

Efeito de sombreamento na região de esteiras de uma torre micrometeorológica tipo plataforma na Floresta Amazônica

O efeito de sombreamento é a deformação do escoamento provocado por um obstáculo e a sua principal característica é a atenuação do escoamento na região do obstáculo oposta ao escoamento. As torres micrometeorológicas na região amazônica são obstáculos ao escoamento do vento e nenhum estudo sobre esse efeito físico na região amazônica foi realizado. Os dados oriundos da região de esteiras são descartados devido às distorções provocadas pela deformação do escoamento. Esse trabalho analisou 1 semana de dados de 10Hz de um anemômetro sônico na região de esteiras da torre plataforma de 81 metros do projeto ATTO na Amazônia central. A energia cinética turbulenta (ECT) foi avaliada em consonância com o critério de estabilidade de Monin-Obukhov durante o período diurno e noturno. Durante o dia, a ECT apresentou dependência do vento média e varia de $17.79+1.82 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ na direção predominante do vento a $1.17+0.07 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ na região de esteiras ($270^\circ+30^\circ$), enquanto no período diurno para U abaixo de $4.5 \text{ m}.\text{s}^{-1}$ a ECT apresentou independência de U e picos na região de esteiras semelhantes aos encontrados na região de predominância do vento. A atenuação na ECT durante o dia em regime quase-neutro e fracamente instável, e os picos na região de esteiras sob regime quase-neutro são indícios da região de sombreamento. A porcentagem de dados durante a semana na região de sombreamento é de 11% durante o período noturno e 0.8% durante o período diurno, mas devido à variabilidade da direção do vento no ATTO durante o ano, é factível que essas porcentagens sejam maiores em outros períodos do ano.

Palavras-chave: Efeito de sombreamento; ECTR; Terrenos complexos; Critério de estabilidade.

Shading effect on the wake region of a platform-type micrometeorological tower in the Amazon Forest

The shadowing effect is the deformation of the flow caused by an obstacle and its main characteristic is the attenuation of the flow in the region of the obstacle opposite the flow. Micrometeorological towers in the Amazon region are obstacles to wind flow and no study on this physical effect in the Amazon region has been carried out. Data from the wake region are discarded due to distortions caused by the deformation of the flow. This work analyzed 1 week of 10Hz data from a sonic anemometer in the wake region of the 81-meter platform tower of the ATTO project in central Amazonia. Turbulent kinetic energy (TKE) was evaluated in accordance with the Monin-Obukhov stability criteria during daytime and nighttime. During the day, TKE showed dependence on the mean wind (U) and a decrease of $17.79+1.82 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ in the predominant wind direction to $1.17+0.07 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ in the wake region ($270^\circ+30^\circ$), while in the day period for U below $4.5 \text{ m}.\text{s}^{-1}$, ECT showed U independence and peaks in the wake region similar to those found in the wind predominance region. The attenuation in the TKE during the day in the quasi-neutral and weakly unstable regime, and the peaks in the wake region under the quasi-neutral regime are indications of the shadowing effect. The percentage of data in the shadowing region is 11% during the night period and 0.8% during the day period, but due to the variability of wind direction in ATTO during the year, it is possible that these percentages are higher in other periods of the year.

Keywords: Shadowing effect; TKE; Complex terrain; Stability criteria.

Topic: **Tecnologia, Modelagem e Geoprocessamento**

Received: **27/12/2021**
Approved: **28/01/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Rardiles Branches Ferreira

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4247952463975708>
rardilesbranches87@gmail.com

Antônio Marcos Delfino de Andrade

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1598464572396546>
marcoslab33@gmail.com

Raoni Aquino Silva de Santana

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2083159643570023>
raoniass@gmail.com

Raphael Pablo Tapajós Silva

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3925768576575087>
rpablotapajos@gmail.com

Rodrigo Da Silva

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9990287494145760>
rsilvf@gmail.com

Júlio Tóta da Silva

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3850475880747662>
totaju@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0028

Referencing this:

FERREIRA, R. B.; ANDRADE, A. M. D.; SANTANA, R. A. S.; SILVA, R. P. T.; SILVA, R. S.; SILVA, J. T.. Efeito de sombreamento na região de esteiras de uma torre micrometeorológica tipo plataforma na Floresta Amazônica. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.1, p.378-387, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0028>

INTRODUÇÃO

As torres micrometeorológicas são amplamente utilizadas nos estudos de transporte de escalares nas florestas da região Amazônica e devido às dimensões dessa região do globo terrestre, é o aparato experimental mais acessível para a aquisição dos dados necessários para estimativas de fluxos de gases traços, entendimento da dinâmica de compostos orgânicos em florestas tropicais, dispersão de poluentes, formação de nuvens (FITZJARRALD et al., 1988; FITZJARRALD et al., 1990; BALDOCCHI et al., 2001; ANDREAE et al., 2015). Apesar do avanço das técnicas de sensoriamento remoto utilizando imagens de veículos aéreos não tripulados e dos produtos de satélites, as torres ainda terão um papel fundamental no ajuste de modelos e no surgimento de novos entendimentos sobre a dinâmica da atmosfera em terrenos complexos.

