



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Dinâmica do Escoamento de Ar Acima e Dentro de uma Floresta Tropical Densa sobre Terreno Complexo na Amazônia

Aurilene Barros dos Santos¹, Julio Tóta², Marcos Antonio Lima Moura³, David Roy Fitzjarrald⁴, Raoni Aquino Silva de Santana⁵, Antonio Marcos Delfino de Andrade⁶, Rayonil Gomes Carneiro⁷

¹Mestre em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade do Estado do Amazonas. Manaus-AM. E-mail: leneufal@hotmail.com; ²Professor do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade do Estado do Amazonas. Manaus-AM; ³Professor da Universidade Federal de Alagoas/Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió – AL; ⁴Professor da Atmospheric Sciences Research Center, University at Albany, SUNY, 251 Fuller Road, Albany, NY 12203, USA; ⁵Mestre em clima e Ambiente Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade do Estado do Amazonas. Manaus-AM; ⁶Doutorando em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande/Departamento de Ciências Atmosféricas. Campina Grande-PB; ⁷Mestrando em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande/Departamento de Ciências Atmosféricas. Campina Grande-PB.

Artigo recebido em 24/05/2013 e aceite em 26/08/2013

RESUMO

Para realização deste estudo foram utilizados dados provenientes de uma campanha de campo conduzida em 2006 na Reserva Biológica do Rio Cuieiras – ZF2, próxima à cidade de Manaus-Amazonas, com o objetivo de descrever o escoamento abaixo do dossel, e determinar sua relação com o vento acima da floresta, foram medidos, gradientes horizontais e verticais de temperatura do ar, e de vento durante as estações seca e chuvosa de 2006. Os resultados indicaram, de uma maneira geral, que a frequência de ventos, tanto acima quanto abaixo da copa, é maior na estação chuvosa alcançando 73,5% e 84% de ocorrência respectivamente. Observou-se também, um padrão de escoamento abaixo da floresta, persistente e sistemático, sobre a área de encosta, subindo durante a noite e descendo durante o dia e desacoplado com o ar acima da copa, esse padrão de escoamento é inverso ao padrão clássico de escoamento valemontanha. A média do gradiente vertical de θ_v foi negativa durante a noite e positiva durante o dia em ambas as estações climáticas. Evidenciando que a topografia e estrutura térmica no interior da floresta é a responsável por esse padrão de escoamento reverso ao longo da encosta.

Palavras chaves: fluxos horizontais, vento, vegetação densa.

Dynamics of Airflow Above and Within a Tropical Rainforest Canopy Dense in the Complex Terrain on Amazonia

ABSTRACT

For this study were used data from a field campaign conducted in 2006 in the biological reserve of Rio Cuieira - ZF2, near the city of Manaus-Amazonas, in order to describe the flow below the canopy, and determine its ratio with the wind above the forest. We measured horizontal and vertical gradients of air temperature, and wind during the dry and wet seasons of 2006. The results indicated, in general, the frequency of winds, both above and below the canopy is higher in the wet season reaching 73.5% and 84%, respectively. It was also observed, a flow pattern below the forest, persistent and systematic, on the slope area, upslope at night and downslope during the day and uncoupled with the airflow above the canopy, this flow pattern is inverse to the classic pattern of mountain-valley drain. The average vertical gradient of θ_v was negative during the night and positive during the day in both seasons. Showing that the topography and thermal structure inside the forest is responsible for this reverse flow pattern along the slope.

Keywords: horizontal flows, wind, dense vegetation.

1. Introdução

Há algum tempo, tem sido evidenciado que grande parte da problemática com a

técnica de *Eddy covariance* (EC) na estimativa de balanço de massa, energia e carbono é devida a existência de transporte horizontais e/ou escoamentos locais desenvolvidos em ambientes de vegetação densa, os quais transportam, por exemplo, CO₂ para dentro/fora da área representativa das torres de fluxos que pode causar superestimativas/subestimativas na concentração de CO₂. Portanto existe uma necessidade de melhor entender a dinâmica desse escoamento, porém, dois temas complicam essa ambição.

Primeiro, escoamentos em terrenos com vegetação são provavelmente mais complexos do que em terreno com pouca ou sem presença de cobertura vegetal, pois, em terreno florestado, devemos considerar não apenas aquecimento/arrefecimento radiativo próximo ao solo, mas também no dossel, bem como possíveis camadas distintas no interior do dossel e sub-bosque (Mahrt *et al.*, 2000). Além disso, a presença de troncos de árvores e vegetação no subdossel podem afetar significativamente a velocidade e direção do vento através de uma variedade de fatores, tais como o arrasto de atrito, o armazenamento de calor e gradientes de pressão não hidrostática. Como resultado, pode haver múltiplas camadas de fluxos termicamente conduzidos, que são desacoplados uns dos outros, assim como os fluxos de ar acima.

Segundo, os mecanismos físicos envolvidos em tal dinâmica variam de lugar para lugar e condições locais estudadas. Isto tem sido evidenciado também por vários estudos em diversas localidades (Aubinet *et al.*, 2003; Staebler e Fitzjarrald, 2004, 2005; Marcolla *et al.*, 2005; Froelich *et al.*, 2005; Froelich e Schmid, 2006; Feigenwinter *et al.*, 2008; Leuning *et al.*, 2008;).

Devido à complexidade do terreno, diversos autores (Mahrt, 1982; Froelich *et al.*, 2005; Froelich e Schmid, 2006; Tóta *et al.*, 2008; Queck *et al.*, 2010; Sedlák *et al.*, 2010; Froelich *et al.*, 2011; Tóta *et al.*, 2012; Chen e

Yi 2012; Wang 2012; Wang e Yi 2012) centraram foco na dinâmica do escoamento e seus efeitos nas trocas verticais de massa, *momentum* e carbono.

No entanto, poucos estudos abordaram a problemática da dinâmica do escoamento em regiões de florestas tropicais, principalmente em terreno complexo de pequena escala, como é o caso da Reserva Biológica do Rio Cuieiras, próxima a cidade de Manaus, Amazonas. Grande parte das pesquisas anteriores se concentrava sobre os escoamentos de maior escala em terreno montanhoso e sobre sítios de latitudes médias. Vale ressaltar que a única pesquisa encontrada na literatura que identifica e evidencia a existência de tais escoamentos na Amazônia Central foi o estudo desenvolvido por Tóta (2012).

