

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA DA AMAZÔNIA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

**DINÂMICA DO ESCOAMENTO DE AR ACIMA E DENTRO DE UMA FLORESTA
TROPICAL Densa SOBRE TERRENO COMPLEXO NA AMAZÔNIA: ASPECTOS
OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**

AURILENE BARROS DOS SANTOS

MANAUS - AMAZONAS

JUNHO DE 2013

AURILENE BARROS DOS SANTOS

**DINÂMICA DO ESCOAMENTO DE AR ACIMA E DENTRO DE UMA FLORESTA
TROPICAL Densa SOBRE TERRENO COMPLEXO NA AMAZÔNIA: ASPECTOS
OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**

ORIENTADOR: DR. JULIO TÓTA DA SILVA

CO-ORIENTADOR: DR. MARCOS ANTONIO LIMA MOURA

FONTE FINANCIADORA: CNPq – INPA/UEA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia e Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

MANAUS - AMAZONAS

JUNHO DE 2013

S237 Santos, Aurilene Barros dos

Dinâmica do escoamento de ar acima e dentro de uma floresta tropical densa sobre terreno complexo na Amazônia : aspectos observacionais e de modelagem / Aurilene Barros dos Santos. --- Manaus : [s.n.], 2013.

xii, 48 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) --- INPA / UEA, Manaus, 2013.

Orientador : Julio Tóta da Silva

Coorientador : Marcos Antonio Lima Moura

Área de concentração : Interações Clima-Biosfera na Amazônia

1. Vento – Amazônia. 2. Vento – Floresta tropical densa.
3. Temperatura do ar – Seca. 4. Temperatura do ar – Chuva.
5. Reserva Biológica do Rio Cuieiras (AM). I. Título.

CDD 19. ed. 551.518

Sinopse:

Este trabalho apresenta um estudo observacional e de modelagem do escoamento do ar acima e abaixo do dossel em uma floresta tropical sobre terreno complexo na Amazônia. Neste estudo foi evidenciado que os gradientes térmicos locais desempenham um papel importante e modulam o escoamento do ar em áreas florestadas.

Palavras-chaves: fluxos horizontais, vento, vegetação densa.

Aos meus pais Antônio Graciliano dos Santos (*in memoriam*) e Marilene Barros dos Santos por todo amor e dedicação, aos meus irmãos Gracilene e Moisés Graciliano por todo carinho e amizade e aos meus sobrinhos Maria Aline e Danilo Graciliano DEDICO.

Ao Antônio Marcos, pelo amor, paciência, dedicação e incentivo durante nossa caminhada juntos OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por iluminar meus caminhos e me dar força para superar as adversidades da vida.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela oportunidade de formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças á colaboração e apoio de algumas pessoas as quais, não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e o agradecimento, quero agradecer em particular:

Ao Professor e amigo Doutor Julio Tóta pela paciência, ajuda, dedicação na orientação, disponibilidade constante, pela continua motivação para conseguir os objetivos e acima de tudo por ter acreditado em mim.

Ao Professor Doutor Marcos Antonio Lima Moura pela amizade, disponibilidade em ajudar na co-orientação, pelas sugestões e conselhos.

Ao amigo Mestre Raoni Aquino Silva de Santana pelo apoio e incentivo, pela paciência e disponibilidade em ajudar, e por me ensinar a mexer no programa aqui utilizado, pois sem sua ajuda seria impossível o termino desse trabalho.

A minha querida amiga Mestra Paula Andrea Morelli Fonseca pelo apoio, amizade, conselhos, pelas horas de conversas e descontração, e principalmente por ser essa pessoa maravilhosa, competente e responsável e por fazer parte do meu ciclo de amizades.

As Minhas queridas amigas, que fiz ao longo do curso, Jorjânia de Oliveira Leão e Diana Sarmiento Franco pelo carinho, paciência, apoio, disponibilidade em ajudar, pelas conversas, conselhos e horas de descontração.

A todos meus familiares em especial meu avô Ivanildo Barros, por todo amor, carinho e dedicação.

A todo o corpo docente do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia-INPA\Universidade do Estado do Amazonas-UEA, pelo auxílio em minha formação.

Aos membros da banca examinadora, Professor Doutor Luiz Antonio Candido e Professora Doutora Rosa Maria Nascimento dos Santos, pela colaboração e disponibilidade.

A todos os amigos de curso pelo apoio, encorajamento e os bons momentos passados ao longo do curso: Jorjânia, Diana, Paulinha, Yara, Andrea, Susana, Polari, Josiel, Adry, Flavio, Cleide Lana, Larissa, Marlison, Ludmila, Bruno Takeshi, Alexandra, Simone, Thiago, Marcos Luiz, Glayson Chagas,

Finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para o término deste trabalho.

RESUMO

Este estudo foi dividido em duas partes: uma observacional e a outra de modelagem. No estudo observacional 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 vale-montanha. A média do gradiente vertical de θ_v foi negativa durante a noite e positiva durante o dia em ambas as estações. Evidenciando que a topografia e estrutura térmica no interior da floresta é a responsável por esse padrão de escoamento reverso ao longo da encosta. Na segunda parte, foi avaliado a performance do modelo analítico de Yi *et al.* (2005, 2008) em estimar o perfil de vento no interior de florestas em área inclinada. Os valores de alguns parâmetros foram extraídos da literatura e foi desenvolvida uma equação para estimar o perfil vertical do coeficiente de arrasto. O comportamento do perfil do vento ao longo do dia e da noite mostrou uma clara atenuação do topo para o interior da floresta de forma parecida de um filtro passa alta. A componente dependente da topografia e do regime térmico dentro da floresta, claramente predomina durante a noite e tem maior influência no perfil nos níveis mais baixos. Vale notar que nos níveis inferiores da floresta, os perfis previstos apresentaram durante a noite (valores negativos) as características observadas de escoamento de drenagem, subindo a inclinação em baixos níveis da floresta e descendo logo na camada acima e a 15 metros de altura.

Palavras chaves: fluxos horizontais, vento, vegetação densa.

ABSTRACT

This paper has been divided from two sections: modeling and observational. In observational study used data from a field campaign conducted in 2006, in the Biological Reserve of Rio Cuieiras - ZF2, near the Manaus city (Amazonas), with the aim of to report the flow below the canopy, and determine their ration to the wind above the forest. We measured horizontal and vertical gradients of air temperature and wind during the 2006 dry and wet seasons. The results shows, in general, the frequency of winds, both above and below the canopy is higher in the dry season reaching 73.5% and 84% respectively. There is also a flow pattern below the forest, persistent and systematic, on the slope area, up at overnight and down during the diurnal and disengaged with the air above the canopy, this flow pattern is opposite to the classic pattern mountain-valley flow. The average vertical gradient of θ_v was negative at night and positive during the day in both seasons. Showing the topography and thermal structure inside the forest is responsible for this reverse flow pattern along the hillside. In the second section was evaluated performance of Yi et al. (2005, 2008) analytical model, to estimate the wind profile inside the forests on sloping area. The values of some parameters were extracted from the literature and an equation was developed to estimate the vertical profile of the coefficient of drag. The behavior of the wind profile throughout the day and night showed a clear attenuation of the top into the forest similarly a high pass filter. The dependent component of the topography and the thermal regime within the forest, clearly predominates at night and have more influence in the profile at the lower levels. Note that the lower levels of the forest, the profiles had provided overnight (negative) characteristics observed runoff drainage, climbing the slope at lower levels of the forest and down in the layer immediately above and 15 meters tall.