Todavia, a alocação de torres micrometeorológicas em um campo de vento deforma o escoamento do vento principal (MOSES et al., 1961; BARTHLOTT et al., 2003; McCAFFREY et al., 2017) e na região de esteiras da torre (região da torre oposta ao anemômetro), a velocidade do escoamento é significativamente atenuado devido à conversão da energia cinética do vento médio em energia cinética turbulenta (ECT) (KAIMAL et al., 1994). Esse efeito físico é chamado na literatura de efeito de sombreamento e apesar do conhecimento de suas características, e estudos sobre esse fenômeno nos sítios de pesquisa da floresta Amazônica são inexistentes. As poucas informações a respeito reportam apenas testes isolados para a existência de distorções dos dados de vento oriundos da direção da torre para o anemômetro (FITZJARRALD et al., 1988) ou o descarte de dados dessas regiões (KRUIJT et al., 2000; DIAS JÚNIOR et al., 2019).

Dentre os modelos de torre mais utilizados na Amazônia estão a torre triangular treliçada (*guy-wired*) e a torre tipo plataforma (*walk-up*) ou retangular, para a qual a secção transversal é sempre maior do que a da torre triangular, (e.g., Large Biosphere Atmosphere (LBA)-K34-Manaus-AM, LBA-Km-67-Santarém-PA, Amazonian Tall Tower Observatory (ATTO)-São Sebastião do Uatumã-AM), mas neste artigo focaremos apenas na torre retangular devido às suas dimensões e ao potencial dessa estrutura em deformar o escoamento que passa por ela. Nesse ponto alguém pode se perguntar o porquê do uso de torres retangulares se elas teoricamente deformam muito mais o escoamento do vento. O uso de tipo plataforma é justificado pela carga que elas suportam. Por exemplo, os estudos da química atmosférica nas florestas Amazônicas voltada para a emissão de compostos orgânicos voláteis biogênicos, utilizam equipamentos que não são suportados por uma torre triangular (RINNE et al., 2002; NÖLSCHER et al., 2016; PFANNERSTILL et al., 2018).

Para dirimir os efeitos da estrutura das torres nas medidas do vento e dos fluxos de escalares em terrenos planos e homogêneos, a orientação para a alocação de anemômetros é a direção predominante do vento e a uma distância de pelo menos 3 vezes a secção transversal da torre entre o anemômetro e a torre (BRUGGEMAN, 2016). Em terrenos complexos, entretanto, mesmo que a montagem das torres e tamanho dos suportes dos anemômetros sejam aplicados de forma rigorosa, a direção do vento não é constante ao longo do ano (ANDREAE et al., 2015). É razoável afirmar que mesmo que a direção predominante do vento seja constante pelo menos em 80% do tempo (frequência requerida para o uso da

técnica de correlação de vórtices) (FOKEN, 2008), 20% de dados descartados podem ter um forte impacto nos resultados de fluxo de escalares como os gases de efeito estufa (FRANK et al., 2016).

No escoamento do ar em uma atmosfera não estratificada (neutra e instável) sobre topografias com elevações e depressões, existe a formação de um campo de pressão na região de esteiras desses obstáculos e invariavelmente as velocidades tendem a ser mais fortes próximo de elevações e mais fracas em vales (RAUPACH et al., 1997). Visto que a principal característica do efeito de sombreamento é a atenuação da velocidade (MOSES et al., 1961), ventos fracos devido a topografia podem ser erroneamente atribuídos ao sombreamento. A complexidade em estudar a região de esteiras de uma torre sobre um terreno caracterizado por sua heterogeneidade é distinguir as contribuições da estrutura das torres de outras características peculiares do terreno, visto que a turbulência produzida por uma torre é de natureza mecânica e se soma a turbulência atmosférica produzida tanto de forma mecânica quanto térmica. Segundo Sun et al. (2012, 2016) há pelo menos 3 regimes de turbulência em uma atmosfera estaticamente estável (período noturno) e a relação entre a escala característica da intensidade da turbulência e o vento médio (U) caracterizam tais regimes. No primeiro regime, a ECT é independente de U para ventos abaixo de um limiar (normalmente ventos fracos). No segundo regime a ECT é dependente de U quando os ventos são fortes. Esses resultados em um terreno complexo são importantes porque na região de sombreamento a velocidade de U é majoritariamente fraca. Dessa forma, qualquer pico de ECT na região de esteiras sob regime estável, não estaria associado ao vento médio e sim a formação de esteiras pela estrutura da torre devido a conversão da energia cinética média (ECM) em ECT (TENNEKES et al., 1972; BERGSTRON, 1996; BARTLOTT et al., 2003; McCAFFREY et al., 2017; CANTEIRO et al., 2021).

