de carbono (em Pg C ano<sup>-1</sup>).



Fonte: Machado, 2005.

O carbono orgânico do solo representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido ou para a atmosfera via atividade microbiana, sendo que os principais processos responsáveis pelo sequestro de carbono nos solos são a humificação, agregação e sedimentação, e os processos responsáveis pelas perdas de carbono no solo são a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação (MACHADO, 2005).

O estoque de C em solos é resultado do balanço entre entradas e saídas de C. Em solos sob vegetação natural a entrada se dá pela adição de material vegetal morto, principalmente da decomposição da liteira e do crescimento e morte de raízes, e as saídas são principalmente pelo efluxo de CO<sub>2</sub> quantificado na superfície do solo (BATJES, 1999; DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Uma variedade de elementos climáticos afetam no estoque de carbono orgânico no solo de floresta, tais como temperatura do ar, precipitação, e velocidade do vento (JOBÁGY; JACKSON, 2000; RYAN; LAL, 2005).

Além dos elementos climáticos, existem diversos outros fatores que determinam o estoque e a distribuição de carbono orgânico no solo, como a posição geográfica, inclinação do solo, perturbações naturais como o fogo, secas, pragas e doenças que desencadeiam alterações no regime de temperatura e umidade do solo (LAL, 2005). A fixação de carbono em solos da floresta tem um importante papel de diminuir a taxa do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e fatores antrópicos como desmatamento e a gestão de florestas e terras agrícolas podem afetar a distribuição e o estoque de carbono orgânico no solo e desta forma (LAL, 2005).

O carbono do solo está também relacionado com a textura do solo, principalmente no primeiro metro do solo, aumentando a quantidade de carbono a medida que aumenta o teor de argila (SCHIMEL et al., 1994; JOBÁGY; JACKSON, 2000), além disso, Jobbágy e Jackson (2000) observaram que em regiões de floresta tropical a distribuição de carbono do solo na vertical é mais profunda comparadas com as outras florestas do mundo, destacando as florestas tropicais perenes como os principais contribuintes para armazenamento de carbono orgânico do solo na profundidade de 1 a 3 m com estimativa de 158 Pg C. Estes mesmos autores relatam que a textura do solo desempenha um papel importante no armazenamento de carbono, pois com o aumento do teor de argila, diminuem as saídas de carbono, devido ao seu efeito estabilizador de carbono do solo.

## 2.2 - FLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO

O fluxo de carbono no solo depende da complexa interação entre clima, solos, espécies florestais e de gestão ambiental (LAL, 2005). Contudo o fluxo de CO<sub>2</sub> na interface solo-atmosfera depende de mudanças nas características físicas, químicas

e biológicas na superfície do solo (DIAS, 2006), sendo que o fluxo de  $\text{CO}_2$  é controlado pela produção de  $\text{CO}_2$  no solo e pelo gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$  entre o solo e atmosfera, tendo a porosidade do solo como um fator de relevante importância (RAICH; SCHLESINGER, 1992). Além desses, existem outros fatores que controlam a respiração do solo como a produtividade primária líquida, a qualidade do substrato e a dinâmica da fauna e flora (RYAN; LAL, 2005).

A produção de  $\text{CO}_2$  em solos é na sua maioria proveniente de respiração de raízes e decomposição da matéria orgânica e, como todas as reações químicas e bioquímicas, estes processos são dependentes da temperatura, sendo a decomposição microbiana, sujeita também à limitação de água (DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Schlesinger e Andrews (2000) relataram que as maiores taxas de respiração do solo são encontradas nos trópicos, onde o crescimento da planta é abundante e as condições são ideais para os decompositores, devido aos elevados valores de temperatura e umidade.

Para a medição do fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo geralmente são usadas câmaras que cobrem pequenas áreas e depois os resultados são extrapoladas para uma área maior com características semelhantes de solo, vegetação e clima. Porém estimativas de fluxo de  $\text{CO}_2$  mesmo dentro de uma vegetação homogênea ainda são incertas, devido às variações tanto no espaço como no tempo (HANSON et al., 1993). Atualmente o método mais utilizado para a medição do fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo é através de câmaras de ciclo fechada, estática ou dinâmica, devido o seu baixo custo e fácil manuseio, sendo a estimativa do fluxo de  $\text{CO}_2$  feita através da determinação da taxa de aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  dentro do espaço de amostragem da câmara, por um tempo conhecido (ROCHETTE; GREGORICH; DESJARDINS, 1992; JENSEN et al., 1996).

### 2.3 - A AMAZÔNIA NO CONTEXTO DO CARBONO

A floresta amazônica situa-se na região equatorial e possui um clima quente e úmido, resultante de uma combinação de vários fatores, sendo que o mais importante é a elevada disponibilidade de energia solar nesta região, fazendo com que a temperatura do ar não possua grandes amplitudes anuais (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996).

A região Amazônica possui dois períodos sazonais de precipitação, um com forte atividade convectiva e outro sem grande atividade convectiva, esta região sofre influência de diversos sistemas atmosféricos, dentre eles destacamos o fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) que é responsável por uma grande parte da variabilidade climática em escalas interanuais (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998). Em anos de *El Niño*, que trazem um clima quente e seco para boa parte da região amazônica, Tian et al. (1998) mostraram que o ecossistema amazônico funcionou como uma fonte de carbono para a atmosfera com até 0,2 Pg de C em 1987 e 1992; e em outros anos sem condições de *El Niño*, este ecossistema funcionou como sumidouro de carbono (até 0,7 Pg C em 1981 e 1993).

As mudanças sazonais na temperatura e umidade do solo e determinados eventos sazonais que afetam o ambiente do solo são importantes reguladores da liberação de carbono, pois a temperatura afeta os processos químicos da matéria orgânica do solo e uma precipitação intensa podem deslocar CO<sub>2</sub> pelos espaços vazios dos poros (SCHLESINGER, 1997; DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Dias (2006), estudando o fluxo de CO<sub>2</sub> em alguns pontos na região amazônica, observou nítida variação espacial e sazonal em resposta a mudanças na temperatura e umidade do solo. Porém, a temperatura e a umidade são importantes fatores de variação temporal de efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em um local específico, mas para extrapolar esses efeitos é preciso levar em consideração outras condições como a textura do solo, estoque de liteira e posição topográfica em uma determinada paisagem (SOTTA et al., 2006).

O relevo é um dos fatores que influencia na formação dos solos, pois interferem na penetração da água, afetando, assim a intensidade de intemperismo. O relevo pode ser classificado quanto a sua fertilidade: Na parte alta do relevo ocorre a formação de solos profundos, altamente intemperizados, bastante ácidos e pobres em nutrientes. Em áreas declivosas, há formação de solos mais rasos, menos intemperizados, menos ácidos e com mais nutrientes. Em área de baixada, existe a formação de solos rasos, não muito intemperizados, porém não muito ácidos e normalmente ricos em nutrientes (ZIMBACK, 2003).

Embora a grande maioria dos solos da Amazônia sejam fortemente intemperizados, há considerável heterogeneidade espacial na textura, tanto em nível

local e regional como ao longo dos gradientes topográficos (SOMBROEK, 1966). A topografia pode influenciar de forma indireta no fluxo de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, através das propriedades do solo associado a ela, influenciando no conteúdo de água no solo, afetando a capacidade de decomposição e transformações de nutrientes no solo, e a capacidade de reter carbono, água e nutrientes no solo (KANG et al., 2000; LUIZÃO et al., 2004; SOTTA et al., 2006).

Na floresta amazônica existe uma variabilidade substancial de tipos florestais e biomassa florestal, interagindo com uma variabilidade na fertilidade, na textura e consequentemente na drenagem do solo (LUIZÃO et al., 2004). Estes mesmos autores em estudo realizado na floresta Amazônica Central mostraram haver variação significativa no teor de argila ao longo de um gradiente topográfico, diminuindo de 65% no planalto para 5% no vale. Junto com a textura, algumas outras propriedades também mostraram uma tendência significativa, como o teor de matéria orgânica e umidade do solo.

A textura do solo, a fertilidade do solo e a topografia também explicaram quase um terço da variação da biomassa viva de árvores acima do solo, em um estudo realizado por Castilho et al. (2006) em uma reserva florestal em Manaus. Estes autores relataram que a influência da textura do solo sobre a produtividade pode estar relacionada à disponibilidade de água e nutrientes, afirmando ainda que os efeitos da variação topográfica sobre o acúmulo de biomassa de árvores não são certamente devido apenas topografia por si só, e sim devido às condições ambientais definidas por ela.

#### 2.4 RAÍZES FINAS

A definição de raízes finas varia em diferentes estudos, existem autores que consideram como raízes finas aquelas com diâmetro inferior a 1mm, outros consideram as raízes finas aquelas com diâmetro inferiores a 2, 3 e até 5mm (CAVALIER; ESTEVES; ARJONA, 1996; SUNDARAPANDIAN; SWAMI, 1996; JACKSON; MOONEY; SCHULZE, 1997; CASTELLANOS et al., 2001; VALVERDE-BARRANTES; RAICH; RUSSELL, 2007; LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2010; LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2012).

Em escala global, as raízes finas, com diâmetro inferior a 2 mm representam um estoque superior a 5% de todo o carbono contido na atmosfera e contribuem com

cerca de um terço da produção primária líquida anual global, devido sua vida curta e rápida reposição (JACKSON; MOONEY; SCHULZE, 1997). As raízes finas contribuem com grande quantidade de carbono para o solo, isso foi observado por Jackson; Mooney; Schulze. (1997), que estudando as raízes finas em 11 biomas, encontraram uma proporção de C:N:P igual a 450:11:1, o mesmo foi observado por Gordon e Jackson (2000), os quais estudando biomassa de raízes finas em florestas tropicais, florestas temperadas, florestas boreais e sistema de tundra, encontraram uma proporção total de C:N:P igual a 522:12:1 para raízes com diâmetro inferior a 2 mm.

O tamanho do diâmetro influencia diretamente na decomposição das raízes, ou seja, quanto maior o diâmetro das raízes, maior a porcentagem de hemicelulose, celulose, lignina e carbono que reduz a quantidade de nutrientes como o nitrogênio, dificultando a decomposição, e neste sentido as raízes finas se decompõe mais rapidamente, disponibilizando mais nutrientes para o solo (GORDON; JACKSON, 2000; SILVER; MIYA, 2001; DORNBUSH; SHISENHART; RAICH, 2002).

O desenvolvimento radicular é um processo muito complexo, controlado por diversos fatores ambientais e da própria planta. A quantidade de raízes finas varia com o tipo de vegetação, isso ocorre principalmente devido às diferenças florísticas, pois as características morfológicas e as estratégicas de absorção são muito ligadas às espécies presentes na área (LEUSCHNER et al., 2004). A produção e distribuição das raízes podem ser influenciadas por fatores atrelados ao solo, tais como fertilidade, densidade, textura, temperatura, umidade, disponibilidade de oxigênio, efeito do pH e histórico do tipo de uso da terra (CASTELLANOS, 2001).

A sazonalidade pluviométrica também é um fator que pode influenciar na produção das raízes finas. Vários estudos realizados em floresta tropical mostraram que a produção de raízes finas é maior na estação úmida do que na seca (VISALAKSHI, 1994; CASTELLANO, 2001; JOSLIN; WOLFE; HANSON, 2000). Na estação chuvosa ocorre o aumento da umidade, melhorando as condições físicas do solo, deixando-o menos compactado, o que provoca também um aumento da decomposição da matéria orgânica, favorecida pela maior ação dos micro-organismos, aumentando com isto a disponibilidade de nutrientes e por

consequência uma maior produtividade de raízes finas neste período (PREGITZER; HENDRICK; FOGEL, 1993).

A precipitação não necessariamente reduz a biomassa radicular total, pois as plantas alongam seus sistemas radiculares para também maximizar a absorção de água durante os períodos de menor precipitação (MARKESTEIJN; POORTER, 2009). Existe variação com relação aos resultados encontrados sobre a relação da biomassa radicular com a umidade do solo em estudos realizados em floresta tropical úmida, sendo que alguns autores observaram existir uma relação positiva da biomassa radicular fina com a umidade do solo e nutrientes (CUEVAS; MEDINA, 1988; METCALFE et al., 2008), enquanto outros obtiveram uma relação negativa em seus resultados (SILVER et al., 2000; ESPELETA; CLARK, 2007; LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2010; LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2012).

A maioria das florestas tropicais se desenvolve sobre solos pobres em nutrientes, e as raízes finas possuem um importante papel de aumentar a aquisição de nutrientes e em manter a circulação destes nutrientes no sistema solo-planta (GOWER, 1987). Em solos pobres, o vegetal minimiza o envio de energia para a parte aérea e concentra sua energia para a parte subterrânea aumentando a produção de novas raízes finas, ampliando assim a área em contato com o solo, intensificando a captação de nutrientes (BLAIR; PERFECTO, 2001; LEUSCHNER et al., 2004). Em solos com grande concentração de nutrientes há uma maior longevidade das raízes finas, portanto há uma redução na produção de raízes finas mortas, enquanto que solos pobres em nutrientes a longevidade das raízes finas é baixa, e a taxa de renovação é muito rápida, fato que aumenta a produção de raízes finas mortas (BURTON; PREGITZER; HENDRICK, 2000; DORNBUSH; SHISENHART; RAICH, 2002). Porém o excesso de nitrogênio no solo, que ocorre normalmente na estação chuvosa, pode diminuir a produtividade de raízes finas vivas e aumentar a produtividade de raízes finas mortas (VALVERDE-BARRANTES; RAICH; RUSSELL, 2007).

A distribuição de nutrientes no solo também influencia na variação vertical da massa de raízes, ou seja, nas camadas mais superficiais do solo é maior a disponibilidade de nutrientes, devido à maior quantidade de massa morta, porém a concentração de nutrientes diminui com a profundidade e conseqüentemente a

biomassa de raízes finas também diminui (MCCLAUGHERTY; ABER, 1982; GOWER, 1987; ESPELETA; CLARK, 2007; VALVERDE-BARRANTES RAICH; RUSSELL, 2007).

Existem variedades de metodologias para coleta de raízes finas, porém os métodos mais usuais são: escavação; monólito; trado; perfil de parede; parede de vidro; e recipiente, cada um com suas vantagens, desvantagens e aplicabilidade. A escolha do método depende, entre outros, do objetivo do estudo, da facilidade na coleta dos dados e da disponibilidade de recursos. Os métodos dos trados e dos monólitos são os mais usados em condições naturais de campo, sendo que, após o trabalho de campo, as raízes são lavadas e estudadas quanto à morfologia ou a biomassa de acordo com o objetivo do estudo, e apesar deste método ser trabalhoso e consumir muito tempo, ele é bastante utilizado, pois a partir dele, é possível fazer um estudo tanto qualitativo como quantitativo e possui elevada exatidão nos resultados (BÖHM, 1979).