Diante do que foi exposto, este estudo pretende caracterizar a dinâmica do escoamento acima e abaixo do dossel em uma vegetação de floresta tropical de terra firme sobre terrenos complexos na Amazônia (Sítio LBA-ZF2), e os principais padrões das microcirculações locais e suas forçantes.

2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo - O sítio experimental do LBA em Manaus (2°36'32" S, 60°12'33" O, 140 m alt.) localiza-se na Reserva Biológica do Rio Cuieiras (cerca de 100 km à noroeste da cidade de Manaus, Amazonas) e é controlado e mantida pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). A área de estudo apresenta uma variação significativa de ondulações topográficas compreendendo vales, platôs e encostas, além de diferentes tipologias florestais entre essas superfícies. Na Figura 1a é apresentada, em grande escala, a localização da área de estudo e a hidrografia e topografia pela imagem SRTM-DEM. A referida área, a qual está inserida a micro bacia do Asu (retângulo preto), segundo estimativas de Rennó *et al.* (2008) é composta por 31% de platôs, 26% de encostas e 43% de vales.

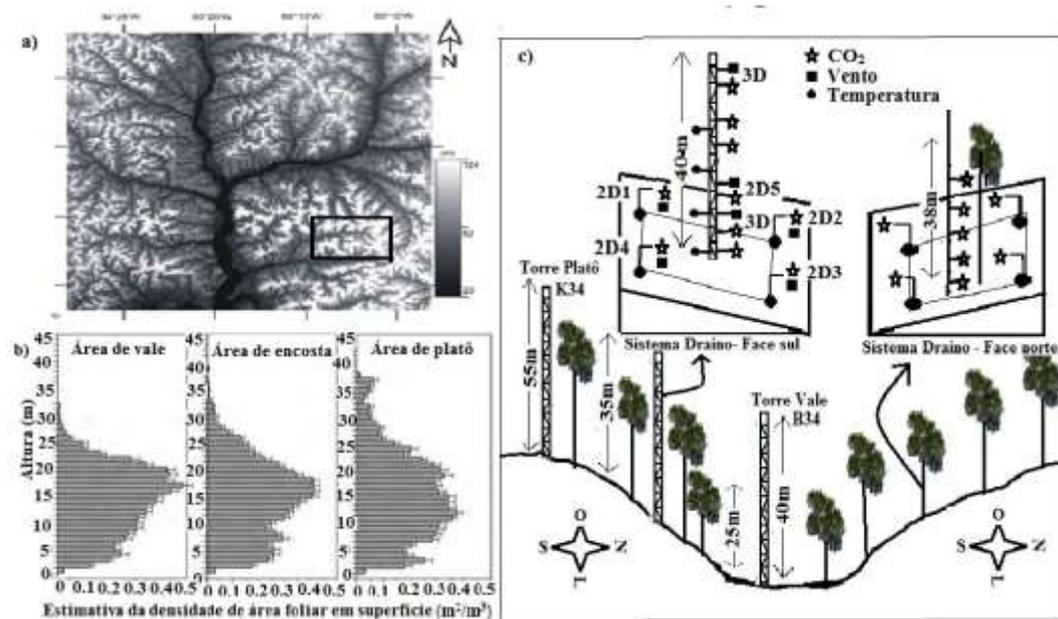


Figura 1. a) Hidrografia e topografia na imagem SRTM-DEM O retângulo preto detalha a micro bacia Asu onde as medidas foram realizadas (fonte: Rennó *et al.*, 2008), b) Densidade da vegetação medida com sensor LIDAR, e c) Sistema de medidas DRAINO (faces sul e norte da encosta) implementado no sítio LBA Manaus, incluindo a topografia e instrumentação.

Em pequena escala, ocorre uma grande variabilidade espacial de platôs, encostas e vales. Esta heterogeneidade de superfície provoca padrões distintos de estrutura e composição da vegetação (Figura 1b), como também diferentes tipos de solos.

As áreas de platôs são cobertas por floresta tropical primária ombrófila densa de terra firme (áreas não inundáveis sazonalmente), variando de 30 a 35 metros de altura média e com biomassa variando de 215 a 492 toneladas por hectare (Laurance *et al.*, 1999). Os solos do tipo latosolo amarelo argiloso (oxisols/ultisols) são característicos dos platôs. Nas áreas de encostas (vertentes), a cobertura vegetal é mais baixa de 20 a 35 metros e com menor biomassa. As composições do solo dessas áreas apresentam uma variação de latosolo argiloso, no início da encosta, para solos arenosos (spodosols) em direção aos vales (Luizão *et al.*, 2004). Os vales são formados de solos arenosos (spodosols) pobremente drenados e inundados sazonalmente, predominando uma vegetação mais aberta e de pequeno porte (altura entre 15 e 25 metros) e com grande concentração de palmeiras. Em algumas áreas dos vales e na parte inferior das encostas com solos constituídos de alto teor de areia branca, uma floresta de baixo porte e biomassa do tipo

campinarana é comumente encontrada (Luizão *et al.*, 2004).

O regime de precipitação na área de estudo segue um período chuvoso (dezembro a abril) e seco (junho a setembro - < 100 mm mês⁻¹) com um total variável de cerca de 2400 mm e as temperaturas do ar variando de 26 °C (abril) a 28 °C (setembro). Maiores detalhes dos padrões médios de meteorologia e hidrologia da área podem ser encontrados em Waterloo *et al.* (2006), Cuartas *et al.* (2007), Tomasella *et al.* (2008), e Hodnett *et al.* (2007).

2.2 Instrumentação e Medidas - Os conjuntos de dados a serem utilizados neste estudo é proveniente de uma campanha de campo, denominada Draino Manaus, realizada pelo Dr. Júlio Tóta em 2006 no sítio experimental do LBA em Manaus, que incluem o fluxo de ar, acima e abaixo da floresta, e a estrutura térmica do ar abaixo do dossel (ver Tóta *et al.*, 2008), durante o período compreendido entre janeiro de 2006 e outubro de 2006.