Este artigo apresenta a análise de uma semana de dados brutos de um anemômetro sônico e os efeitos físicos associados ao efeito de sombreamento de uma torre tipo plataforma nas medidas de turbulência sobre uma floresta ombrófila densa na Amazônia central a partir da ECT e do critério de estabilidade atmosférico de Monin-Obukhov.

METODOLOGIA

Sítio de pesquisa e descrição da torre

Esta pesquisa foi conduzida a partir dos dados obtidos no sítio experimental do projeto ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*) (2°8'32.42" S, 59°0'3.50" W). Esse projeto é desenvolvido na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Uatumã, pertencente ao município de São Sebastião do Uatumã, 150km a nordeste da cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. A região é caracterizada por solos Ferrasol argiloso e de acordo com a classificação KÖPPEN o clima é tropical úmido caracterizado por uma estação chuvosa que se estende de fevereiro a maio e uma estação seca, de junho a outubro. A direção predominante do vento durante o ano é de nordeste (ANDREAE et al., 2015). O índice de área foliar (IAF) em torno no ATTO é de aproximadamente $5,57 \pm 0,37 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e a altura do dossel varia entre 35 e 40 metros (SANTANA et al., 2017, 2018).

No ATTO existem atualmente três torres de medidas equipadas com anemômetros sônicos. A maior delas mede 325 metros e é considerada a maior torre de pesquisa do mundo. As outras duas torres medem mais de 80 metros e tem secção transversal triangular e retangular respectivamente (ANDREAE et al., 2015). Entretanto, a os dados utilizados são oriundos de uma torre tipo plataforma (*Walk-up*) de 81 metros com secção transversal retangular de 12.2m² com largura e comprimento igual a 2.92m x 4.20m (ANDREAE et al., 2015). A torre ainda possui 5 andares, além de escadas a cada 2 m e área frontal de 5.84m² a cada 2m de altura. Os dados foram medidos a um frequência de 10hz por um anemômetro sônico modelo Gill-R3 na altura de 80 metros, na direção leste orientado para o norte (SANTANA et al., 2017). Por hipótese, a região de sombreamento está na direção oeste (270°) e se estende de 30° a 40° no sentido horário e anti-horário.

Processamento e Análise dos dados

O período estudado compreende o intervalo a partir do dia 08 ao dia 14 de março de 2012. Os dados foram obtidos durante o período de observação intensiva (IOP-2012) (SANTANA et al., 2017). Os dados dos anemômetros sônicos foram armazenados em arquivos binários. Cada arquivo contém 30 minutos de dados de 10Hz, perfazendo um total de 18000 linhas e 4 colunas com as variáveis *u*, *v*, *w*, *t*, nessa respectiva ordem, no qual *u* é a componente zonal, *v* é componente meridional, *w* é a componente vertical expressas em m.s⁻¹ e *t* é a temperatura em graus celsius (°C). Os dados foram separados em período noturno (20 às 05 horário local - HL) e diurno (08 às 17 HL) de forma que os períodos de transição da camada limite noturna (CLN) para a camada limite convectiva (CLC) e da CLC para a CLN, fossem evitados. A série diurna tem 55 horas de dados enquanto a série noturna tem 47 horas de dados.

Aplicou-se o controle de qualidade desses dados para a retirada de *outliers* e médias de 10 minutos de *U* para o período diurno e de 5 minutos para o período noturno (VICKERS et al., 2004). O *U* foi calculado a partir dos dados brutos utilizando a componente zonal (*u*) e meridional (*v*), pela seguinte equação:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

Por fim, uma dupla rotação de coordenadas foi aplicada para diminuir as distorções no escoamento causadas pela topografia do terreno (KAIMAL et al., 1994) e então calcular as flutuações das componentes do vento. O pré-processamento da série temporal de cada torre foi desenvolvido no *software* R em conjunto com a IDE RStudio.

Para esta análise, os ventos foram classificados como: fracos, abaixo de 1,5 m.s⁻¹, moderado, de 1,5 m.s⁻¹ a 3 m.s⁻¹, e fortes, acima de 3 m.s⁻¹. Calculou-se a distribuição e frequência da velocidade do vento utilizando o pacote *openair*. A parte turbulenta do vento e da temperatura foram calculadas utilizando a decomposição de Reynolds, $u' = U_i - \bar{u}_i$ para *i*=*u*, *v*, *w*, *t* (STULL, 1988). Além disso o desvio padrão das componentes também foram calculadas. A ECT média por unidade de massa é dada pela metade da soma das variâncias das componentes do vento (STULL, 2015),

$$\frac{ECT}{m} = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (2)$$

E o critério de estabilidade de MO utilizado:

$$\xi = \frac{z}{L} \quad (3)$$

z é a altura do sônico em metros e L é o comprimento de Obukhov. A tabela 1 apresenta as classes de estabilidade encontrados por Sorbjan et al. (2010).

