

# VARIAÇÃO SAZONAL DO BALANÇO DE ENERGIA EM CIDADE LOCALIZADA NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL

*seasonal variation of surface energy balance of a central brazil city*

Ivan Julio Apolonio Callejas \*  
Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira \*\*  
Marcelo Sacardi Biudes \*\*\*  
Luciane Cleonice Durante \*\*\*\*

## Resumo

A concentração e o crescimento populacional experimentado pela cidade de Cuiabá desde 70 tem favorecido o rápido processo de mudanças de cobertura do solo no clima tropical local, principalmente por causa da substituição de áreas naturais por edifícios e superfícies impermeáveis. Com base neste cenário, esta pesquisa teve como objetivo avaliar as trocas entre a superfície e atmosfera de um sítio urbano localizado nas proximidades da região central da cidade de Cuiabá. Em geral, as frações de particionamento de fluxo de calor antropogênico (QF), de calor armazenado dentro do dossel urbano ( $\Delta Q_s$ ), dos fluxos de calor latente (QE) e dos fluxos de calor sensível (QH) corresponderam a 3, 26, 28 e 46% e 3, 23, 31 e 46% da energia disponível no ambiente ( $Q^*+QF$ ), na estação seca e úmida, respectivamente. Estas frações do balanço de energia foram semelhantes às observadas na cidade de Miami, mas diferiram em termos do momento do pico e a intensidade. Os índices médios diurnos da razão de Bowen ( $\beta$ ) nas estações seca e chuvosa foram 1,67 e 1,55, apresentando relação direta com a área da cobertura vegetal. Os fluxos de calor sensível e latente se correlacionaram positivamente respectivamente com a superfície impermeável e vegetada.

**Palavras-chave:** Fluxos de energia; Razão de Bowen; Dossel urbano.

## Abstract

This intense growth and populational concentration experienced by Cuiabá City since the 70's has favored the rapid process of land cover changes on local tropical climate mainly because the replacement of preserved natural areas by building and impervious surfaces. Based on this scenario, this research aimed to evaluate the surface-atmosphere exchanges of an urban site located near downtown of Cuiaba City. In general, the fraction of flux partitioning of anthropogenic heat flux (QF), heat stored inside the urban canopy ( $\Delta Q_s$ ), latent heat fluxes (QE) and sensible heat fluxes (QH) corresponded to 3, 26, 28 and 46% and 3, 23, 31 and 46% of energy available in the environment ( $Q^*+QF$ ), in the dry and wet season respectively. These fractions of the energy balance were similar to those observed in Miami City, but differ in terms of the timing of the peak and the intensity. The average diurnal Bowen ratios ( $\beta$ ) in the dry and wet seasons were 1.67 and 1.55 and showed directed relation with decreasing vegetation cover area. Sensible and latent heat fluxes were positively correlated with impervious surface and vegetated area.

**Key words:** Urban energy fluxes; Bowen ratio; Urban canopy.

## Resumen

El crecimiento de la concentración y de la población que sufre la ciudad de Cuiabá desde el 70 ha favorecido el rápido proceso de cambio de cobertura del suelo en el clima tropical locales, principalmente debido a la sustitución de los espacios naturales por edificios y superficies impermeables. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo evaluar el balance de energía en el entorno urbano situado en el centro de la ciudad de Cuiabá. El flujo de calor antropogénico (QF), el calor almacenado en el dosel urbana ( $\Delta Q_s$ ), el calor latente (QE) y el calor sensible (QH) correspondió en la estación seca y húmeda a 3, 26, 28 y 46%, y el 3, 23, 31 y 46% de la energía disponible en el medio ( $Q^*+QF$ ), respectivamente. Estas fracciones de balance de energía fueron similares a los observados en la ciudad de Miami, pero difieren en cuanto a la sincronización del pico y la intensidad. La relación de Bowen ( $\beta$ ) en la estación seca y húmeda fueron 1,67 y 1,55, están directamente relacionados con el área de la cubierta vegetal. Los flujos de calor sensible y latente se correlacionaron positivamente, respectivamente, con superficie impermeable y vegetación.

**Palabras claves:** Flujos de energía; Razón del Bowen; Canopy urbana.-

(\* Lecturer Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal do Mato Grosso) - R. Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP: 78060-900, Cuiabá (MT) Brasil. Tel: (+55 65) 3615 8774 – ivancallejas1973@gmail.com

(\*\*) Lecturer Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal do Mato Grosso) - R. Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP: 78060-900, Cuiabá (MT) Brasil. Tel: (+55 65) 3615 8774 - mcjanp@gmail.com

(\*\*\*) Lecturer Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal do Mato Grosso) - R. Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP: 78060-900, Cuiabá (MT) Brasil. Tel: (+55 65) 3615 8774 – marcelo@fisica.ufmt.br

(\*\*\*\*) Lecturer Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal do Mato Grosso) - R. Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP: 78060-900, Cuiabá (MT) Brasil. Tel: (+55 65) 3615 8774 – luciane.durante@hotmail.com

## INTRODUÇÃO

Os efeitos das atividades antrópicas sobre o clima das cidades vêm sendo observados na busca de conhecimentos que ajudem a minimizar os efeitos da urbanização sobre as alterações climáticas. Estudos sistemáticos têm sido realizados com intuito de diagnosticar efeitos da urbanização no clima das cidades desde o início do século 19. No Brasil, estudos relacionados com o clima urbano se iniciaram na década de 70 com o trabalho de Monteiro (1976), que elaborou um modelo teórico para a investigação do comportamento climático de cidades. Segundo este autor,

a cidade gera um clima próprio (clima urbano), resultante da interferência de todos os fatores que se processam sobre a camada de limite urbano e que agem no sentido de alterar o clima em escala local. Seus efeitos mais diretos são percebidos pela população através de manifestações ligadas ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras manifestações capazes de desorganizar a vida da cidade e deteriorar a qualidade de vida de seus habitantes (MONTEIRO, 1976).

Para ele, “o clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização” e em seu modelo, o autor desenvolve uma metodologia de análise em que considera o clima urbano como um sistema – Sistema Clima Urbano (SCU) – composto de subsistemas, que se articulam segundo canais de percepção climática. Por outro lado, Oke (1987) define o clima urbano como o resultado das modificações causadas pelo processo de urbanização da superfície terrestre e da interferência dessa urbanização nas características da atmosfera de um determinado local.

O processo de urbanização das cidades, com seu acelerado crescimento populacional, acarretam alterações na superfície terrestre, bem como em sua atmosfera. Essas alterações decorrem, em grande medida, de atividades antropogênicas, como: da emissão de poluentes, que afetam a transferência de radiação e acrescentam núcleos de condensação no ar, aumentando a precipitação; das atividades industriais intensas; da supressão da vegetação nativa; do adensamento populacional; da densidade e geometria das edificações, que criam uma superfície rugosa determinante na circulação do ar e no transporte de calor e vapor d’água; dos materiais de construção; do asfaltamento das ruas que aumentam o estoque de calor; da impermeabilização do solo que aumenta a possibilidade de enchentes (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003; ROTH, 2007).

O enfoque atual do estudo do clima urbano concentra-se, essencialmente, em temáticas como: do balanço de energia, contaminação da atmosfera e qualidade do ar (a poluição atmosférica e seus efeitos sobre a saúde); do conforto térmico (configuração de ilhas de calor) e os impactos pluviais concentrados (geradores de frequentes inundações).

Abordando o clima sob a ótica do balanço de energia, Oke (1988) destaca que o mesmo é um processo físico e termodinâmico que acopla a superfície e a camada limite. Através dele são determinados os fluxos temperatura e umidade do ar, bem como os superficiais, que contribuem de forma significativa no perfil médio de temperatura potencial dentro da camada limite atmosférica. Sobre a superfície urbana, as intensidades de turbulências são maiores do que nas áreas rurais, principalmente devido a natureza dos obstáculos existentes no meio, o que indica que os fluxos de calor e umidade são mais dependentes da natureza da turbulência existente dentro da camada limite. Nas áreas urbanas, não só ficam alterados o balanço de energia e a turbulência, mas também o armazenamento de radiação solar incidente (ondas curtas) que acaba sendo maior em virtude dos materiais que são utilizados nesse meio (com alta capacidade térmica). Outra alteração se refere às múltiplas reflexões de radiação de onda longa que acontecem dentro dos denominados “Cânions Urbanos” contribuem para aprisionar a energia dentro do dossel urbano, dificultado a sua dissipação para camadas atmosféricas superiores. Diferentemente do que acontece nas áreas rurais, a cidade apresenta outras fontes de energias, as denominadas antropogênicas, que contribuem para introduzir mais energia no meio urbano, aumentando ainda mais os ganhos de energia dentro do dossel urbano. Assim sendo, as causas apresentadas contribuem para que haja maior ganho e maior armazenamento de energia na cidade, o que traz como consequência, o maior aquecimento do ambiente urbano,



principalmente à noite, quando comparado com o meio rural que o rodeia. Desta forma, com vistas a estudar o balanço de energia dentro dos ambientes urbanos, Oke (1988), fazendo uso da primeira Lei da Termodinâmica (Lei de conservação de energia) a partir de um volume de controle, computou os ganhos, as perdas e o armazenamento de energia dentro do dossel urbano e formulou a equação de Balanço de Energia que define o comportamento das superfícies urbanas inseridas dentro desse volume de controle conforme Equação 1:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad \text{Equação 1}$$

sendo,  $Q^*$  o saldo de radiação líquida ( $K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow$ ),  $Q_F$  a fonte de calor antropogênica introduzida dentro do volume de controle,  $Q_H$  o fluxo de calor sensível turbulento,  $Q_E$  o fluxo de calor latente turbulento,  $\Delta Q_S$  o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano e  $\Delta Q_A$  a advecção horizontal de calor sensível e latente conduzida para dentro ou fora do volume de controle (Figura 1),  $K \downarrow$  radiação de ondas curtas incidente,  $K \uparrow$  radiação de ondas curtas refletido,  $L \downarrow$  radiação de ondas longas emitido pelo céu e  $L \uparrow$  radiação de ondas longas emitido pela superfície, todas consideradas dentro de um volume de controle.

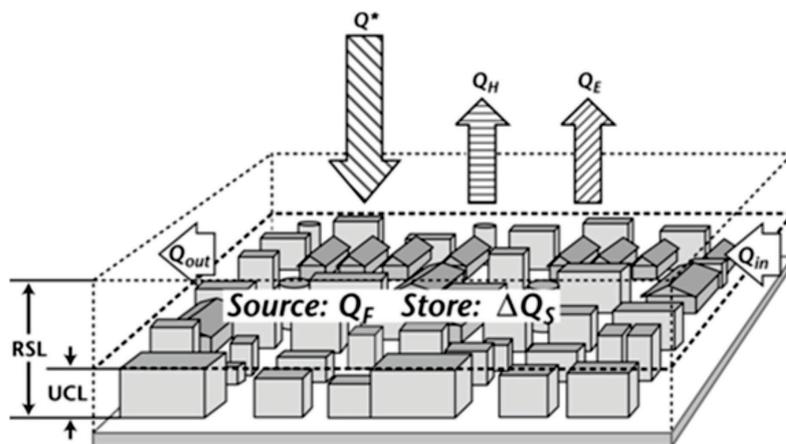


Figura 1 – Ilustração esquemática dos componentes do balanço de energia no volume de controle (superfície urbana + edifícios + ar) definido por Oke (1988). O balanço de energia superficial por unidade de área sobre o topo do volume de controle é dado por  $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$ , sendo que  $\Delta Q_A = Q_{out} - Q_{in}$  é a advecção horizontal que pode acontecer dentro do dossel urbano. RSL (Roughness sub-layer) é a subcamada rugosa e a UCL (Urban canopy layer) é a camada do dossel urbano. Fonte: Roberts et al. (2006).

Ao se analisar processo de transformação urbana sofrido pela cidade de Cuiabá, Capital do Estado de Mato Grosso, percebe-se que o mesmo se iniciou na década de 1930, intensificou-se durante a década de 1960, tornando-a um dos principais centros de abastecimento para as áreas de alta produtividade agrícola da região do Cerrado e do sul da Amazônia. Em 1970, a população de Cuiabá era de 88.254 habitantes e em 2010 alcançou 551.350, um aumento de mais de 624% (IBGE, 2010). Esse intenso crescimento e concentração populacional favoreceu o processo acelerado de mudanças ambientais, em função das alterações nas coberturas das superfícies do solo, principalmente, pela substituição das grandes áreas naturais preservadas em seu entorno por áreas construídas e impermeabilizadas. Modificações estas responsáveis por profundas mudanças no balanço de energia, causando, dentre outras consequências, influencia na dinâmica do movimento do ar, aumento da temperatura na cidade e o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU) (KIM e BAIK, 2004; KOLOKOTRONI et al., 2011).