O sistema de medidas Draino, usado no sítio LBA em Manaus, é semelhante ao desenvolvido pela Universidade Estadual de Nova Iorque, sob a supervisão do Dr. David Fitzjarrald, e aplicada no sítio LBA em Santarém, incluindo os mesmos

procedimentos metodológicos e as taxas de amostragem, que pode ser verificado em Tota *et al.* (2008). No entanto, devido à complexidade do terreno, foi modificado para as condições da floresta em Manaus de maneira a evitar problemas operacionais oriundos das condições de umidade, descargas elétricas e regime de chuva da região e incluiu uma duplicação de observações de CO₂ para diferentes áreas da encosta (Figura 1c).

O sistema e os sensores foram implantados com as medições de temperatura do ar e umidade do ar (círculos), concentração de CO₂ (estrelas), e velocidade e direção do vento (quadrados), para ambas as faces sul e norte. As observações do anemômetro sônico 3-D foram realizadas a 10 Hz e todos os outros parâmetros (CO₂, H₂O, temperatura do ar e umidade do ar) foram amostrados a 1 Hz.

Para aquisição dos dados, foi utilizado um computador pessoal com sistema Linux (os quais foram processados e armazenados via conexão *online* em tempo real com todos

os sensores por uma porta multiseriada), e todos os dispositivos de fornecimento de energia (filtro 12 V e *no-Break*). Ver na Tabela 1 a descrição dos níveis e os parâmetros observados durante o experimento.

Foram montados dois sistemas de medidas, localizados nas faces sul e norte da encosta. Na face sul, os instrumentos foram distribuídos em pontos diferentes (formando uma área retangular, ver Figura 1c e Tabela 1) de maneira que a torre principal Draino ficasse no centro. Foram instalados 7 anemômetros sônicos, sendo 3 anemômetro sônico na torre principal (um anemômetro sônico 3-D ATI a 2 m de altura, o outro um anemômetro sônico 2-D SPAS/2Y a 6 m de altura, ambos abaixo da copa, e o terceiro foi um anemômetro sônico 3-D GILL HS instalado acima da copa (38 m de altura)) e 4 anemômetros sônicos 2-D SPAS/2Y instalados abaixo da copa (2 m de altura) ao longo da encosta.

Tabela 1. Sensores do sistema Draino faces norte e sul no sítio ZF2 LBA Manaus. Em que os termos de flutuação u' , v' e w' são componentes do vento e T' temperatura do ar.

Nível (m)	Parâmetro	Instrumentos
38	u' v' w' T'	Anemômetro sônico 3D GILL
2	u' v' w' T'	Anemômetro sônico 3D ATI
6 e 2	u' v' w' T'	Anemômetro sônico 2D CATI/2
2	Concentração de CO ₂	Analizador de CO ₂ /H ₂ O LI-7000
38, 26, 15, 3, 2 e 1	Perfil de CO ₂ e H ₂ O (face sul)	Analizador de CO ₂ /H ₂ O LI-7000
35, 20, 15, 11, 6 e 1	Perfil de CO ₂ e H ₂ O (face norte)	Analizador de CO ₂ /H ₂ O LI-7000
18, 10, 2 e 1	Temperatura e umidade do ar	Vaisala HMP45C

2.3 Dados utilizados - Foram utilizados os dados de vento e temperatura do ar do ano de 2006 obtidos no sistema Draino face sul Manaus. Definiu-se como estação chuvosa o período de Janeiro a Junho (dia juliano 1-151/2006), enquanto a estação seca o período de Junho a Outubro (dia juliano 152-249/2006). Da mesma forma definiu-se como período diurno as medidas realizadas entre 6 e 18 h (horário local) e como período noturno as medidas entre 18 e 6 h.

As séries temporais do campo de vento correspondente ao período experimental

foram analisadas, assim como os “composites” temporais nos períodos seco/chuvoso para casos específicos. Foi feita uma classificação da intensidade do vento ($m\ s^{-1}$) acima e abaixo da copa (Tabela 1). A definição desses valores foi obtida a partir dos valores máximos, mínimos e médios observados na região durante o período estudado e foram classificados como: vento forte, moderado e fraco. São apresentados também os valores extremos e médio da velocidade do vento, em 2 níveis nas alturas 38 e 2 m.

Tabela 2. Classificação da intensidade e velocidade do vento ($m s^{-1}$) acima e abaixo da copa.

	Acima da copa (38 m)	Abaixo da copa (2 m)
Vento Forte	$\geq 4 m s^{-1}$	$\geq 0.4 m s^{-1}$
Vento Moderado	$2-4 m s^{-1}$	$0.2-0.4 m s^{-1}$
Vento Fraco	$< 2 m s^{-1}$	$< 0.2 m s^{-1}$
Máxima	$9.0510 m s^{-1}$	$1.2695 m s^{-1}$
Média	$1.2108 m s^{-1}$	$0.2090 m s^{-1}$
Miníma	$0.0060 m s^{-1}$	$0.0001 m s^{-1}$

2.4 Estudo de Caso - Foi realizado um estudo de caso em dias, com e sem ocorrência de precipitação, com o objetivo de verificar se a mesma influencia a direção do escoamento do ar tanto acima como abaixo da copa. Os dias escolhidos para fazer este estudo de caso foram aqueles em que os dados de vento foram observados sem interrupções durante todo o dia. Foram analisados 5 dias (dia juliano 40 ao 44) com chuvas variando de 5 a 30 mm e também 5 dias sem chuvas (dia juliano 173, 197, 198, 204, 207) ambos divididos nos períodos diurno e noturno.

3. Resultados e Discussão

Pode-se verificar que, de uma maneira geral, a frequência de ventos, tanto acima

quanto abaixo da copa, é maior na estação chuvosa do que na estação seca (Tabela 3). Os ventos acima da copa, no período chuvoso, alcançam 73,5% enquanto que, abaixo da copa, alcançam 84% de ocorrência. Quanto a classificação do vento, nota-se claramente que a maior ocorrência é de ventos fracos em ambas as estações, tanto acima como abaixo da copa, mas se compararmos somente os períodos, diurno e noturno, observa-se a maior frequência no período noturno (54%). Já as frequências de ventos moderados e fortes são maiores nos períodos diurnos, apresentando seus respectivos valores de 11% e 0,5% (estação seca), e com 15,6% e 1,8% (estação chuvosa).