Tabela 1: critérios de estabilidade de MO.

Classes de estabilidade	Intervalos de ξ
Fortemente instável	$-1 < \xi$
Instável	$-0.6 < \xi < -0.2$
Fracamente instável	$-0.2 < \xi < -0.02$
Quase-neutra	$-0.02 < \xi < 0.02$
Fracamente estável	$0.02 > \xi > 0.2$
Estável	$0.2 < \xi < 0.6$
Fortemente estável	$\xi > 1$

O parâmetro de estabilidade de MO foi agrupado em intervalos de 30° para a geração de Diagramas de caixa (*Boxplots*). Posteriormente a ECT foi agrupada em médias a cada 10° no intuito de observar o comportamento na região de esteiras da torre. Por último, foi realizado a correlação entre a escala característica de velocidade da turbulência e U. Durante o período noturno foi adotado a uso do desvio padrão da componente de vertical σ_w como escala característica da turbulência (DIAS JÚNIOR et al., 2017) em vez da raiz quadrada da ECT (SUN et al., 2012), devido a menor influência dos processos de submesoescala no σ_w (ACEVEDO et al., 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A direção do vento é predominante nos quadrantes nordeste e leste (figura 1) (ANDREAE et al., 2015; LIMA et al., 2017) com velocidade de U acima de 3 m.s⁻¹, mas ao passo que se aproxima do quadrante sudoeste tanto a frequência quanto a velocidade do vento decrescem drasticamente durante o período diurno (figura 1). Nesse período, a direção predominante do vento é leste e a direção com menor incidência de ventos é a direção oeste (figura 1).

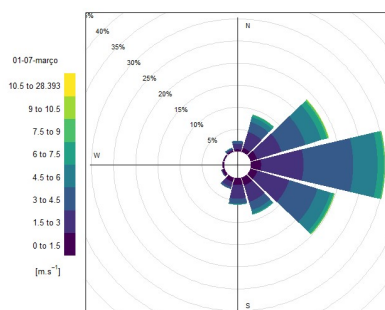


Figura 1: Distribuição de U no período diurno. Predominância de ventos forte na direção leste e de ventos fracos na direção oeste.

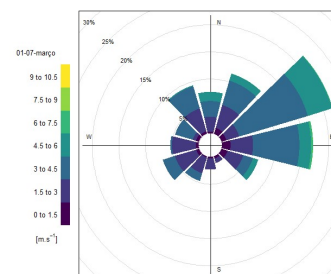


Figura 2: Distribuição de U no período noturno. Predominância de ventos fortes na direção nordeste e de ventos moderados na direção oeste.

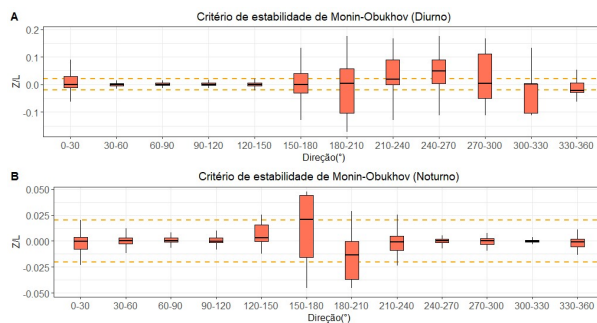


Figura 3: Boxplot do critério de estabilidade de MO no período diurno e noturno do dia 08 ao dia 14 de março de 2012. A) Durante o dia, o regime é quase-neutro e fracamente estável, enquanto no B) período noturno o regime é quase-neutro. As linhas horizontais representam o regime quase-neutro ($-0.02 < \xi < 0.02$).

Durante a noite a direção predominante é nordeste e a direção com menor incidência de ventos é a direção sul (figura 2). Velocidades acima de 4 m.s^{-1} são frequentes nas direções nordeste, leste e sudeste nos dois períodos. Velocidades abaixo de 1.5 m.s^{-1} são observadas em todas as direções, no entanto a predominância dessas velocidades só é observada durante o período diurno na direção oeste. Durante a noite, a predominância é de ventos moderados na região oposta ao anemômetro sônico (oeste) e apesar da menor frequência de ventos entre 180° e 300° , a diferença em relação a direção predominante é pouco acintosa.