## 2.5 CLIMA DA AMAZÔNIA

O clima da região Amazônica é influenciado por diversos fatores, com diversas escalas de tempo e espaço, que em conjunto, determinam o clima desta região. Em escala global o clima da Amazônia sofre influência de sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que se caracteriza pela confluência dos ventos Alísios do Hemisfério Norte e os ventos Alísios do Hemisfério Sul, formando uma grande faixa de instabilidade que favorece o desenvolvimento de correntes ascendente, formando nuvens de grande desenvolvimento vertical, responsável por precipitação abundante, sendo que durante o período de atuação da ZCIT na região Amazônica, ela é a principal responsável pela precipitação na região (MOLION, 1987).

Além da ZCIT, outro mecanismo de grande escala que influencia no clima da região amazônica está relacionado com eventos de *El Niño*-oscilação Sul (ENOS) que se caracteriza por uma mudança no aquecimento superficial do Pacífico equatorial, sendo que em anos de atuação do *El Niño*, ocorre grande aquecimento das águas da região central e leste do Pacífico equatorial, e nessa situação o centro de baixa pressão se desloca para o Pacífico central onde passa a ocorrer forte convecção, aumentando a nebulosidade e a chuva, enquanto no lado oeste da bacia

tropical do Pacífico o resfriamento da superfície do mar contribui para o aumento da pressão à superfície gerando subsidência e redução da precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2000). Em período de *El Niño* o ramo ascendente da circulação de Walker, que normalmente se apresenta sobre o oeste da Amazônia é deslocado para oeste sobre as águas mais quentes do pacífico, enquanto o ramo descendente cobre praticamente toda a Amazônia inibindo a convecção nessa região (MOLION, 1987), a circulação de Walker é uma circulação zonal que é atribuída basicamente ao aquecimento diferencial que se verifica entre continentes e oceanos (VAREJÃO-SILVA, 2000).

No período de atuação do fenômeno *La Liña*, a temperatura da superfície do mar é menor que a média climatológica (águas mais frias do que o normal) no Pacífico tropical Central e leste ocorrendo à subsidência associada à redução da precipitação e na parte tropical oeste da bacia do Pacífico a pressão ao nível do mar é mais baixa que a média climatológica, favorecendo a convecção, a nebulosidade e a precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2000).

Diversos estudos têm mostrado a influência desses fenômenos sobre a variabilidade climática interanual na América do Sul, inclusive na Amazônia onde mostram que em anos de *El Niño* a precipitação da Amazônia foi reduzida, e em anos do fenômeno *La Liña* existe um aumento da precipitação nessa região (KAYANO; MOURA, 1986; MARENGO, 1991; MARENGO, 1992; CAVALCANTI, 1996).

O clima da Amazônia também sofre a influência de sistemas de mesoescala, como o sistema de brisa, e as linhas de instabilidade. O sistema de brisa é um mecanismo físico, no qual o ar, devido ao contraste térmico entre água-terra, move-se em direção ao continente durante o dia, formando nuvens preferencialmente no continente durante o dia e sobre a superfície líquida durante a noite (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996). A Linha de Instabilidade é definida como uma banda de atividade convectiva organizada é uma linha de nuvens cúmulos-nimbos que se forma ao longo da borda de uma grande área de movimento descendente que estão associadas ao sistema de brisa costeiro (COHEN, 1989).

Por fim, a Amazônia sofre influencia de fenômenos de microescala, sendo que os fenômenos que se enquadram nessa categoria são as nuvens, e fenômenos

de turbulência causada pelas características da superfície, da troca de calor e umidade entre o solo e os primeiros metros de altitude, como exemplo dessas influencia, temos a interação no sistema solo-planta-atmosfera. A temperatura do ar no interior de florestas tropicais pode ser até 7 a 10°C menor que fora dela, pois no interior da floresta, a vegetação funciona como um filtro, através da interceptação de radiação de ondas curtas que chega ao solo da floresta, mantendo um maior conteúdo de umidade na superfície do solo (JACOBS, 1988).



Essa reserva é constituída, em 85% de sua área, por floresta ambrófila densa, com dossel entre 30 e 40 m de altura, o qual, só intercepta pouco mais de 10% da precipitação incidente (MORAES, et al., 1997). Na FLONA de Caxiuanã, localiza-se a Estação Científica Ferreira Penna (ECFP), uma base de pesquisa do Museu Paraense Emilio Goeldi (MPEG), destinada a estudos de longo prazo e a formação de recursos humanos, possuindo as seguintes coordenadas geográficas: 01°42'30" de latitude Sul e 51°31'45" de longitude Oeste.

### **3.1.2 Vegetação**

A FLONA de Caxiuanã é riquíssima em espécies vegetais, tendo ambientes de floresta que abrange áreas de terra firme, várzea e igapó, porém 95% da área estão sobre terra firme (LISBOA; SILVA; SOARES, 1997).

### **3.1.3 Clima**

O clima da região é caracterizado como tropical úmido, do tipo *Am*, segundo a classificação de Köppen (MORAES et al., 1997). As temperaturas mais baixas ocorrem de janeiro a março, enquanto os meses mais quentes vão de outubro a dezembro, com temperatura média anual de 27°C e com médias de temperatura mínima e máxima de 22°C e 32°C respectivamente. A umidade relativa média anual é aproximadamente de 80% (COSTA et al., 2009).

A precipitação pluviométrica anual nessa região é elevada, com média aproximada de 2.500 mm, sendo que a maioria dos estudos nessa região mostra haver uma estação mais chuvosa entre os meses de janeiro a maio e uma estação menos chuvosa entre os meses de setembro a dezembro (OLIVEIRA et al., 2002; COSTA; MORAES, 2002; COSTA et al., 2009). De acordo com dados climatológicos de 28 anos da Estação Pluviométrica do IBAMA, localizada no interior da FLONA de Caxiuanã, os períodos chuvoso e seco representam respectivamente 72,5 e 27,5% da precipitação anual (COSTA et al., 2009).

### **3.1.4 Solo**

O relevo é plano a levemente ondulado, com solos do tipo Latossolo Amarelo de origem terciária, com textura argilo-arenosa, ácidos, profundos e oligotróficos (ALMEIDA; LISBOA; SILVA, 1993). Ruivo et al. (2002) caracterizaram o solo da FLONA de Caxiuanã como sendo ácidos, com pH variando entre 4,5 na camada mais superficial do solo (0-20cm) até 5,5 no intervalo de profundidade entre 80-100

cm, os teores de carbono orgânico também diminuem com a profundidade, variando de 109,0 g C kg<sup>-1</sup> solo (0-20cm) para 1,9g C kg<sup>-1</sup> solo (80-100cm).

A floresta de Caxiuanã apresentam subtipologias, sendo elas:

a) Zona de baixio: constituída de pequenos canais que cortam a floresta com desnível de até 5 m, que pode ser parcialmente inundada ou encharcada durante as fortes chuvas do período chuvoso amazônico (janeiro a maio). Nesta zona a característica diferencial em relação às demais, é a maior umidade do solo, solo mais arenoso e a maior abertura do dossel;

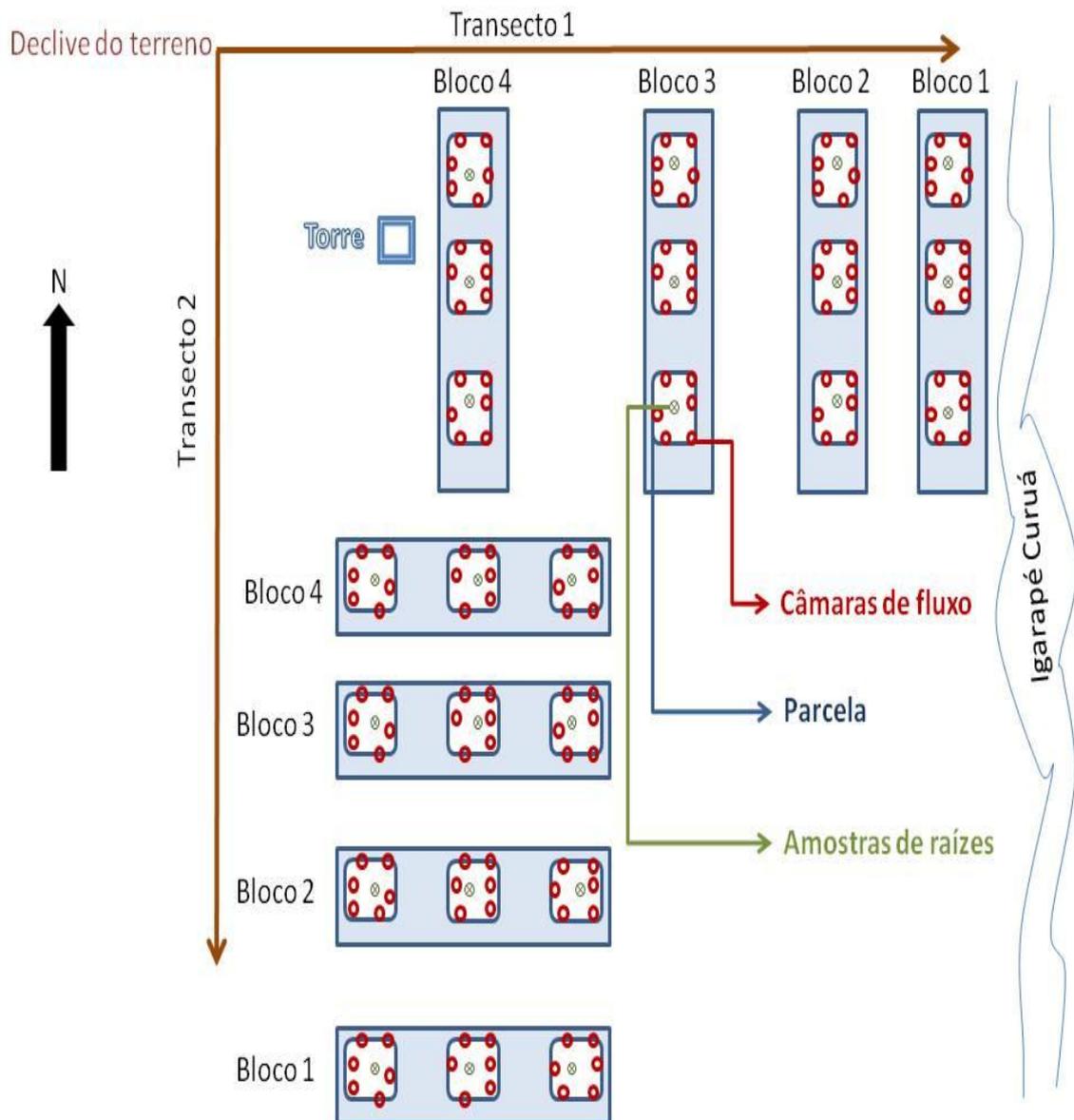
b) Zona de vertente: constituída da parte inclinada entre o platô e o baixio. Pode ser uma faixa muito estreita nas partes mais inclinadas da topografia ou pode ter dezenas de metros nas partes mais suaves. Esta zona apresenta condições intermediárias entre o platô e o baixio; tanto em termos de abertura do dossel, como de umidade e textura do solo;

c) Zona de platô: constituída da parte plana do terreno. Os platôs em Caxiuanã estendem-se por dezenas de hectares com um sub-bosque de boa visibilidade devido à baixa densidade de plantas nestes estratos. O dossel é fechado e o solo varia desde textura argilosa até areno-argilosa (AMARAL; ALMEIDA; COSTA, 2009).

### 3.2 PLANO DE AMOSTRAGEM

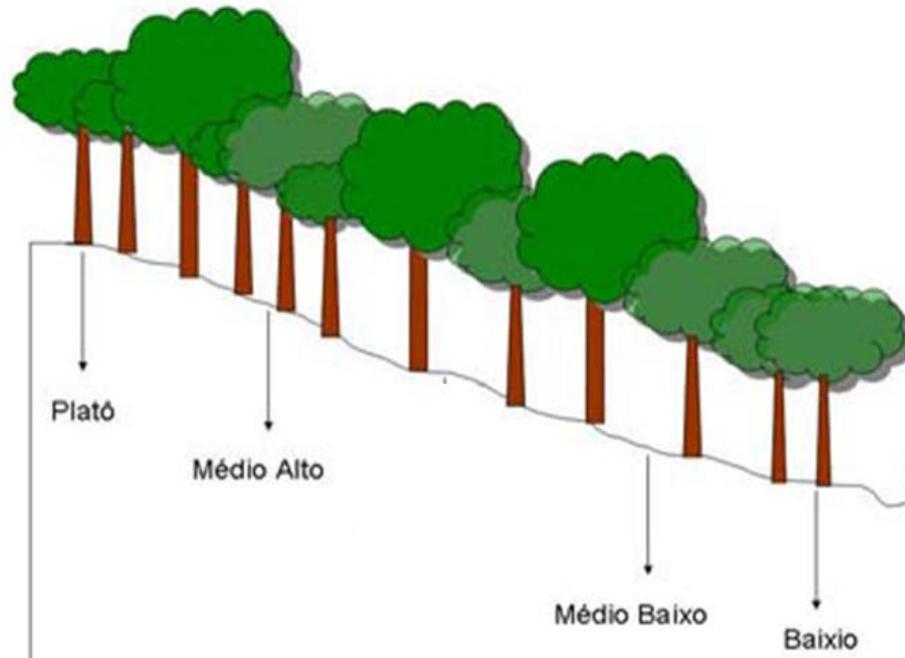
No interior da área de estudo foram selecionados dois transectos, sendo um iniciado próximo à margem de um Igarapé permanente (sentido leste-oeste) e outro nas proximidades de um Igarapé intermitente (sentido norte-sul), denominados neste trabalho como Transecto 1 e Transecto 2, respectivamente (Figura 3). Os transectos possuem um gradiente topográfico, sendo observado um declive de aproximadamente 17,6 metros entre a proximidade da torre micrometeorológica do projeto LBA, ponto mais alto do transecto, até a margem do igarapé, ponto mais baixo do transecto, possuindo uma distância de aproximadamente 711 m entre o platô e o baixio no Transecto 1 e de aproximadamente 648 m no Transecto 2.

Figura 3 - Plano amostral indicando os dois transectos analisados, sendo o Transecto 1 em direção ao Igarapé Curuá (sentido leste-oeste) e o Transecto 2 em direção a área periodicamente alagada (sentido norte-sul).



Em cada transecto foram selecionados quatro locais (Blocos) para a coleta e medição dos dados denominados de baixo (Bloco 1), médio baixo (Bloco 2), médio alto (Bloco 3) e platô (Bloco 4), conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4. Em cada bloco foram demarcadas três parcelas. Em cada parcela foram colocadas cinco câmaras de fluxo e retirado amostras de solo para o estudo de massa das raízes e carbono orgânico do solo.

Figura 4 - Esquematização dos locais onde foram as medições em um perfil de declividade na Floresta Nacional de Caxiuanã.