Keywords: horizontal flows, wind, dense vegetation.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------|-----|
| DEDICATÓRIA..... | iii |
| AGRADECIMENTOS..... | iv |
| RESUMO..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| LISTA DE FIGURA..... | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xii |
| INTRODUÇÃO GERAL..... | 13 |
| OBJETIVOS..... | 14 |
| GERAIS..... | 14 |
| ESPECÍFICOS..... | 14 |

Capítulo 1: Dinâmica do Escoamento de Ar Acima e Dentro de uma Floresta Tropical Densa sobre Terreno Complexo na Amazônia..... 15

| | |
|--|-----------|
| Resumo..... | 16 |
| 1. Introdução..... | 17 |
| 2. Material e Métodos..... | 19 |
| 2.1. Área de estudo..... | 19 |
| 2.2. Instrumentação e Medidas..... | 21 |
| 2.3. Dados utilizados..... | 22 |
| 3. Resultados e Discussão..... | 23 |
| 3.1. Temperatura do Ar..... | 24 |
| 3.2. Direção do Vento ao Longo da Encosta..... | 27 |
| 4. Conclusão..... | 29 |

Capítulo 2: Avaliação de Modelo Simplificado do Perfil de Velocidade do Vento Acima e Abaixo da Floresta: Estudo de Caso do escoamento de Drenagem - Sítio Experimental do Projeto LBA - Manaus-AM.....30

| | |
|---|-----------|
| Resumo..... | 31 |
| 1. Introdução..... | 32 |
| 2. Material e Métodos..... | 33 |
| 2.1 Equação para calcular o perfil vertical do coeficiente de arrasto ($C_D(z)$)..... | 34 |
| 3. Resultados e Discussão..... | 35 |
| 3.1. Aplicação do modelo..... | 35 |
| 4. Conclusão..... | 40 |
| | |
| CONCLUSÃO GERAL..... | 41 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 43 |

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1: Dinâmica do Escoamento de Ar Acima e Dentro de uma Floresta Tropical Densa sobre Terreno Complexo na Amazônia.

| | Pág. |
|--|-------------|
| 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 <i>et al.</i> , 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..... | 19 |
| Figura 2 Ciclo diário dos perfis vertical de temperatura potencial virtual (°C) a) na estação chuvosa e b) na estação seca, e do desvio em relação à média vertical, nas estações c) chuvosa e d) seca..... | 25 |
| Figura 3 Direção e intensidade do vento acima da copa (38 m) durante os períodos: a) chuvoso e b) seco..... | 26 |
| Figura 4 Direção e intensidade do vento abaixo da copa (2 m) durante os períodos: a) chuvoso e b) seco. | 26 |
| 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..... | 28 |

Capítulo 2: Avaliação de Modelo Simplificado do Perfil de Velocidade do Vento Acima e Abaixo da Floresta: Estudo de Caso do Escoamento de Drenagem - Sítio Experimental do Projeto LBA - Manaus-AM.

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 Distribuição vertical da densidade de área foliar ($m^2 m^{-3}$), e coeficiente de arrasto..... | 36 |
| Figura 2 Perfis previstos da velocidade do vento durante o período noturno e diurno..... | 36 |
| Figura 3 Ciclo diário dos Perfis previstos da velocidade horizontal do vento e suas componentes (Alturas: denotado pelas cores)..... | 37 |
| Figura 4 Perfis previstos da velocidade horizontal do vento e suas componentes ao longo do dia e noite (denotado pelas cores)..... | 38 |
| Figura 5 Ciclo diário da velocidade horizontal média do vento prevista e observadas pelo sistema DRAINO Manaus (altura de referencia: ~2 metros)..... | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabela 1 | Sensores do sistema Draino faces norte e sul no sítio ZF2 LBA Manaus.. | 22 |
| Tabela 2 | Classificação da intensidade e velocidade do vento ($m s^{-1}$) acima e abaixo da copa..... | 23 |
| Tabela 3 | Frequência sazonal e intradiurna da intensidade do vento acima e abaixo da copa..... | 23 |

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho apresenta um estudo, observacional e de modelagem, do escoamento do ar acima e abaixo do dossel em uma floresta tropical sobre terreno complexo na Amazônia. Neste estudo foi evidenciado que os gradientes térmicos locais desempenham um papel importante e modulam o escoamento do ar em áreas florestadas, e ficou claro que em terrenos inclinados o padrão de escoamento é mais complexo e apresenta um desacoplamento dos fluxos horizontais acima e abaixo do dossel.

Devido a essa complexidade existem poucos estudos sobre escoamento do ar abaixo do dossel (Gross, 1987; Staebler *et al.*, 2000; Aubinet *et al.*, 2003; Staebler e Fitzjarrald, 2004, 2005, Yi *et al.*, 2005), além disso, a interação do vento com as florestas causa mudanças no regime de vento local, originando situações cujo estudo se manifesta bastante complicado dado o carácter turbulento e tridimensional do escoamento, na maior parte dos casos. O estudo deste tipo de escoamentos é complexo por causa da quantidade de parâmetros que devem ser levados em conta, tais como, a geometria das árvores, as alterações da superfície, o arrasto de atrito, o armazenamento de calor, entre outros.

No entanto, mesmo com toda essa complexidade, é necessário obter informações do escoamento horizontal abaixo da floresta espacialmente no entorno de toda a área de estudo. Entretanto, para obter essas informações é necessário recorrer a modelos e/ou parametrizações que possam caracterizar e representar esses escoamentos dentro da floresta.

Assim, este estudo foi dividido em duas partes:

Uma parte observacional, em que foram utilizados dados (velocidade do vento e temperatura do ar) provenientes de uma campanha de campo denominada Draino Manaus, realizada pelo Dr. Júlio Tóta em 2006 no sítio experimental do LBA em Manaus, usados para caracterizar a dinâmica do escoamento acima e abaixo da copa da floresta.

Na segunda parte, foi avaliado um modelo analítico, desenvolvido por Yi *et al.* (2005, 2008), de escoamento do ar acima e dentro da floresta para o caso do sítio do LBA em Manaus, e comparado os resultados com os dados observados durante a campanha de campo do Draino Manaus em 2006.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Investigar e quantificar, através de medidas observacionais, a dinâmica do escoamento do ar acima e abaixo do dossel em floresta tropical sobre terrenos complexos na Amazônia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a variabilidade da dinâmica temporal e espacial dos escoamentos do ar na área de estudo - ciclos diários e sazonais;
2. Estudar a relação do efeito da topografia e da vegetação no escoamento do ar abaixo do dossel;
3. Verificar a dinâmica do acoplamento do escoamento do ar acima e abaixo do dossel sobre terreno complexo;
4. Avaliar e/ou testar parametrização que possam reproduzir o escoamento abaixo da floresta, para o sitio LBA-ZF2 em Manaus.