Estudos sobre Balanço de Energia em áreas urbanas no Brasil e em regiões de clima (sub) tropical ainda são incipientes (ROTH, 2007). Em trabalho recente, Ferreira (2010) determinou a



variação diurna e sazonal dos principais componentes do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo durante o ano de 2004. Para o período diurno, em fevereiro, os fluxos energéticos de calor sensível, latente e calor armazenado no dossel urbano correspondem a 41%, 13% e 44% respectivamente da energia líquida disponível, enquanto em agosto, 46%, 14% e 44%. As razões de Bowen média diária determinada para fevereiro e agosto foram de 3,23 e 3,27, respectivamente. Em Maitelli (2010) é apresentado um estudo de Balanço de Energia para a Cidade de Cuiabá, Mato Grosso no período de agosto a setembro de 1993. Durante as observações, a média da razão de Bowen observada foi de 1,02, com valores atingindo picos de até 5,8, o que indicou predominância do fluxo de calor sensível nas medições. As taxas de calor estocado no dossel urbano foram significativas e chegavam a 22% da radiação líquida disponível dentro do sistema urbano. Foi evidenciado que os fluxos de calor sensível predominaram sobre os fluxos de calor latente, e que durante o período diurno, aquele utilizava cerca de 20 a 52% da energia líquida disponível para aquecer o ar. Os fluxos de calor sensível quando somados aos fluxos de calor estocado no tecido urbano consumiu, em média, 62% de radiação líquida disponível para aquecer o sistema urbano.

## OBJETIVO

Diante do que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação sazonal do balanço de energia em área densamente urbanizada na cidade de Cuiabá-MT, Brasil, localizada em região de clima tropical, durante o período seco e úmido.

## MATERIAL E MÉTODO

### *Localização do objeto de estudo*

O Município de Cuiabá localiza-se na porção Centro-Sul do Estado de Mato Grosso, no limite ocidental dos domínios do Cerrado e próximo à borda leste do Pantanal Mato-grossense. Possui, atualmente, 3538,17km<sup>2</sup>, sendo que 254,57km<sup>2</sup> correspondem à área de macrozona urbana e 3283,60km<sup>2</sup> à área rural. Encontra-se localizada na província geomorfológica denominada Baixada Cuiabana. As coordenadas geográficas são 15°10' a 15°50'S e 54°50' a 58°10'W. As altitudes variam de 146 metros a 259 metros (IPDU, 2007). A cobertura vegetal é constituída por remanescentes de cerrado, cerradão, matas ciliares no entorno dos rios, principalmente o Cuiabá, e por vegetação exótica.

O clima dominante é do tipo tropical semi-úmido (classificação AW de Köppen), sendo a sua principal característica a presença constante de temperaturas elevadas, registrando média anual em torno de 25° a 26°C, com duas estações bem definidas: uma seca (outono-inverno) e uma chuvosa (primavera-verão). O total pluviométrico anual varia de 1250 a 1500mm (CAMPELO JUNIOR et al, 1991).

Como consequência do crescimento populacional sofrido nas últimas décadas, novos bairros periféricos surgiram na cidade, enquanto os já existentes, principalmente as áreas centrais da cidade, sofreram processo de adensamento e verticalização. Assim sendo, com vista a avaliar o comportamento dos fluxos de energéticos em áreas que sofreram intensa urbanização, selecionou-se o Sítio 1 posicionado na região Leste da cidade no bairro “Areão”, distante aproximadamente 1,45km do centro da cidade, com altitude de 197m em relação ao nível do mar. Este sítio se localiza dentro de uma escola da rede pública estadual de ensino, constituída por um pátio central e blocos lineares simetricamente distribuídos (Figura 3). O bairro é classificado como de uso misto, apresentando com presença de edifícios comerciais, institucionais e residenciais. De acordo com o esquema de Zonas Urbanas Climáticas, ele é classificado como ZUC=3, ou seja, de média densidade urbana e altamente desenvolvido (OKE, 2006).

Baseado no fato do que os sensores de temperatura e umidade do ar ficam influenciados por um raio de cerca de 500m tipicamente (OKE, 2006), o uso e ocupação do solo no entorno sítio

pesquisado foi caracterizado em termos de: área plana de vegetação (árvores, grama, arbustos, etc), área plana permeável (solo desnudo e parcialmente desnudo), área plana impermeável (cimento/asfalto/ brita, estacionamentos, ruas, calçadas com exceção dos edifícios) e áreas de superfícies tridimensionais dos edifícios, subdivididas em área de telhados e paredes. Assim, a área total de superfícies ativas ( $f_s$ ), em contato com a atmosfera, foi definida como:

$$f_s = f_v + f_l + f_p + f_r + f_c \quad \text{Equação 2}$$

sendo que  $f_v$  é a fração de área plana vegetada,  $f_l$  é fração de área plana impermeável (concreto e asfalto),  $f_p$  é a fração de área plana permeável (solo desnudo e parcialmente coberto),  $f_r$  é a fração de área dos telhados dos edifícios e  $f_c$  é a fração de área das paredes (avaliada a partir dos cânions urbanos). É possível se obter a medida da morfologia tridimensional dos sítios em função da divisão da área plana total ( $f_{plana}$ ) pela área total de superfícies ativas ( $f_s$ ) dentro da área do círculo adotado. As frações de área plana para cada tipo de categoria definida bem como a fração de área tridimensional pode ser visualizada na Tabela 1. O entorno do Sítio 1 pode ser visualizado na Figura 2. Como se pode observar, ao se considerar as superfícies das paredes como integrante da área de contato com a atmosfera, o Sítio 1 passa a apresentar 33% a mais de área caso se considerasse apenas as superfícies planas.

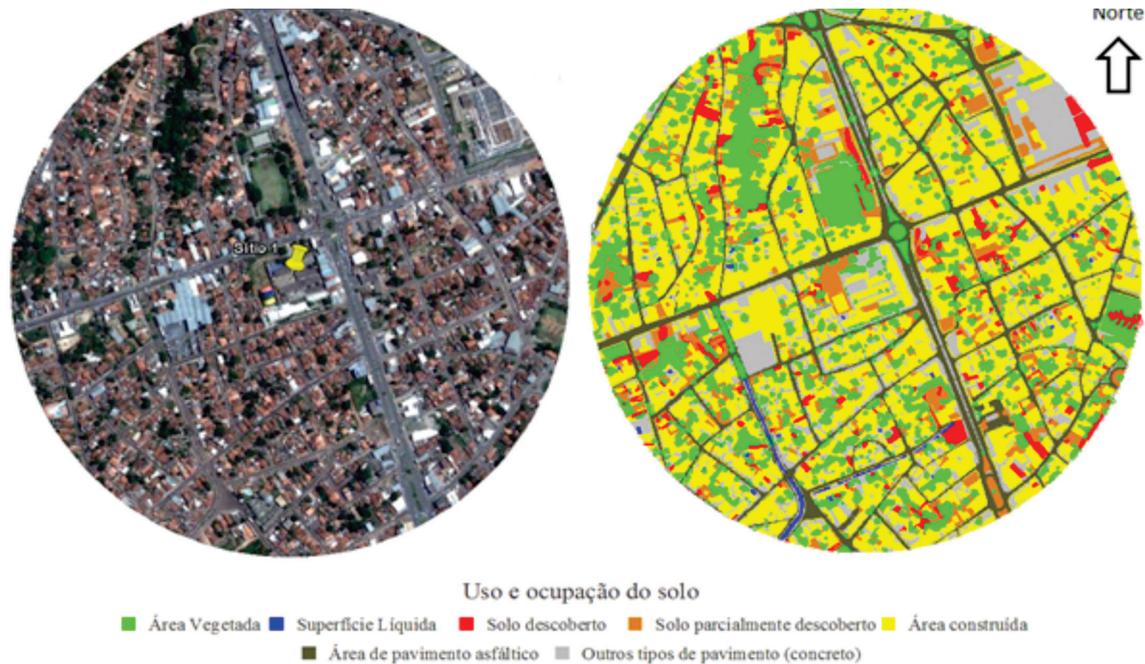


Figura 2 – Uso e ocupação do solo no entorno do Sítio 1.

Tabela 1 – Fração de área ( $f_i$ ) para cada categoria adotada no entorno do Sítio 1 (raio de 500m).

Uso e ocupação do solo	Fração de Área ( $f_i = A_{parcial}/A_{total}$ )					$f_{plana}/f_s$
	Área Impermeabilizada ( $f_l$ )	Área vegetada ( $f_v$ )	Solo desnudo e parcialmente descoberto ( $f_p$ )	Área de telhados ( $f_r$ )	Área de Cânion Urbano ( $f_c$ )	
Sítio 1	21,72%	11,42%	8%	33,97%	24,88%	1,33

## MATERIAIS

Para realização das medições, os seguintes equipamentos micrometeorológicos foram fixados em um poste no pátio central da escola (Figura 3): três Termo-Higrômetros, Marca OnsetComp, Modelo S-THB (níveis 2,5, 3,75 e 7,5m de altura) para avaliação do perfil de temperatura e umi-



dade do ar; um saldo radiômetro, Marca Kipp&Zonen Delft, Inc., Holland, Modelo NR Lite 2 Net Radiometer (nível de 7,5m de altura) para avaliação do saldo de radiação; dois piranômetros Marca OnsetComp, Modelo S-LIB (nível de 7,5m de altura, um instalado para cima e outro para baixo), para a avaliação da radiação solar global incidente e refletida; um fluxímetro, Marca REBS, Inc., Seattle, Washington, Modelo HFT-3.1 (em contato direto com as placas de concreto a uma profundidade de aproximadamente 5cm em relação ao nível do solo instalado dentro de caixas de passagem presentes nos pátios) para avaliação do fluxo de calor no solo (concreto) e dois anemômetros de conchas, Marca OnsetComp, Modelo S-WSA (velocidade) e S-WCA (velocidade e direção), (níveis de 3,75 e 7,5m) para avaliação do perfil de velocidade do vento (Figura 3). Os dados produzidos pelos sinais e/ou pulsos elétricos dos sensores dos equipamentos meteorológicos foram processados e armazenados por Datalogger, Marca OnsetComp, Modelo U30-NRC-VIA-10-S100-000 em intervalos de 10s, com médias a cada 5 minutos, sendo posteriormente os dados reprocessados para intervalos de 30 minutos. Os dados foram coletados durante o período de setembro de 2010 a agosto de 2011, durante as estações seca e úmida, respectivamente.

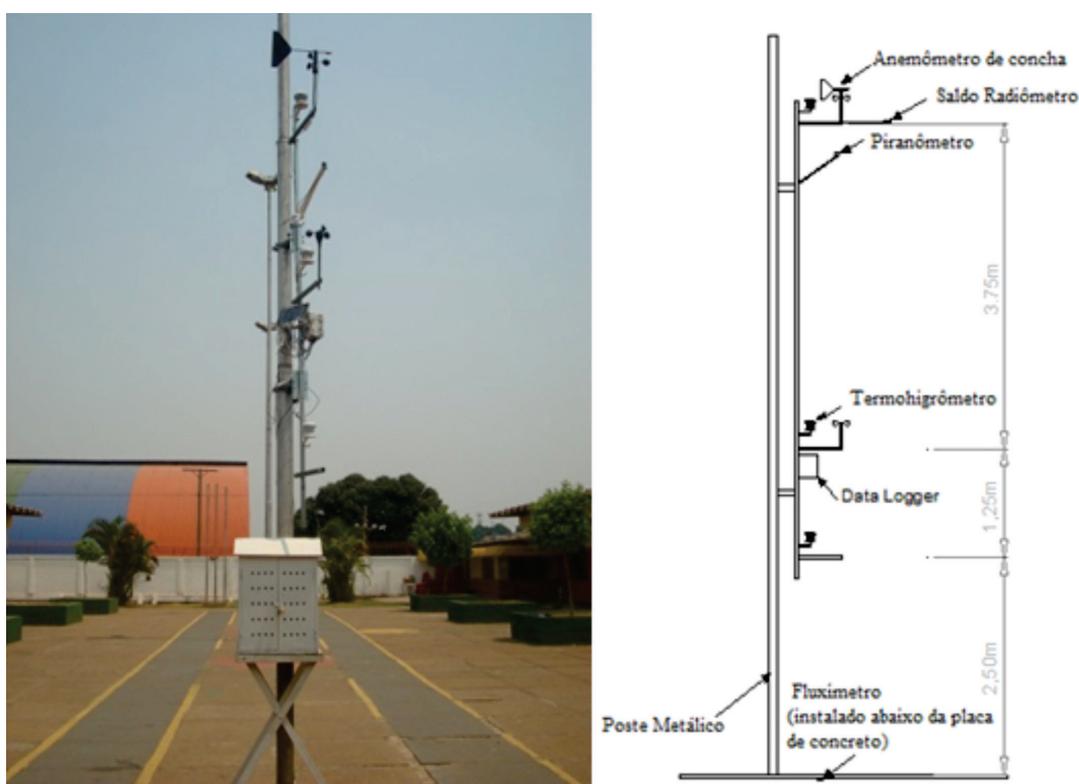


Figura 3 – Estação Meteorológica: detalhes da instalação dos equipamentos.

