

Energia Armazenada no Dossel Urbano, Ilha de Calor e Consumo Energético de Edifícios em Clima Tropical.

Energy Stored in the Urban Canopy, Heat Island and Energy Consumption of Buildings in Tropical Climate

¹Ivan Julio Apolônio Callejas, ²Luciane Cleonice Durante, ³Emeli Lalesca Aparecida da Guarda, ⁴João Carlos Machado Sanches

¹Doutor em Física Ambiental, Professor Associado da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, E-mail: (ivancallejas1973@gmail.com)

²Doutora em Física Ambiental, Professor Associado da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (luciane.durante@hotmail.com)

³Mestre pelo programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (emeliguarda@gmail.com)

⁴Doutor em Urbanismo, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, FACET, Universidade de Mato Grosso, Av. dos Ingás, 3001, Sinop-MT, (sanches@unemat-net.br)

RESUMO: O objetivo deste estudo é avaliar as relações entre a energia armazenada no dossel, a ilha de calor (ICU) e o consumo energético de edificações localizadas em sítios urbano e rural, em clima tropical. Foram utilizadas estações meteorológicas para coletar dados de saldo de energia, fluxo de calor armazenado no solo, temperatura e umidade absoluta do ar, nas estações climáticas seca e chuvosa. O fluxo de calor no solo foi medido por meio de fluxímetro e a energia armazenada no dossel urbano foi estimada. Utilizou-se o parâmetro de Graus-Hora de Resfriamento para derivar o consumo de energia para refrigeração dos dormitórios de uma edificação hipotética, localizada nos sítios urbano e rural. Os resultados indicaram diferenças entre o saldo de energia disponível e a energia armazenada nos sítios urbano e rural, bem como entre a temperatura e umidade do ar. A diferença de $0,3\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ de energia estocada a mais no meio urbano em relação ao rural, no mês seco, corroborou para elevar a intensidade da ICU de $2,2^{\circ}\text{C}$, em média, no dossel urbano. No período chuvoso, a diferença foi de $0,8\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ e observou-se elevação de $1,4^{\circ}\text{C}$ na ICU. Os dormitórios da edificação localizada no meio urbano demandaram $4,6\text{kW}/(\text{m}^2\text{mês})$ a mais no mês de setembro, para manter as mesmas condições térmicas do mês de fevereiro, que demandou $1,4\text{kW}/(\text{m}^2\text{mês})$. Os resultados demonstram que as edificações sob o efeito do fenômeno de ilha de calor urbana requerem maior demanda de energia para a manutenção de condições similares de habitabilidade que no meio rural.

Palavras-Chave: efeitos da urbanização. Graus-hora de resfriamento. Balanço de energia.

ABSTRACT: The study aims to evaluate the relationships between the energy stored in the urban canopy, the heat island phenomenon, and the energy consumption in housing located in urban and rural sites, in tropical climate regions. Meteorological stations were used to collect data on energy balance, heat flux stored in the soil, as well as temperature and absolute air humidity during the dry and rainy seasons. The heat flux in the soil in the rural area was evaluated by employing a heat meter and the energy stored in the urban canopy was estimated. The parameter of the cooling degree hours was used to derive the monthly cooling energy consumption of the building's rooms, which was considered hypothetically deployed in urban and rural sites. The results indicated differences between available energy balance and energy stored in the urban site as well as in the rural site, and still between temperature and humidity. The difference of $0.3\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ of energy stored in the urban environment concerning the rural site, in the dry month, corroborated to raise an average of 2.2°C the intensity of UHI in the urban canopy. In the rainy season, the difference was $0.8\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$, and there was an elevation in the UHI of 1.4°C . The building located in the urban site needs $4.6\text{kW}/(\text{m}^2\text{ per month})$ more energy in September to maintain the same thermal conditions in the bedrooms, while in February, only $1.4\text{kW}/(\text{m}^2\text{ per month})$. The results show that buildings under the effect of the urban heat island require greater energy expenditure to maintain the same conditions of habitability of a dwelling deployed in rural areas.

Keywords: Effects of urbanization. Cooling Degree-days. Energy balance.

1. INTRODUÇÃO

O balanço de energia no ambiente urbano é afetado pelo uso e ocupação do solo e, como correlato, alterações no estoque de energia e no particionamento dos fluxos de calor sensível e latente no dossel urbano (OKE, 1987). O fenômeno de ilha de calor urbana (ICU) decorre do processo de urbanização e é definido como a elevação da temperatura do ar nas cidades em relação às áreas rurais adjacentes. Entre suas causas citam-se o maior armazenamento de radiação solar incidente (ondas curtas), o maior albedo e capacidade térmica dos materiais construtivos utilizados no meio urbano, bem como as múltiplas reflexões de radiação de onda longa que acontecem nos cânions urbanos, que contribuem para aprisionar a energia dentro do dossel urbano, dificultado a sua dissipação para camadas atmosféricas superiores. Além disso, na cidade, ocorre maior presença de fontes de energias antropogênicas, que contribuem para introduzir mais energia no meio, aumentando ainda mais os ganhos de energia dentro do dossel urbano (LINDBERG et al., 2013).