Capítulo 1

Santos, A. B.; Tóta, J.; Moura, M. A. L.; Fitzjarrald, D. R.;
Santana, R. A. S.; Andrade, A. M. D.; Carneiro, R. G.
2013. **Dinâmica do Escoamento de Ar Acima e Dentro
de uma Floresta Tropical Densa sobre Terreno
Complexo na Amazônia.** Submetido a Revista Brasileira
de Geografia Física.

Capítulo 1. Dinâmica do Escoamento de Ar Acima e Dentro de uma Floresta Tropical Densa sobre Terreno Complexo na Amazônia.

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 vale-montanha. A média do gradiente vertical de θ_v foi negativa durante a noite e positiva durante o dia em ambas as estações. 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.

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; Froelchi *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 *et al.*, 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 ($2^{\circ}36'32''$ S, $60^{\circ}12'33''$ 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.

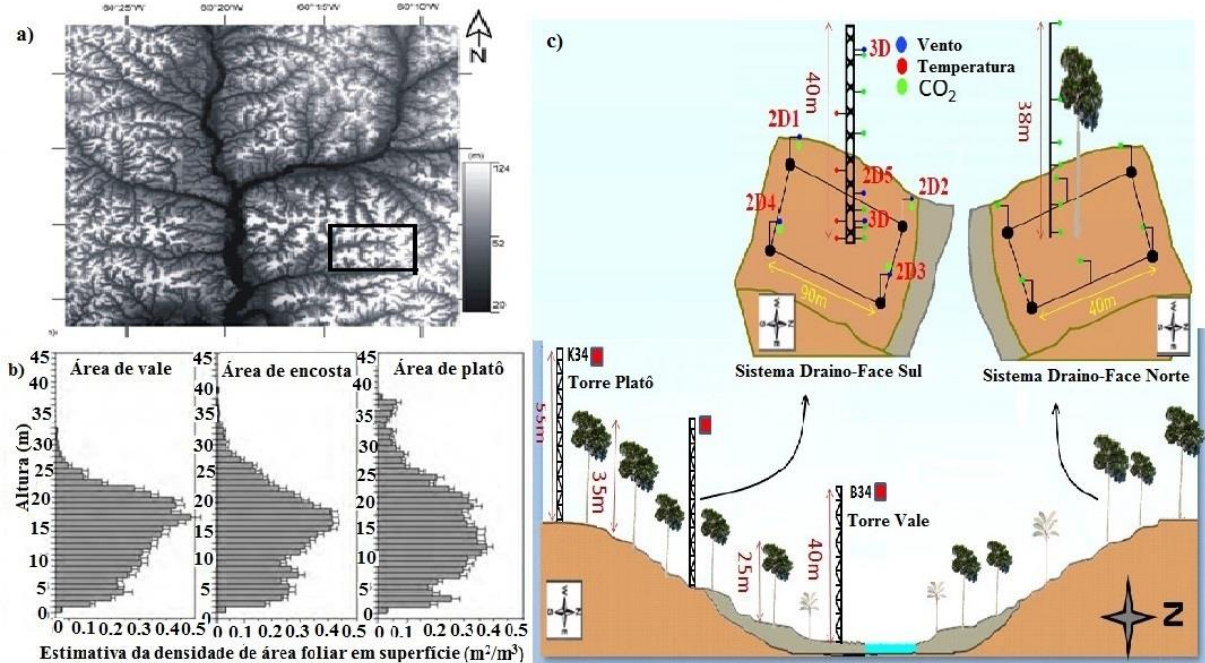


Figura 1. a) Hidrografia e topografia na imagem SRTM-DEM O retângulo preto detalha a micro bacia Asu onde as medidas foram realizadas (fonte: Rennó *et al.*, 2008), b) Densidade da vegetação medida com sensor LIDAR, e c) Sistema de medidas DRAINO (faces sul e norte da encosta) implementado no sítio LBA 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 - $< 100 \text{ mm mês}^{-1}$) 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 (círculo vermelho), concentração de CO₂ (círculo verde), e velocidade e direção do vento (círculo azul), 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 anemômetros sônicos 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 DRAIN0 faces norte e sul no sítio ZF2 LBA Manaus

| 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 |

Termos de flutuação ($u' v' w'$ componentes do vento e T' temperatura do ar)

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. A temperatura do ar foi medida em cinco níveis abaixo do dossel (alturas 17, 10, 3, 2 e 1 m), e foi calculado ($[\theta_v(Z) - \bar{\theta}_v(Z)]_1^{18}$) o desvio da temperatura potencial virtual em relação à média vertical.

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, 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 | $\geq 4 \text{ m s}^{-1}$ | $\geq 0.4 \text{ m s}^{-1}$ |
| Vento Moderado | $2-4 \text{ m s}^{-1}$ | $0.2-0.4 \text{ m s}^{-1}$ |
| Vento Fraco | $< 2 \text{ m s}^{-1}$ | $< 0.2 \text{ m s}^{-1}$ |
| 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} |

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

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, 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, porém 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.

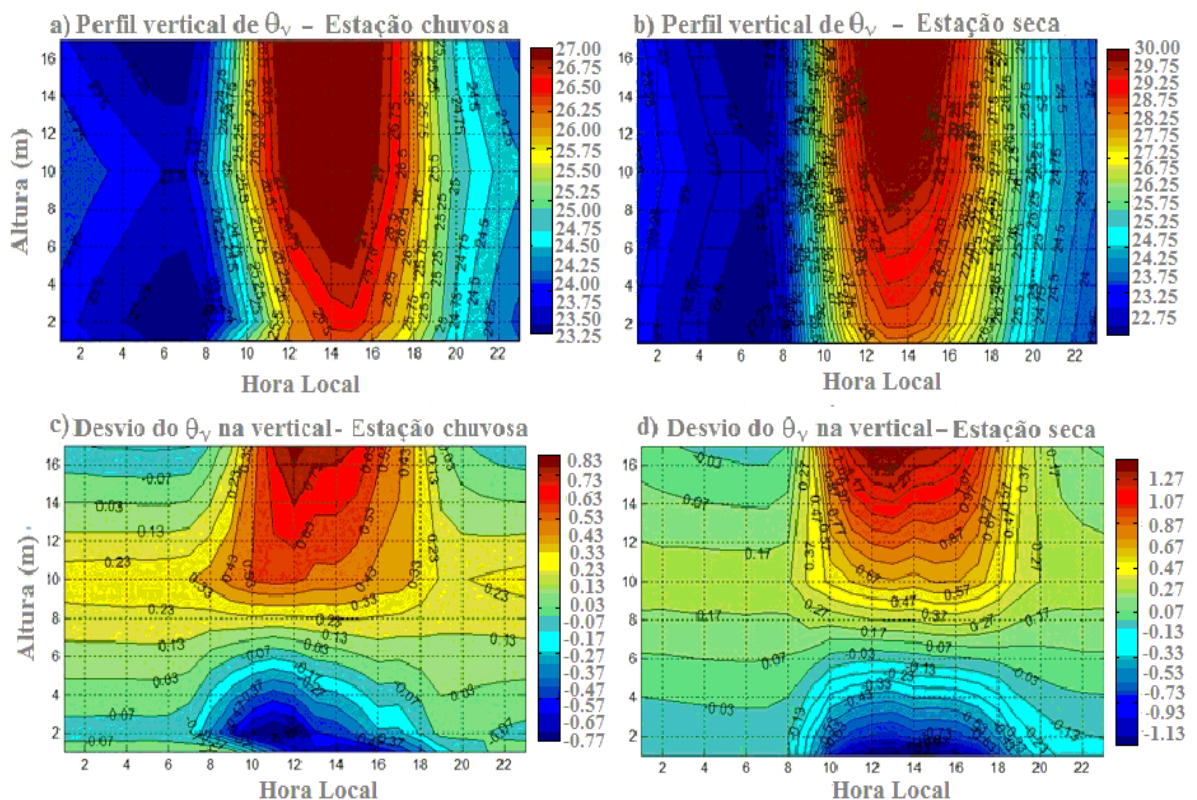


Figura 2. Variação temporal dos perfis vertical de temperatura potencial virtual ($^{\circ}\text{C}$) nas estações a) chuvosa e b) seca, e do desvio em relação à média vertical, nas estações c) chuvosa e d) seca.

