

Mensuração do fluxo de calor sensível na Cidade Universitária - Ilha do Fundão/RJ com um cintilômetro de larga abertura: estudo de caso para o dia 29 de setembro de 2016

Rafael João Sampaio¹
Fabrício Polifke da Silva¹
Afonso Augusto Magalhães de Araújo²
Otto Corrêa Rotunno Filho¹
Hugo Abi Karam³

¹Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro Caixa Postal 68540 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
joaosampaio@ufrj.br; briciopolifke@gmail.com; otto@coc.ufrj.br

³Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, CT, Escola Politécnica, Cidade Universitária – Rio de Janeiro–RJ – 21941-590
afonsoaraujo@poli.ufrj.br

³Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, CCMN, Instituto de Geociências, Cidade Universitária – Rio de Janeiro–RJ – 21941-590
hugo@igeo.ufrj.br

Abstract. This paper describes the use of a wide aperture scintillation as a major potential tool to estimate the sensible heat flux (H) on heterogeneous paths over complex surfaces and as well as a data source for validation of surface energy balance (SEB) algorithms, widely used in remote sensing, over urban and rural surfaces. The methodology applied for estimating the sensible heat flux (H) is derived from atmospheric refractivity and turbulence theories, associated with mean values of meteorological variables. We present a first evaluation of the observations collected during the case study of September 29/2016 for the mean H observed during post-frontal conditions observed along 825 m path defined 48 m above the surface of the UFRJ campus, located in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ), State of Rio de Janeiro, Brazil. The results demonstrate the potential use of a scintillometer for the continuous daily measurements of sensible heat flux behavior representative of large paths on complex heterogeneous land-cover surfaces, such as the ones usually found in urban areas. In addition, this work confirms the importance of the use of the scintillometer during research field campaigns in hydrology, meteorology and engineering commonly interested and focused on water and energy surface budgets.

Key-words/Palavras-chaves: Scintillation, surface energy balance, boundary layer atmospheric, urban area

1. Introdução

O cintilômetro de larga abertura – CintLA é um método alternativo para a mensuração do fluxo de calor sensível. Consiste em instrumento óptico composto de um receptor e de um transmissor posicionados a uma determinada distância horizontal. O transmissor registra a intensidade das flutuações na radiação provocadas pelos vórtices turbulentos presentes no caminho do feixe de luz (Zhan, 2002), sendo essas flutuações utilizadas para a estimativa do fluxo de calor sensível. A distância entre o transmissor e o receptor pode variar entre dezenas de metros a alguns quilômetros, dependendo do tipo e do modelo do cintilômetro usado (Beyrich *et al.*, 2002). Em consequência, a definição da área terrestre (*footprint*) dos CinLAs pode abranger uma porção no terreno que contempla diversos píxeis de imagens orbitais, tornando-se uma excelente ferramenta para estudos de fluxos de energia em superfície integrados com satélites orbitais. Isto o dá uma vantagem em relação a outros métodos de medição direta em campo pontuais, como covariância dos vórtices turbulentos - CVT, que produzem medições locais representativas de uma área superficial (*footprint*).

Na literatura, diversos trabalhos exploram o uso do cintilômetro em estudos nas áreas de micrometeorologia, agrometeorologia e hidrologia (Al-Gaad *et al.*, 2016). Entre potenciais diretrizes de pesquisa, pode-se avaliar a utilização do cintilômetro como um suporte ao sensoriamento remoto, isto é, no que tange à validação de algoritmos como o *Mapping Evapo Transpiration at high Resolution with Internalized Calibration* – METRIC (Al-Gaadi *et al.*, 2016), o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL (Hemakumara *et al.*, 2003), o *Surface Energy Balance System* – SEBS (Bai *et al.*, 2015) ou, até mesmo, a validação de vários desses procedimentos simultaneamente (Tang *et al.*, 2011). Outras linhas de pesquisa utilizam o cintilômetro com o objetivo de estudar os fluxos de energia em diferentes tipos superfície e/ou vegetação, como agricultura (Minacapilli *et al.*, 2016), floresta amazônica (Van Randow *et al.*, 2008), semiárido (Yee *et al.*, 2015), zona urbana (Van Dinter *et al.*, 2015a), região costeira (Lee, 2015) e bacias hidrográficas (Liu *et al.*, 2013).