Tabela 3. Frequência sazonal e intradiurna da intensidade do vento acima e abaixo da copa

Períodos	Frequência do vento					
	Acima da copa (38 m)			Abaixo da copa (2 m)		
	Fraco	Moderado	Forte	Fraco	Moderado	Forte
Chuvoso	59.4%	13.1%	1.4%	47%	31%	6%
Seco	23%	3%	0.1%	9%	6%	1%
Chuvoso noturno	52.4%	2.1%	0.1%	40.1%	14%	0.4%
Chuvoso diurno	28%	15.6%	1.8%	16%	22.7%	6.8%
Seco noturno	54%	0.4%	0.1%	41.3%	12.6%	0.1%
Seco diurno	34%	11%	0.5%	13.7%	26.1%	6.2%

3.1 Temperatura do Ar - A temperatura do ar foi medida em cinco níveis abaixo do dossel (alturas 17, 10, 3, 2 e 1 m). As observações do perfil de temperatura do ar no interior da floresta são utilizadas para monitorar a eventual camada de ar frio ou quente que gera um fluxo de drenagem na área de encosta. Na Figura 2, são apresentados os ciclos diários dos perfis de temperatura potencial virtual e do desvio em relação à média vertical ($[\theta_v(Z) - \bar{\theta}_v(Z)]_1^{18}$), caracterizando a

variabilidade da estratificação térmica (estabilidade) abaixo da floresta.

Ao observar a evolução diária do perfil de temperatura potencial dentro da floresta (Figura 2a e 2b), nota-se, de um modo geral, a existência de dois regimes distintos um diurno outro noturno, em ambas as estações seca e chuvosa. O regime diurno se caracteriza pela elevação da temperatura potencial em todos os níveis, no período da manhã, até atingir um máximo por volta das 12 horas permanecendo até às 16 horas, quando passa a decrescer. No

entanto esses valores máximos variam com a altura, as temperaturas são mais altas no topo do dossel, diminuindo gradativamente até o nível do solo da floresta, isso porque a copa das árvores funciona como um importante receptor e armazenador de energia a qual é redistribuída verticalmente ao longo do dia.

Essa redistribuição de energia tem papel importante nos padrões de estabilidade acima e abaixo do dossel, os quais são importantes fatores que interagem com a dinâmica do escoamento do ar e caracterizam os fluxos verticais e horizontais que modulam o microclima florestal. No período noturno aparecem dois núcleos de resfriamento expressivos acima (15 metros) e abaixo (3 metros), no final da noite e início da manhã, ambos são explicados pelas perdas radiativas ocorridas tanto na parte superior da copa das árvores, como no solo.

Nas Figuras 2c e 2d são apresentados o ciclo diário do desvio de temperatura potencial virtual a partir da média vertical, como podemos observar o padrão é similar para ambos os períodos, seco e chuvoso, porem há uma variação ao longo do dia e na vertical.

Durante o dia, o dossel atua como um interceptor e armazenador de radiação solar interferindo na quantidade de radiação solar que atinge o interior da floresta, logo as temperaturas são mais altas no topo do dossel, diminuindo gradativamente até chegar ao solo florestal, então, conseqüentemente, uma camada de ar quente se forma nas camadas próximas ao dossel e uma outra camada de ar relativamente mais fria se forma próximo ao chão da floresta criando uma condição de inversão de temperatura dentro da floresta.

Já no período noturno, o dossel sofre arrefecimento por perda radiativa e para compensar essa perda, há uma transferência de energia da atmosfera para o dossel, formando uma camada de ar relativamente mais frio próximo a ele. Por outro lado o dossel vegetativo funciona como agente aprisionador de radiação de ondas longas, liberada pela superfície ao longo da noite, mantendo uma camada de ar relativamente mais quente próximo ao chão da floresta, provocando uma condição de instabilidade no interior da floresta. Um padrão semelhante foi relatado por Froelich e Schmid (2006) durante a estação com folhas na floresta estadual Morgan-Monroe, Indiana, EUA.