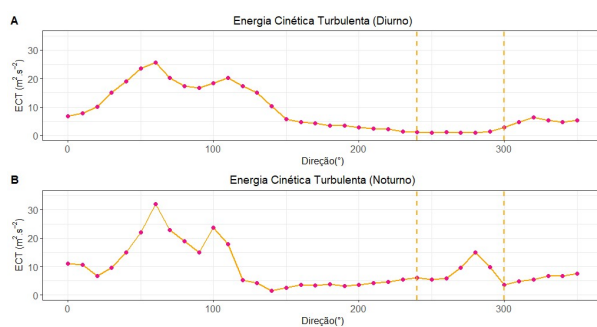


Figura 4: Distribuição da ECT no período diurno (a) e noturno (b). As linhas verticais indicam a região de esteiras ($270^\circ \pm 30^\circ$).

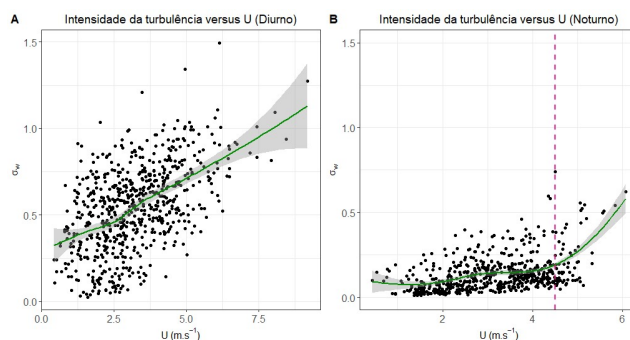


Figura 5: Relação de σ_w com U. a) dependência de σ_w com U e b) independência de σ_w com U $< 4.5 \text{ m.s}^{-1}$ (linha vertical).

Os resultados do parâmetro de estabilidade de MO mostrados na figura 3 apontam para uma atmosfera oscilando entre fracamente instável e fracamente estável durante o dia (figura 3a) e regime quase-neutro durante a noite (figura 3b). No período diurno, entre 330° e 180° a atmosfera é quase-neutra e fracamente estável. De 180° à 300° o regime oscila entre fracamente instável, quase-neutro e fracamente estável. A ECT varia de $17.79 \pm 1.82 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ na direção predominante do vento a $1.17 \pm 0.07 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ na região de esteiras entre 240° e 300° (figura 4a). Durante a noite ECT apresenta variações tanto na região de esteiras quanto na região predominante do vento (figura 4b). No entanto, de 140° a 260° , a variação

diminui, $3.26 \pm 0.57 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, mas volta a oscilar entre 270° e 290° , atingindo um máximo de $12.81 \pm 0.037 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ em 280° . A relação entre a velocidade característica da intensidade da turbulência (σ_w) e o vento médio mostram resultados coerentes com os resultados da ECT. A figura 5a mostra uma relação de dependência de σ_w com U para o período diurno, enquanto a figura 5b mostra uma relação de independência de σ_w com U abaixo de $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Devido a montagem do suporte do anemômetro na direção leste da torre (90°), a região de sombreamento deve estar na direção oeste ($270^\circ \pm 30^\circ$). Dessa forma a predominância de ventos fracos na direção oeste durante o dia podem ser indícios do efeito de sombreamento visto que a atenuação do vento médio é uma de suas características. Ademais à medida que a direção se afasta de $270^\circ \pm 45^\circ$ a velocidade começa a aumentar mesmo com baixíssima incidência (ver figura 1). As atenuações de velocidade ocorrem devido a conversão da energia cinética média do vento (ECM) em ECT no momento em que o escoamento é deformado pela estrutura da torre (BARTHLOTT et al., 2003).

Durante a noite não fica claro uma redução de U na região de esteiras (ver figura 2). A energia cinética nesse período mostra oscilações na região de predominância do vento e na região de esteiras (Figura 4b), todavia, para U abaixo de $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a energia cinética apresenta desconexão com U para o regime fracamente estável da região de esteiras. Dias Júnior et al. (2017) replicaram as análises de Sun et al. (2012) no sítio experimental da Rebio Jarú em Rondônia (Amazônia central) e encontraram resultados semelhantes. Sun et al. (2016) explica que existe um limiar da escala característica da turbulência e de U (ventos fortes) onde ECT é dependente de U e outro para o qual a ECT independe de U (ventos fracos). A média de U no intervalo de 260° a 300° é de $2.79 \pm 0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ durante o período estudado. Dessa maneira, os picos da ECT na região de esteiras são realmente desconexos de U e nesse caso estão associados ao efeito de sombreamento (BERGSTRON, 1996; McCAFFREY et al., 2017).

A porcentagem de dados durante a semana na região de sombreamento é de 11% durante o período noturno e 0.8% durante o período diurno. A turbulência gerada pela deformação do vento médio com a estrutura da torre gera picos de energia que podem ser observados nos resultados da ECT, mas estes são rapidamente dissipados pela viscosidade e no balanço da ECT, essa forma de produção de turbulência contribui para a taxa de dissipação dessa energia (TENNEKES et al., 1972; BRUNET et al., 1994).