Apesar da potencialidade do uso do cintilômetro de larga abertura (CintLA) ser notável, pelo menos até onde é de conhecimento dos autores face à literatura disponibilizada, o pequeno número de publicações descrevendo pesquisas realizadas no Brasil aplicando cintilometria, como Von Randow *et al.* (2008) e Oliveira (2010); revela a necessidade de melhor explorá-lo com os fins de avaliar balanços de energia na superfície terrestre em território brasileiro.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma análise utilizando série de 24 horas de medição de fluxo de calor sensível (H) realizada na Cidade Universitária, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, situada no município do Rio de Janeiro, durante o dia 29 de setembro de 2016, relacionando-a com os dados meteorológicos coletados no mesmo dia do experimento.

2. Metodologia

2.1 Estimação do fluxo de calor sensível pela cintilância.

Os princípios da cintilação e fundamentação teórica para a obtenção dos fluxos de energia a partir das variações de sinal geradas pelo cintilômetro são discutidos em diversos trabalhos, como, por exemplo, Andreas (1990) e Hill (1997). Entretanto, nesta pesquisa, serão descritos apenas os pontos teóricos considerados relevantes para o estabelecimento da metodologia utilizada, deixando essas referências como consulta para interesse no aprofundamento do tema.

O CintLA consiste em um transmissor e em um receptor instalados a uma altura Z_{CintLA} . A relação entre a variância do logaritmo da intensidade das flutuações, $\sigma_{\ln I}^2$, e o parâmetro de estrutura do índice refrativo, C_n^2 , é obtida a partir da equação de propagação de uma onda esférica através de um meio com flutuações no índice refrativo (Von Randow *et al.*, 2008). A equação do C_n^2 para um CintLA que possua diâmetros de abertura iguais para o transmissor e para o receptor foi derivada por Wang *et al.* (1978) e está apresentada na Equação 1.

$$C_n^2 = 1,12 \sigma_{\ln(I)}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (1)$$

Onde D é o diâmetro de abertura do aparelho (m), e L é a distância entre o transmissor e o receptor (m).

As cintilações em meio turbulento são provocadas por flutuações na temperatura e na umidade do ar. Dessa forma, o C_n^2 pode ser expresso em termos dos parâmetros de estrutura da temperatura C_t^2 e da umidade C_q^2 . No entanto, a literatura relata que a temperatura possui maior contribuição nas flutuações nos comprimentos de ondas do espectro visível e do infravermelho próximo, faixas de comprimento nas quais operam os cintilômetros. As

flutuações provocadas pela umidade dominam a porção do espectro eletromagnético associada com a faixa de microondas (Tatarskii, 1961, Yee *et al.*, 2015). Assim, o C_t^2 pode ser representado em função do C_n^2 , conforme a Equação 2 proposta por Wysely (1976).

$$C_t^2 = C_n^2 \left(\frac{T^2}{-0,7810^{-2} P} \right)^2 \left(1 + \frac{0,03}{Bo} \right)^{-2} \quad (2)$$

Onde T é a temperatura, P é a pressão do ar e Bo é a razão de Bowen, isto é, a razão entre os fluxos de calor sensível e latente. O erro gerado por negligenciar a influência da umidade do ar é compensado pela Bo.

Com o C_t^2 conhecido, o fluxo de calor sensível H pode ser estimado a partir de uma função universal ($f(\xi)$), baseada na teoria da similaridade de Monin-Obukhov – TSMO (Monin –Obukov, 1954), Equação 3:

$$\frac{C_t^2 Z_{CintLA}^{2/3}}{T^2} = f(Z_{CintLA} / L_{MO}) = f(\xi) \quad (3)$$

Em que T^* é a escala de temperatura, L_{MO} é o comprimento de Obukhov e Z_{CintLA} é a altura efetiva do cintilômetro sobre a superfície, obtida a partir de uma função de ponderação aplicada sobre o caminho óptico do cintilômetro, como apresenta Hartogenesis *et al.* (2003), obtendo-se, então a Equação 4.

$$Z_{CLA} = \int_0^1 Z(u) G(u) . du \quad (4)$$

Onde Z(u) descreve a altura do caminho óptico no ponto u, e G(u) é a função de peso do CintLA no ponto u. O caminho óptico é normalizado de forma que zero (0) é a posição do transmissor, e 1 é a posição do receptor. G(u) é dado pelo fabricante do aparelho.

Seguindo a TSMO, o fluxo de calor sensível H pode ser estimado pela Equação 5:

$$H = T^* \rho C_p u_* \quad (5)$$

Em que ρ é a massa específica do ar, o C_p é o calor específico do ar, T^* é a escala de temperatura e u_* é a velocidade de fricção.

