

VARIAÇÃO SAZONAL DO BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE URBANA DA CIDADE DE SÃO PAULO, BRASIL.

Mauricio J. Ferreira¹, Amauri P. Oliveira, Jacyra Soares, Eduardo W. Bárbaro, Georgia Codato, Edson R. Marciotto, Mariucha Silva e João F. Escobedo².

¹Grupo de Micrometeorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (mjferreira@model.iag.usp.br; apdolive@usp.br; jacyra@usp.br; eduardobarbaro@uol.com.br; georgia.codato@terra.com.br; edson@model.iag.usp.br; mariucha@model.iag.usp.br;))

² Departamento de Recursos Naturais, Universidade do Estado de São Paulo, Botucatu, São Paulo, Brasil. (escobedo@fca.unesp.br)

RESUMO: O objetivo principal deste trabalho é determinar a evolução sazonal das componentes do balanço de energia na superfície para a cidade de São Paulo, Brasil. Neste trabalho, os valores médios mensais das componentes de radiação solar e de onda longa, incidentes e emergentes da superfície, são estimados utilizando valores observados na plataforma micrometeorológica do IAG-USP. Os valores médios mensais dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente na superfície são estimados utilizando o método aerodinâmico *Bulk* e valores de velocidade do vento, temperatura e umidade específica do ar observada no IAG-USP. Os valores médios mensais do fluxo de calor antropogênico são estimados a partir do inventário do consumo de energia para a cidade de São Paulo. O fluxo líquido de calor armazenado no dossel urbano é estimado como um termo de resíduo da equação do balanço de energia considerando o termo de advecção horizontal de energia nulo.

ABSTRACT: The main goal of this work is to evaluate the seasonal evolution of the main components for the energy budget equation at the surface in the City of São Paulo, Brazil. In this work the monthly-averaged values of the solar and long wave radiations components, incoming and outgoing from the surface, are estimated from observed values at the micrometeorological platform at the IAG-USP. Monthly averaged values of sensible and latent turbulent heat fluxes are estimated using aerodynamic bulk method and observed values of wind speed, air temperature and specific humidity at the IAG-USP. The anthropogenic energy fluxes are estimated from the energy consumption inventory for the City of São Paulo. The energy fluxes store in the urban canopy is estimated as a residual term from the energy budget equation by considering the horizontal advection term null.

Palavras-Chave: Energy Balance, São Paulo City, Urban Heat Island

1. INTRODUÇÃO

A substituição de elementos naturais na superfície urbana interfere na estrutura do meio ambiente e pode provocar alterações no ecossistema. As mudanças na rugosidade da superfície, albedo, capacidade térmica, condutividade térmica, emissividade e a poluição irão causar, sobretudo, alterações no balanço de energia urbano, vento, temperatura (ilha de calor), umidade do ar, resultando em enchentes e outros problemas ambientais (Arnfield, 2003; Landsberg, 1981).

Por outro lado, as alterações no ambiente físico-natural, como: retirada da cobertura vegetal; introdução de novas formas no relevo; concentração de edificações, equipamentos e pessoas; impermeabilização do solo; lançamento concentrado e acumulado de partículas e gases na atmosfera; e produção de energia artificial lado causam as alterações no ambiente natural que determinam a longo e médio prazo formação de um clima urbano (Oke, 1988).

O balanço de energia no elemento de volume correspondente ao dossel urbano é definido por (Oke, 1988) em:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

onde, Q^* é o fluxo líquido de radiação, Q_F é a liberações antropogênica de energia dentro do volume, Q_H é o fluxo turbulento de calor sensível, Q_E é o fluxo turbulento de calor latente, ΔQ_S é o fluxo líquido de calor

armazenado no dossel. E o termo ΔQ_A é a advecção horizontal de energia (Grimmond, 1992; Offerle *et al.*, 2005).

A radiação líquida da superfície é a componente fundamental no balanço de energia, sendo sistematicamente monitorada com instrumentação “*in situ*”, ou estimada através de parametrizações baseadas em observações de variáveis meteorológicas padrões, tais como temperatura do ar, umidade e cobertura de nuvem (Diak, 2004). No entanto, depende de fatores associados ao sistema superfície-atmosfera como: características físicas dos elementos de rugosidade, albedo de superfície, capacidade térmica, condutividade térmica, emissividade da superfície e da atmosfera e transmissividade atmosférica (Ferreira *et al.*, 2007; Landsberg, 1981).

O impacto do fluxo de calor antropogênico no clima global tem sido objeto de consideração por parte da comunidade científica, e o consenso é de que em escala global a contribuição antropogênica é relativamente pequena quando comparada com as demais componentes do balanço de energia na superfície, entretanto em escala local regiões densamente povoadas a contribuição antropogênica pode causar um impacto que não pode ser desprezado (Makar *et al.*, 2006).