## MÉTODO

O Bowen Ratio-Energy Method (BREB) se baseia na lei de conservação de energia no sistema Solo-Ar-Atmosfera. A ideia utilizada no método para estimar os fluxos convectivos se baseia no fato de que a energia disponível na superfície ( $Q^* - Q_G$  ou  $Q^* + Q_F - \Delta Q_S$ , para o caso de áreas urbanas) possa ser repartida entre os fluxos de calor sensível e latente a partir da razão entre esses fluxos ( $\beta = Q_H / Q_E$ ). A teoria de similaridade de Monin-Obukhov estabelece que  $K_H / K_E = \phi_H / \phi_E$ , sendo que  $\phi_H$  e  $\phi_E$  representam as funções universais de similaridade para os perfis de temperatura e umidade específica dentro da CLS (camada limite superficial). Experimentalmente, sabe-se que  $\phi_H$  é igual a  $\phi_E$  em todos os regimes de estabilidade da atmosfera, o que implica dizer que  $K_H$  e  $K_E$  são similares (FOKEN, 2006). Admitindo esta hipótese, é possível escrever a razão entre o fluxo de calor sensível e latente pela Equação 3:

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} = \frac{K_H c_p \Delta T}{K_E \lambda \Delta q} = \frac{c_p \Delta T}{\lambda \Delta q} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

Equação 3

sendo  $\Delta T$  e  $\Delta e$  se referem a diferença de temperatura e pressão de vapor d'água entre dois níveis verticais de medição junto à superfície,  $\gamma = c_{pp}/\epsilon L_v$  a constante psicrométrica,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante ( $1.00467 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $p$  a pressão atmosférica,  $\epsilon$  a razão entre os pesos moleculares do vapor d'água e do ar (0,622), e  $L_v$  o calor latente de vaporização da água, sendo os demais termos já definidos na Equação 1. Assim sendo, o método da razão de Bowen foi utilizado para estimar os componentes do balanço de energia no Sítio 1 através da utilização dos gradientes de temperatura ( $\Delta T$ ) e pressão de vapor d'água no ar ( $\Delta e$ ) nas alturas descritas no item 3.2.

De posse da Razão de Bowen e utilizando a Equação (1) do balanço de energia para superfícies no meio urbano e desprezando o termo advectivo horizontal, os fluxos de calor latente e sensível podem ser calculados pelas Equações 4 e 5.

$$Q_E = \frac{1}{1 + \beta} [(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s]$$

Equação 4

$$Q_H = \frac{\beta}{1 + \beta} [(Q^* + Q_F) - \Delta Q_s]$$

Equação 5

Apesar de o método ser relativamente simples, a precisão dos fluxos de calor sensível e latente é função da razão de Bowen ( $\beta$ ), a qual é dependente da metodologia e dos equipamentos utilizados nas medições de campo. Os erros introduzidos pela razão de Bowen têm sido avaliados por vários autores ao longo dos anos (KALANDA et al., 1980; PEREZ et al., 1999; FOKEN, 2008; HU et al., 2013). Em virtude da constatação de falhas e de resultados inconsistentes na utilização do método da razão de Bowen, Perez et al. (1999) formularam critérios objetivos para avaliar quando os fluxos de energia são confiáveis e corretos, os quais foram revisados por Hu et al. (2013). Os autores realizaram uma análise física do método para encontrar alguns critérios para rejeitar os dados fisicamente inconsistentes, incluindo os casos que se encontram fora dos limites de precisão instrumental. O método falha quando a resolução do sensor é insuficiente para resolver gradientes em  $\Delta T$  e  $\Delta e$ , em casos em que as condições atmosféricas são estáveis, porque  $\beta$  tende a -1, principalmente durante o amanhecer e ao entardecer, fazendo a evapotranspiração tender ao infinito e quando as condições atmosféricas mudam abruptamente, produzindo a erros na medição. Assim, para evitar estas condições, foi utilizado um método de filtragem dos dados onde os valores fisicamente de  $\beta$  fisicamente corretos eram obtidos de forma objetiva e quantitativa, limitando o potencial de erros e vieses na estimativa termos do balanço de energia (PEREZ et al., 1999; HU et al., 2013).

Para estimar o calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano, utilizou-se o Método do Inventário proposto por Sailor e Lu (2004) no qual o calor introduzido no meio pelo homem pode ser dividido em três componentes que representam a maiores fontes de calor no meio urbano a partir da Equação 6:

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FS} + Q_{FM} \quad \text{Equação 6}$$

sendo  $Q_{FV}$  o fluxo de antropogênico gerado pelas fontes veiculares,  $Q_{FS}$  gerado pelas fontes estacionárias (consumo de eletricidade e combustível por residências, indústrias e estabelecimentos comerciais) e  $Q_{FM}$  gerado pelo metabolismo humano e/ ou animal.

A energia armazenada dentro do dossel urbano ( $\Delta Q_s$ ) foi avaliada pelo Modelo Objetivo de Histerese (Objective Hysteresis Model - OHM) proposto por Grimmond et al. (1991) no qual é possível descrever a relação não linear (a histerese) entre as forças radioativas e entre a energia armazenada no dossel urbano através da Equação 7.



$$\Delta Q_s = \sum_1^n (f_i a_{1i}) Q^* + \sum_1^n (f_i a_{2i}) \frac{\partial Q^*}{\partial t} + \sum_1^n (f_i a_{3i})$$

Equação 7

onde  $\Delta Q_s$  é o fluxo de calor armazenado no dossel urbano,  $Q^*$  é o saldo de radiação líquida na superfície urbana em estudo,  $\frac{\partial Q^*}{\partial t}$  é a taxa de variação da radiação líquida no tempo, avaliada por meio da expressão  $0.5(Q^*_{t+1} - Q^*_{t-1})$  com  $t=1h$ ,  $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$  e  $a_{3i}$  são coeficientes empíricos para cada tipo de superfície  $i$  (asfalto, concreto, paredes, telhados, vegetação, solo exposto) associados à resposta térmica da superfície em relação a intensidade do fluxo de energia de entrada, e  $f_i$  as frações dessas superfícies  $i$  dentro da área de estudo. Para aplicar o esquema proposto por Grimmond et al. (1991) existe a necessidade de se conhecer a priori o saldo de radiação líquida no sítio, bem como realizar um inventário das características superficiais da área do entorno (materiais presentes, altura das edificações, morfologia da área e dos edifícios, frações de área impermeabilizadas, vegetadas e de cânions urbanos) conforme foi realizado no item 3.1 e apresentado na Tabela 1. Como representado na Figura 2, as frações de superfícies ( $f_i$ ) normalmente são avaliadas através de fotografias áreas do entorno, bem como através de levantamentos de campo. Os coeficientes de regressão  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , correspondem à resposta do modelo de histerese para cada tipo de superfície presente dentro do meio urbano, e foram obtidos a partir de estudos de fluxo de calor no Sítio 1 (fluxímetro instalado abaixo da placa de concreto), dos dados do Sítio da Fazenda Miranda localizada nas proximidade da cidade de Cuiabá (para solo nu e parcialmente coberto) e dos dados do Sítio da Floresta de Sinop (para áreas vegetadas). Para os dados de Cobertura dos edifícios, Cânions urbanos e revestimento asfáltico, foram utilizados os coeficientes apresentados nos trabalhos de Meyn e Oke (2009), Yoshida et al. (1991) and Anandakumar (1999). A Tabela 2 apresenta apenas os coeficientes médios anuais, mas foram utilizados coeficientes médios mensais para modelar  $\Delta Q_s$  dentro do Sítio 1.

Tabela 2 – Coeficientes médios adotados para o Modelo OHM proposto por Grimmond et al. (1991) para estimar o fluxo de calor armazenado no dossel urbano nos sítios localizados na cidade de Cuiabá – MT

Tipo de Superfície	Local/ Autores	Valores médios anuais		
		$a_1$ (adimensional)	$a_2$ (h)	$a_3$ (W m <sup>-2</sup> )
Área vegetada	Dados de Sinop-MT <sup>1</sup>	0,03	-0,03	-3,30
Solo total ou parcialmente desnudo	Dados Fazenda Miranda-MT <sup>2</sup>	0,26	-0,07	-22,75
Asfalto	Anandakumar (1998) <sup>3</sup>	0,84	-0,83	-19,29
Concreto <sup>4</sup>	Sítio 1	0,21	-0,43	-13,90
Telhado (telha cerâmica)	Meyn (2000)	0,07	0,26	-6,0
Cânions Urbanos	Yoshida et al. (1990–91)	0,52	0,03	-34,0

(1) Coeficientes obtidos na Floresta de Sinop - MT para o ano de 2002; (2) 2 Solo tipo canga laterítica característico da região. Coeficientes obtidos para o período de setembro de 2010 a agosto 2011 em região rural nas proximidades da cidade de Cuiabá-MT; (3) 3 Média do período em que  $a_2$  e  $a_3$  apresentaram valores negativos; (4) Dados obtidos com o fluxímetro instalado no Sítio 1 de setembro de 2010 a agosto 2011

Os resultados encontrados nesta pesquisa foram comparados com os obtidos na mesma região por Biudes et al. (2009 ). Utilizou-se também as pesquisas de Ferreira (2010) e Maitelli (2010) porque eles foram as únicas que conduziram experimento de balanços de energia em áreas urbanas no Brasil. Atenção especial foi dada à pesquisa realizada na cidade de Miami (Flórida, EUA) (NEWTON et al., 2007 ) devido à sua semelhança em termos de clima (também classificada como Köppen AW ) e de população para com a cidade de Cuiabá. Os resultados do balanço de energia dos países de clima temperado, como as obtidas por Grimmond e Oke (2002) (Sítios Americanos) e Offerle et al. (2006) (Sítios europeus) foram utilizados para contrastar o balanço de energia na região pesquisada.

## ANÁLISE DE RESULTADOS

### SALDO DE RADIAÇÃO LÍQUIDA ( $Q^*$ )

As variações diurnas dos valores horários médios mensais para a radiação líquida disponível no meio ( $Q^*$ ) e a radiação solar incidente ( $R_g$ ) podem ser visualizadas na Figura 4 para o período seco e para período úmido, respectivamente. Observa-se que os valores máximos diurnos de  $Q^*$  em média ocorreram às 12h com intensidade de  $520,9 \text{ W m}^{-2}$  no período da seca e às 11h30min com intensidade de  $510,2 \text{ W m}^{-2}$  no período úmido. Os valores médios noturnos foram de  $-83,0 \text{ W m}^{-2}$  no período da seca e de  $-71,3 \text{ W m}^{-2}$  no período úmido, às 18 e 19h, respectivamente. Os valores médios máximos diurnos de radiação solar incidente ( $R_g$ ) foram observados às 12h no período seco com intensidade de  $694,50 \text{ W m}^{-2}$  e às 11h no período úmido com intensidade de  $663,74 \text{ W m}^{-2}$ . Assim, nota-se que a variação de  $Q^*$  se encontra em fase com  $R_g$  no período seco e defasado (atraso de fase) em 0,5h no período úmido.

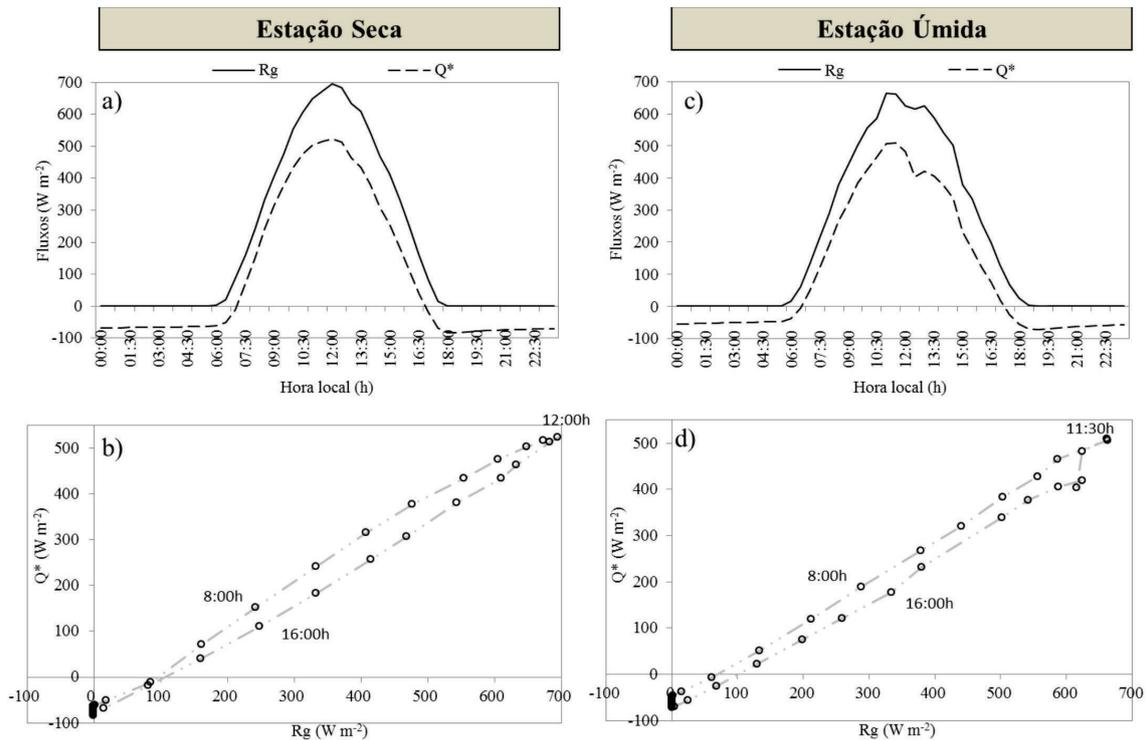


Figura 4 – Variação sazonal média da radiação direta ( $R_g$ ) / radiação líquida ( $Q^*$ ) e diagrama de dispersão  $R_g$  e  $Q^*$  na estação seca e úmida.