Por fim, registra-se que as Equações 6 e 7 foram apresentadas por Thierman e Grassl (1992), sendo utilizadas pelo código computacional SRun 1.29, produzido pela Scintec (2015) para auxiliar o uso do cintilômetro BLS 450, da mesma fabricante.

$$f_t(\xi) = 4\beta_1(1 - 7(\xi) + 20(\xi)^2)^{-1/3} \quad (6)$$

Para condições estáveis ($\xi > 0$); então, tem-se:

$$f_t(\xi) = 4\beta_1(1 - 7(\xi) + 75(\xi)^2)^{-1/3} \quad (7)$$

Os valores de u_* e T^* são calculados iterativamente. O resultado encontrado é usado, como entrada, na Equação 5, resultando no fluxo de calor sensível.

2.2 Área de estudo

O estudo foi realizado na Ilha do Fundão, situada na região metropolitana do Rio de Janeiro. Essa ilha é fruto de um arquipélago com nove ilhas aterradas para compor a Cidade Universitária, onde hoje funciona o campus principal da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Ao todo, a ilha possui em torno de 594,7 hectares (Menezes *et al.*, 2005), sendo 320 hectares originários das oito ilhas iniciais e os demais originários do aterramento. Como aponta Júnior *et al.* (2015), o desenvolvimento do processo de ocupação da ilha está alterando o clima urbano do local, principalmente no que diz respeito às ilhas de calor e ao conforto térmico, fomentando, assim, estudos relacionados ao microclima da local.

2.3 Experimento e processamento dos dados

O experimento de campo foi realizado durante o dia 29 de setembro de 2016 (Figura 1), com céu claro e condições meteorológicas estáveis. O transmissor foi instalado no terraço do prédio da Reitoria – UFRJ, em uma altura de 43 metros, enquanto o receptor foi posicionado sobre o bloco A do Centro de Tecnologia – UFRJ, a 48 metros de altura. A distância entre os dois foi de aproximadamente 825 m. O CintLA utilizado foi um Scintec BLS 450 de fabricação alemã, com diâmetro de abertura de 0,145 m. O cintilômetro foi programado para registrar dados a cada 5 minutos, obtidos a partir de amostras coletadas em intervalos de 30 segundos. Os dados auxiliares foram coletados na estação meteorológica do Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências/UFRJ, localizada na Ilha do Fundão. A plataforma de coleta de dados da estação está configurada para uma frequência de registros de dados a cada 10 minutos.



Figura 1: Localização da área de estudo; a) Ilha do Fundão; b) Transmissor e c) Receptor.

Os dados brutos do CintLA foram processados, inicialmente, pelo código computacional Srun 1.29. A retirada de espúrios das séries de dados, o cálculo da altura efetiva e os gráficos foram produzidos a partir de rotinas em linguagem computacional *Python*. Os dados geoespaciais foram obtidos através do modelo de superfície *MDE_27454so_v1*, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística – IBGE, com processamento via software computacional de livre acesso Qgis 2.8.

3. Resultados e discussão

3.1. Altura efetiva.

A altura efetiva foi obtida a partir da Equação 4, que foi aplicada no perfil topográfico sob o caminho óptico do CintLA, como ilustra a Figura 1. Os dados de topografia foram obtidos a partir do modelo digital do terreno.

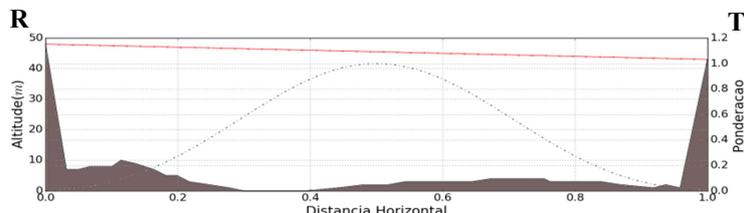


Figura 2: Representação do perfil topográfico ao longo do transecto de medição (em cinza), juntamente com a função de peso (tracejado) aplicada ao caminho óptico (em vermelho).

Hartogensis *et al.* (2003) identificaram que o H é sensível à altura em que se encontra o cintilômetro em relação a superfície. Se a altura do feixe óptico for constante em relação ao terreno durante todo o percurso entre o transmissor e o receptor, pode-se considerar o H mensurado também constante na trajetória do transecto de medição. Entretanto, em terrenos com elevada heterogeneidade da topografia, faz-se necessário o cálculo de uma altura que pondere a contribuição da topografia. A altura encontrada, neste estudo, foi 39,42 metros.