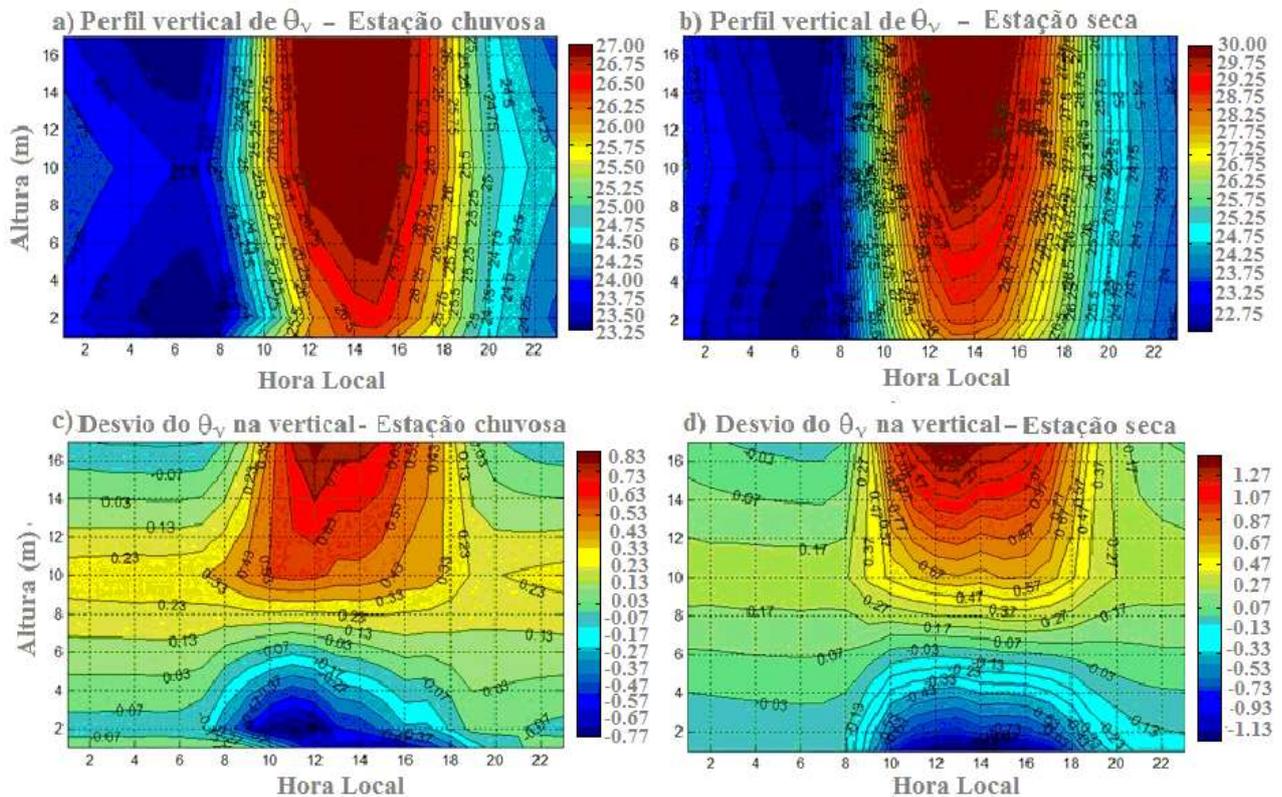


Figura 2. Variação temporal dos perfis vertical de temperatura potencial virtual ($^{\circ}\text{C}$) nas estações a) chuvosa e b) seca, e do desvio em relação à média vertical, nas estações c) chuvosa e d) seca.

Durante as estações seca e chuvosa, o regime do vento horizontal acima (Figura 3) e abaixo do dossel (Figura 4) apresentaram padrões diferentes.

Durante a estação chuvosa (Figuras 3) o vento horizontal observado acima da copa teve direção predominante de leste e nordeste independente de sua intensidade, porém,

durante a estação seca a direção do vento variou conforme a intensidade do vento variava, ventos fracos teve direção de nordeste, sudeste, noroeste e leste, vento moderado teve direção predominante de leste e vento forte teve direção predominante de sudeste.

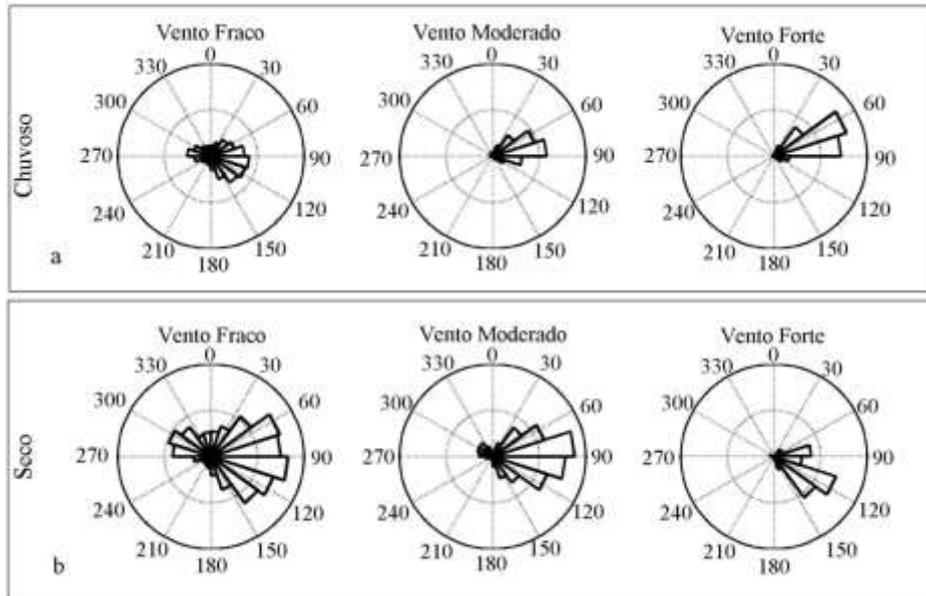


Figura 3. Direção e intensidade do vento acima da copa (38 m) durante as estações: a) chuvosa e b) seca.

As observações mostram que o escoamento do ar dentro da floresta é muito persistente e com padrão semelhante em ambas as estações seca e chuvosa (Figura 4).

O vento horizontal observado abaixo do dossel não apresentou variação sazonal em

sua direção do vento, mas, houve variação na direção do vento quando variou a intensidade. Ventos fracos tiveram direção predominante de norte, ventos moderados e fortes direções predominantes de sul.

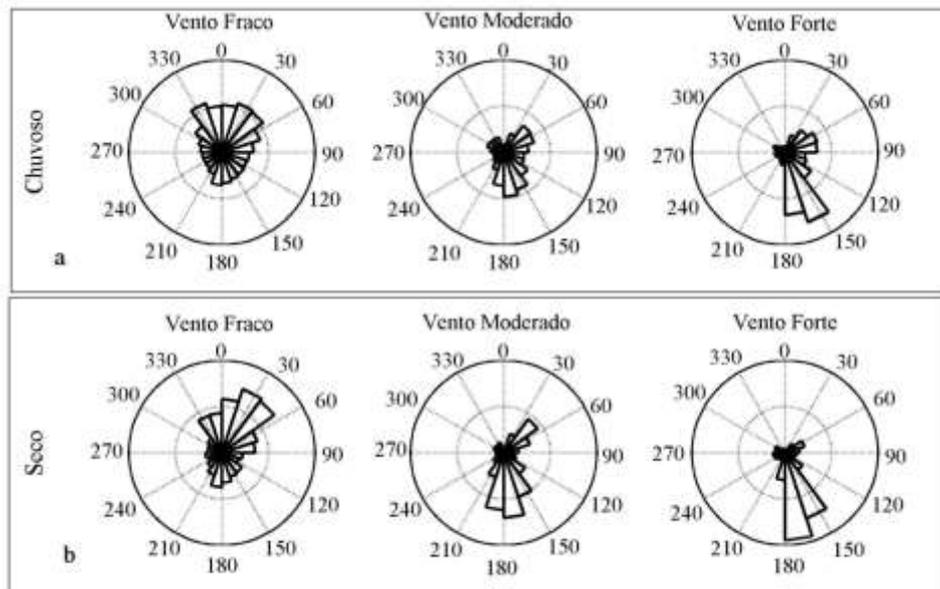


Figura 4. Direção e intensidade do vento abaixo da copa (2 m) durante as estações: a) chuvosa e b) seca.