### 3.3 EFLUXO DE GÁS CARBONO DO SOLO

Nos pontos de coleta foram fixadas no solo anéis de PVC (câmaras de fluxo) (Figura 3), que permaneceram no local durante todo o período de medições para evitar vazamentos no solo e evitar o possível rompimento de micro sítios preenchidas de gás existentes no solo. A respiração do solo (efluxo) foi avaliada utilizando um analisador infravermelho de gás carbono ( $\text{CO}_2$ ) acoplado a uma câmara fechada (EGM-4 *Environmental Gás Monitor for CO<sub>2</sub>*). As coletas foram feitas nos meses de julho, agosto, outubro, novembro de 2011 e março de 2012 representativos dos meses secos de transição e chuvoso.

Em cada ponto de medição foram feitas 5 leituras (repetições), totalizando 15 leituras em cada altura topográfica (Blocos), num total de 60 medições em cada transecto. As medições do efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo foram feitas em dois dias para cada transecto, sendo que, no primeiro dia foram feitas as leituras partindo do baixo (no intervalo de 9:00h às 10:00h) passando pela topografia de médio baixo (10:00h às 11:00h), médio alto (11:00h às 12:00h) e finalizando no platô (12:00h às 13:00h), no dia seguinte as medidas eram feitas de forma inversa, iniciando no platô e

encerrando no baixo, este modo de medição, neste trabalho, foi nomeado de Baixo-Platô e Platô-Baixo respectivamente. Esta metodologia de medições foi utilizada para minimizar os efeitos da variação horária do efluxo de CO<sub>2</sub> na comparação entre as topografias. No mês de outubro, além das leituras rotineiras, foram feitas medições do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no Transecto1 apenas nas topografias de baixo e platô das 09:00h às 18:00h, sendo as leituras feitas em intervalos de meia hora, iniciando às 09:00h no baixo, às 9:30h no platô e assim sucessivamente.

O fluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi obtido pela seguinte fórmula:

$$R_s = \frac{DC}{DT} \times \frac{V}{A}$$

Equação 1

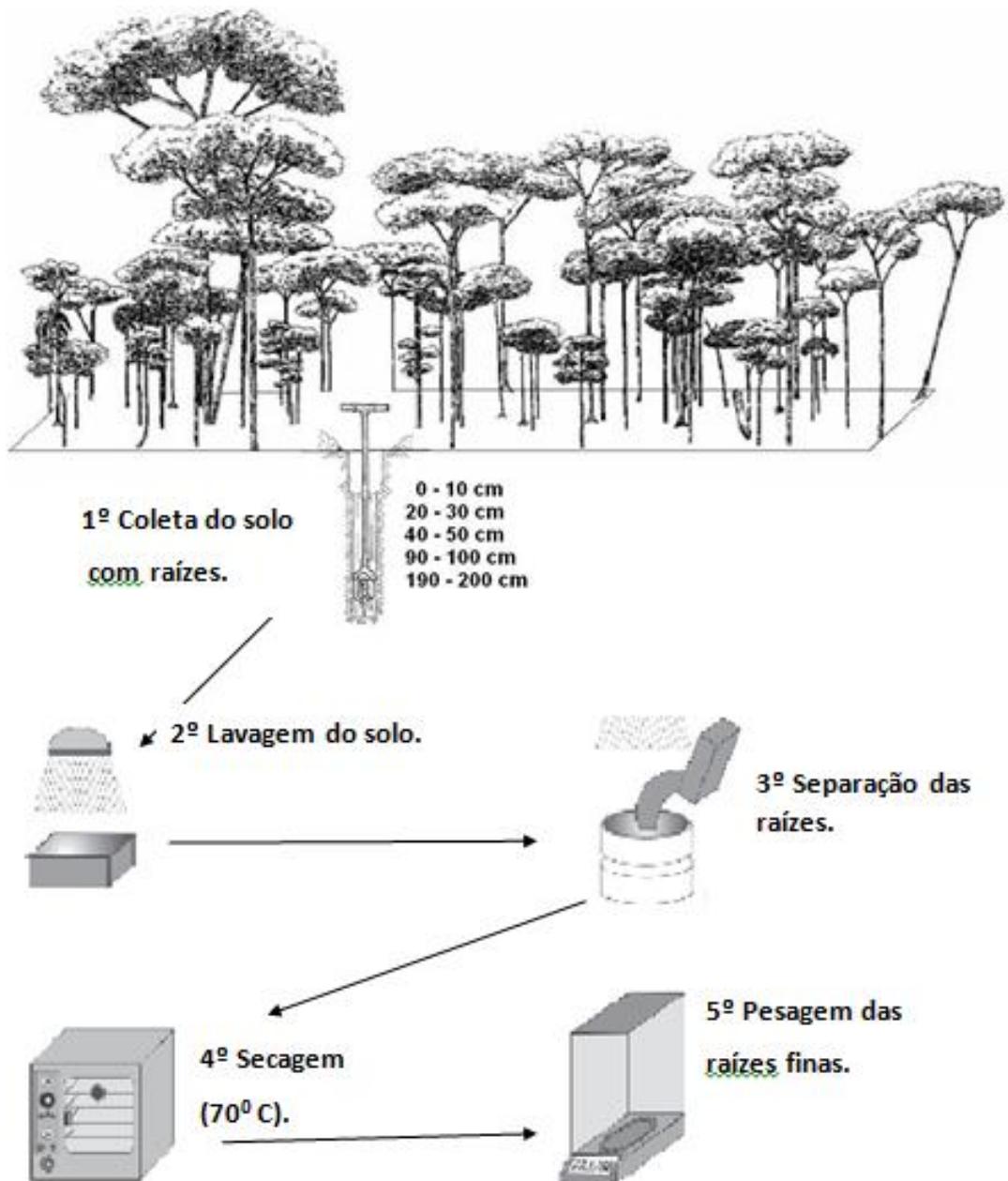
Em que o  $R_s$  é a razão de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo (fluxo de CO<sub>2</sub>/unidade de área/unidade de tempo),  $DT$  é o tempo decorrido da medida,  $DC$  é a diferença de concentração de CO<sub>2</sub> no tempo decorrido,  $V$  é o volume total do sistema e  $A$  é a área do solo exposto à medida. O valor  $R_s$  foi expressa pelo equipamento em gm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>, porém para haver melhor comparação com outros estudos, as leituras foram multiplicado pelo fator de conversão 6,312 e as medidas de efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foram expressadas em μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, pois esta unidade é mais comumente utilizada na literatura. Juntamente com as observações de fluxo foram feitas leituras da temperatura do solo através de um sensor anexado ao aparelho EGM-4.

### 3.4 ANÁLISE DE RAÍZES FINAS

As amostras de solo para a obtenção das raízes foram coletadas próximas ao local onde foram feita as medidas do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, no mês de março de 2011 (Figura 3). Com a ajuda de um trado manual de volume conhecido foram coletados amostras de solos em diferentes camadas (0-10, 20-30, 40-50, 90-100, 190-200 cm de profundidade). As amostras coletadas foram armazenadas em sacos plásticos com a sua devida identificação, e no mesmo dia foram lavadas com água corrente. Após a lavagem as amostras de raízes foram imediatamente secas em estufa a gás por aproximadamente 24 horas. Posteriormente as amostras foram separadas por peneira fina para coleta de raízes, as quais foram separadas manualmente por diâmetro com auxílio de um paquímetro e apenas coletadas com

pinça as raízes com diâmetro igual ou inferior a 2,0 mm ( $\varnothing < 2,0\text{mm}$ ). Após a separação, as raízes foram secas em estufa a 70°C por um período de 24 horas, e posteriormente pesadas em uma balança de precisão (0,0001g) para a obtenção da massa seca (Figura 5). Além da coleta feita em março de 2011 foram coletadas amostras de solo para obtenção de raízes finas superficiais (0-10 cm) nos meses de novembro de 2011 e março de 2012.

Figura 5 - Etapas da coleta e processamento das amostras de solo para retirada das raízes.



Fonte: Adaptado de Lopes et al.(2010).

### 3.5 CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

No mês novembro de 2011 foram coletadas amostras de solo próximas ao local onde ocorreram as medições da respiração do solo em três profundidades (nos intervalos de 0-10, 40-50, 190-200 cm), para análise de carbono orgânico do solo. As amostras foram secas ao ar, levadas para Laboratório de Análise Química do Museu Paraense Emílio Goeldi onde foi feita a determinação do carbono orgânico conforme o método de Walkley-Black.

### 3.6 ANÁLISE DOS DADOS

Para biomassa de raízes primeiramente foi utilizada a análise de variância (ANOVA) *one-way*, para testar se existem diferenças significativas na biomassa de raízes entre as amostras das três repetições (parcelas) na mesma topografia (platô, médio alto, médio baixo, baixo) para todas as profundidades em ambas os transectos. Uma vez não encontrados diferenças significativas, as amostras foram consideradas como repetição. Em seguida os dados foram analisados utilizando análise de variância e teste de Tukey para comparação de média.

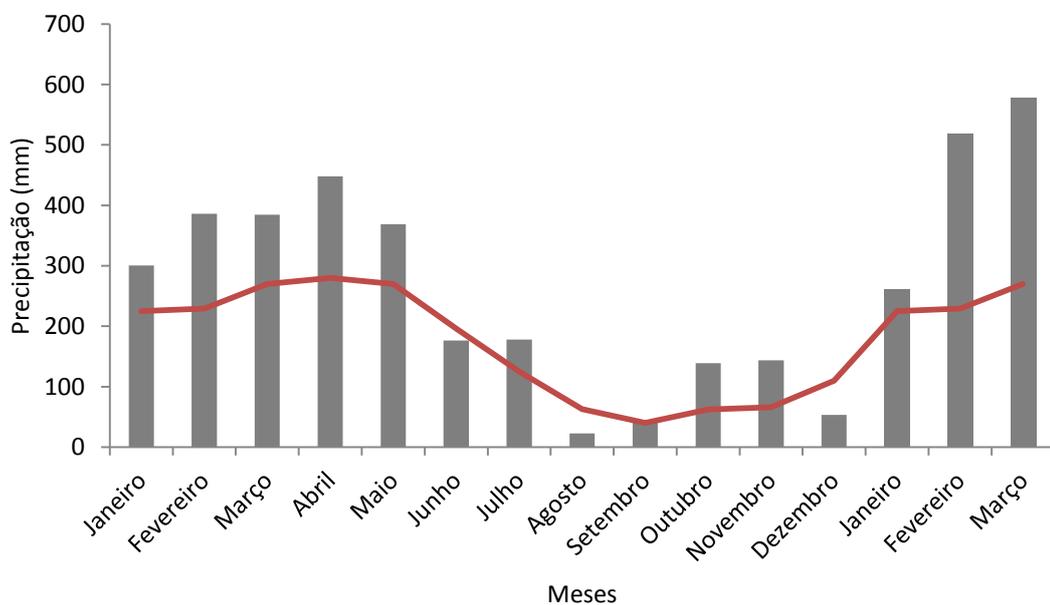
Para cada um dos sitio, a média do efluxo de CO<sub>2</sub> foi calculado a partir das medições das câmaras de fluxo, sendo 15 coletas em cada ponto no gradiente topográfico, totalizando 60 medições em cada transecto. As diferenças espaciais e temporais, bem como diferenças de topografia foram analisadas por medidas de ANOVA e teste de Tukey para comparação da média. Os testes foram feitos nos programas Statistica 8.0 e Systat.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Analisando os totais mensais de precipitação pluviométrica coletados na Estação Científica Ferreira Penna (ECFP) no período de janeiro de 2011 a março de 2012 (Figura 6), observa-se uma sazonalidade da precipitação bem definida, com um período chuvoso de janeiro a maio no qual o total pluviométrico neste período foi de 1887 mm, que corresponde a 71,5% da precipitação anual e um período seco que vai de agosto a dezembro com total pluviométrico de 399 mm, correspondente a 15,1% da precipitação anual. O total da precipitação no ano de 2011 foi de 2640 mm, sendo que a máxima precipitação mensal ocorreu em abril (448 mm) e a mínima em agosto (23 mm). O primeiro trimestre de 2012 apresentou um total pluviométrico de 1356 mm.

Figura 6- Precipitação mensal do ano de 2011 e janeiro a março de 2012 na FLONA de Caxiuanã (disponibilizado pelo Projeto de Estudo da Seca na Floresta (ESECAFLOR)). As barras cinza e verdes são a precipitação no ano de 2011 e 2012 respectivamente e a linha vermelha é a média climatológica da precipitação de 25 anos.



A região Amazônica no geral, não possui estação térmica definida, pois a temperatura do ar não possui significativas variações anuais, no entanto, essa região possui um regime pluviométrico bem definido, tendo um período chuvoso e outro menos chuvoso. O período chuvoso ou com forte atividade convectiva na

Amazônia é compreendido entre os meses de novembro a março, e o período seco, ou com pouca atividade convectiva, é compreendido entre os meses de maio a setembro, sendo os meses de abril e outubro considerados meses de transição entre um regime e outro (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996). Climatologicamente a FLONA de Caxiuanã possui valores anuais de precipitação em torno de 2020 mm com valores mais elevados de precipitação no mês de março (MORAIS et al., 2009). Nos meses de coleta de raízes para a observação do efeito da sazonalidade o total de precipitação pluviométrica foi de 144 mm em novembro de 2011 e 577 mm em março de 2012.

Além de outros fatores, a precipitação no leste da Amazônia é influenciada pelos oceanos Atlântico e Pacífico no primeiro trimestre do ano, e as precipitações fora da média estão relacionados com a presença dos eventos *La Niña* e *El Niño* (SOUZA, 2003). No período deste estudo foi observado a atuação do fenômeno *La Niña* que é caracterizado por influenciar de maneira positiva a precipitação nessa região, ou seja, ocasionando precipitações acima da média climatológica. Este comportamento foi observado quando comparamos os valores da precipitação no ano de 2011 e início de 2012 com os valores da climatologia de precipitação da FLONA de Caxiuanã através dos dados da estação meteorológica do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente IBAMA (1980-2005), observado por Souza-Junior, (2011).

#### 4.2 CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

Comparando o teor de carbono orgânico do solo nos diferentes transectos deste estudo, um partindo da margem de um igarapé permanente (Transecto 1) e outro partindo da margem de um igarapé intermitente (Transecto 2), foi observado uma diferença significativa no carbono orgânico entre as duas parcelas (Tukey  $p = 0,005$ ) na camada superficial do solo (0-10 cm) na topografia de baixio, com teor de carbono orgânico significativamente maior na parcela as margens do igarapé intermitente (Transecto 2) em comparação com o igarapé permanente.