Apesar disso, outros fatores podem contribuir para atenuação do vento médio e a produção de esteiras em uma floresta tropical e devido a superposição desses efeitos nos resultados é extremamente complexo separar os efeitos físicos do sombreamento dos efeitos da topografia e da rugosidade. Embora a altura do sônico tenha sido escolhida no nível mais alto da torre, não se pode ignorar por completo o cisalhamento do vento pela copa das árvores (RAUPACH et al., 1996; SANTANA et al., 2018). O escoamento do ar e os campos de concentração dentro e acima do dossel são perturbados pelas elevações e depressões do terreno e conduzem a um significativa advecção horizontal e vertical de CO_2 (KATUL et al., 2006). Tota et al. (2008) mostraram que advecção é responsável por 70% do déficit no balanço de CO_2 no período noturno em uma floresta ombrófila densa, no oeste da região amazônica, e que sua ocorrência está relacionada à topografia. Os efeitos do relevo na velocidade do vento médio também foram estudados no ATTO por

Souza (2019). As direções predominantes do vento para o mês de março de 2012, apresentados nessa pesquisa, advêm de uma região com bastante elevações que se estende desde o oeste até o leste (270°-110°). O restante tem influência tanto das elevações quanto de depressões que compõem a fitofisionomia do sítio (SOUZA, 2019).

Fitzjarrald et al. (1988) no estudo realizado na reserva Duke, AM, Brasil, sobre o transporte turbulento sobre a floresta, ao comparar os resultados do fluxo de calor em diferentes direções, concluíram que não havia efeito da torre nos dados obtidos. De maneira similar, Kruijt et al. (2000) relataram não haver indícios de efeitos físicos da torre nos dados coletados na floresta de Rondônia.

CONCLUSÃO

Este artigo analisou 102 horas (47 horas no período noturno e 55 horas diurno) de dados de uma torre tipo plataforma sobre um terreno complexo e avaliou o efeito de sombreamento nas medidas de turbulência. Os resultados mostraram que durante o período diurno a ECT é dependente de U quando $0.2 < \xi < 0.02$ e diminui drasticamente na região de esteiras assim como U. Durante a noite a ECT é independente de do vento médio para $U < 4.5 \text{ m.s}^{-1}$ e na região de esteiras os picos de ECT são resultados do efeito de sombreamento.

Todavia, devido a topografia e rugosidade do ATTO, é salutar que estudos mais abrangentes sejam realizados para separar os efeitos inerentes ao sítio de pesquisa, daqueles relacionados ao aparato experimental incluindo os dados da torre de 325 metros. Ainda será preciso observar com uma base de dados maior, os efeitos das torres no escoamento do vento no projeto ATTO. Estudos complementares do espectro turbulento e com dados também da torre triangular de 81 metros alinhados com modelagem de dinâmica dos fluídos computacional (CFD) serão realizados futuramente. Devido a variabilidade ao longo do ano, é factível que em algum momento a torre sombreie o anemômetro e que a porcentagem de dados na região de esteiras seja significativa.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. O.; ACEVEDO, O. C.; ARAÚJO, A.; ARTAXO, P.; BARBOSA, C. G. G.; BARBOSA, H. M. J.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHI, X.; CINTRA, B. B. L.; SILVA, N. F.; DIAS, N. L.; DIAS JÚNIOR, C. Q.; DITAS, F.; DITZ, R.; GODOI, A. F. L.; GODOI, R. H. M.; HEIMANN, M.; HOFFMANN, T.; KESSELMEIER, J.; KÖNEMANN, T.; KRÜGER, M. L.; LAVRIC, J. V.; MANZI, A. O.; LOPES, A. P.; MARTINS, D. L.; MIKHAILOV, E. F.; ZULOAGA, D. M.; NELSON, B. W.; NÖLSCHER, A. C.; SANTOS NOGUEIRA, D.; PIEDADE, M. T. F.; PÖHLKER, C.; PÖSCHL, U.; QUESADA, C. A.; RIZZO, L. V.; RO, C. U.; RUCKTESCHLER, N.; SÁ, L. D. A.; OLIVEIRA, M.; SALES, C. B.; SANTOS, R. M. N.; SATURNO, J.; SCHÖNGART, J.; SÖRGEL, M.; SOUZA, C. M.; SOUZA, R. A. F.; SU, H.; TARGHETTA, N.; TÓTA, J.; TREBS, I.; TRUMBORE, S.; EIJCK, A. V.; WALTER, D.; WANG, Z.; WEBER, B.; WILLIAMS, J.; WINDERLICH, J.; WITTMANN, F.; WOLFF, S.; SERRANO, A. M. Y.. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, v.15, p.10723-10776, 2015.