3.2 Direção do Vento ao Longo da Encosta - Vale salientar que a inclinação da encosta (Sistema Draino face sul, ver Figura 1b) tem orientação Sul-Norte, com a presença do vale na parte Norte, portanto o escoamento é descendo a encosta quando o vento é de sul e subindo a encosta quando é de norte.

O regime do vento horizontal acima e abaixo do dossel apresentou padrões distintos entre dia e noite (Figura 5). Durante o dia é observado um padrão de escoamento horizontal dentro da floresta, bem definido e persistente, em todos os níveis da encosta e em média com direção de sudoeste e sudeste com direção predominante de sul, em contraste ao vento acima da copa onde a direção predominante foi de leste. Esse comportamento abaixo da copa indica que o escoamento estava descendo a encosta em direção ao vale durante a maior parte do período de estudo. Isso é devido à estrutura térmica dentro da floresta, como foi visto na Figura 2, que ao longo do dia cria uma condição de inversão de temperatura com um gradiente vertical de temperatura positivo, ou seja, há arrefecimento do ar próximo ao chão da floresta, como a densidade do ar aumenta com a diminuição da temperatura esse ar tende a descer a encosta devido à ação da gravidade e ao gradiente de temperatura que gera uma condição de estabilidade dentro da floresta, sugerindo um padrão de ventos

catabáticos. Um regime similar de ventos catabáticos diurnos foi relatado por Froelich e Schmid (2006) durante a estação com folhas na floresta estadual Morgan-Monroe, Indiana, EUA.

Estes resultados mostram que o escoamento abaixo do dossel em floresta tropical densa inclinada é oposto aos padrões diurnos clássicos de escoamentos em regiões inclinadas estudados em outros locais (Manins e Sawford, 1979; Sturman, (1987); Papadopoulos e Helmis, 1999; Kossmann e Fiedler, 2000).

Durante a noite, um padrão mais complexo é observado ao longo da encosta e diferenciado em relação ao escoamento acima da copa que teve direção predominante de leste. Observou-se que, no topo da encosta, o escoamento do ar foi descendo a encosta com direção sudeste e subindo a encosta com direção nordeste-noroeste. No meio da encosta, o escoamento também teve esses comportamentos de subida e descida, mas a direção predominante foi de nordeste e noroeste, ou seja, subindo a encosta. Finalmente, na parte inferior da área de encosta, a direção do vento prevaleceu de norte e nordeste, evidenciando um desacoplamento com ar acima da copa e subindo a encosta. Esse padrão de escoamento subindo a encosta é devido à estrutura térmica dentro da floresta, visto na Figura 2. Durante

a noite, tem-se uma camada de ar relativamente mais quente próximo ao chão da floresta, como a densidade diminui com o aumento da temperatura, essa camada fica mais leve e é forçada a subir a encosta, sugerindo um regime de vento anabático. Froelich e Schmid (2006) encontraram características semelhantes de regime de

ventos anabático durante o período noturno, em sua área de estudo, na floresta estadual Morgan-Monroe, Indiana, EUA.

Estes resultados mostra que em florestas com topografia irregular (inclinação) o escoamento do ar no interior da floresta não segue o conceito clássico de padrão de escoamento noturno em regiões inclinadas.

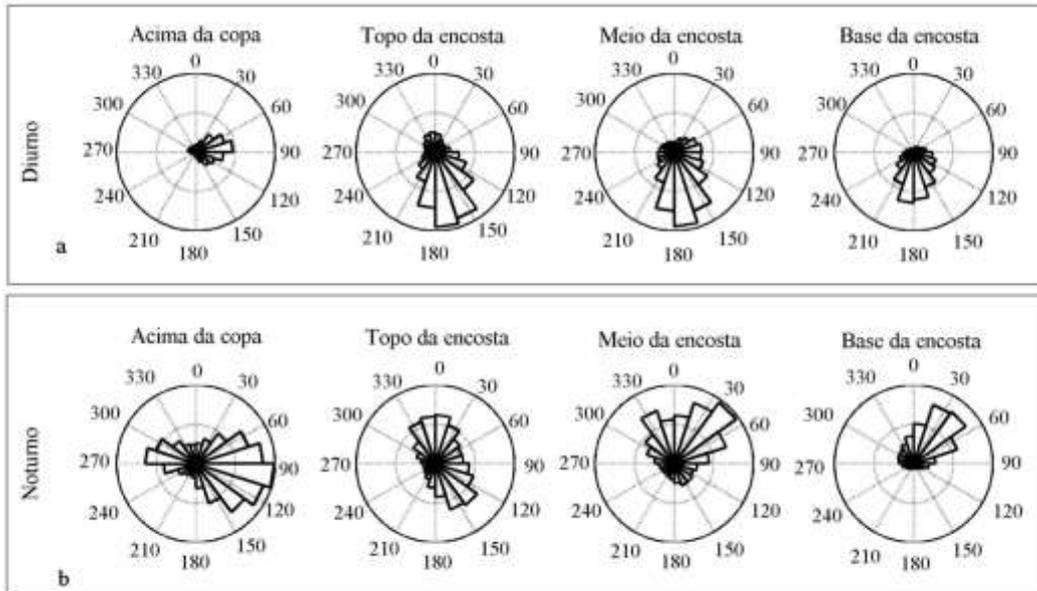


Figura 5. Direção do vento acima (38 m) e abaixo da copa (2 m), ao longo da encosta, durante os períodos: a) diurno e b) noturno.

3.3 Estudo de Caso - Observa-se na figura 6 que o escoamento do ar ao longo da encosta teve o mesmo padrão independentemente da ocorrência de precipitação, tanto nos dias em que houve precipitação quanto nos dias sem ocorrência de precipitação, porém, houve variação na direção do vento entre o período diurno e noturno.