Podemos sugerir que a maior taxa de carbono orgânico no transecto 2 seja proveniente da maior entrada de carbono no solo pela vegetação, pois as margens do igarapé intermitente, por ficar um período sem movimento de água, pode acumular uma quantidade maior de material orgânico. Outro fator a ser considerado

é o tipo de vegetação, pois na margem do igarapé intermitente a vegetação existente é típica de terra firme, ou seja, uma vegetação de grande porte, enquanto na margem do igarapé Curuá, por ser uma área que fica permanentemente alagada, a vegetação existente é uma vegetação característica de floresta de várzea. Outra diferença marcante entre a floresta de terra firme e a de várzea é que esta última apresenta uma menor diversidade de espécies, com um sub-bosque bem aberto e o dossel mais baixo, com cerca de 30 m de altura (FERREIRA et al., 2005). A maior taxa de carbono orgânico no Transecto 2 pode também estar relacionada com a inclinação do solo, pois este transecto possui visivelmente uma inclinação mais acentuada (maior declividade) na região de baixo e com isso, ocorrendo precipitação, uma maior quantidade de material orgânico pode ser transportado pela água da chuva das áreas mais elevada até as áreas mais baixas.

Tabela 1- Comparação da porcentagem de carbono orgânico no solo entre os dois transectos e entre as diferentes topografias nas profundidades de 0-10, 40-50, e 190-200 cm.

<b>CARBONO ORGÂNICO (%)</b>				
<b>Transecto1</b>				
<b>Topografia/ Profundidades</b>	<b>0 a 10 cm</b>	<b>40 a 50 cm</b>	<b>190 a 200 cm</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Baixio</b>	1,92 ± 0,19 <sup>A</sup>	0,71 ± 0,05 <sup>B</sup>	0,47 ± 0,04 <sup>B</sup>	3,10
<b>Médio Baixio</b>	1,92 ± 0,16 <sup>A</sup>	0,72 ± 0,05 <sup>B</sup>	0,37 ± 0,04 <sup>C</sup>	3,01
<b>Platô</b>	2,02 ± 0,17 <sup>A</sup>	0,83 ± 0,12 <sup>B</sup>	0,54 ± 0,04 <sup>B</sup>	3,39
<b>Transecto2</b>				
<b>Baixio</b>	3,08 ± 0,08 <sup>A</sup>	0,97 ± 0,09 <sup>B</sup>	0,43±0,00 <sup>C</sup>	4,48
<b>Médio Baixio</b>	2,57 ± 0,89 <sup>A</sup>	0,92 ± 0,09 <sup>B</sup>	0,37 ± 0,01 <sup>C</sup>	3,86
<b>Platô</b>	2,02 ± 0,17 <sup>A</sup>	0,83 ± 0,12 <sup>B</sup>	0,54 ± 0,04 <sup>B</sup>	3,39

\*Os números após o símbolo ± representa o erro padrão da média. Letras diferentes na mesma linha representam que existe diferença significativa entre as médias (Tukey  $p < 0,05$ ).

Na comparação do teor de carbono orgânico do solo entre as quatro topografias na mesma profundidade, não foram observadas diferenças significativas entre elas ( $p > 0,05$ ), no entanto, com relação à profundidade observa-se uma redução no teor de carbono orgânico com a profundidade na maioria das

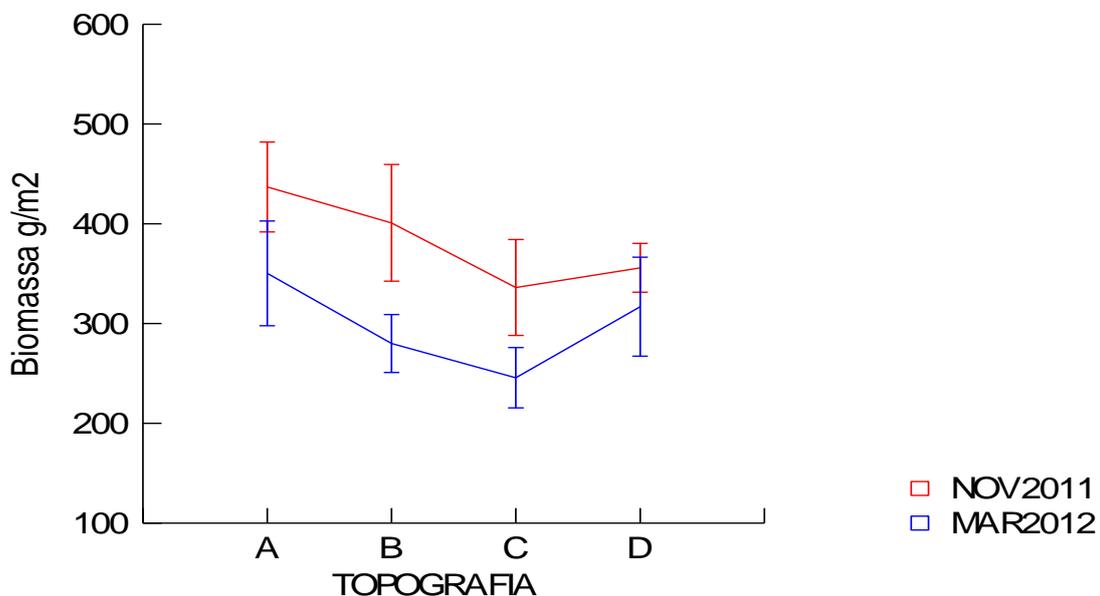
observações (Tabela 1). Ruivo et al. (2002), analisando o carbono orgânico até a profundidade de 5 m em duas trincheiras em Caxiuanã, próximas ao local do presente estudo, observou que o carbono orgânico diminui intensamente no primeiro metro de profundidade.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA BIOMASSA DE RAÍZES

#### 4.3.1 Variação sazonal

As médias da biomassa de raízes finas ( $\leq 2$  mm) superficiais (0-10 cm) nas diferentes topografias estão apresentadas na Figura 7. Em ambos os meses não houve diferença significativa na biomassa de raízes entre os transectos ( $p = 0,757$ ). Leão (2010), estudando a biomassa de raízes muito finas ( $< 1$  mm) em floresta tropical úmida encontrou o valor médio de  $212 \text{ gm}^{-2}$  para os primeiros 10 cm de profundidade. Silver et al. (2005), encontrou valores de biomassa de raízes finas ( $< 2$  mm) de  $218 \text{ gm}^{-2}$  e  $292 \text{ gm}^{-2}$  em sítios com solo argiloso e arenoso respectivamente na Floresta Nacional do Tapajós.

Figura 7 - Biomassa de raízes finas ( $\leq 2$  mm) superficiais (0-10 cm) nos Transectos 1 e 2 no mês de novembro de 2012 e março de 2013 nas topografias de baixio (A), médio baixio (B), médio alto (C) e platô (D).



A biomassa de raízes finas foi diferente no mês seco e chuvoso ( $p = 0,023$ ) sendo que os valores médios de biomassa de raízes superficiais foi maior no mês

seco  $382,47 \pm 25,46 \text{ gm}^{-2}$  em comparação ao mês chuvoso  $298,24 \pm 23,5 \text{ gm}^{-2}$ . Um experimento realizado em uma floresta secundária no nordeste do Pará, foi encontrado maior produção de raízes na estação seca do que na estação chuvosa, tanto de raízes vivas como de raízes mortas (LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2010, 2012). Algumas espécies respondem a seca aumentando o crescimento radicular, porém com pequena mudança na biomassa total (JOSLIN; WOLFE; HANSON, 2000). Alguns autores, estudando em floresta tropical, observaram o efeito da sazonalidade pluviométrica sobre a mortalidade de raízes finas, encontraram uma maior taxa de mortalidade no período seco (SUNDARAPANDIAN; SWAMY, 1996; GREEN et al., 2005; SILVER et al., 2005). Souza-Junior (2011) encontrou maior taxa de crescimento de raízes na época chuvosa em Caxiuanã e Metcalfe et al., (2008) também em Caxiuanã, observou que o crescimento das raízes finas superficiais diminuem no período de transição da estação seca para a chuvosa.

Com relação à topografia, não foi encontrado diferença significativa na biomassa de raízes finas ( $p = 0,271$ ). Alguns estudos observaram diferença na biomassa de raízes, com relação à topografia, porém estes estudos foram feitos em ambientes diferentes como Rosado et al. (2011), que estudaram em área de várzea e de montanha na Mata Atlântica, e encontrou menor biomassa em áreas de várzea ( $334 \text{ gm}^{-2}$  na estação seca e  $219 \text{ gm}^{-2}$  na estação chuvosa) do que na área de montanha ( $875$  e  $451 \text{ gm}^{-2}$  na estação seca e chuvosa, respectivamente).

#### **4.3.2 Variação com a profundidade**

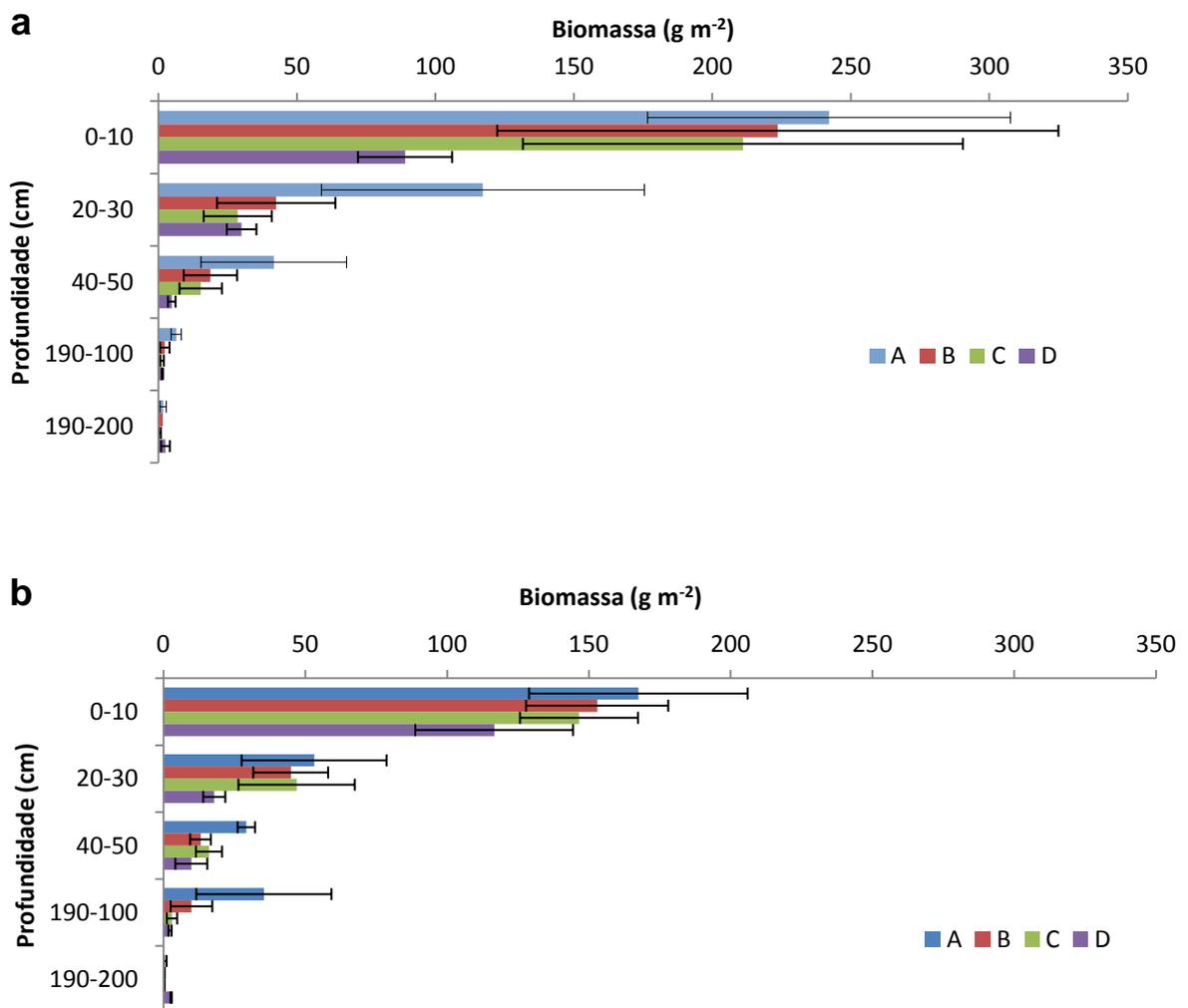
A biomassa de raízes em ambos os transectos nas diversas profundidades (0-10, 20-30, 40-50, 90-100, 190-200 cm) nas topografias de baixo (A), médio baixo (B), médio alto (C) e platô (D) estão inseridos na Figura 8, a coleta das raízes foi feita no mês de março de 2011.

De uma maneira geral, podemos observar que houve uma redução na biomassa de raízes com o aumento da profundidade do solo em ambas os transectos e para todas as topografias, essa redução é observada principalmente da camada superficial para as demais profundidades.

Na camada superficial do solo está concentrada a maior biomassa de raízes, com 70,7% e 67,2% da biomassa total no Transecto 1 e Transecto 2 respectivamente. Nos primeiros 30 cm do solo foram encontradas mais de 80% do total da biomassa de raízes do solo para ambos os transectos, esta característica é

observada na maioria dos resultados em pesquisas de diversos tipos de vegetação inclusive em floresta tropicais, que mostram que mais de 50% das raízes finas são encontradas nos primeiros 30 cm do solo (TOLEDO; KAUFFMAN, 2001; LEUSCHNER et al., 2004; RODIN, 2004). A biomassa de raízes diminui consideravelmente com a profundidade reduzindo para 7,4% na camada de 40 a 50 cm, 1,1% entre 90 a 100 cm e 0,6% entre 190 a 200 cm no Transecto 1 e para 7,8% entre 40 a 50 cm, 5,8% entre 90 a 100 cm e 0,4% entre 190 a 200 cm no Transecto 2.

Figura 8- Biomassa de raízes com diâmetro  $\leq 2$  mm em diferentes profundidades no Transecto 1 (a) e Transecto 2 (b) nas topografias de baixo (A), médio baixo (B), médio alto (C) e platô (D) em abril de 2011.



Alguns autores mostraram que a biomassa de raízes finas geralmente diminui com a profundidade do solo e também aumentam seus diâmetros para adquirir mais resistência nas camadas mais profundas, que oferecem maior impedimento para o desenvolvimento das raízes (TOLEDO; KAUFFMAN, 2001; TAPIA-CORAL et al., 2005). As raízes finas são mais abundantes no horizonte com maior concentração de compostos orgânicos, onde se concentrou de 40 a 70% do total de biomassa dessas raízes (EHRENFELD; KALDOR; PARMELEE, 1992).

As somas da biomassa de raízes das diferentes profundidades e em cada topografia estão apresentadas na Tabela 2. Apesar de ser observada uma redução na biomassa total de raízes com a elevação topográfica, não houve diferença estatística ( $p > 0,05$ ) em relação à topografia para cada profundidade, assim como também não houve diferença significativa entre os dois transectos ( $p > 0,05$ ).

Tabela 2- Biomassa de raízes total ( $\text{g m}^{-2}$ ) nas topografias de baixo (A), médio baixo (B), médio alto (C) e platô (D).