Nas estimativas do balanço de energia realizado em São Paulo, Ferreira (2010) encontrou no período diurno valor máximo de  $Q^*$  igual a  $452 \text{ W m}^{-2}$  em agosto e  $520 \text{ W m}^{-2}$  em fevereiro, ambos às 13h, período representativo das estações seca e úmida, respectivamente. No período noturno, o mínimo foi de  $-41 \text{ W m}^{-2}$  às 20h em fevereiro e  $-72 \text{ W m}^{-2}$  às 19h em agosto. Em região de pastagem nas proximidades da cidade de Cuiabá, Biudes et al. (2009) avaliou a intensidade diurna de  $Q^*$  em  $574,6 \text{ W m}^{-2}$  e  $586,0 \text{ W m}^{-2}$  na estação seca e úmida, respectivamente. Os fluxos noturnos não foram disponibilizados pelo autor. Os fluxos energéticos foram estimados pela primeira vez em Cuiabá por Maitelli (2010). A autora realizou experimento no final da estação seca e início da estação chuvosa. Os dados indicaram que  $Q^*$  alcançou valor máximo de  $510,6 \text{ W m}^{-2}$  no período diurno e  $-55 \text{ W m}^{-2}$  durante as primeiras horas do período noturno. Na cidade de Miami (NEWTON et al., 2007), cidade com características climáticas e populacionais semelhantes à cidade de Cuiabá,  $Q^*$  alcançou valor diurno máximo de aproximadamente  $570 \text{ W m}^{-2}$  e noturno de aproximadamente  $-50 \text{ W m}^{-2}$ . Com base nestes resultados, pode-se inferir que a variação diurna  $Q^*$  foram semelhantes aos observados na região e em outras localidades, como São Paulo e Miami. Por outro lado, os



fluxos noturnos foram superiores aos verificados na década de 90 para cidade de Cuiabá e também para a cidade de Miami. Uma possível explicação para este comportamento pode ser atribuído às diferenças nas propriedades térmicas e físicas das superfícies no interior do dossel urbano e também devido a complexa configuração morfométrica dos edifícios no site pesquisado (como altura, orientações, densidade, etc.).

A média anual de  $Q^*/R_g$  correspondeu a aproximadamente a 61,65% da radiação global, enquanto no período seco e úmido, as relações observadas foram de 60,25 e 63,11%, respectivamente. Na área de pastagem, Biudes et al. (2009) verificou que  $Q^*$  correspondeu a 80,50% da radiação global incidente e em termos sazonais, 69,6% na estação seca e 91,4% na úmida. Ao se consultar os dados apresentados por Maitelli (2010), constata-se que  $Q^*/R_g$  correspondeu a aproximadamente 61,96% da radiação global incidente no período de agosto e setembro. Os valores registrados para radiação solar direta incidente em São Paulo e em Miami não foram apresentados pelos autores, o que impediu a comparação da relação  $Q^*/R_g$  com os obtidos na cidade de Cuiabá. Os resultados encontrados nos sítios pesquisados se aproximam dos valores registrados por Maitelli (2010), mas diferem consideravelmente dos obtidos por Biudes et al. (2009), área rural perto da cidade de Cuiabá, com predominância de solo coberto por pastagens e vegetação arbórea. As diferenças no balanço de energia entre as superfícies urbanas e rurais podem ser atribuídas às características térmicas e espectrais, influenciadas pelo albedo da superfície, geometria do cânion urbano e estado de umidade do solo durante as estações do ano na região (OKE et al., 1991; CHRISTEN e VOGT, 2004; FERREIRA, 2010).

#### CALOR ANTROPOGÊNICO (QF)

Ao analisar as curvas de variação média diária de QF para as estações seca e úmida (Figura 5), é possível verificar que a dissipação de energia no entorno do Sítio 1 apresentou três períodos de máximos: o primeiro aconteceu no início da manhã, das 7h às 8h (~10 Wm<sup>-2</sup>), o segundo ao meio dia, das 11h às 12h (~10,3 W m<sup>-2</sup>) e o terceiro, no final da tarde, das 17h às 18h (~9,30 Wm<sup>-2</sup>). Este comportamento é semelhante ao observado na cidade de São Paulo com picos ocorrendo no início da manhã (~19,1 W m<sup>-2</sup>), outro próximo ao meio dia (~18,6 Wm<sup>-2</sup>) e último no final da tarde (~19,3 Wm<sup>-2</sup>) (FERREIRA, 2010). Biudes et al. (2009) não realizou estimativa do fluxo de calor antropogênico por se tratar de área rural, onde praticamente não há dissipação de energia antropogênica. Por sua vez, em Maitelli (2010) e Newton et al. (2007), este termo foi considerado de baixa intensidade se comparado aos outros fluxos, sendo descartados. Sailor e Hart (2006) realizaram estimativas do fluxo de calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano para várias cidades americanas, inclusive na cidade de Miami, sul da Flórida. O valor máximo de QF encontrado para o verão foi de 28,5 W m<sup>-2</sup>, intensidade quase três vezes superior às máximas observadas na cidade de Cuiabá.

O fluxo de calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano reflete principalmente o padrão de tráfego de veículos da cidade de Cuiabá, visto que as fontes veiculares (QFV) foram a principal fonte de dissipação de energia no meio, correspondendo a aproximadamente 66,6% de QF, enquanto as fontes estacionárias (QFS) e fontes metabólicas (QFM) por apenas 18,2% e 15,1%, respectivamente. Em São Paulo, QFV foram responsáveis por aproximadamente 53% de QF, enquanto QFS e QFM por 38% e 9%, respectivamente (FERREIRA, 2010). A menor fração proporcionada pelas fontes estacionárias pode ser justificada pelo menor consumo de combustíveis fósseis (como gás liquefeito de petróleo, óleo combustível e gás natural) na cidade de Cuiabá, em comparação com o consumo da cidade de São Paulo. Pode-se inferir que as fontes veiculares são a principal fonte de dissipação de calor dentro do dossel urbano, especialmente em cidades com menor população menor, como o caso de Cuiabá.



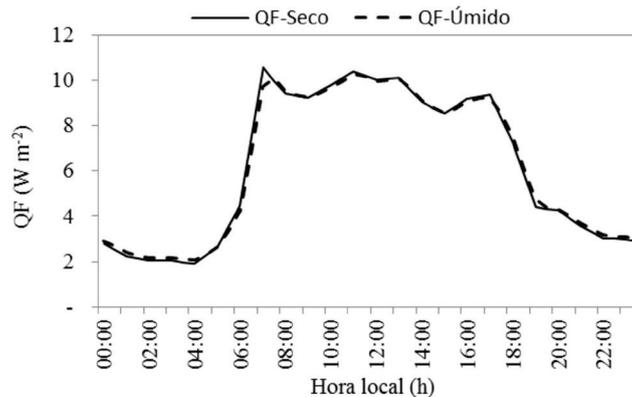


Figura 5 - Variação sazonal média diária do fluxo de antropogênico (QF) na estação seca e úmida.

Pela análise das frações de  $QF/Q^*$ , pode-se inferir que os fluxos de calor antropogênicos apresentam menor contribuição no balanço de energia durante o período diurno, em média 3,1% da energia disponível no meio tanto na estação seca quanto na úmida. No entanto, durante o período noturno, sua contribuição se eleva, chegando a representar em média 30,6% de  $Q^*$ . Desta forma, esta componente apresenta baixa contribuição no balanço de energia na cidade de Cuiabá com clima tropical, enquanto que em cidades de clima temperado, devido ao elevado consumo de eletricidade e de combustíveis fósseis durante o inverno para aquecimento residencial e uso industrial,  $QFS/QF$  pode atingir valores de até 70%, elevando a sua contribuição para o balanço de energia, principalmente no período noturno (SAILOR e LU, 2004).

#### FLUXO DE CALOR ARMAZENADO DENTRO DO DOSEL URBANO ( $\Delta QS$ )

Os valores máximos diurnos de  $\Delta QS$  em média ocorreram às 12h30min com intensidade de 148,36  $W m^{-2}$  no período da seca e às 11h 30min com intensidade de 134,9  $W m^{-2}$  no período úmido. Os valores médios noturnos foram de -42,6  $W m^{-2}$  no período seco e de -38,0  $W m^{-2}$  no período úmido, às 18 e 19h, respectivamente (Figura 6). Ao comparar a cidade com o site rural vizinho, fluxos de calor no interior de solo ( $G$ ) foram consideravelmente inferiores na cidade de Cuiabá (37,6  $W m^{-2}$  e 41,4  $W m^{-2}$  nas estações úmida e seca, respectivamente) (BIUDES et al., 2009) devido ao fato de não apresentar áreas tridimensionais (cânions urbanos) ou ainda superfícies impermeáveis. Por sua vez, o solo apresenta menor capacidade e admitância térmica do que os materiais artificiais tradicionalmente utilizados nas cidades, reduzindo o armazenamento de energia no dossel rural e esfriando mais rapidamente à noite do que áreas urbanas (OKE et al., 1991).

Em São Paulo, as intensidades no período diurno alcançaram 273 e 226  $W m^{-2}$  ambos às 12h, e no período noturno, -67 e -98  $W m^{-2}$  na estação úmida e seca, as 18 e 19h, respectivamente. O fluxo armazenado no dossel urbano no trabalho de Maitelli (2010) foi estimado pelo Método de Parametrização de Radiação Líquida e apresentou durante o dia valores de 100  $W m^{-2}$  e noturno de -50  $W m^{-2}$ . Em Miami, os fluxos médios diários foram estimados indiretamente pelo Método do Resíduo e considerados elevados, alcançando valores de 200  $W m^{-2}$  ao meio dia e os noturnos na ordem -50  $W m^{-2}$ . Assim, conclui-se que fluxos de calor armazenados dentro do dossel urbana da cidade de Cuiabá foram menores do que nas cidades citadas anteriormente, mas maior do que no sítio rural localizado em sua vizinhança. Pode-se então inferir que o processo de urbanização modificou o clima pré-existente, alterando o balanço de energia na região da pesquisa. Destaca-se que os fluxos de calor estimados por Maitelli (2010) foram 49% inferiores aos observados nesta pesquisa, provavelmente devido à simplificação proporcionada pelo Método de Parametrização de Radiação Líquida, as diferenças na morfologia urbana (fator de visão do céu da superfície e relação  $H/W$  do cânion urbano), as características termo físicas entre os locais de estudo e também devido ao processo de urbanização sofrido pela cidade de Cuiabá desde a década de 90.

A variação diurna entre  $\Delta QS$  e  $Q^*$  demonstrou que praticamente não existe o efeito de histerese (Figura 6) e que os valores de picos diários ocorreram quase que no mesmo instante

os valores máximos de intensidade  $Q^*$ . Este comportamento diverge do observado na cidade de Miami (clima temperado) e na cidade de São Paulo (clima subtropical), onde se verificou acentuada histerese e que os valores de pico foram alcançados 1h antes de a intensidade máxima de  $Q^*$ . Assim, no dossel urbano de Cuiabá, o processo de condução de calor sensível foi mais lento do que os observados em cidades em altitudes elevadas. O comportamento observado por Ferreira (2010) na cidade São Paulo pode ser resultado da aplicação dos coeficientes empíricos ( $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ ) determinados para cidades de clima temperado para a estimativa do calor armazenado dentro do dossel urbano ( $\Delta Q_s$ ). É importante mencionar que a histerese está associada às características termofísicas dos materiais presentes no ambiente, tais como capacidade, difusividade e efusividade térmica, bem como a quantidade de umidade no solo e nos materiais artificiais (OKE et al., 1991).