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.

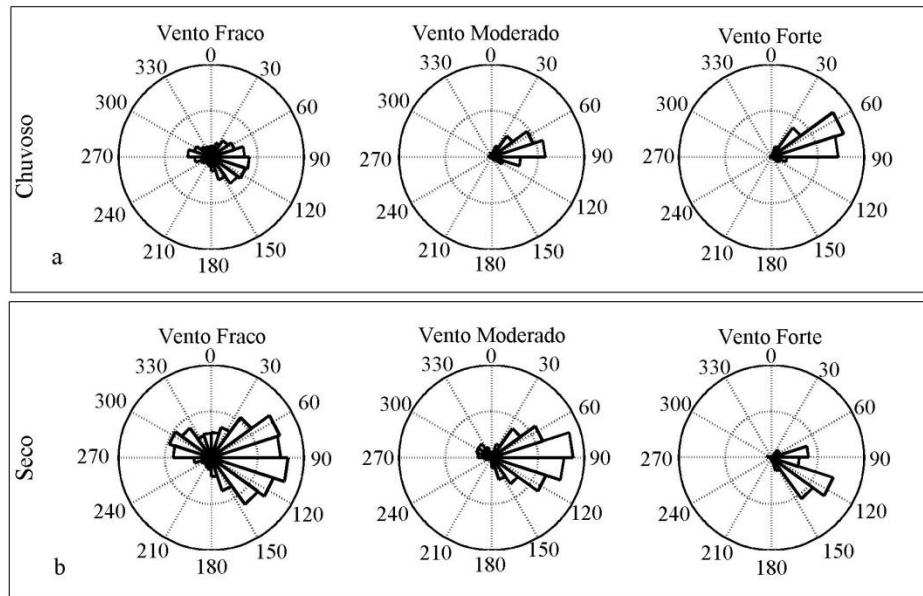


Figura 3. Direção e intensidade do vento acima da copa (38 m) durante as estações: a) chuvosa e b) seca.

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.

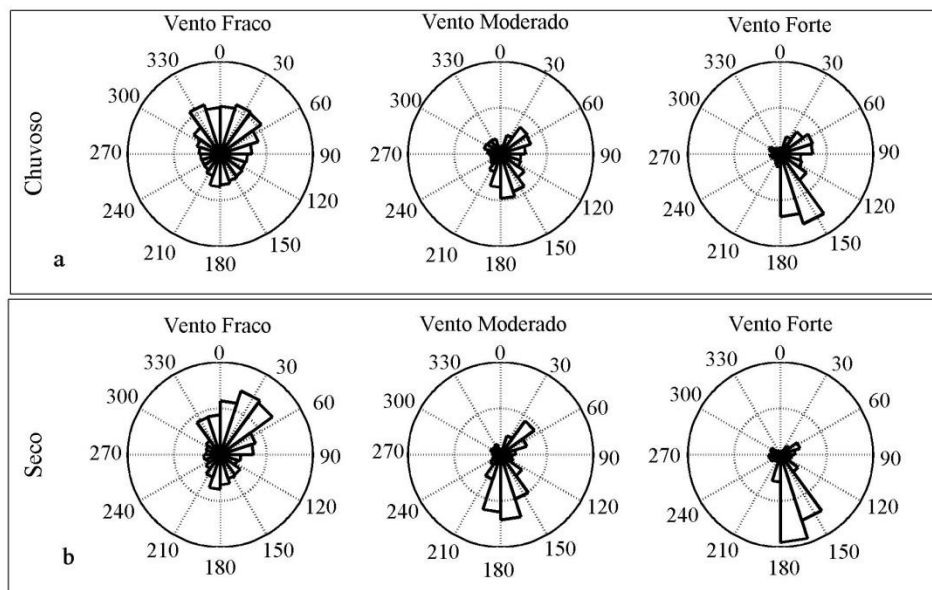


Figura 4. Direção e intensidade do vento abaixo da copa (2 m) durante as estações: a) chuvosa e b) seca.

3.2. Direção do Vento ao Longo da Encosta

Vale salientar que a inclinação da encosta (Sistema Draino face sul, ver Figura 1c) 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.

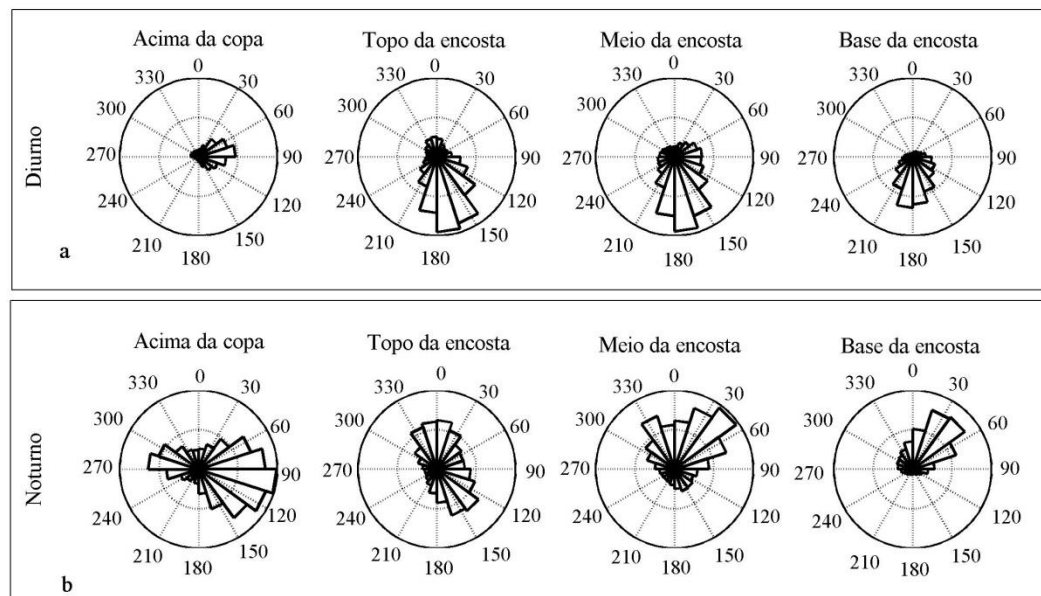


Figura 5. Direção do vento acima (38 m) e abaixo da copa (2 m), ao longo da encosta, durante os períodos: a) diurno e b) noturno.

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.

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.