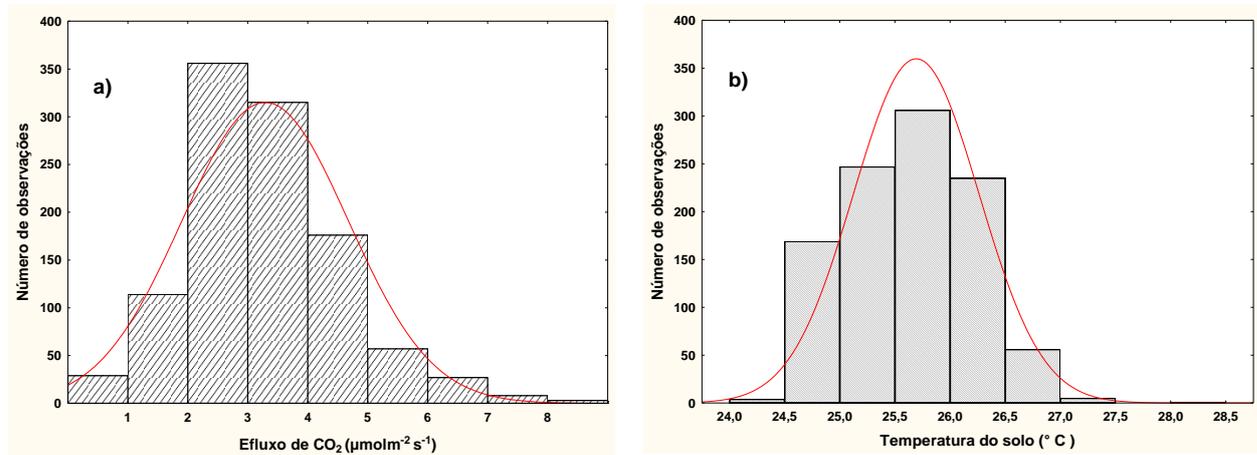
<b>Biomassa de raízes <math>\text{gm}^{-2}</math></b>		
<b>Topografia</b>	<b>Transecto1</b>	<b>Transecto2</b>
<b>A</b>	409,08	285,80
<b>B</b>	288,87	221,03
<b>C</b>	256,75	212,81
<b>D</b>	127,89	149,37

#### 4.4 - EFLUXO DE $\text{CO}_2$ DO SOLO

##### 4.4.1 Valores médios

O histograma dos dados (Figura 9a) indica que mais de 60% das observações ficaram entre 2 e 4  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , a média amostral foi igual a  $3,18 \pm 0,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , a mediana e a moda foram de 3,09 e 2,27  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em um total de 1096 observações.

Figura 9 - Histograma do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (a) e temperatura do solo a 10 cm de profundidade (b), para todas as observações durante todo o período de coleta (a linha vermelha representa a normalidade).



Os resultados observados neste trabalho estão próximos aos valores encontrados em outros estudos realizados na floresta de Caxiuanã como Sotta et al. (2006), que encontrou média de  $3,09 \pm 0,25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $3,91 \pm 0,19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para latossolo amarelo de terra firme arenoso e argiloso respectivamente e Gonçalves (2009) que encontrou média anual do efluxo de  $2,84 \pm 0,20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em latossolo amarelo. A temperatura do solo (Figura 9b) teve valor mínimo e máximo de 24,4°C e 28,8°C respectivamente, a moda ocorreu na classe de 25,8°C e a média foi de 25,7°C.

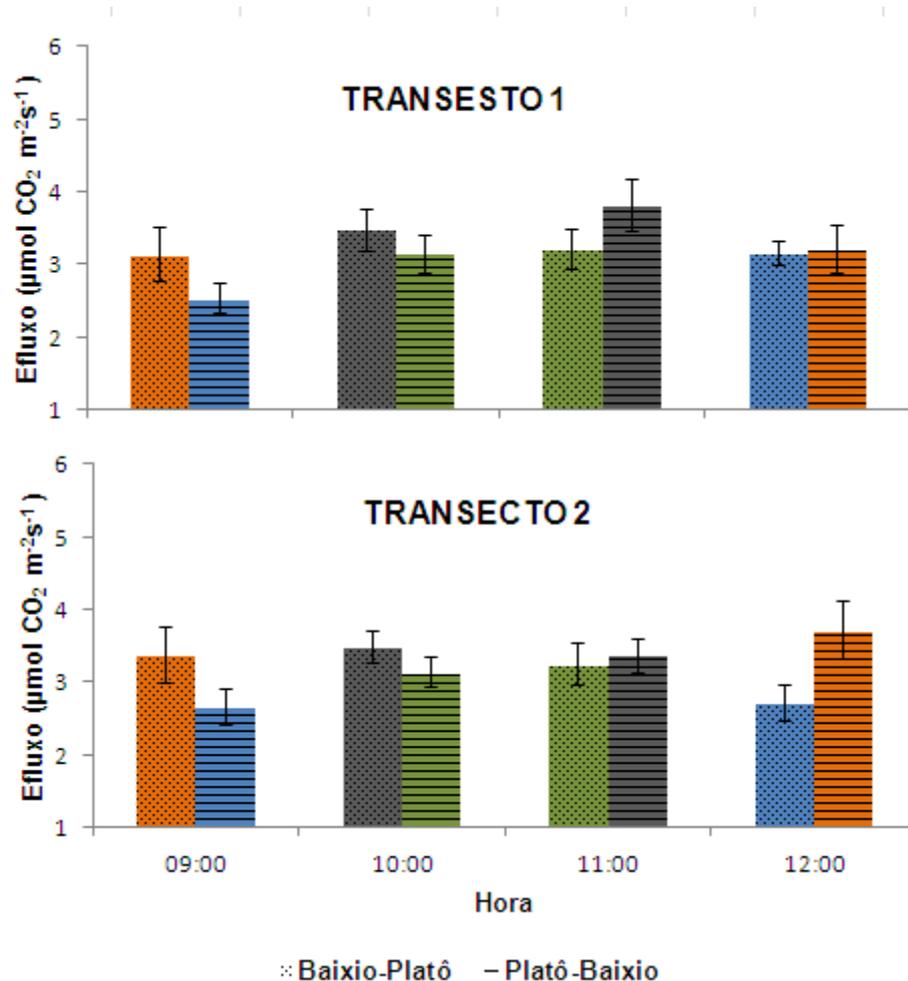
#### 4.4.2 Comportamento mensal do efluxo de CO<sub>2</sub>

Através da análise de variância, foi observado que não houve diferença significativa entre as parcelas do interior dos blocos em todos os meses estudados, consideramos então que as parcelas são repetições.

As medidas do efluxo de CO<sub>2</sub> em cada mês estão apresentadas nos gráficos seguintes. No mês de julho (Figura 10) no Transecto 1 foi observada diferença significativa apenas entre o efluxo das 9:00h (platô) e 11:00h (médio baixo), sendo o efluxo das 11:00h significativamente maior (Tukey  $p = 0,015$ ) no percurso Platô-Baixo. No Transecto 2 foi observado que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo da topografia de baixo foi significativamente maior que o efluxo da topografia de platô (Tukey  $p = 0,042$ ) no horário das 12:00h com médias de  $3,71 \pm 0,40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $2,71 \pm$

0,24  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para o baixo e platô respectivamente. No mês de julho não foi observado diferença significativa entre os dois transectos.

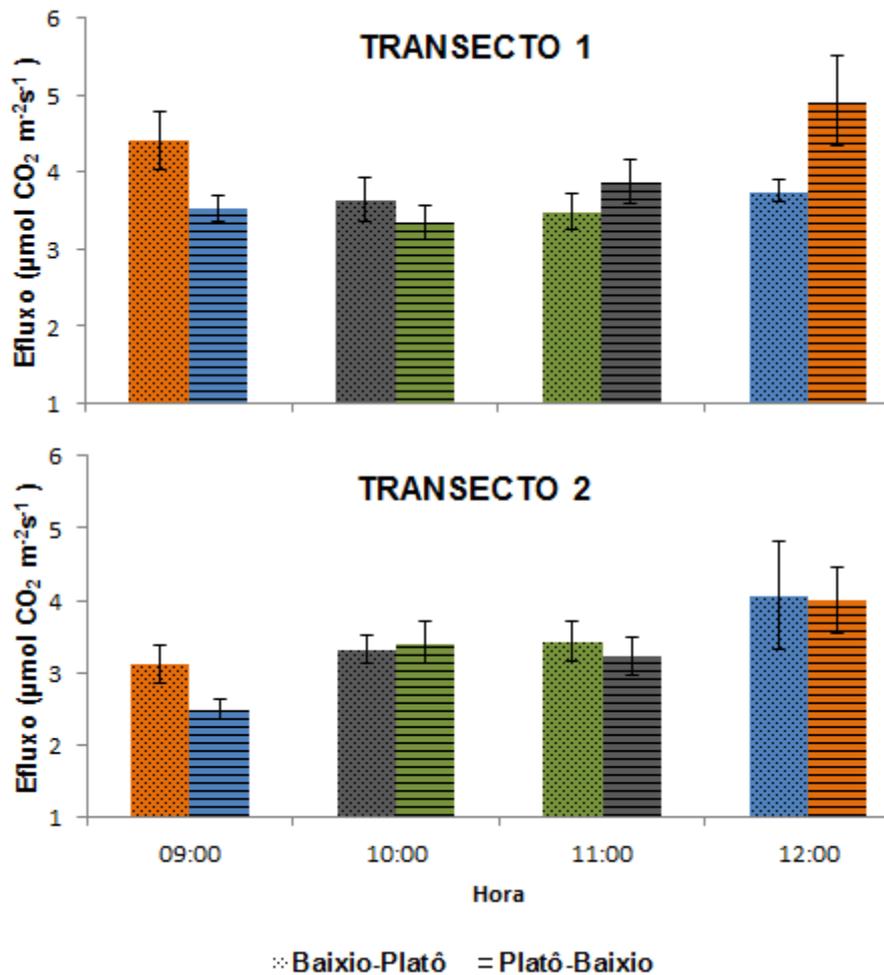
Figura 10—Efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo no mês de julho no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixo até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixo (tracejado) no horário das 9:00 às 13:00h. As cores representam as topografias de baixo (laranja), médio baixo (cinza), médio alto (verde) e platô (azul).



No mês de agosto (Figura 11) no Transecto 1 partindo do Platô-Baixio o efluxo de  $\text{CO}_2$  no horário de 12:00h (baixio) foi significativamente maior em relação aos horários de 9:00h (platô) (Tukey  $p = 0,037$ ) e 10:00h (médio alto) (Tukey  $p = 0,014$ ). Comparando as topografias de baixo e platô nos dois dias de medições, observa-se que o efluxo foi maior na topografia de baixo com  $4,41 \pm 0,37 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em relação à topografia de platô com  $3,53 \pm 0,17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no horário de 9:00h (Tukey  $p = 0,038$ ). No Transecto 2 partindo do Platô-Baixio houve diferença entre os fluxos de  $\text{CO}_2$  de 9:00h (platô) e 12:00h (baixio), sendo o fluxo das 12:00h significativamente maior (Tukey  $p = 0,005$ ). Neste mês, houve diferença entre os

transectos no horário das 9:00h no Bloco 1 (baixio) (Tukey  $p = 0,008$ ) e no Bloco 4 (platô) (Tukey  $p = 0,000$ ).

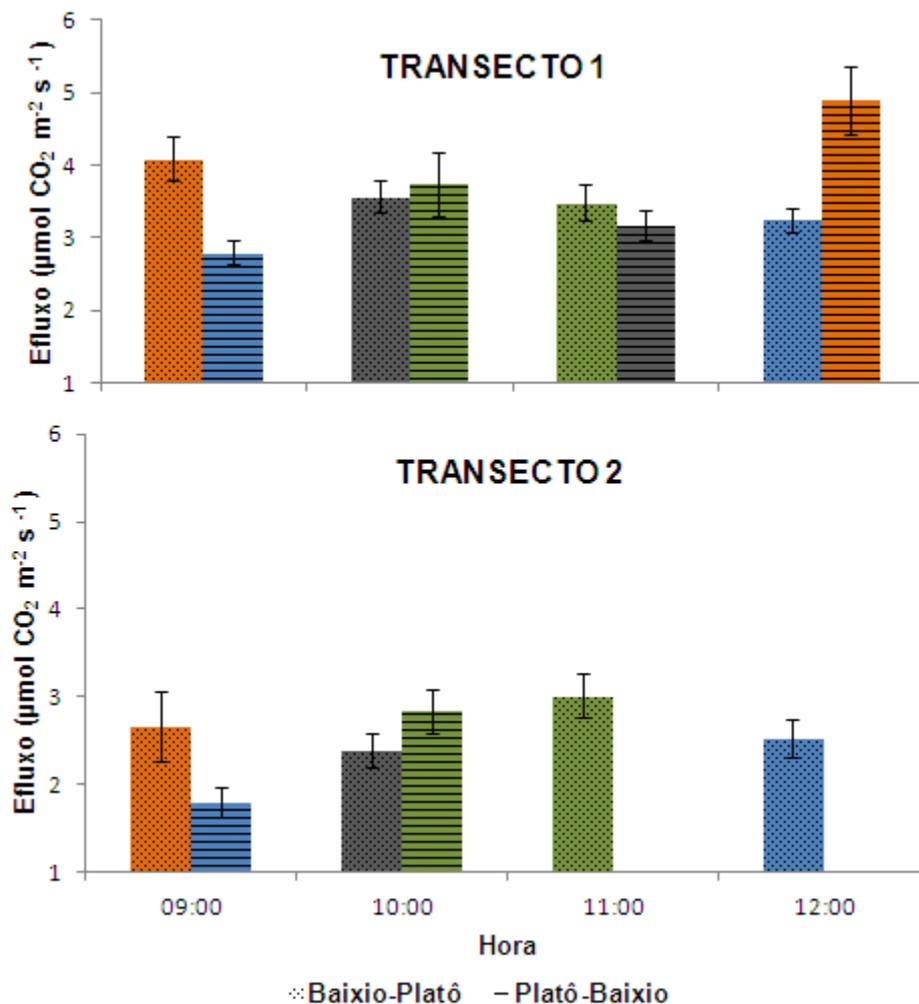
Figura 11–Efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo no mês de agosto no Transecto 1 e Transecto 2 partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00 às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul).