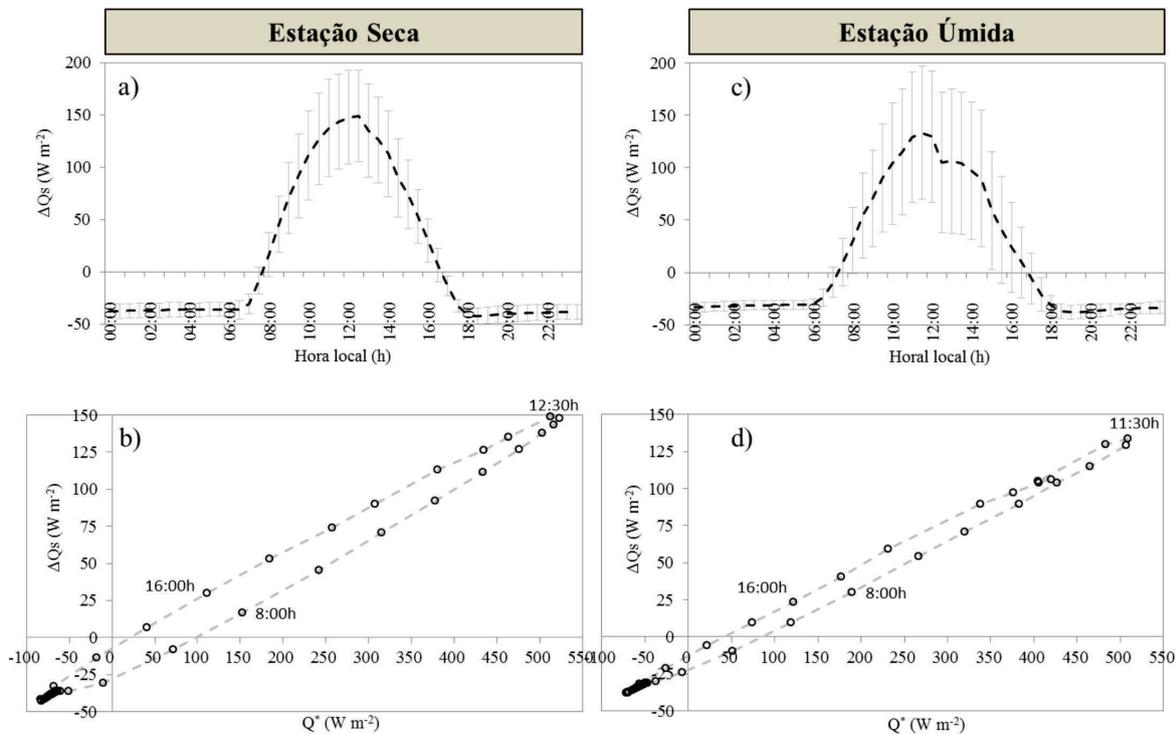


Figura 6 - Variação sazonal média diária do fluxo de calor no dossel urbano ( $\Delta Q_s$ ) e diagrama de dispersão  $\Delta Q_s$  e  $Q^*$  na estação seca e úmida.

O valor médio anual de  $\Delta Q_s$  período diurno (noturno) correspondeu a aproximadamente a 24% (63%) da energia disponível no meio ( $Q^* + Q_f$ ), enquanto na estação seca e chuvosa, as relações observadas foram de 26% (60%) e 24% (66%), respectivamente (Tabela 3). O valor diário médio mensal do fluxo de calor armazenado em São Paulo no ano de 2004 correspondeu a 24% da radiação líquida e em Miami a 30%. Maitelli (2010), em estudo na região de Cuiabá entre agosto e setembro de 1993, estimou o calor estocado dentro do dossel urbano utilizando como referência o saldo de energia disponível no meio, encontrando taxas de calor estocado na ordem 22% da radiação líquida, valores próximos em percentagem aos observados nesta pesquisa, mas inferiores em intensidade.

### FLUXO DE CALOR SENSÍVEL (QH) E LATENTE (QE)

As variações diárias dos valores horários médios mensais para os fluxos de calor latente e sensível podem ser visualizadas na Figura 7 e 8 para o período seco e úmido, respectivamente. Ao se analisar o comportamento, observa-se que os fluxos máximos diurnos (noturnos) de  $Q_E$  e  $Q_H$  em média ocorreram às 12h (18h e 19h) com intensidade de  $140,0 \text{ W m}^{-2}$  ( $-29,2 \text{ W m}^{-2}$ ) e  $243,4 \text{ W m}^{-2}$  ( $-8,9 \text{ W m}^{-2}$ ) no período da seca e às 10h30min (19h) e 11h30min (2h) no período úmido com intensidades de  $142,1 \text{ W m}^{-2}$  ( $-31,1 \text{ W m}^{-2}$ ) e  $242,6 \text{ W m}^{-2}$  ( $1,8 \text{ W m}^{-2}$ ), respectivamente. Ao se confrontar estes valores com os médios máximos diurnos da radiação líquida ( $Q^*$ ), nota-se que as variações de  $Q_E$  e  $Q_H$  se encontram em fase com  $Q^*$  no período seco. Por outro lado, no período

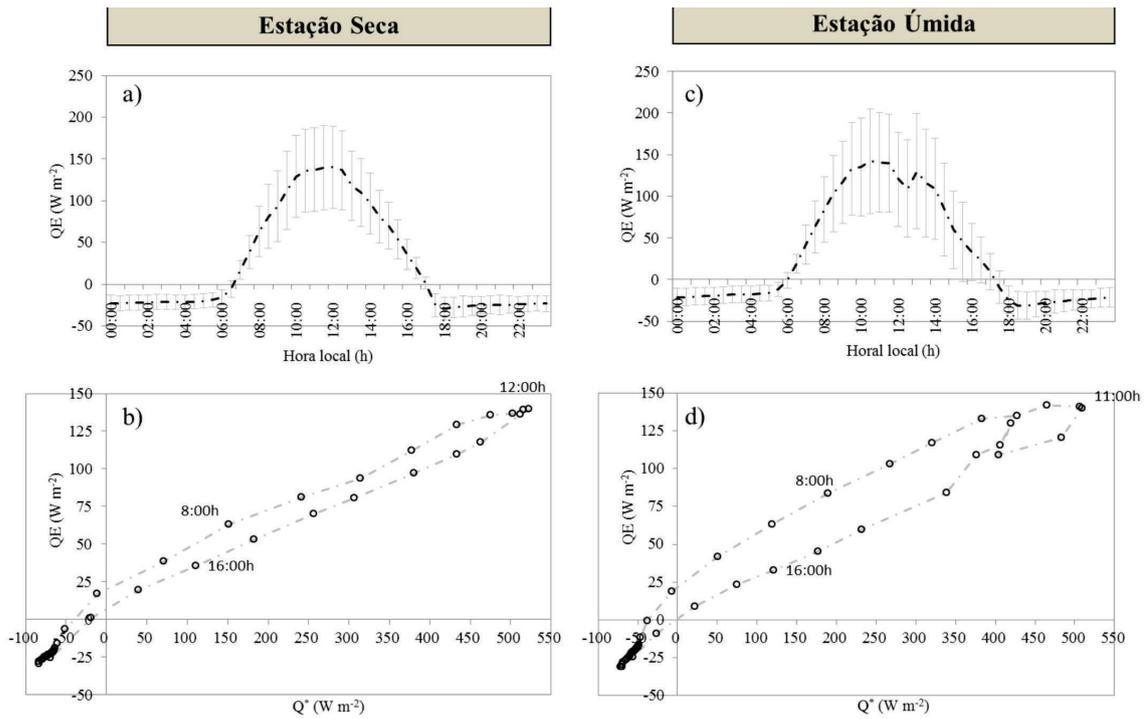


Figura 7 – Variação sazonal média diária do fluxo de calor latente (QE) e diagrama de dispersão QE e  $Q^*$  na estação seca e úmida.

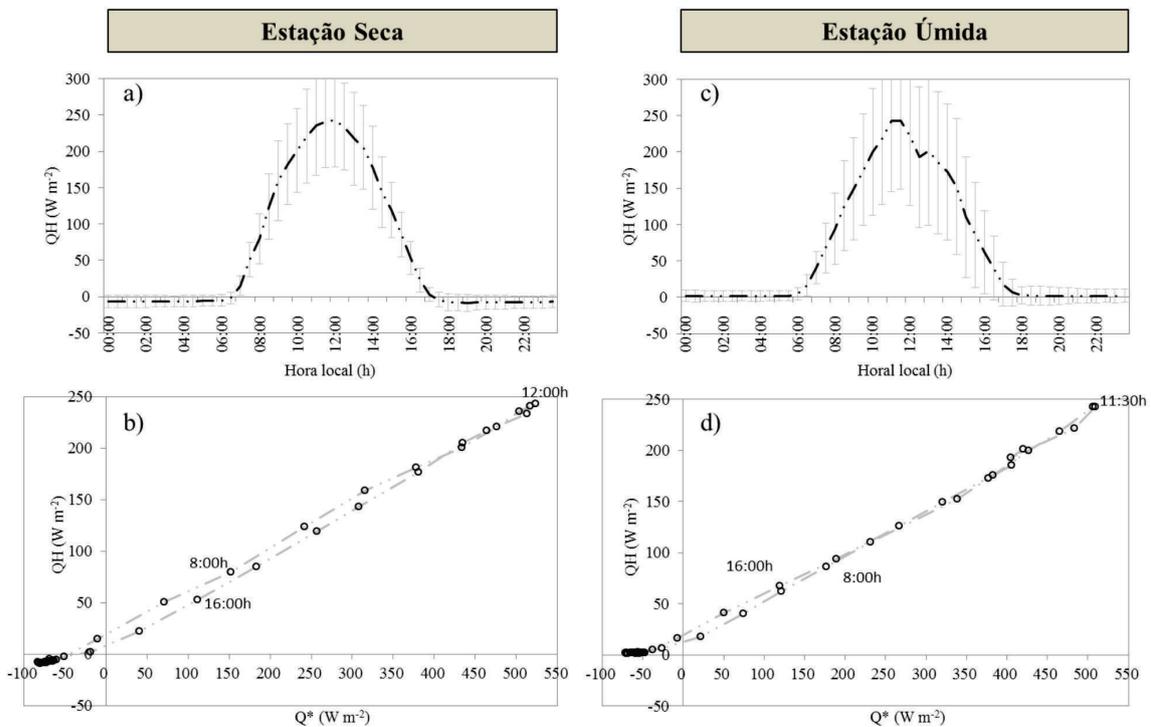


Figura 8 – Variação sazonal média diária do fluxo de calor sensível (QH) e diagrama de dispersão QH e  $Q^*$  na estação seca e chuvosa.

úmido, QE se encontra adiantado (avanço de fase) em 1 hora em relação a  $Q^*$ , e QH se encontra em fase.

Ferreira (2010) encontrou valor máximo no período diurno (noturno) de QE e QH igual a 65 ( $1 W m^{-2}$ ) e 197  $W m^{-2}$  ( $-56 W m^{-2}$ ) às 14h (6 e 20h) em agosto, e 67 ( $1 W m^{-2}$ ) e 209  $W m^{-2}$  ( $-19$



Wm-2) também às 14h (01 e 23h) em fevereiro, período representativo das estações seca e úmida, respectivamente. QE e QH apresentaram efeito de histerese, com atraso de 2h em relação ao pico de Q\*, divergindo do comportamento observado no dossel urbano de Cuiabá, que estão em fase. Apesar das diferenças entre Cuiabá e São Paulo, observou-se que os fluxos de calor sensível foram maiores do que os fluxos de calor latente em ambas as cidades. Os efeitos da histerese nos fluxos turbulentos de calor sensível e latente observados na cidade de São Paulo quanto na cidade de Cuiabá estão associados à velocidade de resposta da superfície à entrada de energia, que varia em função da latitude, características do solo, nebulosidade e umidade da superfície (FERREIRA, 2010).

Em área rural localizada nas proximidades de Cuiabá, Biudes et al. (2009) verificaram que as intensidades de QE e QH alcançaram 259,7 Wm-2 e 159,3 Wm-2 na estação seca e 319,7 m-2 e 234,4 Wm-2 na estação úmida. O comportamento se justifica por se tratar de área de “Cerrado” desmatado com presença de pastagem, onde é esperada a elevação dos fluxos de calor latente. Em Maitelli (2010) verificou-se que os valores médios máximos horários de QE e QH estão equilibrados e na ordem de 200 Wm-2, o que era esperado, uma vez que se observou intensa urbanização nos bairros centrais da cidade de Cuiabá, de ~14.3 para ~34.4 % entre os anos de 1986 e 2007 (CALLEJAS et al., 2011). Em Miami, QE e QH alcançaram valores máximos diurnos de aproximadamente 160 Wm-2 e 250 Wm-2 às 13h, período úmido na região. O comportamento observado em Miami se assemelha ao verificado em Cuiabá, com intensidade média diária máxima muito próxima ao da região de estudo.