O maior aquecimento do ambiente urbano, principalmente à noite, quando comparado com o meio rural que o rodeia, pode ser entendido por meio do balanço de energia, fazendo-se uso da primeira Lei da Termodinâmica (Lei da conservação de energia), a partir de um volume de controle, computando-se os ganhos, as perdas e o armazenamento de energia dentro do dossel urbano (Equação 1), em que Q^* é o saldo de radiação líquida, Q_F é a fonte de calor antropogênica introduzida dentro do volume de controle, Q_H é o fluxo de calor sensível turbulento, Q_E é o fluxo de calor latente turbulento, ΔQ_S é o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano e ΔQ_A é a advecção horizontal de calor sensível e latente conduzida para dentro ou fora do volume de controle.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Estudos evidenciam que a impermeabilização do solo, o uso de materiais artificiais e a supressão da vegetação nas cidades reduzem o fluxo de calor latente e elevam o fluxo de calor sensível e o estoque de energia do dossel urbano, provocando e intensificando os efeitos da ICU (OKE, 1987; WANG et al., 2015; CALLEJAS et al., 2016). Uma forma de melhor compreender e avaliar a modificação climática causada pelo processo de urbanização é através de comparações entre o meio urbano e o rural.

O processo de urbanização e as decorrentes alterações nas condições climáticas influenciam no consumo energético para manter as condições térmicas das edificações urbanas, visto que as temperaturas do ar na cidade são mais elevadas do que as do entorno (KOLOKOTRONI et al, 2013). Um método para estimar a quantidade de energia necessária para calefação e/ou resfriamento de edificações em diferentes localidades é o Graus-Hora (DURMAYAZ; KADIOGLU; SEM, 2003). O método se baseia no fato de que sempre que as perdas ou ganhos de energia são diretamente proporcionais ao gradiente de temperatura existente entre os meios externo e interno da edificação. Sempre que a temperatura do ar estiver abaixo (calefação) ou acima (resfriamento) da temperatura base (T_b), haverá a necessidade de consumo energético para manutenção das condições ideais de conforto térmico nos ambientes (GOULART E LAMBERTS, 1995). Em locais onde a ilha de calor é mais pronunciada, existe a tendência de que nas estações frias haja menor consumo energético para calefação, e nas estações quentes, maior consumo energético para refrigeração (OKE, 1987).

A cidade de Cuiabá, Capital do Estado de Mato Grosso, está localizada em região de clima tropical continental e apresenta elevadas temperaturas de ar durante todo o ano. Associada à sua localização geográfica, a cidade passou um intenso crescimento populacional entre as décadas de 70 a 90 (IPDU, 2012), acompanhado de acelerado processo de alterações nas superfícies do solo, principalmente, pela substituição das áreas naturais preservadas de

seu entorno, por áreas construídas e impermeabilizadas. Estas modificações provocaram mudanças no balanço de energia, causando, dentre outras consequências, influencia na dinâmica do movimento do ar, aumento da temperatura e o fenômeno das Ilhas de Calor Urbana (ICU) (CALLEJAS *et al.*, 2016).

O fenômeno de ilha de calor urbana em Cuiabá já foi evidenciado por alguns pesquisadores (MAITELLI, 1994; COSTA, 1999; DUARTE, 2000; PINHO 2003; CALLEJAS, 2012; SANTOS, 2012), com maior intensidade observada de 5,7°C no período noturno da estação seca, no centro da cidade. Além disso, observa-se que existe relação entre a intensidade de ICU e a distância entre as áreas central e mais periféricas (CALLEJAS, 2012). Diante desse cenário, indaga-se qual o impacto que o fenômeno de ICU provoca no consumo energético das edificações inseridas no meio urbano? Questiona-se, também, se as variáveis do balanço de energia (saldo de radiação e intensidade da energia armazenada no dossel urbano) se relacionam com a intensidade de ilha de calor, bem como com o desempenho termoenergético das edificações.

O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da urbanização sobre a intensidade de energia armazenada no dossel urbano, sua relação com o fenômeno de ilha de calor urbana e o desempenho termoenergético de habitações da cidade de Cuiabá-MT.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O Município de Cuiabá (15°10' a 15°50'S; 54°50' a 58°10'W) 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, na região geomorfológica denominada Baixada Cuiabana. Possui 3538,17km², sendo que 254,57km² correspondem à área de macrozona urbana e 3283,60km² à área rural (Figura 1). A altitude varia de 146 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, com média anual em torno de 25 a 26°C, com duas estações bem definidas: uma seca (outono-inverno) e uma chuvosa (primavera-verão). O índice 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 vistas a avaliar o comportamento do fluxo de energia armazenado dentro do dossel urbano e da intensidade de ilha de calor em áreas que sofreram intensa urbanização, selecionou-se o Sítio 1 (urbano), posicionado na região Leste da cidade no Bairro Areão, distante aproximadamente 1,45km do centro da cidade, e o sítio 2 (rural), localizado ao sul da cidade de Cuiabá, distante aproximadamente 14,9km do Sítio 1 e 15km do centro da cidade. As altitudes dos Sítios 1 e 2 são 197 e 157m, respectivamente. O Sítio 1 se localiza em uma escola da rede pública estadual de ensino, constituída por um pátio central e blocos lineares simetricamente distribuídos. O Sítio 2 está inserido dentro de uma fazenda denominada Miranda.