Durante o período diurno, para ambos os dias estudados, a direção do vento acima da copa é predominante de leste e nordeste, diferente do escoamento do ar ao longo da encosta. No topo da encosta, a direção predominante é de sul e sudeste, no meio da encosta a direção é de sul e sudeste, na base da encosta a direção predominante de sul, evidenciando um escoamento abaixo do dossel desacoplado com o ar acima da copa e descendo a encosta.

Observou-se ainda, durante o período noturno em ambos os dias estudados, que no topo da encosta a direção do vento é de norte

e sudeste, no meio da encosta a direção predominante é de nordeste e noroeste. Na base da encosta, a direção predominante é de norte e nordeste, ou seja, um escoamento subindo a encosta diferente do escoamento do ar acima da copa que tem direção predominante de leste, sudeste e oeste. Esses resultados mostram que a precipitação não influenciou a direção do vento acima e abaixo da copa. E conforme já discutido, a estrutura térmica da floresta é o que modula o escoamento do ar.

Como foi visto na Figura 2, a média do gradiente vertical de temperatura potencial virtual foi negativa durante a noite e positiva durante o dia para ambas as estações seca e chuvosa. Esta observação mostra que durante o dia uma camada de ar relativamente frio predomina dentro da floresta, criando uma condição de inversão. Em contraste, durante a noite uma camada de ar relativamente mais quente no interior da floresta gera uma

condição de instabilidade, evidenciando que a topografia e estrutura térmica no interior da

floresta é a responsável por esse padrão de escoamento reverso ao longo da encosta.

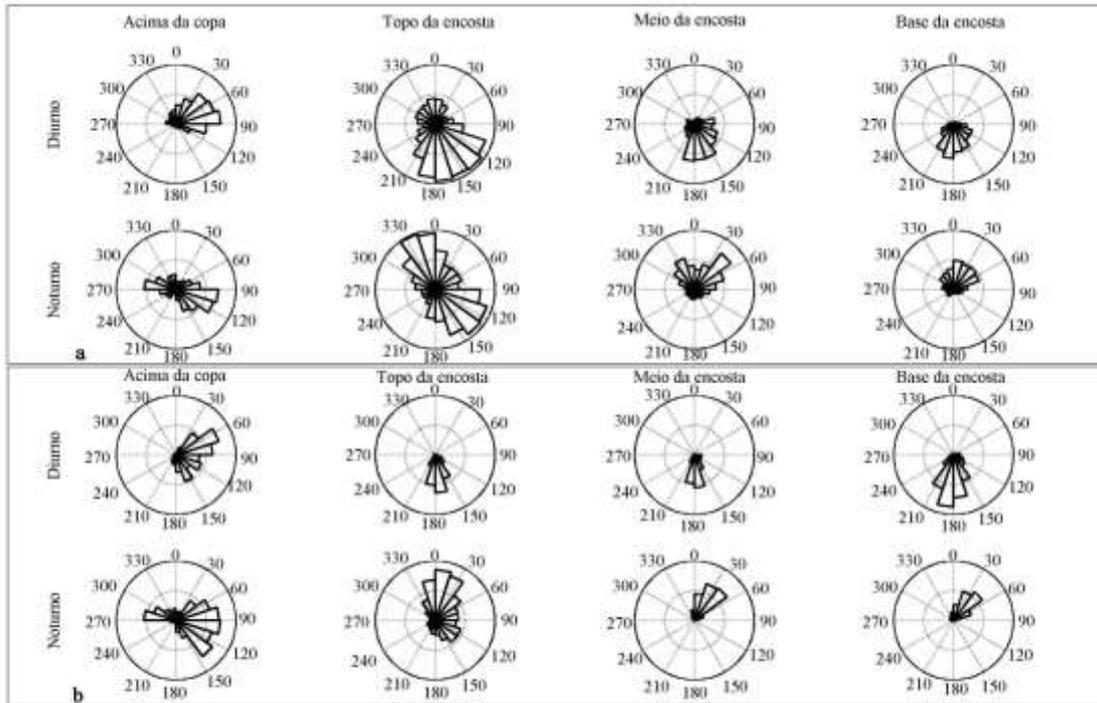


Figura 6. Direção do vento acima (38 m) e abaixo da copa (2 m) ao longo da encosta, durante os períodos diurno e noturno, a) 5 dias com chuva e b) 5 dias sem chuva.

4. Conclusões

O padrão de escoamento do ar ao longo da encosta foi o mesmo durante as estações chuvosa e seca, no entanto houve dois padrões distintos um diurno e outro noturno, que são opostos aos padrões clássicos de escoamentos em áreas inclinadas sem florestas. Durante o período diurno é observado um escoamento descendo a encosta e desacoplado com o ar acima da copa devido à inversão de temperatura que se desenvolveu abaixo do dossel. Já durante o período noturno, foi observado um escoamento subindo a encosta associado à condição de *lapse* de temperatura abaixo do dossel da floresta, evidenciando que gradientes térmicos locais desempenham um papel importante e dominam o escoamento abaixo do dossel em terrenos inclinados.

O estudo de caso mostra que a precipitação não influencia na direção do escoamento ao longo da encosta, evidenciando que a estrutura térmica da floresta é a principal forçante do escoamento do ar ao longo da encosta. Estes resultados

sugerem que as diferenças entre os padrões de escoamento encontrados aqui e os padrões clássicos de escoamentos em áreas inclinadas são resultados das diferenças no regime térmico devido à ausência ou presença de um dossel de floresta densa, e reforçam a necessidade de mais investigação sobre os padrões de escoamentos em outros locais com terreno complexo na Amazônia, assim como necessidade de estudos de modelagem de escoamentos do ar em terrenos florestais, que incluem as forçantes radiativas no perfil de temperatura acima e abaixo de um dossel de floresta densa.

5. Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pelas bolsas de estudos.