O fluxo de calor antropogênico depende basicamente do consumo médio de energia por indivíduo e da densidade da população nas regiões urbanas. Corresponde a uma fonte importante de energia, que em alguns casos pode se aproximar ou mesmo ultrapassar a radiação líquida média em algumas cidades, especialmente no inverno em latitudes médias e altas (Oke, 1988).

A natureza complexa da superfície urbana pode causar mudanças significativas dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente. São modificados principalmente pela intensidade do vento de maneira não linear, isto é, nas situações em que a velocidade do vento é baixa, pequenas mudanças na velocidade do vento podem provocar mudanças significativas nos fluxos turbulentos. Entretanto ventos cuja velocidade é de alta a moderada, pequenas variações na velocidade não provocam alterações expressivas nos fluxos turbulentos (Avisar, 1996).

Quando existe disponibilidade de água na superfície para a evapotranspiração, a energia radiativa absorvida pela superfície é preferencialmente redistribuída na forma de fluxo turbulento de calor latente. Sob tais condições o aumento na velocidade do vento tende a aumentar o fluxo turbulento de calor latente mais do que o fluxo turbulento de calor sensível (Avisar, 1996; Kimura e Kuwagata, 1995). O fluxo líquido de calor armazenado ΔQ_S no dossel é importante para o ambiente urbano no sentido de quantificar o excedente de radiação líquida em locais altamente urbanizados. ΔQ_S depende dos materiais, da estrutura da superfície urbana e de sua liberação noturna. É considerado um dos principais contribuintes para a formação de ilha de calor urbana (Roberts, *et al.*, 1984; Grimmond e Oke, 1999b).

O fluxo de calor sensível e latente é associado ao movimento horizontal do vento e depende da velocidade, sentido, temperatura e da umidade do ar em movimento. A advecção de calor representa o ganho ou perda líquida devido ao transporte associado à heterogeneidade das fontes e dissipadores (Spronken-Smith *et al.*, 2000). O termo da advecção horizontal de energia na superfície ΔQ_A é difícil de ser determinado observacionalmente, pois mesmo em uma superfície urbana a área de cobertura dos sensores é em geral considerada homogênea em escala local. Assim, neste trabalho será assumido que ΔQ_A contribui fracamente com o balanço de energia na superfície, podendo ser desprezado (Offerle *et al.*, 2005).

O objetivo deste trabalho é investigar as componentes do balanço energia na superfície da cidade de São Paulo para o ano de 2004, considerando os aspectos horários, diários e mensais relacionados à transferência de energia no sistema superfície atmosfera.

2. DESCRIÇÃO DO CLIMA DE SÃO PAULO

O clima na cidade de São Paulo segundo Oliveira *et al.* (2002a) é típico das regiões subtropicais do Brasil caracterizadas por um inverno seco no período de julho a setembro e o verão úmido de dezembro a março. Os valores mínimos da temperatura e umidade relativa média diária mensal ocorrem em julho e agosto (16°C e 74% respectivamente). O valor máximo da média diária mensal da temperatura e umidade relativa é registrado para o mês de fevereiro (22,5°C). A precipitação acumulada mensal máxima ocorre em fevereiro (255 mm) enquanto que a umidade relativa máxima (80%) é observada em dois períodos distintos que corresponde dezembro-janeiro e março-abril. Os resultados apresentados a seguir devem ser interpretados neste contexto climático.

3. RESULTADOS

Na figura 1 são apresentadas às evoluções diurnas dos valores médios mensais das componentes do balanço de energia para a superfície da cidade de São Paulo representativos do período do verão (Fevereiro) e de inverno (Agosto). Os dados utilizados nestas estimativas correspondem às observações realizadas na plataforma micrometeorológica do IAG-USP durante o ano de 2004.

Na figura (1a e 1b) o máximo na evolução diurna do fluxo de calor sensível ocorre após o máximo na evolução diurna da radiação líquida em função da defasagem existente entre o ciclo diurno da temperatura do ar e da superfície. O ciclo diurno do termo de armazenamento, ΔQ_s , também apresenta defasagem em relação ao ciclo diurno da radiação líquida, Q^* . Esta defasagem se deve ao fato da capacidade térmica do dossel urbano ser menor em virtude da falta de áreas verdes na região urbana de São Paulo. Verificou-se também que a razão $\Delta Q_s/Q^*$ para São Paulo é elevada indicando que o calor líquido armazenado no dossel urbano é o grande responsável pela formação da ilha de calor urbana na cidade de São Paulo.