Para caracterização do uso e ocupação do solo no entorno dos sítios, quantificaram-se as frações de área das categorias definidas em um raio de 500 metros, conforme proposto por Oke (2006), conforme Equação 2, em: área plana de vegetação – Av (árvores, grama, arbustos, etc), área plana permeável - Ap (solo desnudo e parcialmente desnudo), área plana impermeável - Ai (cimento, asfalto, brita, estacionamentos, ruas, calçadas com exceção dos

edifícios) e áreas de superfícies tridimensionais dos edifícios, subdivididas em área de telhados – A_T e paredes – A_P e área total de superfícies ativas (A_S) em contato com a atmosfera. A morfologia tridimensional dos sítios é obtida pela razão entre a área plana total (A_{Plana}) e a área total de superfícies ativas (A_S), dentro do raio adotado.

$$AS = AV + AI + AP + AT + AC \quad (2)$$

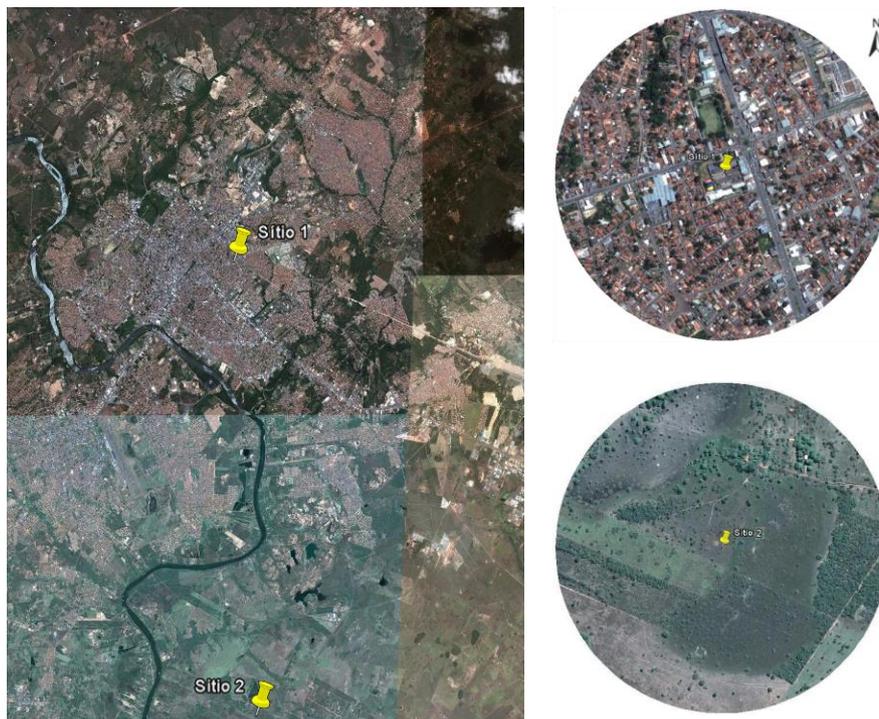
A fração de área plana das categorias e a fração tridimensional constam da Tabela 1. O entorno dos sítios 1 e 2 podem ser visualizados na Figura 1. Ao se considerar as superfícies das paredes como integrantes da área de contato com a atmosfera, o Sítio 1 apresenta 33% a mais de área do que se fossem consideradas as superfícies planas. No sítio 2, devido a pouca presença de edificações em seu entorno, não houve contribuição em virtude da presença das superfícies de paredes das edificações.

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

Uso e ocupação do solo	Fração de Área ($A_{parcial} / A_{total}$)					A_{plana}/A_S
	Área Impermeabilizada (A_I)	Área vegetada (A_V)	Solo desnudo e parcialmente descoberto (A_P)*	Área de telhados (A_T)	Área de Cânion Urbano (A_C)	
Sítio 1	21,72%	11,42%	8%	33,97%	24,88%	1,33
Sítio 2	Desprezível	20,00%	79%	1%	Desprezível	1,00

*solo coberto por vegetação tipo pastagem e rasteira foram incluídos no solo parcialmente descoberto.

Figura 1 – Localização e entorno do Sítio 1 (urbano) e 2 (rural) na cidade de Cuiabá-MT/ Brasil.