Em outubro (Figura 12) no Transecto 1, partindo do Platô-Baixio, o efluxo de  $\text{CO}_2$  de 12:00h (baixio) foi significativamente maior que os horários de 9:00h (platô) (Tukey  $p = 0,001$ ) e 11:00h (médio baixio) (Tukey  $p = 0,005$ ). Comparando as topografias de platô e baixio para os mesmos horários observa-se novamente que a região de baixio foi superior a região de platô com média de efluxo de  $4,07 \pm 0,30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no baixio e  $2,78 \pm 0,16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no platô no horário de 9:00h (Tukey  $p = 0,001$ ), e média de efluxo de  $4,88 \pm 0,47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no baixio e  $3,23 \pm 0,17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no platô no horário das 12:00h (Tukey  $p = 0,002$ ). No Transecto 2 partindo do Platô-Baixio o efluxo de  $\text{CO}_2$  das 10:00h foi significativamente maior que o efluxo das 9:00h (Tukey  $p = 0,005$ ). Os transectos

foram significativamente diferentes no horário das 9:00h no Bloco 1 (baixio) ( $p = 0,009$ ) e no Bloco 4 (platô) ( $p = 0,000$ ), também foram diferentes no horário das 10:00h no Bloco 2 (médio baixio) ( $p = 0,000$ ) e no horário de 12:00h no Bloco 4 (platô) ( $p = 0,016$ ).

Figura 12–Efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo no mês de outubro no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul).

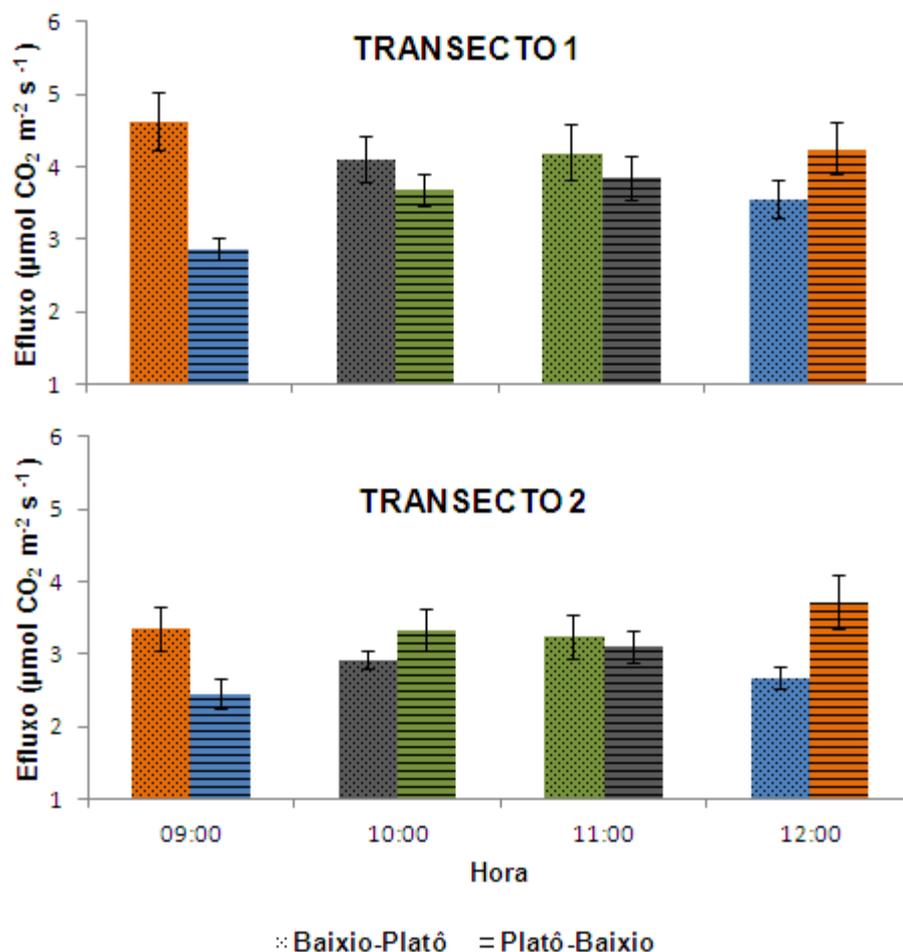


\* Por falha no equipamento EGM, não foi possível fazer as leituras nos topografias finais do transecto Platô-Baixio.

No mês de novembro (Figura 13) no Transecto 1, partindo do Platô-Baixio o efluxo das 12:00h (baixio) foi significativamente maior que o efluxo das 9:00h (platô) (Tukey  $p = 0,003$ ). A comparação entre as topografias, mais uma vez, mostrou valores mais elevados de efluxo na topografia mais baixa com  $4,62 \pm 0,40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  do que na topografia mais elevada com  $2,87 \pm 0,15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no horário das 9:00h (Tukey  $p = 0,005$ ) e com  $4,25 \pm 0,35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no baixio e  $3,55 \pm$

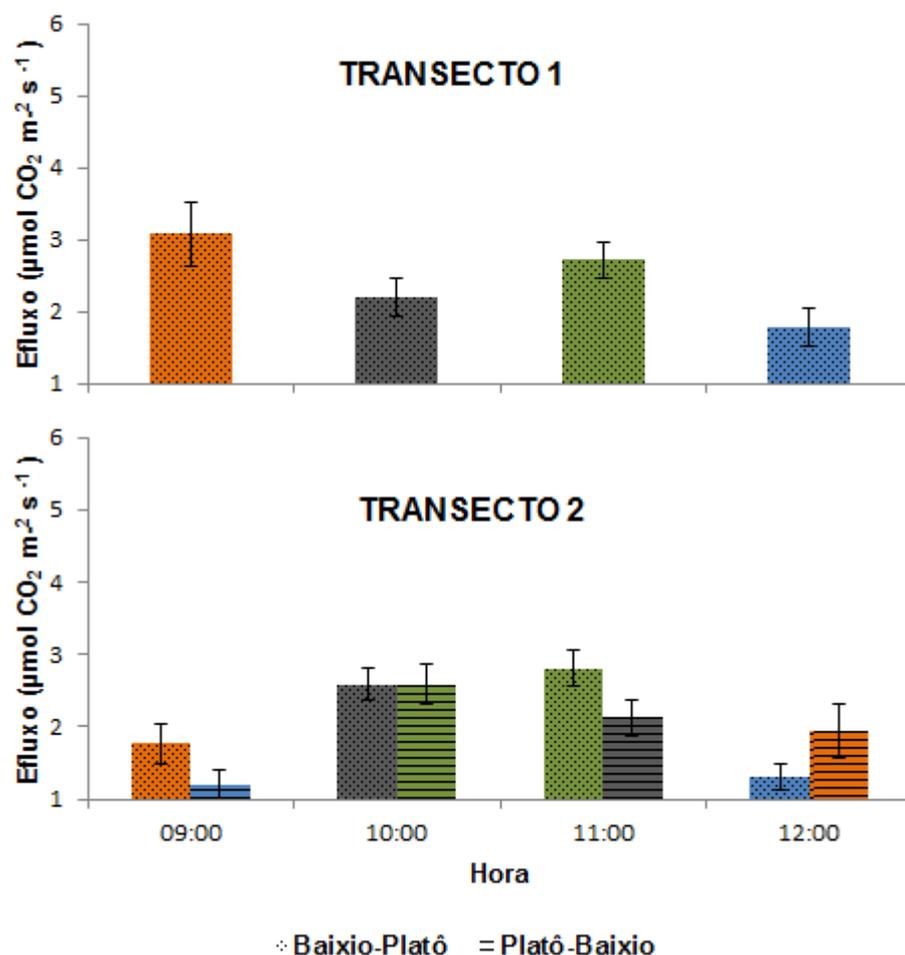
0,26  $\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no platô no horário das 12:00h (Tukey  $p = 0,030$ ). No Transecto 2 partindo do Platô-Baixio o efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo também foi maior no horário das 12:00h (baixio) em relação ao horário das 9:00h (platô) (Tukey  $p = 0,009$ ). Na comparação entre as topografias, também foi encontrada diferenças significativas no efluxo (Tukey  $p = 0,016$ ), com valores mais elevados na topografia de baixio com  $3,34 \pm 0,29 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  e  $2,44 \pm 0,19 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no platô às 9:00h e  $3,72 \pm 0,37 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no baixio e  $2,66 \pm 0,15 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no platô no horário das 12:00h (Tukey  $p = 0,014$ ). Os transectos foram estatisticamente diferentes no horário das 9:00h no Bloco 1 (baixio) ( $p = 0,014$ ), também foram diferentes no horário das 10:00h no Bloco 2 (médio baixio) ( $p = 0,002$ ) e no horário das 12:00h no Bloco 4 (platô) ( $p = 0,003$ ).

Figura 13- Efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo no mês de novembro no Transecto 1 e Transecto 2, partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô (azul).



Em março de 2012 (Figura 14) no Transecto 1 o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo das 9:00h (baixio) foi significativamente maior que o efluxo das 12:00h (platô) (Tukey  $p = 0,031$ ) no transecto Baixio-Platô. No Transecto 2 partindo novamente do Baixio-Platô o efluxo das 9:00h (baixio) foi significativamente menor que o efluxo das 11:00h (médio alto) (Tukey  $p = 0,014$ ) e o efluxo das 12:00h foi significativamente menor que o efluxo nos horários de 10:00h (Tukey  $p = 0,001$ ) e 11:00h (Tukey  $p = 0,000$ ), e partindo do transecto Platô-Baixio houve diferença entre o efluxo das 9:00h e 10:00h (Tukey  $p = 0,004$ ). Com relação à diferença entre os dois transectos, foi encontrada apenas no horário das 9:00h no Bloco 1 (baixio) ( $p = 0,020$ ).

Figura 14–Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no mês de março no Transecto 1 e Transecto 2 partindo da topografia de baixio até o platô (pontilhado) e partindo da topografia de platô até o baixio (tracejado) no horário das 9:00h às 13:00h. As cores representam as topografias de baixio (laranja), médio baixio (cinza), médio alto (verde) e platô. (azul).



\*Por falha no equipamento EGM não foi possível fazer a leituras no transecto Platô-Baixio no Transecto1.

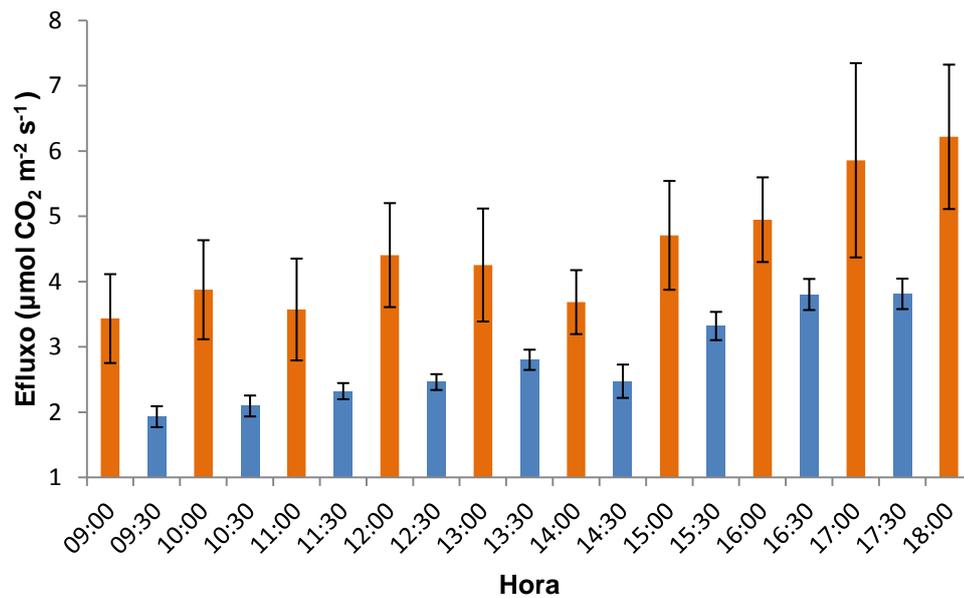
Analisando todos os meses estudados, podemos observar que exceto em março, todos os meses tiveram diferença significativa entre as topografias de platô e baixo, alguns apenas em um transecto, outros em ambos os transectos, alguns em apenas um horário, outros em ambos os horários (9:00h e 12:00h) sendo que de maneira geral, o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi maior na região de baixo em comparação com a região de platô, esta diferença pode estar relacionada à característica diferencial do ambiente relacionados à variação topográfica como a diferença do solo que é mais úmido e arenoso na região de baixo na floresta de Caxiuanã (AMARAL; ALMEIDA; COSTA, 2009). Sotta et al. (2006) estudaram o efluxo de CO<sub>2</sub> em dois locais com texturas diferentes do solo (argiloso e arenoso) em Caxiuanã e observou que a taxa média de CO<sub>2</sub> foi 21% maior para a areia (3,9 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) do que para a argila (3,1 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>).

Observou-se também que no período estudado, a maioria das observações do transecto Platô-Baixo possuíram diferença significativa entre os fluxos das 9:00h e 12:00h, apresentando um efluxo maior no baixo em comparação com o platô. Este comportamento pode ser uma resposta conjunta entre os efeitos da topografia e da variação horária no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo. Zanchi (2004) estudando o comportamento diário do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em 5 dias nas estações seca e chuvosa em uma floresta tropical úmida primária em Rondônia, observou que nos horários de medições do presente estudo (9:00h às 13:00h) houve uma tendência de crescimento no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no período seco, porém no período chuvoso para os mesmos horários, o comportamento do efluxo foi praticamente homogêneo. Silva-Junior (2008) também encontrou uma pequena tendência de crescimento no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo para o horário de observações do presente estudo, porém este autor estudou somente no período seco. Desta forma podemos sugerir que este comportamento do efluxo seja devido ao efeito conjunto da topografia e da variação horária, já que exceto em março, este comportamento não é observado no percurso Baixo-Platô para os demais meses.

No dia 4 de outubro foram feitas medições do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no intervalo de 9:00h às 18:00h na topografia de baixo e platô no Transecto 1, o efluxo foi medido em intervalos de 30 minutos, iniciando às 9:00h no baixo, 9:30 no platô e assim sucessivamente até às 18:00h, é importante destacar que na noite do dia 3 de outubro ocorreu uma forte precipitação, sendo a maior precipitação pluviométrica

registrada para este mês, com 62 mm. As médias de efluxo de CO<sub>2</sub> foram maiores na região de baixo, porém não foram estatisticamente diferentes, exceto no horário das 12:00h (Tukey  $p = 0,04$ ), a média do efluxo no baixo foi maior porém com grande variabilidade espacial entre as 5 coletas da parcela (Figura 15).

Figura 15- Comportamento horário do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no Transecto 1 em um dia no mês de outubro das 9:00h às 18:00h na topografia de baixo (laranja) e platô (azul) em intervalos de 30 minutos.