Capítulo 2

Santos, A. B.; Tóta, J.; Moura, M. A. L. 2013. **Avaliação de Modelo Simplificado do Perfil de Velocidade do Vento Acima e Abaixo da Floresta: Estudo de Caso do Escoamento de Drenagem - Sitio Experimental do Projeto LBA - Manaus-AM.**

Capítulo 2. Avaliação de Modelo Simplificado do Perfil de Velocidade do Vento Acima e Abaixo da Floresta: Estudo de Caso do Escoamento de Drenagem - Sítio Experimental do Projeto LBA - Manaus-AM.

RESUMO

Neste estudo foi avaliado o desempenho do modelo analítico de Yi *et al.* (2005, 2008) em estimar o perfil de vento no interior de florestas em área inclinada. Os valores de alguns parâmetros foram extraídos da literatura, e foi desenvolvida uma equação para estimar o perfil vertical do coeficiente de arrasto. O comportamento do perfil do vento, ao longo do dia e da noite, mostrou uma clara atenuação do topo para o interior da floresta de forma parecida de um filtro passa alta. A componente dependente da topografia e do regime térmico dentro da floresta claramente predomina durante a noite e tem maior influência no perfil nos níveis mais baixos. Vale notar que, nos níveis inferiores da floresta, os perfis previstos apresentaram durante a noite (valores negativos), as características observadas de escoamento de drenagem subindo a inclinação em baixos níveis da floresta e descendo logo na camada acima e a 15 metros de altura.

Palavra-chave: escoamento, terrenos complexos, Amazônia.

1. Introdução

O escoamento horizontal sobre certa altura de áreas vegetadas em geral é representado por uma camada com distribuição logarítmica de velocidade e de fluxo constante, nas quais relações lineares entre fluxos e gradientes são empregadas (Garratt, 1980). Entretanto, em uma altura logo acima da vegetação essas relações têm limitada aplicação, devido ao fato de que, apesar da camada apresentar fluxos constantes, as relações entre fluxos e perfis e propriedades turbulentas não seguem o mesmo princípio (Fitzjarrald e Moore, 1995).

Nesta camada denominada subcamada rugosa, as relações fluxo-perfis não são seguidas (Fitzjarrald e Moore, 1995; Harman e Finnigan, 2007; Yi, 2008) e sofre o efeito denominado, “Forest Anomaly”, a qual parece estar relacionada com o fato de que turbilhões acompanhando o fluxo sobre uma área uniforme (baixa rugosidade) apresentem menores tamanhos daqueles que se desenvolvem sobre áreas de floresta de alta rugosidade (Fitzjarrald e Moore, 1995). Nesta camada a turbulência é caracterizada pela presença de estruturas coerentes distintas geradas próximo ao topo da vegetação (Pachêco, 2001; Sá e Pachêco, 2001, 2006).

A grande dificuldade para descrever o escoamento horizontal do vento na camada abaixo da vegetação é a presença de um segundo máximo no perfil vertical na porção mais baixa da vegetação. O perfil do vento apresenta uma forma do tipo “S”, e tem sido observado em vários tipos de biomas na literatura (Turnipseed *et al.*, 2003; Yi *et al.*, 2005). Este tipo de perfil apresenta um gradiente negativo da velocidade do vento, o que invalida a aplicação da teoria de comprimento de mistura desenvolvida por Prandtl (1925), conforme observado por Denmead e Bradley (1985). Em geral, este segundo máximo no perfil do vento está associado a escoamento de drenagem horizontal (Turnipseed *et al.*, 2003; Yi *et al.*, 2005).

Sá e Pachêco (2006) confirmaram a inexistência de uma teoria adequada para tratar o escoamento do vento abaixo da floresta, e sugerem uma parametrização do perfil do vento para esta região da vegetação. Yi *et al.* (2005, 2008) deduziram um modelo analítico para estimar o perfil do vento abaixo da copa que incorpora os efeitos da transferência de *momentum* e térmicos dentro da copa.

Diante do que foi exposto, este estudo pretende avaliar a performance do modelo analítico de Yi *et al.* (2005, 2008) em estimar o perfil de vento no interior de florestas de terrenos complexos.

2. Material e Métodos

Foi utilizado um modelo analítico de Yi *et al.* (2005, 2008) para estimar o perfil de vento abaixo da copa. Esse modelo é baseado na equação de *momentum* simplificada com a coordenada do escoamento alinhada com a inclinação do terreno (Mahrt, 1982), dada por:

$$-\frac{\overline{(u'w')}}{\partial z} - g \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \sin \alpha = c_D(z)a(z)u^2(z) \quad (1)$$

Em que, $-\overline{(u'w')}$, é o estresse de cisalhamento médio, g a aceleração devido a gravidade, Θ_0 a temperatura potencial do ambiente, Θ a temperatura potencial da camada, $\Delta\theta=(\Theta - \Theta_0)$ o déficit de temperatura potencial, $a(z)$ a densidade de área foliar, c_D o coeficiente de arrasto, e $u(z)$ a velocidade média do vento, α a inclinação do terreno.

O coeficiente de arrasto é dado por: $c_D = [u^*(z)/u(z)]^2$, a velocidade de fricção dentro da vegetação é $u^*(z) = -\overline{(u'w')}$. Após substituição desses termos em (1), temos:

$$\frac{\partial[c_D(z)u^2(z)]}{\partial z} - c_D(z)a(z)u^2(z) = g \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \sin \alpha \quad (2)$$

Seguindo Yi *et al.* (2005, 2008), multiplicando ambos os lados de (2) por $[e^{(-L(z))}]$, (sendo $L(z) = \int_0^z a(z')dz'$, o índice de área foliar acumulado) e integrando da altura (z) dentro da vegetação até o topo da copa (h), obtêm-se uma solução analítica dada por:

$$u^\pm(z) = \pm \left[u^2(h) \left(\frac{c_D(h)}{c_D(z)} \right) e^{-(LAI-L(z))} - g \frac{\Delta\theta}{c_D(z)\theta_0} \sin \alpha \int_z^h e^{-(L(z')-L(z))} dz' \right]^{1/2} \quad (3)$$

No qual, $L(h) = LAI$ (índice de área foliar), $c_D(h)$ o coeficiente de arrasto e $u(h)$ a velocidade do vento médio, no topo da vegetação (h). O sinal positivo e negativo em (3) indicam escoamentos descendo e subindo a inclinação do terreno, respectivamente. Na equação (3) o

escoamento é dado por uma componente dependente da inclinação do terreno e da estrutura térmica dentro da vegetação e uma componente independente da topografia do terreno.

A componente independente do terreno pode ser escrita, seguindo as hipóteses de Yi *et al.* (2005, 2008), como:

$$u_f(z) = u(h) \left(\frac{c_D(h)}{c_D(z)} \right)^{1/2} e^{-\left(\frac{LAI}{2} \left(1 - \frac{z}{h} \right) \right)} \quad (4)$$

A equação (4) é o modelo exponencial para o perfil do vento dentro da vegetação usado em vários estudos anteriores (Raupach and Thom, 1981).