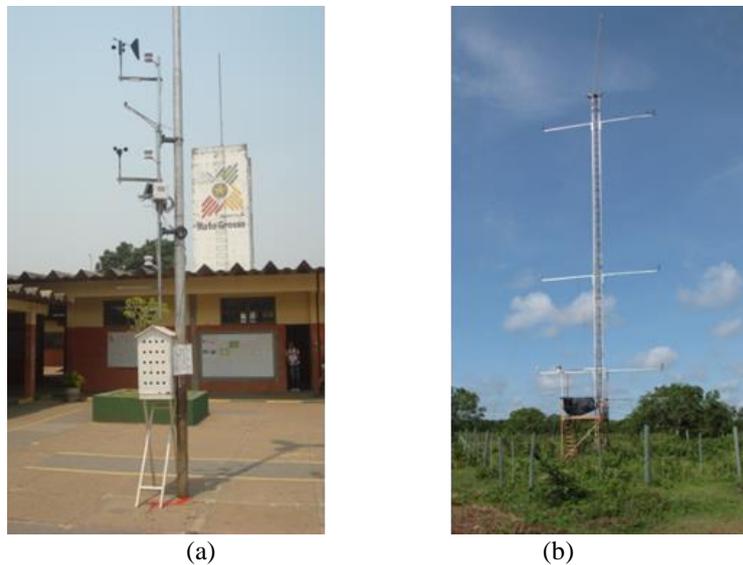
2.2 Instrumentação

Para realização das medições, os seguintes equipamentos meteorológicos foram utilizados (Figura 2): termo-higrômetros instalado a 2 e 5m do nível do solo no Sítios 1 e 2, respectivamente; pirômetros para mediação da radiação solar incidente; saldos radiômetro, Marca Kipp & Zonen Delft, Inc., Holland, Modelo NR-Lite2 Net Radiometer, instalado nos

níveis de 5 e 20m, nos sítios 1 e 2, respectivamente; para avaliação do saldo de radiação utilizaram-se fluxímetros, Marca REBS, Inc., Seattle, Washington, Modelo HFT-3.1 instalado a uma profundidade de aproximadamente 5cm para avaliação do fluxo de calor no concreto e solo, respectivamente.

Os dados produzidos pelos sinais e/ou pulsos elétricos dos sensores dos equipamentos meteorológicos foram processados e armazenados por Datalogger das Marcas OnsetComp, modelo U30-NRC-VIA-10-S100-000 e Campbell-Stokes, Modelo CR1000, em intervalos de 30s, 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 chuvosa, respectivamente. Nos meses de setembro de 2010 e fevereiro de 2011 foram observadas as menores e maiores precipitações durante o período de coleta de dados, sendo estes escolhidos neste estudo em virtude de serem meses em que, provavelmente, houve a ocorrência de maior e menor demanda por eletricidade para refrigeração, com exceção dos meses em que ocorre a entrada de frente frias (junho, julho e agosto).

Figura 2 - Estação meteorológica instalada no Sítio 1 (a) e no Sítio 2 (b).



2.3 Avaliação da Energia Armazenada no Dossel Urbano e Rural ($\Delta Q_s / G$)

O fluxo de calor no solo na área rural foi estimado através da utilização de fluxímetros convenientemente instalados dentro do solo a uma profundidade de 5 cm. Por outro lado, a energia armazenada dentro do dossel urbano (ΔQ_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, por meio da Equação 3, sendo ΔQ_s o fluxo de calor armazenado no dossel urbano, Q^* o saldo de radiação líquida na superfície urbana em estudo, $\partial Q^* / \partial t$ a taxa de variação da radiação líquida no tempo, 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 a fração dessas superfícies i dentro da área de estudo (Tabela 1).

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

Para aplicar o esquema proposto deve-se conhecer o saldo de radiação líquida nos sítios, 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 indicado na Tabela 1. As frações de superfícies (f_i) usualmente são avaliadas através de fotografias aéreas do entorno (Figura 1), bem como por meio de levantamentos de campo. Os coeficientes de regressão a_1 , a_2 e a_3 , que correspondem à resposta do modelo de histerese para cada tipo de superfície presente no meio urbano, foram obtidos a partir de estudos de fluxo de calor no solo em áreas vegetadas, solo nu ou parcialmente coberto, de fluxo de calor no concreto. Para cobertura e asfalto, utilizaram-se os coeficientes apresentado nos trabalhos de Meyn e Oke (2009) e Anandakumar (1999). Os coeficientes médios para cada tipo de material constam da Tabela 2.

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	Valores médios anuais	a_1 (adimensional)	a_2 (h)	a_3 (W m ⁻²)
Área vegetada	Dados de Sinop-MT ¹	0,03	-0,03	-3,30
Solo total ou parcialmente desnudo	Dados Fazenda Miranda-MT ²	0,26	-0,07	-22,75
Asfalto	Anandakumar (1998) ³	0,84	-0,83	-19,29
Concreto ⁴	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 Solo tipo canga laterítica. Coeficientes obtidos para o período de setembro de 2010 a agosto 2011. 3 Média do período em que a_2 e a_3 apresentaram valores negativos. 4 Dados obtidos com os fluxímetros instalado no sítio de setembro de 2010 a agosto 2011.

2.4 Intensidade de Ilha de Calor Urbana (ICU)

A correlação do fluxo de calor armazenado no solo e no dossel urbano com o fenômeno de ilha de calor urbana em Cuiabá já foi evidenciada por alguns pesquisadores (COSTA, 1999; DUARTE, 2000; PINHO 2003; e SANTOS, 2012), com a premissa que a intensidade de ilha de calor aumenta das áreas periféricas para as áreas centrais, onde ocorrem adensamento urbano, tráfego intenso de veículos, diminuição das áreas verdes e permeáveis (OKE, 1987).