ACEVEDO, O. C.; MORAES, O. L. L.; DEGRÁZIA, G. A.;

FITZJARRALD, D. R.; MANZI, A. O.; CAMPOS, J. G.. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, 2009.

BALDOCCHI, D.; FALGE, E.; GU, L.; OLSON, R.; HOLLINGER, D.; RUNNING, S.; ANTHONI, P.; BERNHOFER, C. H.; DAVIS, K.; EVANS, R.; FUENTES, J.; GOLDSTEIN, A.; KATUL, G.; LAW, J. B.; LEE, X.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MUNGER, W.; OECHEL, W.; PAW, U. K. T.; PILEGAARD, P. K.; SCHMID, H. P.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S.. Fluxnet: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.82, p.2415-2434.

BARTHLOTT, C.; FIEDLER, F.. Turbulence structure in the wake region of a meteorological tower. *Boundary-Layer Meteorology*, v.108, p.175-190, 2003.

BERGSTROM, H.. High resolution climatological wind

measurements for wind energy Applications. **Flygtekniska Forsöksanstalten Aeronautical Research Institute of Sweden**. 1996.

BRUGGEMAN, D.. Evaluation of Tower Shadowing on Anemometer Measurements at Los Alamos National Laboratory. **Los Alamos National Laboratory Report**, 2016.

BRUNET, Y.; FINNIGAN, J. J.; RAUPACH, M. R.. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: single-point velocity statistics. **Boundary-Layer Meteorology**, v.70, p.95-132, 1994.

CANTERO, E.; SANZ, J.; BORBÓN, F.; PAREDES, D.; GARCÍA, A.. On the measurement of stability parameter over complex mountainous terrain. **Wind Energy Science Discussions**, 2021.

CERMAK, J. E.; HORN, J. D.. Tower shadow effect. **Journal of Geophysical Research**, v.73, n.6, p.1869-1876, 1968.

DIAS JÚNIOR, C. Q.; SÁ, L. D. A.; MARQUES FILHO, E. P.; SANTANA, R. A.; MAUDER, M.; MANZI, A. O.. Turbulence regimes in the stable boundary layer above and within the Amazon forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.233, p.122-132.

DIAS JÚNIOR, C. Q.; DIAS, N. L.; SANTOS, R. M. N.; SÖRGEL, M.; ARAÚJO, A.; TSOKANKUNKU, A.; DITAS, F.; SANTANA, A. A.; RANDOW, C. V.; MARTA, S.; PÖHLKER, C.; TOLEDO MACHADO, L. A.; SÁ, L. D.; ZULOAGA, D. M.; JANSSEN, R.; ACEVEDO, O.; OLIVEIRA, P.; FISCH, G.; CHOR, T.; MANZI, A.. Is there a classical inertial sublayer over the amazon forest? **Geophys. Res. Lett.**, v.46, p.5614-5622, 2019.

FITZJARRALD, D. R.; STORMWIND, B. L.; FISCH, G.; CABRAL, O. M. R.. Turbulent Transport Observed Just Above the Amazon Forest. **Journal Of Geophysical Research**, v.93, p.1551-1563, 1988.

FITZJARRALD, D. R.; MOORE, K.; MORAES, O.; SCOLAR, J.; MANZI, A. O.; SÁ, L. D. A.. Daytime Turbulent Exchange Between the Amazon Forest and the Atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.95, p.825-16, 1990.

FOKEN, T.. **Micrometeorology**. Berlim, 2008.

FRANK, J. M.; MASSMAN, W. J.; SWIATEK, E.; ZIMMERMAN, H. A.; EWERS, B. E.. All sonic anemometers need to correct for transducer and structural shadowing in their velocity measurements. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.33, n.1, p.149-167, 2016.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J.. **Atmospheric boundary layer flows: their structure and Measurement**. New York: Oxford Press, 1994.

KATUL, G. G.; FINNIGAN, J. J.; POGGI, D.; LEUNING, R.; BELCHER, S. E.. The Influence of Hilly Terrain on Canopy-Atmosphere Carbon Dioxide Exchange. **Boundary-Layer Meteorology**, v.118, p.189-216.

KRUIJT, B.; MALHI, Y.; LLOYD, J.; NOBRE, A. D.; MIRANDA, A. C.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; GRACE, J.. Turbulence statistics above and within two Amazon rain forest canopies. **Boundary-Layer Meteorology**, v.94, n.2, p.297-331, 2000.

LESIEUR, M.. **Turbulence in Fluids**. Springer, 2008.

LIMA, N. S.; TOTA, J.; BOLZAN, M. J. A.; FERREIRA, A. S.; PIETZSCH, M. R.. A brief observation of the formation of coherent structures and turbulence over a rain forest area in central Amazonia: the ATTO-CLAIRE / IOP – 1/2012 experiment. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.35, p.187-199, 2017.