Para demonstrar a influência da urbanização nos fluxos de calor sensível e latente, quantificou-se a frações de áreas planas vegetadas (fv) e fração de área plana impermeáveis (fI) no sítio de Cuiabá (Tabela 3). Apresenta-se também os valores de fv e fI informados por Maitelli (2010), por Biudes et al. (2009), Ferreira (2010) e Newton et al. (2007) e as razões de QE/Q\*, QH/QE e QH/(Q\*-ΔQS) para Q\* > 0, com o objetivo de compará-los com os frações obtidas em locais de clima temperado localizados em cidades da América do Norte (GRIMMOND and OKE de 2002) e europeias (OFFERLE et al., 2006) (Figura 9).

Tabela 3 – Fração de área plana vegetada, impermeabilizada e relações entre QE/Q\*, QH/QE e QH/(Q\*-ΔQS) para os Sítios 1, Maitelli (2010) (década de 90), Ferreira (2010), Biudes et al. (2009) (sítio rural) e Miami (NEWTON et al., 2007) para Q\*> 0.

Local	Fração de área Vegetada plana (fv)	Fração de área impermeabilizada plana (fI)	QE/Q*	QH/(Q*-ΔQs)	QH/QE
Sítio 1	0,15	0,74	0,30	0,64	1,61
Cuiabá (MAITELLI, 2010)	0,20	0,80	0,38	0,40	1,02
Biudes (2008)	0,95	0,05	0,57	0,30	0,62
São Paulo (FERREIRA, 2010)	0,05	0,75	0,15	0,93	3,27
Miami-Florida (EUA) (NEWTON et al., 2007)	0,23	0,53	0,27	0,61	1,55

Ao se observar a Figura 9, nota-se que a relação QE/Q\* para o sítio 1 pesquisado ficou compreendida acima da curva teórica estabelecida por Grimmond e Oke (2002) (Figura ; a), indicando que as taxas de fluxo de calor latente foram superiores às verificadas nos sítios com clima temperado. É possível também observar que as frações de QH/(Q\*-ΔQs) relaciona-se com as fração de área impermeável (fI) e seguiram a curva teórica estabelecida para os sítios do hemisfério norte (Figura ; b). Por outro lado, as frações QH/QE ficaram abaixo da curva teórica (Figura ; c), o que indica que os fluxos de calor sensível (QH) dentro do dossel urbano de Cuiabá foram menores. As relações de QE/Q\* e QH/QE para Cuiabá na década de 90 (MAITELLI, 2010) foram plotadas na Figura 10 e observou-se relações similares com as do Sítio 1, o que pode ser justificado como hipótese a imprecisão na quantificação da área vegetada e impermeável na vizinhança do local da pesquisa devido a indisponibilidade à época de imagens de satélite de alta resolução. Como a instalação do

nível de sensores não foi informada na pesquisa, vislumbra-se também a possibilidade de que os sensores de temperatura e umidade do ar tenham sido influenciados por centenas de metros por regiões de diferentes frações de áreas vegetadas e impermeabilizadas das informadas pela autora. Outra possibilidade é que as taxas de superfícies impermeabilizadas também sejam menores do que as indicadas na pesquisa, visto que para a década de 90 é esperado menores taxas de urbanização urbana na área central de Cuiabá, conforme constatado por Callejas et al. (2011a), o que justificaria maiores taxas de fluxo de calor latente.

Na cidade de São Paulo, constata-se que as taxas de  $QE/Q^*$  observadas foram muito inferiores à observada no sítio pesquisado, enquanto a relação  $QH/QE$  ficou compreendida acima da curva teórica estabelecida para cidades de clima temperado, o que indica que os fluxos de calor sensível foram superiores aos observados nas cidades de latitudes elevadas. No sítio rural (BIUDES et al., 2009), as relações se apresentaram como esperado, com elevadas taxas de fluxo de calor latente e menor intensidade de fluxo de calor sensível, com relação  $QH/QE$  menor que 1 (Figure ; c). Na cidade de Miami no estado da Flórida, observou-se relações muito semelhantes às observadas no Sítio 1, mas inferior em virtude da menor taxa de impermeabilização do entorno do sítio pesquisado.

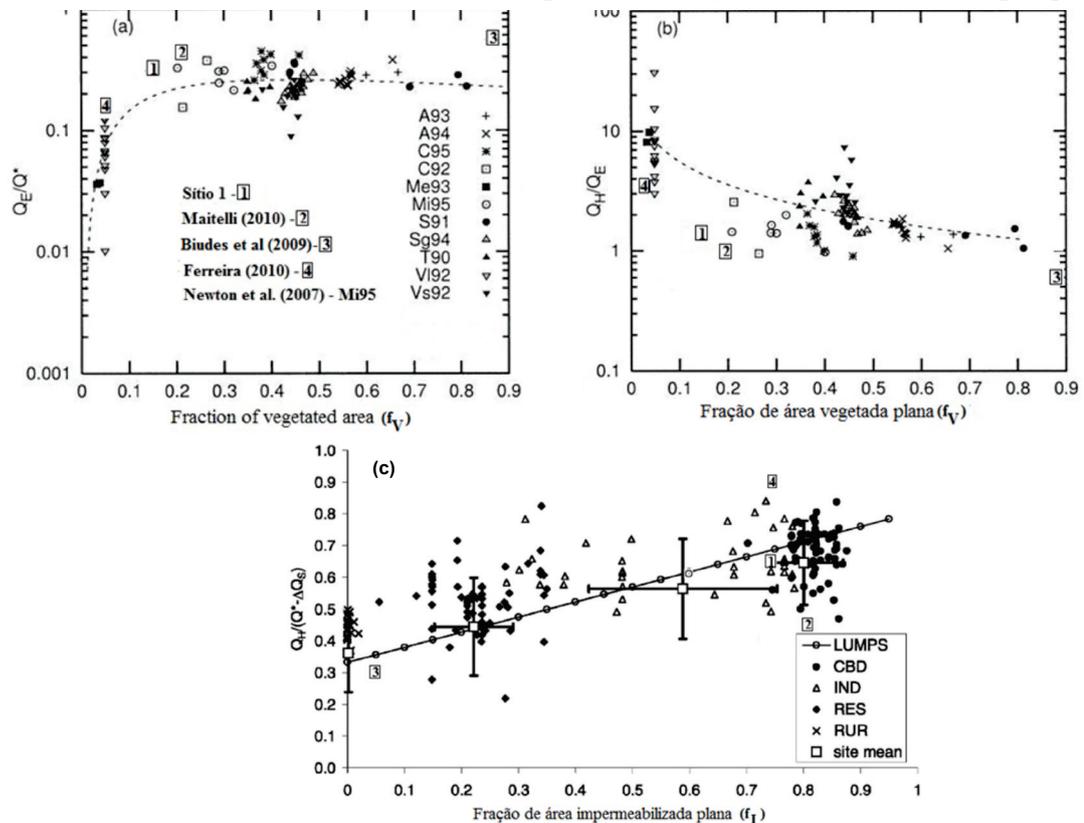


Figura 9 – Relações entre (a)  $QE/Q^*$  com a fração de área vegetada plana ( $f_v$ ), (b)  $QH/(Q^*-\Delta Q_s)$  com a fração de área plana impermeabilizada ( $f_i$ ) e (c)  $QH/QE$  com a fração de área vegetada plana ( $f_v$ ) entre os Sítios 1, Cuiabá (MAITELLI, 2010), Biudes (2008), Miami (NEWTON et al., 2007) e cidades de clima temperado. Dados representativos das 10 às 14h. Fonte: (a) e (b) adaptado de Grimmond e Oke (2002) e (c) de Offerle et al. (2006)

Observou-se uma grande dispersão no diagrama entre  $QE/Q^*$  e  $QH/(Q^*-\Delta Q_s)$ , bem como na  $QH/QE$  para regiões de climas temperados. Assim, é necessário realizar mais experimentos em climas tropicais urbanos, especialmente com diferentes frações de impermeável ( $f_i$ ) e áreas vegetadas ( $f_v$ ) para verificar uma tendência observada neste trabalho, isto é, fluxos latentes superiores e fluxos sensíveis menores do que os observados em climas temperados.

**RAZÃO DE BOWEN ( $\beta = QH/QE$ )**

Ao analisar as curvas de variação média diária da razão de Bowen durante as estações seca e chuvosa (Figura 10), observa-se que os valores máximos de  $\beta$  diurno e noturno em média ocorre-



ram às 13h30min e 4h30min, com intensidade 1,87 e 0,33, no período seco, respectivamente. Os valores médios diurnos ( $Q^* > 0$ ) e noturnos ( $Q^* < 0$ ) foram de 1,66 e 0,30. Isso indica que durante o período seco, os fluxos de calor sensível preponderaram sobre os fluxos de calor latente, fator este ocasionado pela restrição hídrica imposta ao meio e pelas elevadas taxas de impermeabilização dentro do dossel urbano (~74%). No período chuvoso, nota-se que os valores máximos de  $\beta$  diurnos foram superiores enquanto os máximos noturnos foram inferiores aos observadas no período seco e ocorreram às 17h e 17h30min com valores de 1,98 e -0,70, respectivamente. Devido à maior disponibilidade de água neste período, os valores médios diurnos ( $Q^* > 0$ ) e noturnos ( $Q^* < 0$ ) foram inferiores as observadas no período seco (1,54 e -0,08), o que indica que houve maior destinação de energia para a evaporação da água neste período, como esperado. Devido às pequenas intensidades entre os fluxos no período noturno, a razões de Bowen foram irregulares e menores do que -1, valor normalmente encontrado nas cidades temperadas (GRIMMOND e OKE, 2002; LORIDAN e GRIMMOND et al., 2012).

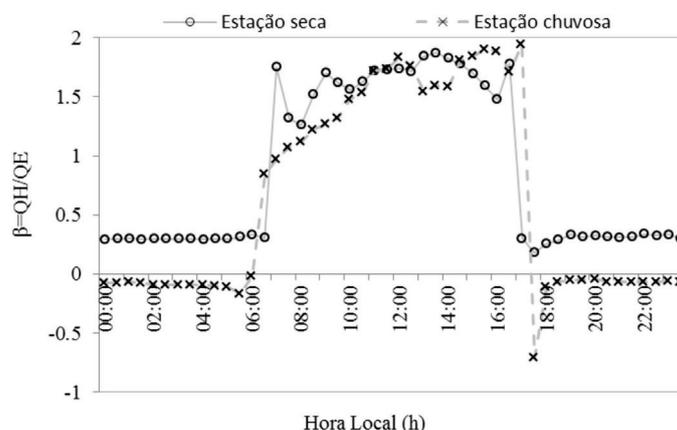


Figura 10 – Variação sazonal média horária da Razão de Bowen na estação seca e úmida.

Ao se analisar a variação sazonal da razão de Bowen no Sítio 1, nota-se que o valor mínimo médio mensal ocorreu no mês de fevereiro (1,28) e o valor máximo em setembro (2,82). A média anual de  $\beta$  correspondeu a aproximadamente a 1,61, enquanto no período seco e úmido, os valores médios observados foram 1,67 e 1,55, respectivamente. Estes resultados indicam que tanto no período seco quanto no úmido houve predomínio dos fluxos verticais de calor sensível sobre os fluxos verticais de calor latente. Os resultados são consistentes com aqueles encontrados em cidades de clima temperado visto que supressão de vegetação e a impermeabilização dos solos por superfícies impermeáveis, como ruas, calçadas, parques de estacionamento e edifícios reduz a evapotranspiração dentro das áreas urbanas, o que corrobora para a predominância de fluxos de calor sensível sobre o latente, mesmo na estação chuvosa.

Em São Paulo, a razão de Bowen média mensal apresentou valor mínimo de 2,92 em setembro e máximo de 4,29 em junho e média anual foi de 3,54. Estes valores são muito superiores aos valores sazonais e médios anuais observados nos sítios urbanos de Cuiabá. No sítio rural, Biudes et al. (2009) verificou que a razão de Bowen média no período seco e úmido foram 0,54 e 0,70, respectivamente, com média anual de 0,62. Para Miami, a intensidade média diária da razão de Bowen foi de 1,47 no período de maio a julho (NEWTON et al., 2007), valor semelhante ao observado ao sítio central de Cuiabá, por causa da similaridade em termos de características morfológicas do sítio, com 29% da área de cobertura, 21% de cânions urbanos e 1,33 de relação entre áreas planas e tridimensionais (Tabela 1). Para Cuiabá na década de 90, a razão média de Bowen durante o dia foi de 1,02 e durante a noite, inferior a -0,5 (MAITELLI, 2010). Os valores diurnos obtidos neste trabalho estão dentro do intervalo observado para sítios em regiões suburbanas ( $\beta = 1,2$  a  $2$ ). Os obtidos por Biudes et al. (2009) estão ao lado da faixa para sítios rurais ( $\beta < 0,5$ ), enquanto que aqueles observados por Ferreira (2010), para regiões centrais de cidades desenvolvidas ( $\beta > 4$ ) (LORIDAN e GRIMMOND et al., 2012).