A título de comparação, na tabela 1 estão relacionados os valores médios diários (calculado a partir da média aritmética dos valores horários médios mensais observados durante o ciclo diurno indicados na figura 1b) das componentes do balanço de energia para a região urbana da cidade de São Paulo durante agosto de 2004 (Inverno) e na cidade do México (Tejeda-Martínez e Jáuregui-Ostos, 2005), entre o período de 1 a 7 de dezembro de 1993 (Inverno). Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que as componentes do balanço de energia apresentam um comportamento semelhante à de outros centros urbanos como, por exemplo, a cidade do México, México.

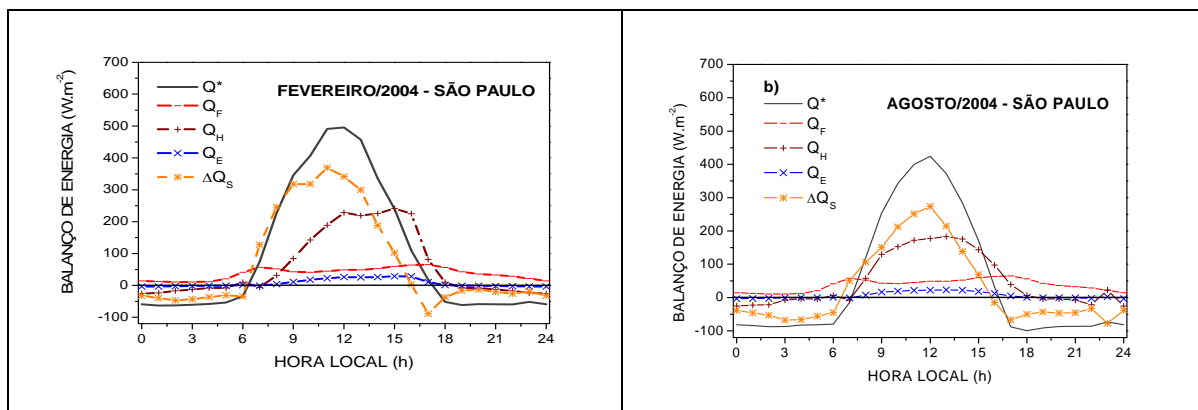


Figura 1: Evolução diurna das componentes médias mensais do balanço de energia na superfície urbana da cidade de São Paulo para período inverno (fevereiro) e verão (agosto). Observações realizadas na plataforma micrometeorológica do IAG-USP durante o ano de 2004.

Tabela 1: Valores médios diários ($W m^{-2}$) baseados na evolução diurna média mensal das componentes do balanço de energia para a cidade de São Paulo durante o mês de agosto de 2004 (Inverno). Valores médios observados na Cidade do México, México, entre 1 e 7 de dezembro de 1993 (Tejeda-Martínez e Jáuregui-Ostos, 2005).

	Cidade de São Paulo (Agosto de 2004)	Cidade do México (1 a 7 de dezembro de 1993)
Q^*	223,0	267,0
Q_F	71,0	-
Q_H	78,6	95,7
Q_E	9,8	11,1
ΔQ_s	205,6	160,5

A figura 2 apresenta a evolução sazonal dos valores diários médios mensais (calculado a partir da integral dos valores médios horários mensais durante o ciclo diurno) das componentes do balanço de energia durante o ano 2004 na cidade de São Paulo, Brasil (CUASO).

A tabela 2 apresenta o resumo estatístico das componentes do balanço de energia ao longo do dia para uma região urbana da cidade de São Paulo durante o verão (Fevereiro) e o inverno (Agosto).

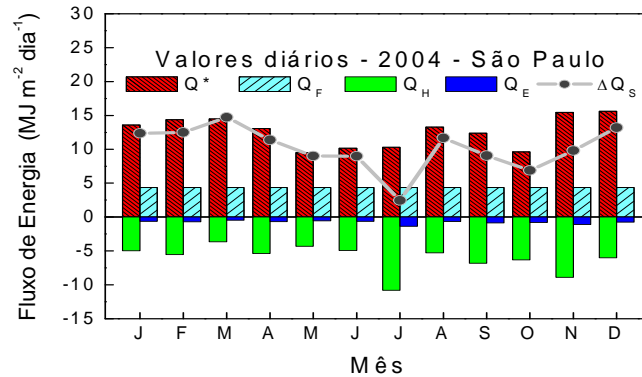


Figura 2: Evolução sazonal dos valores diários médios mensais das componentes do balanço de energia na cidade de São Paulo em 2004.