Da mesma forma, obtêm a componente dependente da topografia e do gradiente térmico no interior da vegetação, dada por:

$$u_g(z) = \left[-\frac{h}{LAI c_D(z)} g \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \sin \alpha \left(1 - e^{-LAI \left(1 - \frac{z}{h} \right)} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

A equação (5) tem o termo de fluabilidade que incrementa a velocidade horizontal na parte inferior da vegetação, mas a dependência também da densidade e estrutura da vegetação, tende a reduzir a velocidade da mesma forma que a componente independente do terreno (4).

2.1. Equação para calcular o perfil vertical do coeficiente de arrasto ($C_D(z)$)

Foi desenvolvida uma equação para estimar o perfil vertical do coeficiente de arrasto para ZF2, a distribuição de densidade de área foliar que foi assumida é aquela obtida por Marques Filho *et al.* (2005) para a torre K34.

$$c_D(z) = c_D(h) + a(z) e^{-LAI/2 \left(1 - \frac{z}{h} \right)} \quad (6)$$

Em que $c_D(h) = 0.05$ (Fitzjarrald *et al.*, 1988).

3. Resultados e Discussão

3.1. Aplicação do modelo

O modelo foi avaliado e comparado com as observações do vento horizontal abaixo da floresta no sítio do LBA em Manaus. Os valores de alguns parâmetros foram extraídos da literatura, mas para estimar o perfil vertical do coeficiente de arrasto foi utilizada a equação 6.

A Figura 1 apresenta esses perfis, observa-se que o perfil vertical do coeficiente de arrasto acompanha a curva média de densidade foliar, ou seja, encontramos maiores valores de $C_D(z)$ onde temos maiores concentração de área foliar.

A curva média de área foliar apresenta três estratos de vegetação: a zona principal à qual correspondem picos de concentração de área foliar da ordem de $0,33 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ e os maiores valores de $C_D(z)$ situada entre 26 e 28 m de altura; a segunda zona apresenta densidade média máxima de área foliar de $0,24 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ na altura de 15 m; e finalmente uma zona próxima ao solo com pico de densidade média de área foliar de $0,26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ na altura de 4 m. Essa zona corresponde à existência de alta densidade de plântulas e arvoretas especificamente nesse local. Os dois estratos superiores são intercalados por zona de transição localizada na faixa de 17 a 20 m com densidade de área foliar mínima de $0,13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. A segunda zona de transição ocorre no intervalo de 6 a 10 m com uma densidade de área foliar mínima de $0,15 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$.

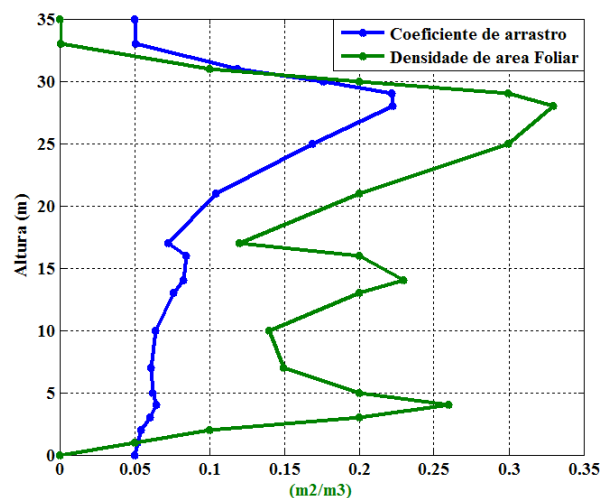


Figura 1. Distribuição vertical da densidade de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$), e coeficiente de arrasto.

Na Figura 2 são apresentados os perfis de vento médio previsto, onde foi feito um teste com o valor do coeficiente de arrasto constante e variando. O valor de $c_D(z)$ é importante e influencia o perfil até níveis baixos da copa, possivelmente relacionado com instabilidades dinâmicas que penetram no interior da vegetação (Fitzjarrald *et al.*, 1988). Note que os perfis previstos apesar de apresentarem uma forma similar entre dia e noite variam em magnitude, como já era esperado, pois, no período noturno tem-se os menores valores de velocidades de vento, e mostram o típico formato “S”.

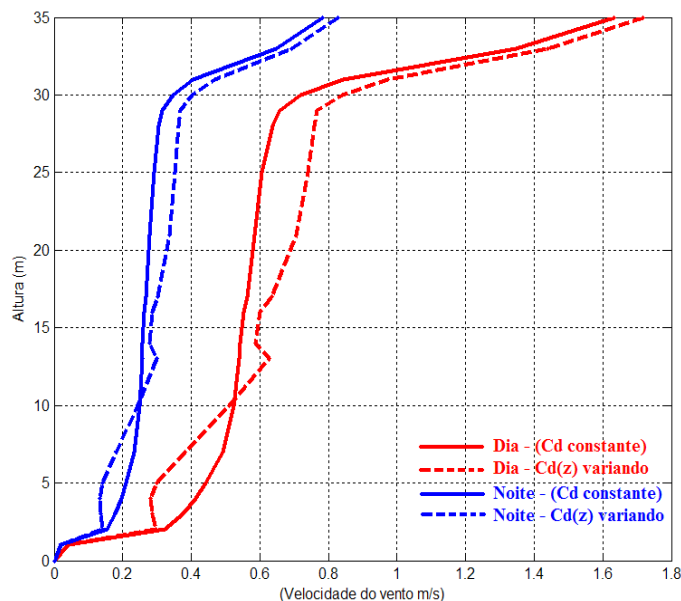


Figura 2. Perfis previstos da velocidade do vento durante o período noturno e diurno.

A Figura 3 apresenta o ciclo diário dos perfis verticais da velocidade horizontal e suas componentes. O comportamento do perfil do vento ao longo do dia e da noite mostra uma clara atenuação do topo para o interior da floresta de forma parecida de um filtro passa alta, conforme observado por Fitzjarrald *et al.*, (1988). Essa atenuação é devido à presença da vegetação, que aumenta a força de arrasto, que tende a reduzir a velocidade do vento continuamente chegando a zero próximo ao chão da floresta.

A componente dependente da topografia e do regime térmico dentro da floresta, claramente predomina durante a noite e tem maior influência no perfil nos níveis mais baixos (Figura 3). Note que o sinal de u_g (Figura 3, painel inferior) é negativo durante a noite, e isso indica escoamento subindo a inclinação do terreno, e positivo durante o dia, ou seja, escoamento descendo a inclinação do terreno, concordando com os resultados observacionais (Capítulo 1) e com estudo realizado por Tóta *et al.* (2012).