O comportamento da razão de Bowen dentro do dossel urbano em Cuiabá indicou que durante o dia, os fluxos deixaram o dossel urbano (positivo). Durante a noite, na estação seca, os fluxos de calor sensível e latente foram dirigidos para dentro do dossel urbano (negativo), da região superior para a inferior da atmosfera urbana. Por outro lado, durante a estação chuvosa, os fluxos de calor sensível se mantiveram positivos (para cima) e os latentes se mantiveram negativos (para baixo) dentro do dossel urbano. Os picos observados no nascer e no pôr do sol (Figura 11) ocorrem em virtude da mudança de sinal dos fluxos energéticos, com diferenças de pressão de vapor ou gradientes de temperatura muito pequenos entre os níveis de observação (próximo ao limite de precisão do sensor) e com baixa intensidade de saldo de energia, gerando inconsistência numérica no método da razão de Bowen (PEREZ et al., 1999; HU et al., 2013).

Em São Paulo, durante o período diurno, a razão de Bowen permaneceu relativamente constante e igual a 4, contrapondo-se ao que foi observado no Sítio 1, em que se observa grande variação ao longo do dia, tanto no período seco quanto no úmido. À noite, Ferreira (2010) destaca que a razão variou em torno de -4,8 em fevereiro (período úmido) a -6,5 em agosto (período seco). Em Miami, durante o dia, a razão de Bowen média foi de 1,55. À noite, a razão permaneceu positiva até 21h (local), horário a partir do qual se torna negativa em virtude da inversão de sentido do fluxo de calor sensível. No trabalho realizado por Maitelli (2010), a autora descreve que a razão de Bowen durante o período de observação em média foi superior a 1,0 durante o período diurno, e a noite, alcançou valor de até -3,2. O comportamento observado para razão de Bowen no sítio pesquisado indica que durante o período diurno, os fluxos se mantiveram positivos, deixando o dossel urbano. Durante o período noturno, os fluxos de calor sensível e latente permaneceram negativos durante a estação seca, ou seja, da atmosfera superior para a inferior do dossel urbano. Por outro lado, durante a estação chuvosa, observou-se que durante o período noturno os fluxos de calor sensível se mantiveram positivos e o latente negativos. Os saltos observados na Figura 11 no início da manhã e no final da tarde ocorrem em virtude da mudança de sinal dos fluxos energéticos, com diferenças de pressão de vapor muito pequenas entre os níveis de observação (próximo ao limite de precisão do sensor) e com baixa intensidade de saldo de energia ( $Q^*+QF$ ) –  $\Delta Q_s$ , gerando inconsistência numérica no método da razão de Bowen (PEREZ et al., 1999; HU et al., 2013).

A permanência dos fluxos de calor sensível e latente positivos dentro do dossel urbano se dá em virtude da liberação do calor armazenado ( $\Delta Q_s$ ) durante os períodos em que não há entrada de radiação no sistema urbano ( $Q^*<0$ ). Este comportamento resulta em aparecimento de convecção térmica durante o período noturno em virtude das regiões mais próximas as superfícies (devido ao resfriamento radioativo dos materiais que formam o dossel urbano) estarem mais aquecidas e mais úmidas que as regiões superiores do dossel urbano, o que induz turbulência, gerando uma camada de mistura durante o período noturno. Os resultados encontrados nas camadas mais baixas diferem dos observados no meio rural, onde  $Q_H$  é direcionado da atmosfera para a superfície devido à inversão térmica observada nestes ambientes durante o período noturno (BIUDES et al., 2009). É importante mencionar que os fluxos ascendentes e as modificações nas trocas turbulentas observadas na cidade explicam a formação do fenômeno de Ilha de Calor Urbana verificada entre o meio urbano e o rural.

### BALANÇO DE ENERGIA

Pela análise da Tabela 4 e a Figura 11, é possível verificar que as parcelas dos fluxos de calor antropogênicos são as que menos contribuem no balanço de energia durante o período diurno (em média 3,1% tanto na estação seca quanto na chuvosa). No entanto, durante o período noturno, devido a supressão da radiação solar, sua contribuição se eleva para 30,6%. No geral, a radiação líquida e o calor antropogênico dissipado dentro do dossel urbano representaram anualmente aproximadamente 97% e 3% do total de energia disponível no meio dentro do dossel urbano. Desta forma, este componente apresenta baixa contribuição no balanço de energia na cidade de Cuiabá com clima tropical, enquanto que em cidades de clima temperado, devido ao elevado consumo de eletricidade



e de combustíveis fósseis durante o inverno, a sua contribuição pode se elevar consideravelmente no balanço de energia, principalmente durante o período noturno.

Tabela 4 – Valores médios diários em W m<sup>-2</sup> para os componentes do balanço de energia e frações entre os fluxos no período diurno e noturno (estação seca e úmida).

Período	Estação Seca		Estação Chuvosa	
	Diurno (Q* > 0)	Noturno (Q* < 0)	Diurno (Q* > 0)	Noturno (Q* < 0)
Q*	332	-66	300	-54
Q <sub>F</sub>	10	4	10	4
ΔQ <sub>s</sub>	87	-37	71	-33
Q <sub>E</sub>	94	-20	92	-19
Q <sub>H</sub>	158	-6	143	3
Frações				
Q <sub>H</sub> /Q <sub>E</sub>	1,67	0,28	1,55	-0,13
ΔQ <sub>s</sub> /(Q*+Q <sub>F</sub> )	0,26	0,60	0,23	0,66
Q <sub>E</sub> /(Q*+Q <sub>F</sub> )	0,28	0,33	0,31	0,39
Q <sub>H</sub> /(Q*+Q <sub>F</sub> )	0,46	0,09	0,46	-0,05
Q <sub>H</sub> /ΔQ <sub>s</sub>	1,80	0,15	2,02	-0,08
(ΔQ <sub>s</sub> + Q <sub>H</sub> )/Q <sub>E</sub>	2,60	2,09	2,31	1,56

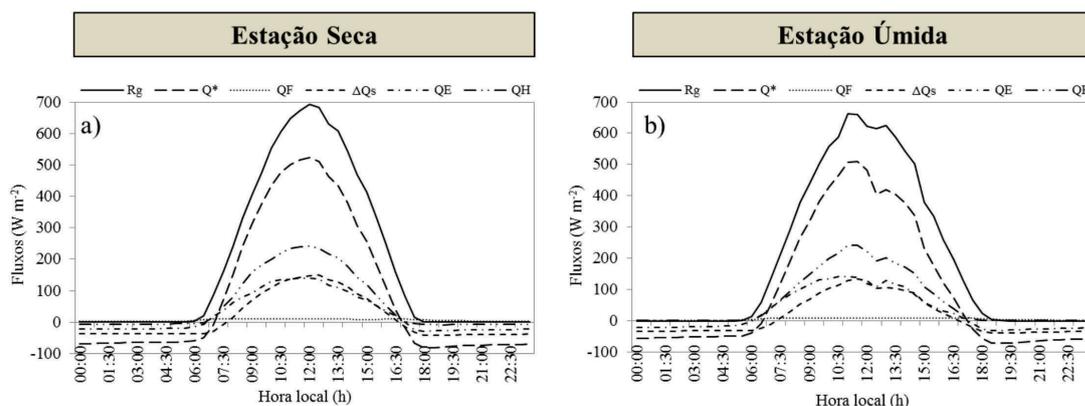


Figura 11 – Curso diário dos valores médios mensais dos componentes do balanço de energia na estação seca e úmida.

O calor armazenado dentro do dossel urbano (ΔQ<sub>s</sub>) é responsável por fração de energia no balanço de energia. As frações médias diurnas de ΔQ<sub>s</sub>/(Q\*+Q<sub>F</sub>) no balanço de energia correspondem a 26% e a 24% da energia disponível no meio na estação seca e chuvosa, respectivamente. Nota-se que após amanhecer há uma intensa contribuição em termos de condução e convecção térmica e uma grande quantidade de energia é armazenada dentro do dossel urbana e transportada para a camada limite urbana (CLU) na forma de calor sensível, aquecimento o ar e aumentando a turbulência dentro do dossel urbano no período do dia. Por outro lado, durante a tarde, observa-se redução nos fluxos de condução e no de convecção. Não se observou entre ΔQ<sub>s</sub> e Q\* efeito de histerese. Desta forma, o calor armazenado dentro do dossel urbano está em fase com Q\*+Q<sub>F</sub>. Durante o período noturno, a fração média ΔQ<sub>s</sub>/(Q\*+Q<sub>F</sub>) foi de 60% a 66% na estação seca e chuvosa, respectivamente. Com base nestes resultados, pode-se afirmar que a perda de radiação durante o período noturno foi suprida quase que inteiramente pela remoção de calor do armazenamento dentro do dossel urbano. A remoção de calor sensível armazenado foi direcionada para promover a evaporação (Q<sub>E</sub>) e para gerar convecção (Q<sub>H</sub>) dentro dos cânions urbanos, induzindo turbulência e gerando uma camada de mistura durante o período noturno. Estes resultados são consistentes com os observados na cidade de Miami e outros sítios do hemisfério norte (NEWTON et al., 2007; LORIDAN e GRIMMOND et al., 2012).

Os fluxos turbulentos de calor latente foram sistematicamente inferiores aos fluxos de calor sensível. As frações médias diurnas de  $Q_E / (Q^* + Q_F)$  no balanço de energia corresponderam a 28% e a 31% da energia disponível no meio na estação seca e chuvosa, respectivamente. Nota-se que durante o período da manhã, as taxas dos fluxos de calor latente são maiores do que a observada no período vespertino em virtude da diminuição da umidade da superfície à medida que evaporação se processa no período da manhã. Devido a este comportamento, na estação seca que  $Q_E$  e  $Q^*$  estão em fase (praticamente não há efeito de histerese) e na estação úmida,  $Q_E$  chegou a apresentar adiantamento de fase de 1h em relação a  $Q^*$ . Durante a noite, a fração média  $Q_E / (Q^* + Q_F)$  no entorno do Sítio 1 chegou a representar na estação seca 33% da energia disponível no meio, enquanto da úmida 39%. Os fluxos de calor latente sempre se mantiveram positivos dentro do cânion urbano nos períodos diurnos e negativos, embora de pequena intensidade, nos períodos noturnos. O curso diário temporal e frações diurnas de  $Q_E / (Q^* + Q_F)$  foram razoavelmente semelhantes aos observados em Miami e outras cidades do hemisfério norte (NEWTON et al., 2007; LORIDAN e GRIMMOND et al., 2012.).

Os fluxos turbulentos de calor sensível apresentaram as maiores contribuições dentro do balanço de energia. As frações médias diurnas de  $Q_H / (Q^* + Q_F)$  no balanço de energia corresponderam a 46% da energia disponível no meio na estação seca e chuvosa, respectivamente. Durante o período matutino, as taxas de fluxos de calor sensível foram maiores do que as observadas no período vespertino.  $Q_H$  e  $Q^*$  se encontravam em fase, não sendo observado efeito de histerese na estação seca e chuvosa. Durante a noite, a fração média  $Q_H / (Q^* + Q_F)$  alcançou 9% e a 5% da energia disponível no meio, na estação seca e úmida, respectivamente. Os fluxos de calor sensível permaneceram positivos dentro dos cânions urbanos durante o dia, sendo este comportamento relacionado à variação diurna nas condições da atmosfera, visto que a instabilidade é aumentada depois do amanhecer, favorecendo os fluxos convectivos aos condutivos. Durante a noite, na estação seca, os fluxos se tornam negativos após o por do sol (a energia é transportada para longe do dossel urbano) e permanecem negativos até o amanhecer. Como mencionado, a atmosfera urbana noturna perto da superfície permanece instável, sendo este efeito ocasionado principalmente pela grande quantidade de calor armazenado dentro do dossel urbano. Por outro lado, na estação chuvosa, foram observadas pequenas quantidades de fluxos positivos. O fluxo ascendente calor sensível ( $\Delta Q_S$  e  $Q_H$ ) e à instabilidade atmosfera no interior do dossel urbano durante a estação seca foram responsáveis pela formação da Ilha de Calor Urbana (ICU) noturna na região (CALLEJAS et al., 2011b). A forma temporal global de  $Q_H / (Q^* + Q_F)$  e frações diurnas foram razoavelmente semelhantes aos observados em Miami, em outras cidades norte-americanas e europeias e dentro do intervalo dos valores observados em áreas urbanas (NEWTON et al., 2007; CHRISTEN e VOGT, 2004).