3.2 Parâmetro de estrutura do índice refrativo – C_n^2

Com a finalidade de retirar possíveis dados espúrios (picos no sinal não relacionados com os fenômenos turbulentos), aplicou-se um filtro de média em janela móvel. Assim, utilizando esse filtro, toda a série de dados foi percorrida por uma janela de 15 unidades. Em cada janela, foram calculados a média \bar{x} e o desvio padrão σ . Dessa maneira, os valores individuais medidos que se encontrassem fora do intervalo de confiança de $\bar{x} \pm n\sigma$ eram retirados e substituídos por uma interpolação dos valores mais próximos. A Figura 3 apresenta a variação do parâmetro de estrutura do índice refrativo para n igual a 1, 2 e 3.

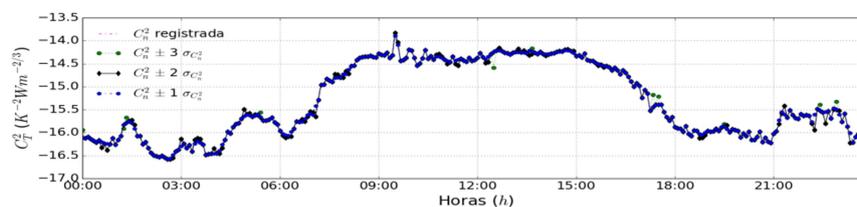


Figura 3: Variação do C_n^2 em 24 horas.

O maior valor de C_n^2 registrado para o dia 29 de setembro de 2016 foi 1,27402 E-14, com média foi 1,7875E-15, enquanto o menor valor registrado para variável foi 2,734E-17.

3.3 Variáveis meteorológicas e fluxo de calor sensível - H

A Figura 4 apresenta os valores de temperatura, velocidade do vento, pressão atmosférica e fluxo de calor sensível para o dia do experimento.