A intensidade da ilha de calor é expressa pelas Equações 4 e 5, que representam a diferença entre a temperatura do ar urbana (T_u) em relação às áreas do seu entorno e a região rural (T_r) (OKE, 1987). O aumento da temperatura e da impermeabilização do solo urbano promovem a redução da umidade do ar, sendo esta variável igualmente importante nos estudos de clima urbano. Assim, realizou-se avaliação da diferença entre a umidade absoluta entre os Sítios 1 e 2, estudados de forma análoga à Equação 4, substituindo a variável temperatura pela umidade (Equação 5).

$$\Delta T_u - r = T_u - T_r \quad (4)$$

$$\Delta U_u - r = U_u - U_r \quad (5)$$

As análises foram feitas considerando-se as médias horárias mensais da temperatura de bulbo seco e umidade absoluta. Para análise comparativa entre os sítios, trabalhou-se com a diferença entre as médias horárias das temperaturas mensais de bulbo seco e da umidade relativa dos Sítios 2 (urbano) em relação ao Sítio 1 (rural), justificado pela hipótese de que neste ocorreriam os valores extremos dessas variáveis e, também, por sua posição relativamente central na cidade e entre os sítios. Este procedimento também foi utilizado no computo dos Graus-Hora de Resfriamento e no consumo energético das edificações.

2.5 Graus-hora de Resfriamento (CHD) e Consumo Energético (Q_c)

Para avaliação do consumo energético, utilizou-se o parâmetro climático de Graus-Hora, definido como o somatório das diferenças de temperatura, quando esta se encontra abaixo de uma temperatura base (T_b), para o caso de necessidade de uso de energia para calefação, e acima de uma temperatura base (T_b), para o caso de necessidade de uso de energia para refrigeração. O método presume que as energias necessárias para manter as condições de conforto térmico em uma habitação são proporcionais a diferença entre a temperatura do meio (T_{med}) e a temperatura base (BUYUKALACA et al., 2001). Assim, para estimar a energia necessária para calefação e refrigeração ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hora}$), utilizaram-se as Equações 6 e 7, conforme Durmayaz (2000), em que HHD corresponde aos Graus-hora de calefação (Heat Degree Hours), CHD aos Graus-hora de resfriamento (Cooling Degree Hours), T_b representa a temperatura base necessária para que haja conforto nas estações de inverno e verão, respectivamente e T_{med} representa a temperatura média horária dos dias de um determinado mês, avaliadas a partir de medições em estações meteorológicas.

$$\text{HHD} = \Sigma (T_b - T_{med}) \quad (6)$$

$$\text{CHD} = \Sigma (T_{med} - T_b) \quad (7)$$

Para a região estudo, desprezou-se a necessidade de calefação devido à baixa ocorrência de temperaturas menores que a temperatura base no período da pesquisa. A temperatura base para resfriamento foi adotada em 26°C , conforme recomendado por BRASIL (2010). Os Graus-Hora de Resfriamento foram avaliados a partir das estações meteorológicas instaladas nos Sítio 1 e 2, nos meses de setembro e fevereiro, conforme descrito anteriormente.

O consumo energético foi estimado a partir do coeficiente total de perda ou ganho de calor (L) (DURMAYAZ, 2000), utilizando uma habitação padrão hipoteticamente instalada nas duas regiões de coleta de dados (dentro do meio urbano, em região central da cidade e no meio rural adjacente). Esta metodologia considera as perdas pela envolvente, as perdas localizadas e as perdas pela ventilação, sendo avaliado pela Equação 8, em que L é expresso em W/K ou $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ (ganho ou perda de energia por variação de temperatura), U é a transmitância de cada componente da edificação, A é a área de cada ambiente da edificação, I a taxa de renovação de ar no ambientes (ACH), V o volume interno da edificação; $(\delta C_p)_{ar}$ é a capacidade térmica volumétrica do ar assumida ser igual a $1,2 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ (δ a densidade de energia e C_p calor específico do ar).

$$L = \Sigma(U \cdot A) + I \cdot (\delta C_p)_{ar} \times (V/3,6) \quad (8)$$

Neste estudo, utilizou-se a edificação já pesquisada anteriormente por Callejas et al. (2013), na qual foram quantificados o consumo energético de refrigeração apenas dos dormitórios, das 21h às 7h, conforme recomendado pelo RTQ-R (BRASIL, 2010). O sistema construtivo é composto por paredes de alvenaria, piso de concreto, cobertura de telha cerâmica em duas águas, forro de PVC, esquadrias externas metálicas e portas internas de madeira. A planta baixa e as vistas do projeto da edificação podem ser visualizadas nas Figuras 3 e 4. O pé-direito dos ambientes é de 2,6m. As propriedades geométricas e termo físicas utilizadas para estimar o coeficiente total de perda ou ganho de calor (L) foram obtidas na NBR 15220 (ABNT, 2003) e são apresentadas na Tabela 3. A taxa de renovação de ar foi adotada conforme Caneppele et al. (2013), que estimou vazão média de $0,001604 \text{ m}^3/\text{s}$ de infiltração de ar pelas venezianas da janela e pelas frestas das aberturas, o que equivale a aproximadamente 1 troca de ar por hora nos volumes dos ambientes da edificação. As trocas térmicas realizadas pelo piso foram desprezadas.