Tabela 2: Valores diários médios mensais das componentes do balanço de energia na superfície para a cidade de São Paulo no verão (Fevereiro) e inverno (Agosto) de 2004.		
Valor diário (MJ m ⁻²)		
Fluxo	Fevereiro	Agosto
Q*	14,37	10,18
Q _F	4,35	4,35
Q _H	5,54	4,92
Q _E	0,69	0,62
ΔQ _S	12,49	8,99
Fração	Fevereiro	Agosto
Q _H /(Q*+ Q _F)	0,30	0,34
Q _E /(Q*+ Q _F)	0,037	0,043
ΔQ _S /(Q*+ Q _F)	0,67	0,62

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho é investigar as componentes do balanço energia na superfície da cidade de São Paulo. Para tanto foram estimadas as evoluções diurnas media mensal das componentes do balanço de energia na superfície utilizando observações realizadas durante o ano de 2004 na plataforma micrometeorológica do IAG da USP. Conclui-se que o máximo na evolução diurna do fluxo de calor sensível ocorre após o máximo na evolução diurna da radiação líquida em função da defasagem existente entre o ciclo diurno da temperatura do ar e da superfície. O ciclo diurno do termo de armazenamento, ΔQ_S, também apresenta uma defasagem em relação ao ciclo diurno da radiação líquida, Q*. Esta defasagem se deve ao fato da capacidade térmica do dossel urbano ser menor em virtude da falta de áreas verdes na região urbana de São Paulo. Verificou-se também que a razão ΔQ_S/Q* para São Paulo é elevada indicando que o calor líquido armazenado no dossel urbano é o grande responsável pela formação da ilha de calor urbana na cidade de São Paulo.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq (Proc. N° 476807/2007-7), CAPES e a FAPESP pelo apoio financeiro no desenvolvimento da pesquisa e a NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center pelos dados de radiação solar e terrestre.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNFIELD, A. J.: Two Decades Of Urban Climate Research: A Review Of Turbulence, Exchanges Of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *Int. J. Climatol.* **23**: 1–26, 2003.
- AVISSAR, R.: Potencial Effects of Vegetation on the Urban Thermal Environment, *Atmospheric Environment*, **30 (3)**: 437-448, 1996.
- DIK, G. R., MECIKALSKI, J. R., ANDERSON, M. C., NORMAN, J. M., KUSTAS, W. P., TORN, R. D. and DEWOLF, E. R. L.: Estimating land surface energy budgets from space: Review and current efforts at the University of Wisconsin – Madison and USDA – ARS. *Bulletin of American Meteorological Society*, January, 65-78, 2004.
- FERREIRA, M.J., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J., BÁRBARO E.W., CODATO, G., MARCIOTTO, E.R. E SILVA M.: Evolução diurna do balanço de radiação na superfície da cidade de São Paulo, Brasil. Apresentado no 8º Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica, Cuzco, Peru. 2007.
- GRIMMOND, C. S. B.: The Suburban Energy Balance: Methodological Considerations and Results for a Mid-Latitude West Coast City Under Winter and Spring Conditions. *International Journal of Climatology*, **12**, 481-497, 1992.
- GRIMMOND, C. S. B. and OKE, T. R.: Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *J. Appl. Meteorol.* **38**, 1262-1292, 1999b.
- KIMURA, F. and KUWAGATA, T.: Horizontal Heat Fluxes Over Complex Terrain Computed Using a Simple Mixed-Layer Model and a Numerical Model, *Jornal of Applied Meteorology*, **34**: 549-558, 1995.
- LANDSBERG, H. E.: The Urban Climate, Academic Press, New York-NY, 271 p, 1981.
- MAKAR, P. A., GRAVEL, S., CHIRKOV, V., STRAWBRIDGE, K. B., FROUDE, F., ARNOLD, J. and BROOK, J.: Heat Flux, Urban Properties and Regional Weather, *Atmospheric Environment*, **40**: 2750-2766, 2006.
- OFFERLE, B., GRIMMOND, C.S.B. and FORTUNIAK, K.: Heat Storage and Anthropogenic Heat Flux in Relation to the Energy Balance of a Central European City Centre. *International Journal of Climatology* **25**, 1405-1419, 2005.
- OKE, T. R.: The Urban Energy Balance, *Progress in Physical. Geography* **12**, pp 471-508, 1988.
- OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J. and SOARES, J.: Diurnal Evolution of Solar Radiation at the Surface in the City of São Paulo: Seasonal Variation and Modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, **71(3-4)**, 231-249, 2002a.
- ROBERTS, S. M., OKE, T. R., VOOGT, J. A., GRIMMOND, C. S. B. and LEMONSU, A.: Energy Storage in a European City Center, Météo-France, Toulouse, France, 1984.
- SPRONKEN-SMITH, R. A., OKE, T. R. and LOWRY, W.P.: Advection and the Surface Energy Balance Across an Irrigated Urban Park, *International journal of climatology*, **20**: 1033–1047, 2000.
- TEJEDA-MARTÍNEZ, A. and JÁUREGUI-OSTOS, E.: Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review, *Atmosfera*, **18**, 1–23, 2005.