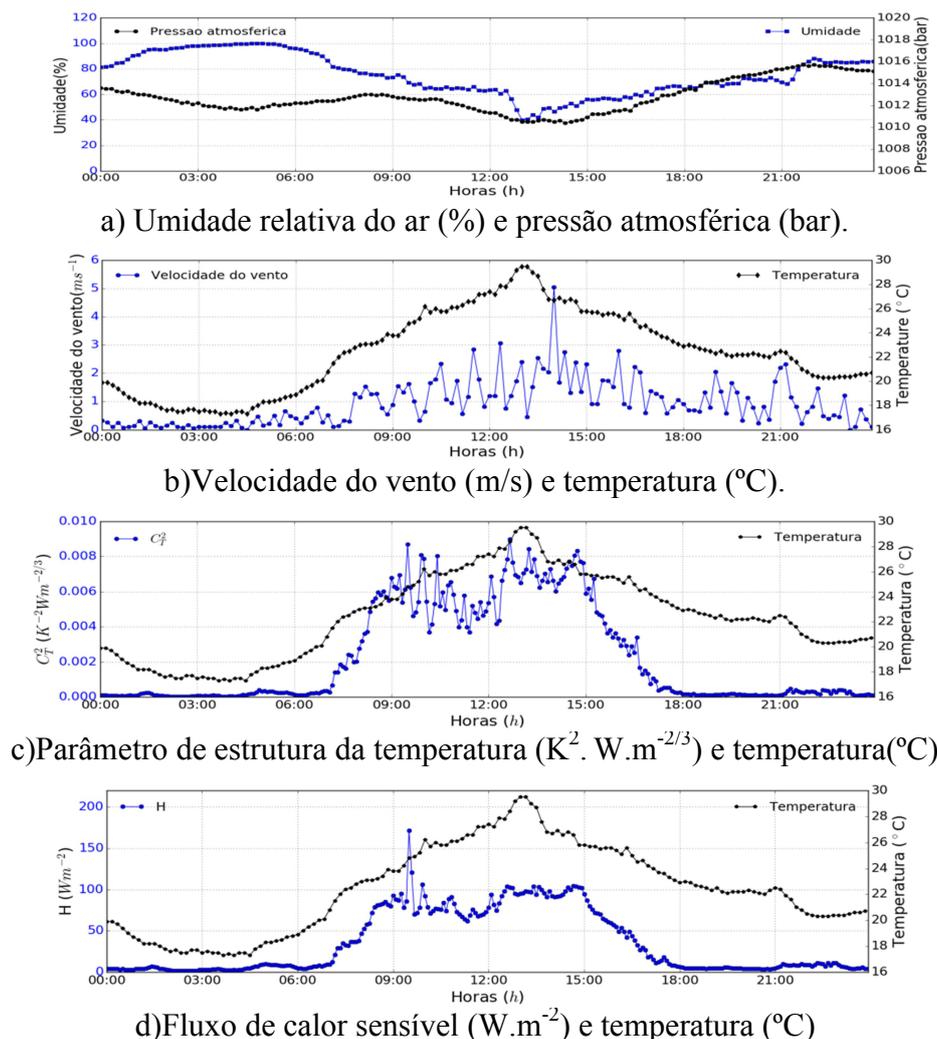


Figura 4: Dados coletados no dia 29 de setembro de 2016 na ilha do Fundão.

A umidade relativa no dia 29 variou de 39,9% a 100%, enquanto a pressão atmosférica oscilou de 1010,2 bar a 1015,7 bar, como apresentado na Figura 4a. As maiores velocidades de vento foram registradas após o meio-dia, sendo o maior valor 5,05 m/s. A menor temperatura registrada foi 17,3°C e a maior 29,5°C, sendo 22,35°C a temperatura média do dia, como se observa na Figura 4b.

Pelas Figuras 4c e 4d, constata-se que o C_n^2 e C_t^2 possuem um padrão de comportamento em relação ao pôr do sol e ao nascer do sol. As flutuações em ambos os parâmetros, para o período noturno, são pequenas. Com o nascer do sol, ocorre um aumento significativo da intensidade de oscilações que persiste até o final do dia. Após o pôr do sol, os parâmetros retornam às baixas flutuações.

A Figura 4d apresenta o fluxo de calor sensível. Dada à escala temporal de coleta do cintilômetro, é possível identificar, com clareza, o padrão de comportamento do H no decorrer das 24 h, sobretudo sua mudança entre o dia e a noite. Pela mesma figura, é possível notar que o pico de fluxo sensível ocorreu por volta as 10:30 h da manhã, enquanto que o maior registro de temperatura ocorreu por volta das 13:00 h da tarde. Tal comportamento denota a transferência de energia solar diretamente para o aquecimento da superfície (janela atmosférica). Posteriormente, esse aquecimento, a partir dos fluxos turbulentos (térmicas), é transferido para a atmosfera, corroborando com observações registradas na literatura. Nota-se que o CintLA não consegue registrar fluxos negativos. Dessa forma, para determinar o sinal

correspondente de cada registro, faz-se necessária uma coleta de dados auxiliares, que registrem a temperatura do ar e do solo, tornando-se, assim, possível identificar a direção dos fluxos.

4. Considerações finais

Neste trabalho, foram apresentados dados de fluxo de calor sensível coletados por um cintilômetro de larga abertura durante 24 h, juntamente com as variáveis meteorológicas como velocidade do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura do ar. Os resultados mostram a potencialidade do aparelho para mensuração de calor sensível (H) em grandes superfícies, podendo ser empregado em diversos campos de estudo, notadamente em engenharia e mais especificamente na área de hidrometeorologia. Destaca-se a viabilidade de relacioná-lo com estudos envolvendo plataformas orbitais. Estudos mais aprofundados em relação ao comportamento do fluxo de calor sensível em diferentes superfícies serão realizados na continuidade deste trabalho. Os principais focos serão a superfície de uma ilha litorânea, adotando como área de estudo a ilha do Fundão, e medições em bacias hidrográficas de pequena escala, no âmbito do projeto 'EIBEX - Estudos Integrados de Bacias Experimentais' - COPPE/UFRJ.

Agradecimentos

Inicialmente, os autores agradecem a bolsa de estudos concedida ao primeiro autor fornecida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ –Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) –E-26/010.002980/2014, FAPERJ No. E_12/2015, bem como ao suporte oferecido pelo projeto CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e pelo projeto MCT / FINEP / CT-HIDRO (2005-2016). Os autores reconhecem, ainda, o apoio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e da Prefeitura do Rio de Janeiro, pela disponibilização de dados auxiliares, bem como o apoio da Prof^{ra}. Dr^a. Célia Maria Paiva do Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências/UFRJ, mediante disponibilização de dados meteorológicos empregados no estudo.