Figura 3 – Foto e planta Baixa da edificação.

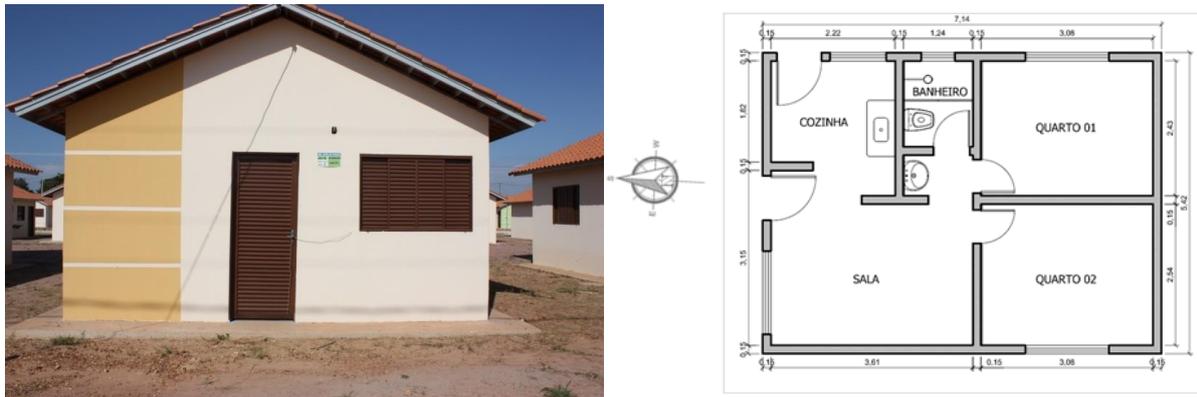


Figura 4 – Cortes da HIS.

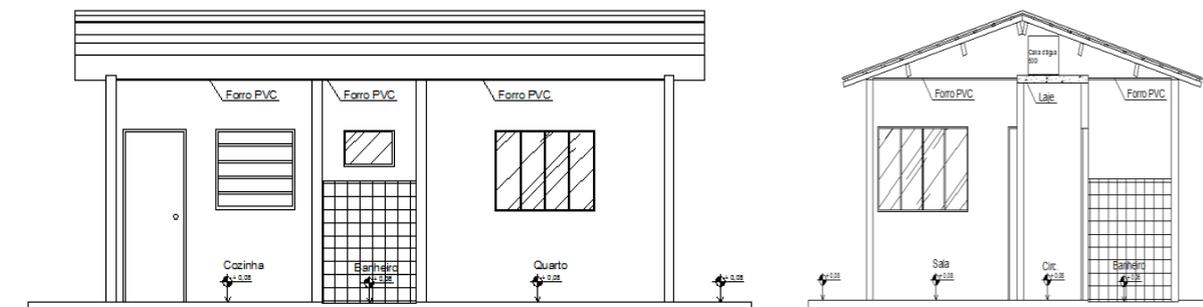


Tabela 3 – Propriedades geométricas e termo físico dos dormitórios da edificação.

Componentes	Área (m ²)	Composição dos materiais utilizados	Transmitância
Paredes externas dos quartos	30,86	Argamassa 2,5cm + Tijolo 8 furos (19x19x9cm) + Argamassa 2,5cm	2,49 W/m ² .K
Piso em Radier dos quartos	17,50	Radier concreto (15cm) + piso cerâmico 10mm	0,12 W/m ² .K
Cobertura dos quartos	17,50	Telha Cerâmica + ar (e>5cm) + Forro PVC (1cm)	1,75 W/m ² .K
Aberturas Janelas Quartos	2,40*	Vidro comum	5,80 W/m ² .K
Volume dos quartos	39,54m ³		

*área de abertura de vidro – 50%.

A partir das estimativas de HDD e CHD, os requisitos mensais de aquecimento (Q_h) e resfriamento (Q_c), em kWh, podem ser calculados, a partir das Equações 9 e 10.

$$Q_h = L \times HDH \times (1/1000) \quad (9)$$

$$Q_c = L \times CDH \times (1/1000) \quad (10)$$

Apenas os valores de Q_c foram utilizados com a finalidade de se comparar o consumo energético da habitação devido a baixa quantidade de graus horas de aquecimento observada na região da pesquisa. Para tanto, relacionou-se a energia armazenada no dossel urbano com os Graus-Hora de Resfriamento e com o consumo energético da edificação.