McCAFFREY, K.; QUELET, P. T.; CHOUKULKAR, A.; WILCZAK, J. M.; WOLFE, D. E.; ONCLEY, S. P.; BREWER, W. A.; DEBNATH, M.; ASHTON, R.; IUNGO, G. V.; LUNDQUIST, J. K.. Identification of Tower-wake Distortions Using Sonic Anemometer and lidar measurements. **Atmos. Meas. Tech.**, v.10, p.393-407, 2017.

MOSES, H.; DAUBEK, H. G.. Errors in Wind Measurements Associated with Tower-Mounted Anemometers. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.42, n.3, p.190-194, 1961.

NÖLSCHER, A. C.; SERRANO, A. M. Y.; WOLFF, S.; ARAUJO, A. C.; LAVRIČ, J. V.; KESSELMEIER, J.; WILLIAMS, J.. Unexpected seasonality in quantity and composition of Amazon rainforest air reactivity. **Nature Communications**, 2016.

PFANNERSTILL, E. Y.; NÖLSCHER, A. C.; SERRANO, A. M. Y.; BOURTSOUKIDIS, E.; KEßEL, S.; JANSSEN, R. H. H.; TSOKANKUNKU, A.; WOLFF, S.; SÖRGEL, M.; SÁ, M. O.; ARAÚJO, A.; WALTER, D.; LAVRIČ, J.; DIAS JÚNIOR, C. Q.; KESSELMEIER, J.; WILLIAMS, J.. Total OH Reactivity Changes Over the Amazon Rainforest During an El Niño Event. **Frontiers in Forests and Global Change**, v.1, 2018.

RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. J.; BRUNET, Y.. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. **Boundary-Layer Meteorology**, v.78, p.351-382, 1996.

RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. J.. The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere Interactions. **Journal of Hydrology**, v.190, p.182-213, 1997.

RINNE, H. J. I.; GUENTHER, A. B.; GREENBERG, J. P.; HARLEY, P. C.. Isoprene and monoterpene fluxes measured above Amazonian rainforest and their dependence of light and temperature. **Atmospheric Environment**, v.36, p.2421-2426, 2002.

SANTANA, R. A. S.; DIAS JÚNIOR, C. Q.; VALE, R. S.; TÓTA, J.; FITZJARRALD, D. R.. Observing and Modeling the Vertical Wind Profile at Multiple Sites in and above the Amazon Rain Forest Canopy. **Adv. Meteorol.**, 2017.

SANTANA, R. A.; DIAS JÚNIOR, C. Q.; TÓTA, J.; FUENTES, J. D.; VALE, R. S.; ALVES, E. G.; SANTOS, R. M. N.; MANZI, A. O.. Air turbulence characteristics at multiple sites in and above the Amazon rainforest canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, p.41-54, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.027>

SORBJAN, Z.; GRACHEV, A. A.. An Evolution of the Flux-Gradient Relationship in the Stable Boundary Layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v.135, p.385-405, 2010.

SOUZA, V. B.. **Análise da influência da topografia do terreno na organização da turbulência dentro e acima de um dossel florestal amazônico**. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Universidades Estadual do Amazonas, Manaus, 2019.

STULL, R. B.. **An introduction to boundary layer meteorology**. 9 ed. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988

STULL, R. B.. **Meteorology for Scientists and Engineers**. Vancouver, 2015.

SUN, J.; MAHRT, L.; BANTA, R. M; PICHUGINA, Y. L.. Turbulence Regimes and Turbulence Intermittency in the Stable Boundary Layer during CASES-99. **Journal Of The Atmospheric Sciences**, v.69, p.338-351.

SUN, J.; LENSCHOW, D. H.; LEMONE, M. A.; MAHRT, L.. The Role of Large-Coherent-Eddy Transport in the Atmospheric

Surface Layer Based on CASES-99 Observations. **Boundary-Layer Meteorology**, v.160, p.83-111.

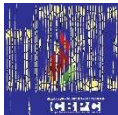
TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L.. **A First Course in Turbulence**. 1972.

TÓTA, J.; FITZJARRALD, D. R.; STAEBLER, R. M.; SAKAI, R. K.; MORAES, O. M. M.; ACEVEDO, O. C.; WOFYSY, S. C.; MANZI, A. O.. Amazon Rainforest Subcanopy Flow and the Carbon Budget: Santarém LBA-ECO site. **Journal of Geophysical Research**, v.114, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JG000597>

VICKERS, D.; MAHRT, L.. Evaluating Formulations of Stable Boundary Layer Height. **Journal Of Applied Meteorology**, v.43, p.1736-1749, 2004.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum). *The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).*



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157286533336662017/>