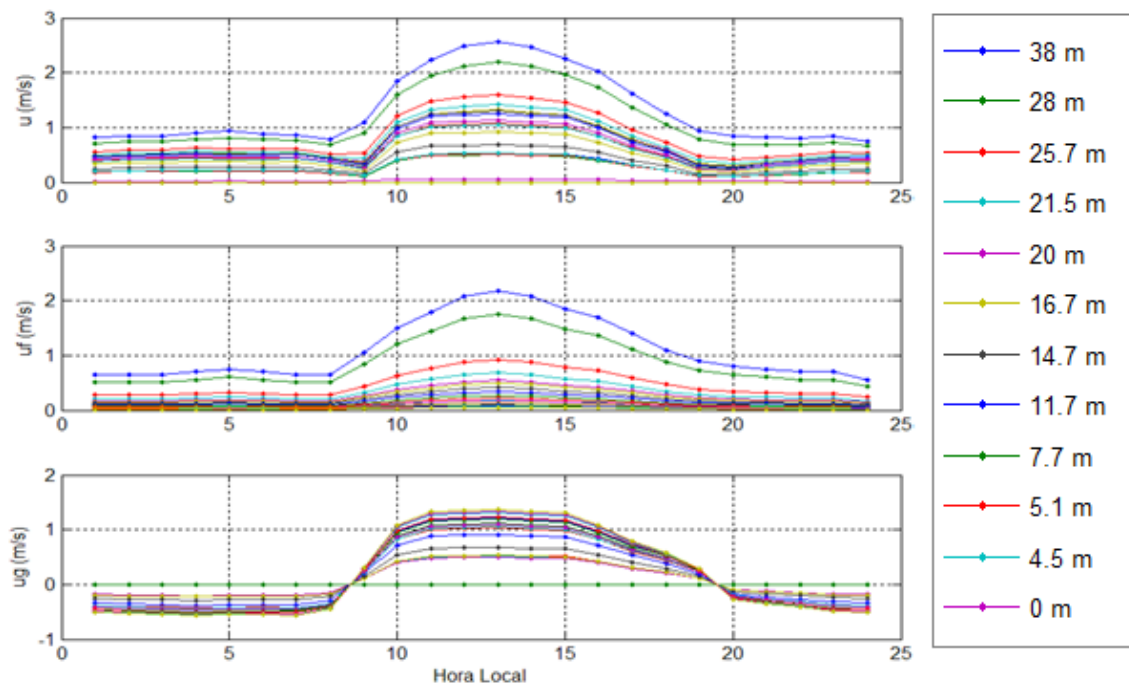


Figura 3. Ciclo diário dos Perfis previstos da velocidade horizontal do vento e suas componentes (Alturas: denotado pelas cores).

A Figura 4 apresenta os perfis verticais da velocidade horizontal e suas componentes ao longo do dia e noite. A componente dependente da topografia e do regime térmico dentro da floresta, claramente exerce maior influencia no perfil nos níveis mais baixos, enquanto o contrario acontece com a componente independente do terreno.

Os estudos observacionais desenvolvidos por Tóta *et al.*, (2008, 2012) confirmaram que, abaixo da floresta tropical na Amazônia, o termo de flutuabilidade foi o principal mecanismo físico que dirige o escoamento abaixo da copa. Portanto, o modelo analítico indica este comportamento relacionando predomínio do termo térmico nos níveis mais baixo enquanto o termo flutuabilidade está relacionado com a relação da transferência vertical de *momentum* ao longo da vegetação.

Vale notar que nos níveis inferiores da floresta, os perfis previstos apresentaram durante a noite (valores negativos – Figura 3, painel inferior) as características observadas de escoamento de drenagem, subindo a inclinação em baixos níveis da floresta e descendo logo na camada acima e a 15 metros de altura. Esses resultados concordam com os resultados observacionais do capítulo 1.

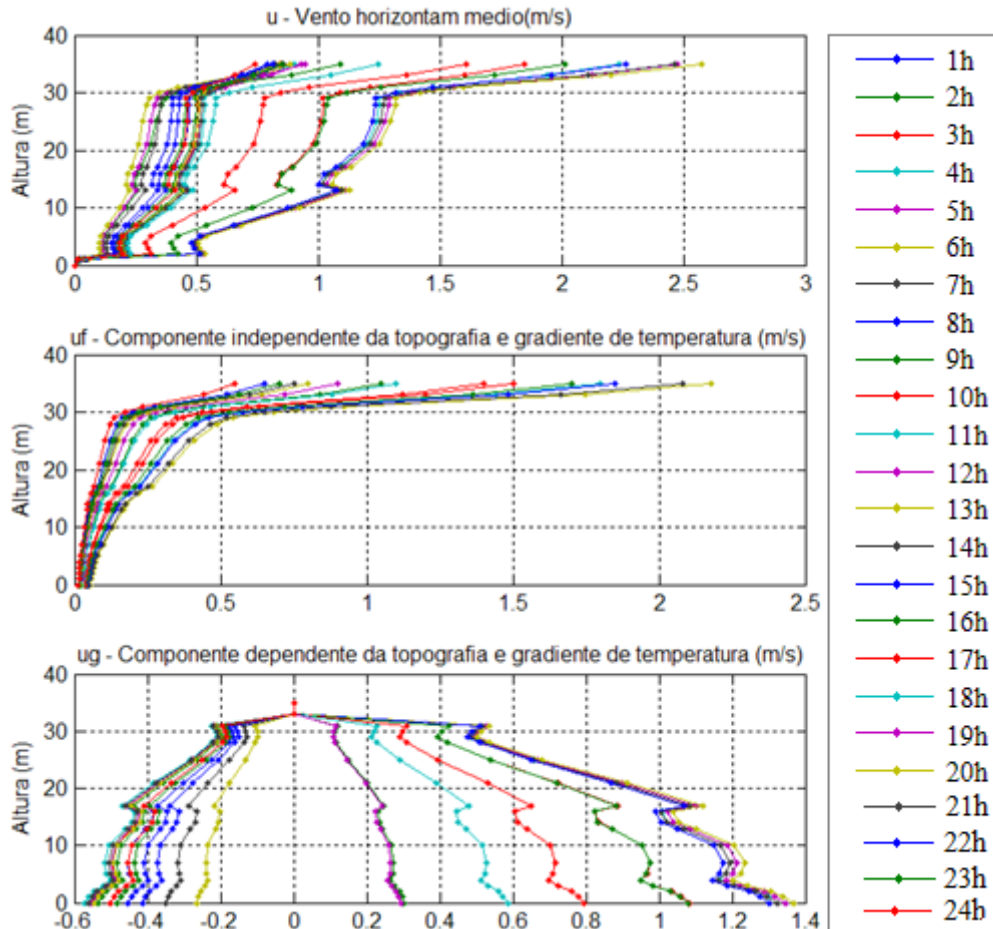


Figura 4. Perfis previstos da velocidade horizontal do vento e suas componentes ao longo do dia e noite (denotado pelas cores).

O ciclo diário da velocidade horizontal média prevista foi comparado com os dados obtidos abaixo da floresta durante o DRAINO Manaus.

Vale salientar que as posições dos sensores de vento e sua distribuição ao longo da encosta seguem a Figura 1c do Capítulo 1 [topo da encosta (sônicos 2D1 e 2D4), centro da encosta (sônicos 3D e 2D5) e base da encosta (sônicos 2D2 e 2D3)].

Conforme Figura 5, pode-se observar que na maior parte do período diurno, entre 10 e 15hs, e durante a madrugada e início da manhã o modelo superestimou o vento. Já entre as 7 e 9hs e no final da tarde e início da noite o modelo subestimou o vento.

No entanto o modelo foi capaz de simular satisfatoriamente o ciclo diário da velocidade horizontal do vento, apesar de ter superestimado/subestimados os ventos ao longo do dia, ele foi capaz de captura a forma e magnitude dentro dos desvios das observações, mostrando razoável predição.