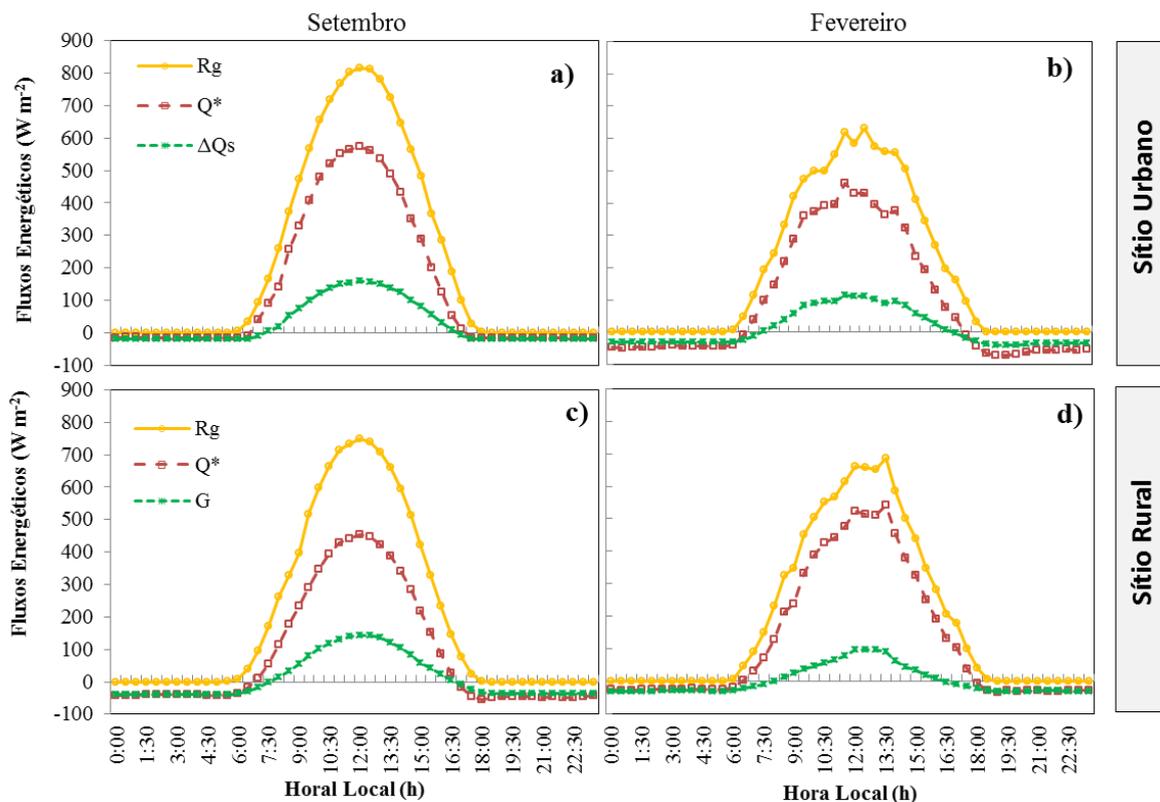
4. RESULTADOS

4.1 Saldo de Radiação no Meio Urbano e Rural (Q^*)

Ao se comparar os fluxos de energia nos meios urbano e rural, observa-se que a radiação média diária solar incidente na cidade, no mês de setembro, alcançou intensidade máxima de $816,93\text{Wm}^{-2}$ às 12h, enquanto no meio rural, a intensidade máxima foi de 750Wm^{-2} no mesmo horário. No mês de fevereiro, a intensidade máxima foi menor em ambos os sítios e iguais a $632,29\text{Wm}^{-2}$ às 12h30min e $687,71\text{Wm}^{-2}$ às 13h30min, nos sítios urbano e rural, respectivamente (Tabela 4, Figura 4). Justifica-se este comportamento devido a maior nebulosidade que se estabelece no período chuvoso.

Os valores médios máximos para o saldo de radiação nos meios urbano e rural apresentaram comportamento análogo aos horários de pico da radiação solar incidente. Em setembro, os registros foram de $573,97\text{Wm}^{-2}$ e $454,65\text{Wm}^{-2}$, e em fevereiro, $429,78\text{Wm}^{-2}$ e $542,67\text{Wm}^{-2}$, nos meios urbano e rural, respectivamente (Tabela 4, Figura 4). Assim, verifica-se que o saldo de radiação se encontra em fase com a radiação solar incidente em ambos os meios. No mês seco, a razão média Q^*/R_g no meio urbano alcançou 60%, e no meio rural, 43%, o que indica maior energia disponível no meio urbano. No mês chuvoso, ocorreu comportamento inverso, com razão Q^*/R_g no meio urbano de 50% e, no meio rural, de 65%. Este comportamento pode justificar uma menor intensidade de ilha de calor urbana no mês de fevereiro em relação a setembro, ocasionando menor consumo de energia pela edificação localizada tanto no meio urbano quanto no rural neste mês.

Figura 4 – Fluxos energéticos médios para os meses de (a) setembro de 2010 e (b) fevereiro de 2011.