Referências bibliográficas

- Al-Gaadi, K. A.; Patil, V. C.Tola; E. Madugundu; R. Gowda; P. H.. Evaluation of METRIC-derived ET fluxes over irrigated alfalfa crop in desert conditions using scintillometer measurements. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 6, p. 441, 2016.
- Andreas, E. L. **Turbulence in a refractive medium**. Bellingham: SPIE's Milestone, 1990. 720 p.
- Bai, J.; Jia, L.; Liu, S.; Xu, Z.; Hu, G.; Zhu, M.; Song, L. Characterizing the footprint of eddy covariance system and large aperture scintillometer measurements to validate satellite-based surface fluxes. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 5, p. 943–947, 2015.
- Beyrich F. R.; De Bruin, W. M. L.; Meijninger J. W.; Schipper, H.. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogenous land surface. **Boundary Layer Meteorology**, v. 105, p. 85–97, 2002.
- Hartogensis, O. K. et al. Derivation of an Effective Height for Scintillometers: La Poza Experiment in Northwest Mexico. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 5, p. 915–928, 2003.
- Hemakumara, h. M.; Chandrapala, L.; Moene, A. F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 2, p. 109–122, 2003.

- Hill, R. J. Algorithms for obtaining atmospheric surface-layer fluxes from scintillation measurements. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 14, n. 3, p. 456–467, 1997.
- Junior, A. C. da S. O.; Brandão, A. M. de P. O sistema clima urbano da ilha do Fundão (Rj): subsídio para o planejamento urbano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, V. 08, n. 01, p. 113-127, 2015
- Kleissl, J; Gomez, J.; Hong, S.-H.; Hendrickx, J. M. H.; Rahn, T.; Defoor, W. L.. Large Aperture Scintillometer Intercomparison Study. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 128, n. 1, p. 133–150, 2008.
- Lee, S.-H. Determination of Turbulent Sensible Heat Flux over a Coastal Maritime Area Using a Large Aperture Scintillometer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 157, n. 2, p. 309–319, 2015.
- Liu, S. M.; Xu, Z. W.; Zhu, Z. L.; Jia, Z. Z.; Zhu, M. J. S. M Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 24–38, 2013.
- Menezes, P. M. L. de; Andrade, L. G. de, Lepore, V. M. G.; Silva, B. S.; Ferreira, T. de S. F. Evolução histórico-geográfica-cartográfica da ilha do Fundão. In: X Encontro de Geógrafos da América, São Paulo. **Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.
- Minacapilli, M.; Cammalleri, C.; Ciraolo, G.; Rallo, G.; Provenzano, G. Using scintillometry to assess reference evapotranspiration methods and their impact on the water balance of olive groves. **Agricultural Water Management**, v. 170, p. 49–60, 2016.
- Monin, A. S.; Obukhov, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR**, v. 24, n. 151, p. 163–187, 1954.
- Oliveira, M. B. L. **Estudos de trocas de energia sobre a floresta amazônica**. 144p. Tese(doutorado em florestas tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2010.
- Scintec. **Scintec boundary layer scintillometer Srun software manual**. Scintec AG, Rottenburg, 2015, 66 pp
- Tang, R.; Li, Z.; Jia, Y.; Li, C.; Sun, ; Kustas, W. P.; Anderson, M. C.. An intercomparison of three remote sensing-based energy balance models using Large Aperture Scintillometer measurements over a wheat-corn production region. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3187–3202, 2011.
- Tatarski VI. **Wave propagation in a turbulent medium**. McGraw-Hill, New York, 285 pp, 1961.
- Van Dinter, D.; Wood, C. R.; Hartogensis, O. K.; Nordbo, A.; O'Connor, E. J. Observing crosswind over urban terrain using scintillometer and Doppler lidar. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 4, p. 1901–1911, 2015.
- Von Randow, Celso; Kruijt, Bart; Holtslag, A. A M; Oliveira, M. B. L. de. Exploring eddy-covariance and large-aperture scintillometer measurements in an Amazonian rain forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 4, p. 680–690, 2008.
- Wang, T.; Ochs, G. R.; Clifford, S. F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 . **Journal of the Optical Society of America**, v. 68, n. 3, p. 334, 1978.
- Wesely, M., 1976a. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. **Journal of Applied Meteorology**. V. 15, 43–49
- Yee, M. S.; Pauwels, V. R. N., Daly, E.; Beringer, J.; Rüdiger, C.; McCabe, M. F.; Walker, J. P. A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 213, p. 226–239, 2015.
- Zhang, S.; Yang, H.; Singh, L. Introduction: Renaissance of Scintillometry. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 105, Issue 1, October, p. 41–42, 2002.