A fração  $Q_H / \Delta Q_S$  representa a relação entre o fluxo de calor sensível por convecção térmica e por condução térmica (calor armazenado dentro do dossel urbano). Durante o dia,  $Q_H$  e  $\Delta Q_S$  são gerados principalmente a partir de  $Q^*$  e no período noturno, o fluxo de calor sensível por convecção térmica ( $Q_H$ ) e latente ( $Q_E$ ), devido a supressão da radiação solar, são alimentados pela dissipação do fluxo de calor sensível armazenado dentro do dossel urbano ( $\Delta Q_S$ ). Durante a estação seca e úmida, nos períodos diurnos, os fluxos turbulentos de calor sensível foram superiores aos fluxos condutivos de calor sensível armazenado dentro do dossel urbano (1,8 e 2,02, respectivamente). Durante o período noturno,  $\Delta Q_S$  é o agente responsável por fornecer energia para aquecer o ar dentro do dossel urbano e promover a evaporação nesses ambientes, sendo que as frações nesse período foram de 0,15 e -0,08 durante a estação seca e chuvosa, respectivamente. A análise de fração  $(\Delta Q_S + Q_H) / Q_E$  indica que os fluxos calor sensível por condução e convecção são maiores que os fluxos de calor latente (pelo menos 1,5 vezes superior) tanto no período diurno quanto no noturno, na estação seca e chuvosa.

Pela análise das frações apresentadas, é possível inferir que durante o dia, a maior parte da radiação disponível no meio urbano é usada para aquecer o dossel e ser armazenado dentro das superfícies urbanas. Por sua vez, durante a noite, a liberação de calor armazenado no interior das



superfícies urbanas compensa as perdas de radiação líquida, aquece o ar urbano, e mantém a turbulência e a evaporação ao longo da noite. Este comportamento também foi observado nas suburbanas dos sítios pesquisados nas cidades do hemisfério norte e europeias (GRIMMOND e OKE, 2002; CHRISTEN e VOGT, 2004), bem como na cidade de São Paulo (FERREIRA, 2010). Destaca-se que as frações avaliadas para o balanço de energia do Sítio 1 se assemelham às frações observadas para a cidade de Miami, Florida, USA (Clima Aw) (NEWTON et al., 2007).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar os fluxos energéticos em área densamente urbanizada na cidade de Cuiabá-MT (Brasil) localizada em região de clima tropical quente-seco e quente-úmido (AW na classificação de Köppen) durante a estação seca e chuvosa. Nossa intenção foi comparar os resultados com os obtidos em cidades localizadas no hemisfério norte, em climas tropicais e temperados. As expectativas eram encontrar grandes diferenças entre os balanços de energia entre as cidades localizadas no hemisfério sul e no norte. Ao invés disso, foram observadas mais semelhanças do que diferenças. Notou-se que interação entre as superfícies (edifícios, pavimentos, paredes entre outros), solo e atmosfera forneceram uma partição no balanço energético semelhante aos sítios localizados em latitudes baixa e alta do hemisfério norte.

A cidade de Cuiabá está localizada abaixo do equador e acima do trópico de Capricórnio, com elevada precipitação anual, com grande de calor e umidade e também rodeada por área alagadas. Por estas razões, esperava-se altas taxas de fluxos de calor latente na região, mas esta hipótese não foi confirmada. Ao invés, as elevadas frações de áreas impermeáveis (74%), aliadas as baixas frações de área vegetada (15%) afetaram o particionamento do balanço de energia dentro do dossel urbano da cidade de Cuiabá, reduzindo consideravelmente a dissipação de energia na forma de fluxos de calor latente (QE) se comparado ao sítio vizinho rural (redução de 46 e 24% na estação seca e chuvosa). Observou-se, assim como em Miami e outros sítios americanos e europeus pesquisados, que a intensidade do fluxo de calor latente é altamente dependente da cobertura vegetal existente nas proximidades do sítio. Por outro lado, o calor armazenado dentro do dossel urbano foi elevado em pelo menos três vezes se comparado com valor observado no sítio rural adjacente a cidade de Cuiabá. A maior quantidade de superfícies em virtude da presença das edificações (superfícies tridimensionais), bem com devido às propriedades físicas e térmicas do tecido urbano, corroboraram para que maiores quantidades de energia fossem armazenadas dentro do dossel urbano, especialmente nos materiais artificiais. O restante da energia disponível no meio foi dissipado na forma de fluxos de calor sensível (QH), sendo que estes também foram superiores em relação à área rural adjacente (elevação de 53 e 5% na estação seca e chuvosa). Desta forma, uma grande quantidade de energia disponível no meio (~70% em média) foi utilizada para aquecer o ar por convecção (QH), sendo o restante armazenado no interior do dossel urbano ( $\Delta Q_s$ ). Durante a noite, a liberação de  $\Delta Q_s$  e fluxos ascendentes de QH dentro do dossel urbano foram responsáveis pela formação da Ilha de Calor Urbana noturna observada na região. Dentre os termos do balanço de energia, o fluxo de calor antropogênico (QF) dentro do sítio urbano de Cuiabá foi o que apresentou menor contribuição durante o dia (3%), mas a noite, a supressão de radiação solar direta, faz com que sua contribuição se eleve (33%), apesar da pequena intensidade verificada no interior do dossel neste período.

As frações de QH, QE e  $\Delta Q_s$  no balanço energético da cidade de Cuiabá foram semelhantes às observadas na cidade de Miami e outros bairros residenciais das cidades europeias e da América do Norte. A Razão de Bowen ( $\beta = QH/QE$ ) foi igual a 1,67 e 1,55, na estação seca e chuvosa, respectivamente, sendo maiores do que os observados no sítio rural adjacente e próximo da intensidade observada na cidade de Miami (1,47). O resultado encontrado decorre da grande quantidade de superfície impermeabilizadas e baixa quantidade de cobertura vegetal existente no interior do sítio urbano pesquisado. Esses valores estão dentro do intervalo observado para regiões suburbanas ( $\beta = 1,2$  a 2) e consistentes com os resultados encontrados para Zonas Urbanas Climáticas de média densidade urbana (ZUC=3).

Apesar das semelhanças no particionamento do balanço energético, observou-se que a intensidade dos fluxos medidos dentro do dossel urbano de Cuiabá foi menor do que o observado na cidade de Miami, fazendo com que as frações de  $QE/Q^*$  e  $QH/(Q^*-\Delta Qs)$  fossem plotadas, respectivamente, acima e abaixo da curva teórica estabelecida para as cidades de climas temperados. Observou-se também que os ciclos diurnos de calor armazenado no dossel urbano, fluxos de calor sensível e latente diferem daqueles observados em cidades de clima temperado, uma vez que  $\Delta Qs$ ,  $QH$  e  $Q^*$  se encontravam em fase durante o período de seca, sendo observado efeito de histerese apenas entre  $QE/\Delta Qs$  e  $Q^*$ . Assim, no período chuvoso,  $QE$  atingiu valor máximo 1h antes de  $Q^*$ , sendo que  $QH$  manteve-se em fase. Destaca-se que para locais de clima temperado, o efeito de histerese em  $\Delta Qs$  é pronunciado e os picos de intensidade ocorrem geralmente 1 a 2 h antes da intensidade máxima de  $Q^*$ . Por sua vez,  $QH$  não apresenta efeito de histerese, sendo que o pico de intensidade ocorre no mesmo instante que a radiação líquida disponível no meio (geralmente às 12h), enquanto  $QE$  apresenta efeito de histerese, sendo observado atraso de fase, geralmente, 1 a 2h após a intensidade máxima de  $Q^*$ . No dossel urbano de Cuiabá, pode-se associar o comportamento dos fluxos se manterem em fase devido às características termofísicas dos materiais encontrados no ambiente urbano, tais como capacidade, difusividade e efusividade térmicas, bem como devido a quantidade de umidade presente no solo, o que indica que novas pesquisas em cidades de clima tropical no hemisfério sul precisam ser conduzidas com intuito de ratificar os resultados encontrados nesta pesquisa.

As cidades de clima tropicais geralmente apresentam altas temperaturas durante todo o ano, com elevadas horas de desconforto térmico em regiões a céu aberto e grande demanda de graus-horas de resfriamento no interior das edificações. Como foi ratificada a dependência entre fluxos de calor sensível / latentes e as frações de área vegetada ( $fV$ ) e impermeabilizada ( $fI$ ) dentro do dossel urbano, recomenda-se que estes parâmetros urbanísticos sejam reavaliados no plano diretores das cidades com vistas a evitar com que as áreas sejam demasiadamente urbanizadas, o que permitirá maior equilíbrio entre os fluxos de calor sensível e latente dentro das cidades. Seguindo esta estratégia, espera-se reduzir a formação e a intensificação das Ilhas de Calor Urbanas, não agravando as condições ambientais do meio urbano, promovendo assim a melhoria da qualidade de vida das populações.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ANANDAKUMAR, K. A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface, *Atmospheric Environment*, v.33, p. 3911–3918, 1999.
- BIUDES, M. S. *et al.* Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 2, p. 135-143, 2009.
- CALLEJAS, I. J. A., OLIVEIRA, A. S., SANTOS, F. M. M., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A., ZEILHOFER, P. Relationship between land use/cover and surface temperatures in the urban agglomeration of Cuiabá/Várzea Grande, central Brazil. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 5, 053569, 2011a.
- CALLEJAS, I. J. A., OLIVEIRA, A. S., SANTOS, F. M. M., DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Estudo comparativo de temperatura e umidade entre meio urbano e rural. In: **XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC)**, Búzios-RJ, Anais. Búzios, 2011b.
- CAMPELO JÚNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N.; CASEIRO, F. T. Caracterização macroclimática de Cuiabá. III In: Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente. 1991, Londrina. *Anais...* 1991. Londrina, 1991.
- CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, v.24, p.1395–1421, 2004.



- FERREIRA, M. J. **Balço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. 183f. Tese. (Doutorado) - Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP. São Paulo. SP. Brazil, 2010.
- FOKEN, T. 50 years of the Monin–Obukhov similarity theory. **Bound. Lay. Met.**, v.119: p.431–447, 2006.
- GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A. and OKE, T.R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment, Urban Atmosphere**, v.25, n.3, p.311-326, 1991.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS), **J. App. Met.**, v.41, n.7, p.792-810, 2002.
- HU, S., ZHAO, C., LI, J., WANG, F., CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrol. Process.**, 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Pesquisas Geográficas. **Estimativas Populacionais 2010**.
- IPDU. Inst. Pesq. e Desenv. Urbano. **Perfil Socioeconômico de Cuiabá**, V. III, Cuiabá: Central de Texto, 2007.
- KOLOKOTRONI, M., REN, X.; DAVIES, M.; MAVROGIANNI, A. London’s urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. **Energy and Buildings**, v.47, p. 302–311, 2012.
- LORIDAN, T.; GRIMMOND, C. S. B. Characterization of Energy Flux Partitioning in Urban Environments: Links with Surface Seasonal Properties. **J. App. Met. and Clim.**, 51(2), p.219-241, 2012.
- MAITELLI, G. T. Balço de Energia Estimado para a Cidade de Cuiabá: Uma Abordagem de Balço de Energia pelo Método de Bowen. **Clima Urbano e Planejamento das Cidades**, v.4, n.2, 2010.
- MEYN, S., OKE, T. R. Heat Fluxes Through Roofs and Their Relevance to Estimates of Urban Heat Storage. **Energy and Building**, v.41, p.745-752, 2009.
- NEWTON, T. *et all.* The suburban energy balance in Miami, Florida. **Geogr. Ann.**, v. 89, p.331–347, 2007.
- MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEO/USP, 1976.
- MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.
- OKE, T. R.; JOHNSON, G. T; STEYN, D. G; WATSON, I. D. Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night part 2. **Boundary-Layer Meteorology**, v.56, p.339-358, 1991.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2a. Edição, New York: Routledge, 1987. 435p.
- OKE, T. R. The Urban Energy Balance. **Progress in Physical Geography**, v.12, p.471-508, 1988.
- OKE, T. R. **Initial guide to obtain representative meteorological observations at urban site**. Word Meteorological Organization. Canada, 2006.
- OFFERLE, B. *et all.* Intraurban Differences of Surface Energy Fluxes in a Central European City. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v.45, p.125–136, 2006.
- PEREZ, P.J. *et all.* Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agric. and Forest Meteorology.**, v.97, n.3, p.141–150, 1999.
- ROBERTS, S. M.; OKE, T. R.; GRIMMOND, C. S. B.; VOOGT, J. A. Comparison of Four Methods to Estimate Urban Heat Storage. **J. App. Met. and Clim.**, v. 45, n.12, p. 1766-1781, 2006.
- ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. **Int. J. Clim.** v.27, p.1859-1873, 2007.
- SAILOR, D.J.; LU, L.A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. **Atmospheric Environment**, v.38, 2737–2748, 2004.
- SAILOR, D. J, HART, M. An anthropogenic heating database for major U.S. cities. In: **Sixth Symposium on the Urban Environment**, Boston, Paper 5.6, 2006.
- YOSHIDA, A.; TOMINAGA, K.; WATATANI, S. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. **Energy Building**, v.15-16, p.417–423, 1991.

Trabalho enviado em junho de 2016  
Trabalho aceito em agosto de 2016