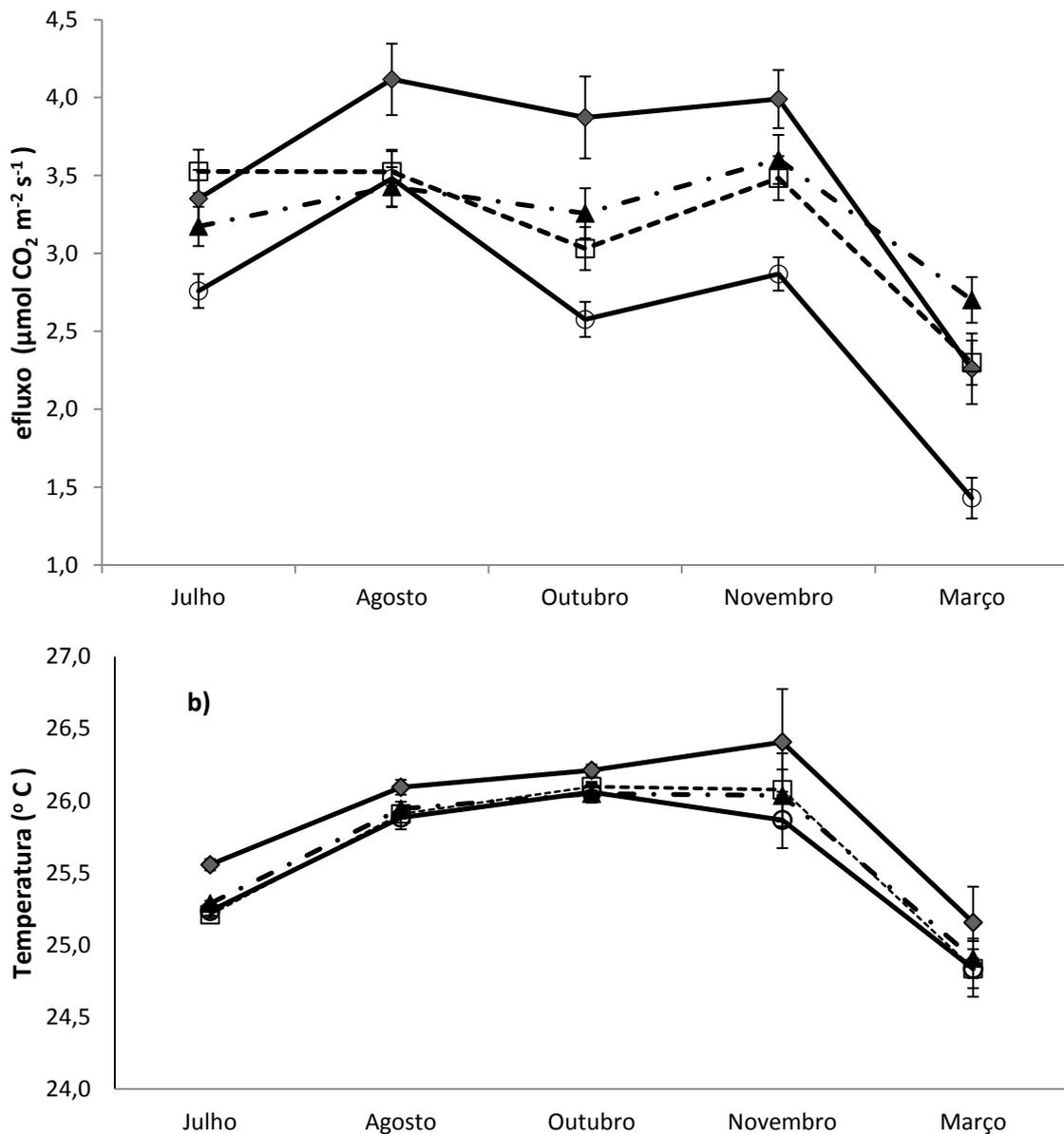
O efluxo teve um comportamento crescente durante o dia em ambas às topografias, sendo menor pela manhã ( $3,4 \pm 0,68 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no baixo e  $1,9 \pm 0,16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no platô) e maior no final da tarde, ( $6,2 \pm 1,11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no baixo e  $3,8 \pm 1,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no platô), com uma amplitude de  $2,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  e  $1,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no baixo e platô respectivamente.

#### 4.4.3 Variação do efluxo com os meses em cada bloco, nos diferentes transectos.

Comparando as médias do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo nas diferentes topografias para todo o período estudado (Figura 16a), observa-se um aumento do efluxo do mês de julho para agosto que climatologicamente são meses de transição, seguida por uma suave redução nos meses da estação seca (outubro e novembro) e por fim uma redução mais acentuada no mês chuvoso (março), independente da posição topográfica. Comportamento similar no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi encontrado por Sotta et al.(2006) que em dois anos de estudo, observou que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo diminui progressivamente durante a estação chuvosa, seguido por um aumento

no período de transição, seguido por uma diminuição progressiva durante a estação seca, aumentando novamente na estação chuvosa.

Figura 16- Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (a), e temperatura do solo a 10 cm de profundidade (b) nas topografias de baixo (-♦-), médio baixo (-□-), médio alto (-▲-) e de platô (-○-). Barras de erro representam ± erro padrão da média.

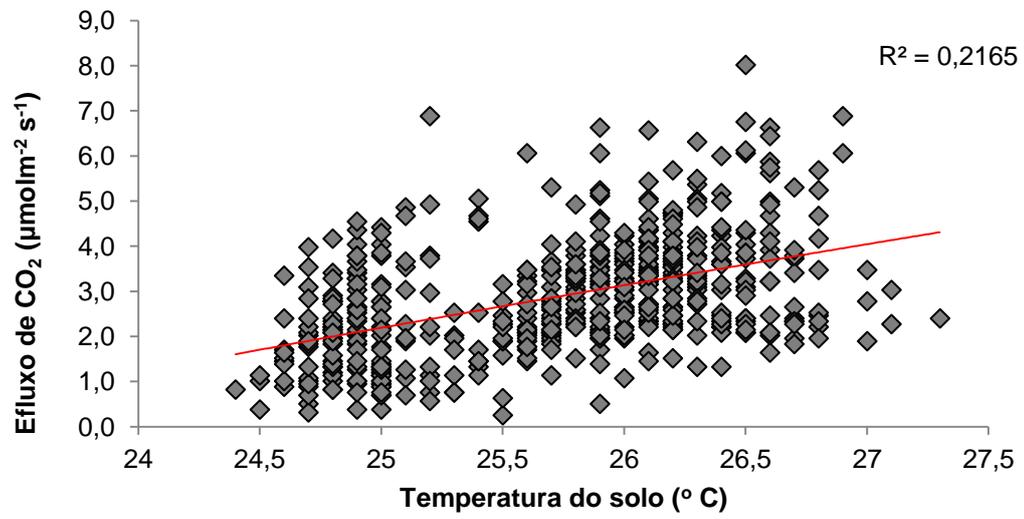


Nos meses de outubro e novembro, observa-se que a diferença no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo entre o baixo e platô são maiores, observa-se ainda que nas topografias intermediárias (médio baixo e médio alto) existe pouca variação no efluxo nos meses com pouca precipitação. A sazonalidade da precipitação possui

efeito significativo no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo ( $p < 0,01$ ) tendo o mês de agosto (mês de transição) com maior média de efluxos de CO<sub>2</sub> e o mês de março (mês chuvoso) com a menor média de efluxo, independente da posição topográfica. Os resultados estatísticos mais detalhados da diferença do efluxo de CO<sub>2</sub> em todos os blocos e para os dois transectos estão em anexo. Estes resultados são similares aos encontrados por Sotta et al. (2006) que encontrou as maiores taxa de efluxo em meses de transição (julho e janeiro) e menor efluxo no mês chuvoso (abril). Porém outros estudos diferem dos resultados aqui apresentados, por exemplo os resultados apresentados por Gonçalves (2009) que encontrou maiores magnitudes dos efluxos na estação chuvosa, sendo que o efluxo teve comportamento crescente no início da estação chuvosa (janeiro e fevereiro) diminuindo no final da estação (março e abril), porém o mesmo autor estudando o efluxo diário em um dia na estação seca e outro na estação chuvosa encontrou efluxo médio diário maior na estação seca, o autor justifica os seus resultados afirmando que as leituras dos dados mensais de seu trabalho e de outros da literatura são feitas geralmente às 12:00h, sem levar em consideração a variação diária do efluxo.

O comportamento da temperatura do solo no momento das observações do efluxo (Figura 16b) também variou no decorrer dos meses, sendo maior nos meses secos e menor no mês chuvoso, tiveram também variação entre as diferentes topografias, sendo a temperatura no baixio significativamente maior em quase todos os meses. Estudos têm mostrado uma relação de dependência entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo e a temperatura do solo como Sotta et al. (2004) que fez a correlação diária do efluxo de CO<sub>2</sub> com a temperatura do solo em diversas profundidades e observou uma maior correlação a 5 cm de profundidade ( $r^2 = 0,68$ ), seguida pela profundidade de 10cm ( $r^2 = 0,65$ ). Zanchi (2004) e Gonçalves (2009) também observaram uma relação de dependência entre o efluxo de CO<sub>2</sub> e a temperatura do solo em ambiente de floresta tropical. Entretanto este trabalho, não encontrou uma relação do efluxo de CO<sub>2</sub> com a temperatura (Figura 17).

Figura 17- Dispersão do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo com a temperatura do solo na profundidade de 10 cm.



## 5 CONCLUSÕES

Houve diferença significativa na taxa de carbono orgânico do solo entre os diferentes transectos, na topografia de baixio para a camada superficial do solo (0-10 cm), com o teor de carbono orgânico significativamente maior na parcela as margens do igarapé intermitente. Com relação à variação topográfica, não foram encontradas diferenças significativas no carbono orgânico do solo, no entanto, com relação à profundidade observa-se uma redução no teor de carbono orgânico na maioria das observações.

Houve uma redução na biomassa de raízes com o aumento da profundidade do solo em ambos os transectos para todas as topografias, essa redução é observada principalmente da camada superficial (0 a 10 cm) para as demais profundidades, sendo que na camada superficial do solo está concentrada a maior biomassa de raízes. Quanto a sazonalidade, foi observado uma diferença significativa na biomassa de raízes finas, tendo o valor da biomassa de raízes significativamente maior no mês seco (novembro) em relação ao mês chuvoso (março). Não houve diferença na biomassa de raízes finas ao longo do gradiente topográfico para as mesmas profundidades.

O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, de maneira geral, foi maior na região de baixio em comparação com a topografia de platô, porém esta diferença provavelmente não está relacionada apenas a variação da topografia mais sim a fatores influenciados por ela. A sazonalidade da precipitação possui efeito significativo no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, sendo o mês de agosto (mês de transição) com maior média de efluxos de CO<sub>2</sub> e o mês de março (mês chuvoso) com a menor média de efluxo, independente da posição topográfica.

## REFERÊNCIAS

- ADUAN, E.R; VILELA, F.M; KLINK, A.C. Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - O caso do Cerrado Brasileiro. **Embrapa Cerrados**. Planaltina DF, 2003.
- ALMEIDA, S.S.; LISBOA, P.L.B.; SILVA, A.S.L. Diversidade florística de uma comunidade arbórea na Estação Científica Ferreira Penna, em Caxiuanã (Pará) PA. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**, Série Botânica, Belém, v.9, p.93-128, 1993.
- AMARAL, D.D.; ALMEIDA, S.S.; COSTA, D.C.T. Contribuições ao manejo florestal de espécies de valor madeireiro e não madeireiro na Floresta Nacional de Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.) **Caxiuanã: Desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2009. p.199-221.
- BATJES, N. **Management Options for Reducing CO<sub>2</sub>- Concentrations in the Atmosphere by Increasing Carbon Sequestration in the Soil**. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1999.
- BLAIR, B.C.; PERFECTO, L. Nutrient Content and Substrate Effect on Fine Root Density and Size Distribution in a Nicaraguan Rain Forest. **Biotropica**, v. 33, p. 697-701, 2001.
- BURTON, A. J.; PREGITZER, K.S.; HENDRICK, R. L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. **Oecologia**, v.125, p.389–399, 2000.
- CAVALCANTI, I.F.A. Episódios El Niño/ Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. **Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática; Edição Especial comemorativa de 10 anos**, 1996.
- CASTELLANOS, J.; JARAMILLO, V.J.; SANFORD-JUNIOR, R.L; KAUFFMAN, J.B. Slash and burn effects on fine root biomass and productivity in a tropical dry forest ecosystem in México. **Forest Ecology and Management**, v.148, p.41 – 50, 2001.
- CASTILHO, C. V.; MAGNUSSON, W.E.; ARAÚJO, R.N.O.; LUIZÃO, R.C.C.; LUIZÃO, F.J.; LIMA, A.P.; HIGUCHI, N. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: Effects of soil and topography. **Forest Ecology and Management**, v.234, p.85 – 96, 2006.
- CAVALIER, J.; ESTEVES, J.; ARJONA, B. Fine-Root Biomess in Three Successional Stages of na Andean Cloud Forest in Colombia. **Biotropica**, v. 28 (4b), p. 728 – 736, 1996.
- COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. **Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v.4, n. 11, p.34-40, 1989.
- COSTA, J.P.R; MORAES, J.C. Médias mensais de variáveis meteorológicas ( 1996-1999). In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. p. 225-232.

COSTA, A.C.L.; ALMEIDA, S.S.; CARVALHO, C.R.; MEIR, P.; MALHI, Y.; COSTA, R.F.; SILVA JUNIOR, J.A.; COSTA, M.C.; TANAKA, B.T.; FISHER, R.A.; SOTTA, E.D.; OLIVEIRA, L.L.; GONÇALVES, P.H.L.; BRAÇA, A.P.; BARRETO, P.N. Experimento Esecaflo-LBA em Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.) **Caxiuanã: Desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2009. p. 45-90.

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within amazonian forests II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. **Oecologia**, v. 76, p. 222-235, 1988.

D'ANDRÉA, F.A. **Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais**. 2004.110f. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

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

DIAS, J.D. **Fluxo de CO<sub>2</sub> proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia**. 2006. 88f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DORNBUSH, M. E.; SHISENHART, T. M.; RAICH, J. W. Quantifying fine-root decomposition: an alternative to buried litterbags. **Ecology**, v. 83, n. 11, p. 2985-2990, 2002.

EHRENFELD, J.; KALDOR, E.; PARMELEE, R. W. Vertical distribution of roots along a soil toposequence in the New Jersey Pinelands. **Canadian Journal of Forest Research**, v.22, p.1929-1936, 1992.

ESPELETA, J.F.; CLARCK, D.A. Multi-scale variation in fine root biomass in a tropical rain forest: a seven year study. **Ecological Monographs**, v.77, p.377–404, 2007.

FERREIRA, L.V.; ALMEIDA, S.S.; AMARAL, D.D.; PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da Estação Científica Ferreira Penna: Subsídios para o plano de Manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. **Pesquisas, Botânica**, n.56, p.103-116, 2005.

FISCH, G.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Clima da Amazônia. **Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática; Edição Especial comemorativa de 10 anos**, p. 24-41, 1996.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

GONÇALVES, L.H.P.; **Influência de Variáveis Biofísicas nas taxas de respiração de solos em floresta tropical da Amazônia Oriental**. 2009. 54f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2009.

GORDON, W. S.; JACKSON, R. B. Nutrient concentrations in fine roots. **Ecology**, v.81, n. 1, p. 275-280, 2000.