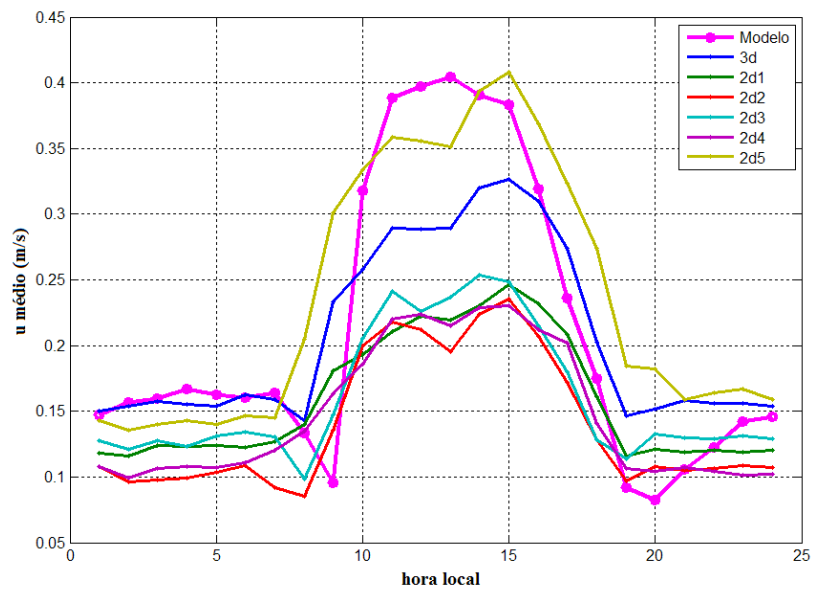


Figura 5. Ciclo diário da velocidade horizontal média do vento prevista e observadas pelo sistema DRAIN0 Manaus (altura de referencia: ~2 metros).

4. Conclusões

Um modelo analítico desenvolvido por Yi (2005, 2008) foi testado e comparado com os dados medidos durante a fase de observações do DRAIN0 no sítio do LBA em Manaus. Apesar de simplificações e considerações nos dados de entrada do modelo, foi possível avaliar sua performance em descrever o escoamento do vento horizontal sobre uma área de inclinação topográfica abaixo da floresta.

Portanto, esses tipos de parametrização simplificada e analítica são extremamente úteis para serem usadas em modelos numéricos de circulação atmosférica, e dessa forma, poder avaliar espacialmente as trocas entre uma superfície heterogênea e atmosfera.

Como sugestão propõe-se avaliar a possibilidade de usar este tipo de parametrização juntamente com modelo numérico de mesoescala para avaliar a questão da interação entre a heterogeneidade de superfície e as circulações atmosféricas locais sobre o sítio de medidas do LBA estudado.

CONCLUSÃO GERAL

Capítulo 1:

O padrão de escoamento do vento 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 a inversão de temperatura que se desenvolveu abaixo do dossel. Já durante o período noturno foi observado um escoamento subindo a encosta associado a 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 vento 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 vento em terrenos florestais, que incluem o forçantes radiativas no perfil de temperatura acima e abaixo de um dossel de floresta densa.

Capítulo 2:

Um modelo analítico desenvolvido por Yi (2005, 2008) foi testado e comparado com os dados medidos durante a fase de observações do DRAINNO no sítio do LBA em Manaus. Apesar de simplificações e considerações nos dados de entrada do modelo, foi possível avaliar sua performance em descrever o escoamento do vento horizontal sobre uma área de inclinação topográfica abaixo da floresta.

Portanto, esses tipos de parametrização simplificada e analítica são extremamente úteis para serem usadas em modelos numéricos de circulação atmosférica, e dessa forma, poder avaliar espacialmente as trocas entre uma superfície heterogênea e atmosfera.

Como sugestão propõe-se avaliar a possibilidade de usar este tipo de parametrização juntamente com modelo numérico de mesoescala para avaliar a questão da interação entre a heterogeneidade de superfície e as circulações atmosféricas locais sobre o sítio de medidas do LBA estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Denmead, O.T.; Bradley, E.F. 1985. Flux-gradient relationships in a forest canopy. In: Hutchison, B.A.; Hicks, B.B. (Eds). **The forest-atmosphere interaction**. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 1985. p. 421-442.

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.

Fitzjarrald, D. R.; Stormwind, B. L.; Fisch, G.; Cabral, O. M. R. 1988. Turbulent Transport Observed Just Above the Amazon Forest, **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. D2, p. 1551–1563.

Fitzjarrald, D.R.; Moore, K.M. 1995. Physical mechanisms of heat and mass exchange between forests and the atmosphere. In: Lowman, M.; Nadkarni, N. (eds). **Forest Canopies: A Review of Research on This Biological Frontier**, San Diego: Academic Press, p. 45–72.

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.

Garratt, J. R. 1980. Surface Influence upon Vertical Profiles in the Atmospheric near-surface layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.106, n.450, p. 803-819.

Harman, I. N.; Finnigan, J. J. A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 2, p. 339-363. 2007.

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. 1982. Momentum balance of gravity flows. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 39, n. 12, 2701-2711.

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.

Marques Filho, A. O.; Dallarosa, R. G.; Pachêco, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta – Reserva biológica do Cuieiras – ZF2, Manaus, **Acta Amazonica**, v. 34, n. 4, p. 427-436.

Pachêco, V. B. **Algumas Características do Acoplamento entre o Escoamento Acima e Abaixo da Copa da Floresta Amazônica em Rondônia**. 2001 109f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.

Papadopoulos, K.H.; Helmis, C.G. 1999. Evening and morning transition of katabatic flows. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 92, n. 2, p. 195–227.

Prandtl, L. 1925. Über die ausgebildete turbulenz. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, v. 5, n. 2, p. 136–139.

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.

Raupach, M. R., Thom, A. S. 1981. Turbulence in and above Plant Canopies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 13, p. 97-129.

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.

Sá, L. D. A.; Pachêco, V. B. 2001. Relação de Similaridade para os Perfis de Velocidade do Vento dentro da Copa da Floresta Amazônica em Rondônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 81-89.

Sá, L. D. A.; Pachêco, V.B. 2006. Wind velocity above and inside Amazonian Rain Forest in Rondônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n.3a, p. 50-58.

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., Moore, K.E., Czikowsky, M.J., Acevedo, O.C. 2000. Topographic effects on flux measurements at Harvard Forest, In: 9th Conference on Mountain Meteorology. **American Meteorological Society**, p. J17.

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), p. 1-15.

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.; NAGESWARARAO, M.; SONEJI, J. R. (Ed.). **Tropical Forests**. Croatia: In Tech, 2012, p. 305-330, ISBN 978-953-51-0255-7.

Turnipseed, A. A.; Anderson, D. E.; Blanken, P. D.; Baugh, W. M.; Monson, R. K. 2003. Airflows and turbulent flux measurements in mountainous terrain: Part 1 - Canopy and local effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 119, n. 1-2, p. 1–21.

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.

Yi, C., Monson, R. K.; Zhai, Z.; Anderson, D. E.; Lamb, B.; Allwine, G.; Turnipseed, A. A.; Burns, S. P. 2005. Modeling and measuring the nocturnal drainage flow in a high-elevation, subalpine forest with complex terrain, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. (D22)303, doi:10.1029/2005JD006282.

Yi, C. Momentum transfer within canopies. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 1, p. 262-275. 2008.