6. Referências

- Aubinet, M.; Heinesch, B.; Yernaux, M. 2003. Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest, *Boundary Layer Meteorology*, v. 108, n. 3, p. 397–417.
- Chen, H.; Yi, C. 2012. Optimal control of katabatic flows within canopies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 138, n. 667, p. 1676-1680.
- Cuartas, L. A.; Tomasella, J.; Nobre, A. D.; Hodnett, M. G.; Waterloo, M. J.; Munera, J. C. 2007. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.145, n.1-2, p. 69-83.
- Feigenwinter, C.; Bernhofer, C.; Eichelmann, U.; Heinesch, B.; Hertel, B.; Janous, D.; Kolle, O.; Lagergren, F.; Lindroth, A.; Minerbi, S.; Moderow, U.; Mölder, M.; Montagnani, L.; Queck, R.; Rebmann, C.; Vestin, P.; Yernaux, M.; Zeri, M.; Ziegler, W.; Aubinet, M. 2008. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, n. 1, p.1–21.
- Froelich, N. J.; Schmid, H. P.; Grimmond, C. S. B.; Su, H. B.; Oliphant, A. J. 2005. Flow divergence and density flows above and below a deciduous forest Part I. Non-zero mean vertical wind above canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 133, n. 1-4, p. 140-152.
- Froelich, N. J.; Schmid, H. P. 2006. Flow divergence and density flows above and below a deciduous forest Part II. Below-canopy thermotopographic flows. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 138, n. 1-4, p. 29-43.
- Froelich N. J.; Grimmond, C. S. B.; Schmid, H. P. 2011. Nocturnal cooling below a forest canopy: Model and evaluation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, n. 7, p. 957–968.
- Hodnett, M. G.; Tomasella, J.; Cuartas, L. A.; Waterloo, M. J.; Nobre, A. D. 2007. Subsurface hydrological flow paths in a Ferralsol (Oxisol) landscape in central Amazonia. *Hydrological Sciences Journal* (in press).
- Laurance, W. F.; Fearnside, P. M.; Laurance, S. G.; Delamonica, P.; Lovejoy, T. E.; Rankin-de-Merona, J. M.; Chambers, J. Q.; Gascon, C. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, v.118, n. 1-3, p.127-1381.
- Leuning, R.; Zegelin, S. J.; Jones, K.; Keith, H.; Hughes, D. 2008. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, n. 11, p. 1777-1797.
- Luizão, R. C. C.; Luizão, F. J.; Paiva, R. Q.; Monteiro, T. F.; Sousa, L. S.; Kruijt, B. 2004. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. *Global Change Biology*, v.10, n. 5, p. 592-600,
- Mahrt, L. Momentum balance of gravity flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 39, n. 12, 2701-2711. 1982.
- Mahrt, L.; Lee, X.; Black, A.; Neumann, H.; Staebler, R.M. 2000. Nocturnal mixing in a forest subcanopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 101, n.1, p. 67–78.
- Manins, P.C.; Sawford, B.L. 1979a. Katabatic winds: a field case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 105, n. 446, p. 1011–1025.
- Marcolla, B.; Cescatti, A.; Montagnani, L.; Manca, G.; Kerschbaumer, G.; Minerbi, S. 2005. Importance of advection in the atmospheric CO₂ exchanges of an alpine forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 130, n. 3-4, p. 193–206.
- Papadopoulos, K.H.; Helmis, C.G. 1999. Evening and morning transition of katabatic

flows. *Boundary-Layer Meteorology.*, v. 92, n. 2, p. 195–227.

Queck, R.; Bernhofer, C. 2010. Constructing wind profiles in forests from limited measurements of wind and vegetation structure. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.150, n. 5, p.724–735.

Rennó, C. D.; Nobre, A. D.; Cuartas, L. A.; Soares, J. V.; Hodnett, M. G.; Tomasella, J.; Waterloo, M. J. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3469-3481.

Sedlák, P.; Aubinet, M.; Heinesch, B.; Janouš, D.; Pavelka, M.; Potužníková, K.; Yernaux, M. 2010. Night-time airflow in a forest canopy near a mountain crest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 150, n. 5, p. 736–744.

Staebler, R. M.; Fitzjarrald, D. R. 2004. Observing subcanopy CO₂ advection, *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 122, n. 3-4, p. 139–156.

Staebler, R.M.; Fitzjarrald, D.R. 2005. Measuring canopy structure and the kinematics of subcanopy flows in two forests. *Journal of Applied Meteorology.*, v. 44, n. 8, p. 1161–1179.

Tomasella, J.; Hodnett, M. G.; Cuartas, L. A.; Nobre, A. D.; Waterloo, M. J.; Oliveira, S. M. 2008. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, v. 22, n.13, p.2133-2147.

Tóta J.; Fitzjarrald, D. R.; Staebler, R. M.; Sakai, R. K.; Moraes, O. M. M.; Acevedo, O. C.; Wofsy, S. C.; Manzi, A. O. 2008. Amazon rain Forest subcanopy flow and the carbon budget: Santarém LBA-ECO site, *Journal Geophysical Research - Biogeosciences*, v. 113, n. G3 (G00B02),

Tóta, J.; Fitzjarrald, D. R.; Silva-Dias, M. A. F. 2012. Exchange of Carbon Between the Atmosphere and the Tropical Amazon Rainforest. In. SUDARSHANA, P.; NAGESWARA-RAO, M.; SONEJI, J. R. (Ed.). *Tropical Forests*. Croatia: In Tech, 2012, p. 305-330, ISBN 978-953-51-0255-7.

Wang, W. 2012. An Analytical Model for Mean Wind Profiles in Sparse Canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 142, n. 3, p. 383–399.

Wang, W.; Yi, C. 2012. A new nonlinear analytical model for canopy flow over a forested hill. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 109, n. 3-4, p. 549-563.

Waterloo, M.J.; Oliveira, S. M.; Drucker, D. P.; Nobre A. D.; Cuartas, L. A.; Hodnett, M. G.; Langedijk, I.; Jans, W. W. P.; Tomasella, J. De Araujo, A. C.; Pimentel, T. P.; Estrada, J. C. M. 2006. Export of organic carbon in run-off from an Amazonian rainforest blackwater catchment. *Hydrological Processes*, v. 20, n.12, p. 2581-2597.