GOWER, S. T. Relations between mineral nutrient availability and fine root biomass in two Costa Rican tropical wet forests: a hypothesis. **Biotropica**, v. 19, n.2, p. 71-75, 1987.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTY, J.; MIRANDA, A.C.; MCIR, P.; MIRANDA, H.S.; NOBRE, C.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGTH, I.; GASH, J. Carbon Dioxide Uptake by an Undisturbed Tropical Rain Forest in South West Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, v. 270, n. 5237, p.778-780, 1995.

GREEN, J. J.; DAWSON, L.A.; PROCTOR, J; DUFF, E.I.; ELSTON, D.A. Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. **Plant and Soil**, v.276, p.23-32, 2005.

HANSON, P.J.; WULLSCHLEGER, S.A.; BOHLMAN, S.A.; TODD, D.E. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO<sub>2</sub> efflux from an upland oak forest. **Tree Physiology**, V.13, p.1-15, 1993.

HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; NOBRE, C.A.; HACLDER, J.L.; LAWRENCE, K.T.; CHOMENTOWSKI, W.H. Annual Fluxes of Carbon from Deforestation and Regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v.403, p.301-304, 2000.

INTERNATIONAL PAINELOF CLIMATE CHANGES (IPCC). **Climate Change The Scientific Basis**. IPCC Technical paper. WMO/Unep 2008.

JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E. D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.94, p.7362-7366, 1997.

JACOBS, M. **The tropical rain forest- a first encounter**. Berlin: Spriner Vorlag, 1988. 295p.

JENSEN, L.S.; MUELER, T.; TATE, K.R.; ROSS, D.J.; MAGID, J.; NIELSEN, N.E. Soil surface CO<sub>2</sub> flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.1297-1306, 1996.

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**. v10, p.423-436, 2000.

JOSLIN, J. D.; WOLFE, M. H.; HANSON, P. J. Effects of altered water regimes on forest root systems. **NewPhytology**. V.147, p.117-129, 2000.

KANG S.; KIM, S.; OH, S.; LEE, D. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. **Forest Ecology and Management**, v.136, p.173-184, 2000.

KAYANO, M.T.; MOURA, A.D.O. El-Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.4, n. 1-2, p.201-214, 1986.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v.220, p.242-258, 2005.

LEÃO, M.F. **Estoque e distribuição de raízes finas em clareiras naturais e clareiras formadas por exploração seletiva de madeira em uma floresta de terra firme no município de Mojú, Pará.** 2010. 49f. Dissertação (Mestrado em botânica) - Universidade Federal Rural da Amazônia e Museu Paraense Emílio Goeldi, 2010.

LEUSCHNER, C. L.; HERTEL, D.; SCHMID, I.; KOCH, O.; MUHS, A.; HÖLSCHER, D. Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 258, p. 43–56, 2004.

LIMA, S.T.T.; MIRANDA, I.S.; VASCONCELOS, S.S. **Effects of water and nutrient availability on fine root growth in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil.** New Phytologist, 2010.

LIMA, S.T.T.; MIRANDA, I.S.; VASCONCELOS, S.S. Fine- root production in two secondary forest sites with distinct ages in Eastern Amazon. **Acta Amazônia**, v. 42, n. 1, p. 95-104, 2012.

LISBOA, P.L.B.; SILVA, A.S.L.; SOARES, S.S. Florística e estrutura dos ambientes. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã.** Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 1997. p. 163-194.

LUIZÃO, R.C.C.; LUIZÃO, F.J.; PAIVA, R.Q.; MONTEIRO, T.F.; SOUZA, L.S.; KRUIJT, B. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. **Global Change Biology**, v.10, p.592–600, 2004.

MACHADO, P. L. O de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon Dioxide Transfer over a Central Amazonian Rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, D24: 31593-31612, 1998.

MALHI, Y; .BALDOCHIE, D.D.; JARVIS, P.G.The Carbon Balance of Tropical, Temperate and Boreal Forests. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, p. 715-740, 1999.

MARENGO, J. **Extreme climatic events in the Amazon Basin and their associations with the circulation of the global tropics.** 1991. 147 f. Ph. D. (Thesis) - Department of Meteorology, University of Wisconsin-Madison, 1991.

MARENGO, J. Interannual variability of surface climate in Amazon basin. **International Journal of Climatology**, v.12, n. 8, p.853-863, 1992.

MARKESTEIJN, L.; POORTER, L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance. **Journal of Ecology**, v.97, p.311-325, 2009.

MCCLAUGHERTY, C. A.; ABER, J. D.The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. **Ecology**, v. 63, n. 5, p. 1481-1490, 1982.

MCGUIRE, A. D.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; JOYCE, L.A. Equilibrium Responses of Soil Carbon to Climate Change: Empirical and Process-Based Estimate. **Journal of Biogeography**, v.22, p.785–796,1995.

METCALFE, D. B.; MEIR, P.; ARAGÃO, L.E.O.C.; COSTA, A.C.L.; BRAGA, A.P.; GONÇALVES, P.H.L.; SILVA JUNIOR, J.A.; ALMEIDA, S.S.; DAWSON, L.A.; MALHI, Y.; WILLIAMS. M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. **Plant and Soil**, v. 311, p. 189-199, 2008.

MOLION, L.C.B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, n. 1, p.107-117, 1987.

MORAES,J.C.; COSTA, J.P.R.; ROCHA, E.J.P.; SILVA, I.M. Estudos hidrometeorológicos na bacia do rio Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1997.

MORAIS, C.B.etal. Variabilidade de precipitação na floresta de Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.) **Caxiuanã: Desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2009, p. 91-97.

MUSEU PAPARENSE EMÍLIO GOELDI-MPEG. **Mapa da localização da Floresta Nacional de Caxiuanã-Pa**. Disponível em: <<http://www.museu-goeldi.br>>. Acesso em: fev. 2012.

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

NOBRE, A. C; NOBRE D.A. O Balanço de carbono da Amazônia Brasileira. **Estudos Avançados**, v.16, n.45, 2002.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 59, n. 3, 2007.

OLIVEIRA, M.C.F.; COSTA, A.C.L.; COSTA, J.P.R.; PALHETA, M.C.P.; PEREIRA, M.G.P. Comportamento dos elementos meteorológicos. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. p. 217-224.

OMETTO, B. H. P. J.; NOBRE, A.D.; ROCHA, H.R.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A. Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. **Oecologia**, v.143, p.483–500, 2005.

POST, W. M.; EMANUEL, W.R.; ZINKE, P.J.; STANGENBERGER, A.G. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, v.298, p.156–159, 1982.

PREGITZER, K.S; HENDRICK, R.L.; FOGEL, R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. **New Phytologist**, v.125, p.575-580, 1993.

RAICH, J.W.; SCHLESINGER W.H.The global carbon dioxide flux in soil respiration and relationship to vegetation and climate.**Tellus**, v.44B, p.81–99, 1992.

REUBENS, B.; POESEN, J.; DANJON, F.; GEUDENS, G.; MUYS, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. **Trees**, v. 21, p.385–402, 2007.

ROCHETTE, P.; GREGORICH, E.G.; DESJARDINS, R.L. Comparison of static and dynamic closed chambers for measurement of soil respiration under field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v.72, p.605-609, 1992.

RODIN, P. **Distribuição da biomassa subterrânea e dinâmica de raízes finas em ecossistemas nativos e uma pastagem plantada no cerrado do Brasil central**. 2004. 97f. Dissertação (Mestrado em ecologia)- Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Biológicas, 2004.

ROSADO, P.H.B.; MARTINS, A.C.; COLOMEU, T.C.; OLIVEIRA, R.S.; JOLY, C.A.; AIDAR, M.P.M. Fine root Biomass and root length density in a lowland and a montane tropical rain forest, SP, Brazil. **Biota Neotropica**, v.11, n.3, 2011.

RUIVO, M.L.P.; PEREIRA, S.B.; BUSSETTI, E.P.C.; COSTA, R.F.; QUANZ, B.; NAGAISHI, T.Y.; OLIVEIRA, P.J.; MEIR, P.; MALHI, Y.; COSTA, A.C.L. Propriedades do solo e fluxo de CO<sub>2</sub> em Caxiuanã, Pará: Experimento LBA – ESECAFLOR. In: KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. (Ed.). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 2002. v.3, p.291-299.

RYAN, M.G.; LAL, B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, v.73, p.3 – 27, 2005.

SCHIMMEL, D. S.; BRASWELL, B.H.; HOLLAND, E.A.; MCKEOWN, R.; OJIMA, D.S.; PAINTER, T.H.; PARTON, W.J.; TOWNSEND, A.R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. **Global Biogeochemistry Cycles**, v.8, p.279-293, 1994.

SCHLESINGER, W. H. **Soil organic matter: A source of atmospheric CO<sub>2</sub>**. in G. M. Woodwell, editor. The role of the terrestrial vegetation in the global carbon cycle. New York, USA: Wiley, 1984. p. 111–127.

SCHLESINGER, W.H. **Biogeochemistry: an analysis of global change**, 2nd edn. New York: Academic, 1997.

SCHLESINGER, W.H.; ANDREWS J.A. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, v. 48, p.7–20, 2000.

SILVA-JUNIOR, A.J. **Efeitos da exclusão de chuva no fluxo de CO<sub>2</sub> do solo na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará**. 2008.65f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

SILVER, W. L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian Forest ecosystem. **Ecosystems**, v. 3, p. 193-209, 2000.

SILVER, W. L.; MIYA, R. K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. **Oecologia**, v. 129, p.407–419, 2001.

SILVER, W. L. et al. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forests soils. **Global Change Biology**, v.11, p.290-306, 2005.

SOMBROEK, W. G. **Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. Center of Agricultural Publication and Documentation, Wageningen, 1966.

SOTTA, E.D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, v.10, p. 601–617, 2004.

SOTTA, E.D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B.R.; PAIXÃO, R.K.; RUIVO, M.L.P.; ALMEIDA, S.S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.237, p.57–64, 2006.

SOUZA, E.P.P. **Relações entre as anomalias de TSM do Atlântico e Pacífico e as precipitações na Amazônia oriental**. 2003. Dissertação (Mestrado)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2003.

SOUZA-JUNIOR, A.J. **Influência da precipitação pluviométrica na taxa de crescimento de raízes na Floresta Nacional de Caxiuanã**. 2011. 47f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

SUNDARAPANDIAN, S. M.; SWAMY, P. S. Fine root biomass distribution and productivity patterns under open and closed canopies of tropical forest ecosystems at Kodayar in Western Ghats, South India. **Forest Ecology and Management**, v.86, p.181-192, 1996.

TAPIA-CORAL, S. C.; LUIZÃO, F.J.; WANDELLI, E.; FERNANDES, E.C.M. Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 42, p. 65:33, 2005.

TIAN, H.; MELILLO, J.M.; KICKLIAHTER, D.W.; MCGUIRE, A.D.; HELFRICH, J.V.K.; MOORE, B.; VOROSMARTV, C.J. Effects of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. **Nature**, v. 396, p.664-667, 1998.

TOLEDO, Z.O.; KAUFFMAN, J.B. Root biomass in relation to channel Morphology of head water streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v.37, n. 6, 2001.

TRUMBORE, S.E.; CHADWICK O.A.; AMUNDSON, R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. **Science**, v.272, p. 393–396, 1996.

VALVERDE-BARRANTES, O. J.; RAICH, J. W.; RUSSELL, A. E. Fine-root mass, growth and nitrogen content for six tropical tree species. **Plant and Soil**, v. 290, p. 357–370, 2007.

VAREJÃO-SILVA, M.A.; **Meteorologia e Climatologia**. Pernambuco, p.449, 2006

VISALAKSHI, N. Fine root dynamics in two tropical dry evergreen forests in southern India. **Journal Bioscience**, v. 19, n. 1, p. 103-116, 1994.

ZANCHI, B.F. **Medição do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo com câmaras automáticas sobre floresta em Rondônia**. 2004. 57f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, geofísica e Ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo. SP, 2004.

ZIMBACK, C. R. L. **Classificação de solos**. Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas. Botucatu: FCA, UNESP, 2003. 13p.

# APÊNDICES

**APÊNDICE A - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO1 (BAIXIO-PLATÔ).**

Meses		Valor de p			
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
Julho	Agosto	0.133	0.991	0.951	0.235
Julho	Outubro	0.404	0.999	0.962	0.999
Julho	Novembro	0.055	0.518	0.116	0.596
Julho	Março	1.000	<b>0,015</b>	0.741	<b>0,000</b>
Agosto	Outubro	0.972	0.999	1.000	0.373
Agosto	Novembro	0.995	0.798	0.427	0.968
Agosto	Março	0.108	<b>0,004</b>	0.307	<b>0,000</b>
Outubro	Novembro	0.855	0.658	0.397	0.765
Outubro	Março	0.351	<b>0,008</b>	0.334	<b>0,000</b>
Novembro	Março	<b>0,044</b>	<b>0,000</b>	<b>0,004</b>	<b>0,000</b>

**APÊNDICE B - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 1 (PLATÔ-BAIXIO).**

Meses		Valor de p			
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
Julho	Agosto	<b>0,001</b>			<b>0,050</b>
Julho	Outubro	0,499			0,374
Julho	Novembro	0,716			0,056
Julho	Março				
Agosto	Outubro	<b>0,040</b>			0,750
Agosto	Novembro	<b>0,016</b>			1,000
Agosto	Março				
Outubro	Novembro	0,985			0,779
Outubro	Março				
Novembro	Março				

**APÊNDICE C - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 2 (BAIXIO-PLATÔ).**

Meses		Valor de p			
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
Julho	Agosto	0.981	0.985		0.057
Julho	Outubro	0.531	<b>0,002</b>		0.992
Julho	Novembro	1.000	0.267		1.000
Julho	Março	<b>0,007</b>	<b>0,021</b>		<b>0,013</b>
Agosto	Outubro	0.855	<b>0,011</b>		<b>0,019</b>
Agosto	Novembro	0.990	0.567		<b>0,044</b>
Agosto	Março	<b>0,034</b>	0.079		<b>0,000</b>
Outubro	Novembro	0.586	0.353		0.997
Outubro	Março	0.303	0.947		<b>0,041</b>
Novembro	Março	<b>0,009</b>	0.799		<b>0,017</b>

**APÊNDICE D - TESTE DE TUKEY RELATIVO AOS VALORES DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO AO LONGO DOS MESES DE ESTUDO NO TRANSECTO 2 (PLATÔ-BAIXIO).**

Meses		Valor de p			
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
Julho	Agosto	0.979		0.998	0.217
Julho	Outubro	<b>0,014</b>			
Julho	Novembro	0.868		0.947	1.000
Julho	Março	<b>0,000</b>		<b>0,009</b>	<b>0,022</b>
Agosto	Outubro	0.065			
Agosto	Novembro	0.994		0.993	0.222
Agosto	Março	<b>0,000</b>		<b>0,018</b>	<b>0,000</b>
Outubro	Novembro	0.178			
Outubro	Março	0.220			
Novembro	Março	<b>0,000</b>		0.054	<b>0,021</b>