Comportamento semelhante foi verificado por Callejas (2012), onde o sítio com maior taxa de vegetação apresentou maior disponibilidade de energia no período chuvoso. As variações observadas na radiação líquida ocorreram em função das diferenças na transmissividade e emissividade efetiva da atmosfera, das propriedades térmicas do dossel

urbano e vegetativo e, também, devido ao albedo efetivo das superfícies onde o experimento foi realizado. Estes parâmetros são responsáveis por alterar os componentes da radiação de onda curta e longa das superfícies, principalmente nas superfícies urbanizadas. Com relação ao albedo, em estudo realizado em áreas de floresta e pastagem na Amazônia, verificou que os valores observados de albedo no período úmido foram ligeiramente menores que os valores correspondentes no período seco, o que contribuiu para elevar o saldo de radiação disponível neste período nas áreas pesquisadas (RIBEIRO, 1994). Este comportamento pode justificar a maior disponibilidade de energia no meio rural no mês chuvoso.

4.2 Energias Armazenadas no Dossel Urbano (ΔQ_s) e Rural (G)

A intensidade máxima média do fluxo de calor armazenado no dossel urbano (ΔQ_s) e solo (G), em setembro, foram de $158,43 \text{ Wm}^{-2}$ às 12h e $104,04 \text{ Wm}^{-2}$ às 12h30min, respectivamente (Tabela 4, Figura 4). Nota-se que o fluxo de calor armazenado no dossel urbano encontrava-se em fase com o pico máximo do saldo de radiação no sítio urbano, enquanto no sítio rural, o fluxo de calor no solo encontrava-se atrasado em meia hora em relação ao pico do saldo de radiação. Em fevereiro, os fluxos no Sítio 1 foram de $116,30 \text{ Wm}^{-2}$ às 11h 30min, enquanto no Sítio 2 foi de $97,62 \text{ Wm}^{-2}$ às 12h 30min, indicando que, no mês chuvoso, o fluxo armazenado no dossel urbano e no solo encontrava-se adiantado em uma hora relação ao saldo de energia no meio. Este fato pode ser justificado pela maior presença de umidade no meio, o que modifica as propriedades térmicas dos materiais naturais e, principalmente, dos artificiais, fazendo com que a energia seja mais rapidamente armazenada. No mês seco, a razão média $\Delta Q_s / Q^*$ no meio urbano alcançou 16%, enquanto no meio rural, foi de 13% (G/Q^*), o que indica maior energia sendo estocada no meio urbano. No mês chuvoso, observou-se redução do estoque de energia nos meios urbano e rural, com razão média $\Delta Q_s / Q^*$ e G/Q^* de 10% e 1%, respectivamente. Mesmo assim, o estoque de energia continuou sendo maior no sítio urbano.

Tabela 4 – Valores médios diários dos componentes do balanço de energia ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e da diferença temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade absoluta do ar (g/m^3) para os Sítios 1 e 2 em setembro (seco) e fevereiro (chuvoso).

Meses	Setembro		Fevereiro		
	Fluxo	Urbano (1)	Rural (2)	Urbano (1)	Rural (2)
R _g		19,7	17,5	16,1	16,6
Q*		8,1	7,7	8,0	10,9
ΔQ_s ou G		1,3	1,0	0,85	0,03
Fração					
Q*/R _g		0,40	0,44	0,50	0,65
$\Delta Q_s / (Q^*)$ ou G/Q^*		0,16	0,13	0,10	0,01
Diferença média entre meio urbano (1) e rural (2)					
R _{gu} – R _{gr}		2,2		-0,5	
Q* _u – Q* _r		0,4		-2,8	
$\Delta Q_s - G$		0,3		0,8	
ΔT_{u-r}		2,2		1,4	
$\Delta U_{a,u-r}$		0,6		0,5	

Nos meses setembro e fevereiro os fluxos de calor armazenados no dossel urbano foram superiores aos armazenados no solo. Isso se deve, principalmente, à presença de materiais artificiais introduzidos pelo homem no meio urbano (com elevada condutividade e capacidade térmica; baixa efusividade), bem como devido à maior presença de superfícies

ativas nos cânions urbanos. Pela análise do comportamento dos fluxos, nota-se que as intervenções urbanísticas introduzidas no meio pelo homem provocam profundas mudanças no balanço de energia da cidade. Este comportamento reflete na formação de ilhas de calor urbana, fenômeno já evidenciado em várias pesquisas na região. O decréscimo de estoque de energia armazenado no mês chuvoso se deu em virtude da menor disponibilidade de energia no meio urbano, das trocas térmicas durante os dias de chuva, das modificações nas propriedades térmicas dos materiais pela maior presença de umidade e, devido à grande parcela de energia utilizada para a evaporação da água neste período. Diante deste comportamento, espera-se que as edificações instaladas tanto no meio urbano quanto no rural apresentem maiores Graus-Horas de resfriamento e maior consumo energético no mês de setembro do que no mês de fevereiro. Nesse mesmo sentido, devido ao maior estoque de energia na cidade, espera-se que a edificação instalada na cidade apresente maior quantidade de horas de resfriamento e consumo superior de energia em relação à instalada no meio rural, em ambos os meses pesquisados.

4.3 Intensidade de Ilha de Calor Urbana (ICU)

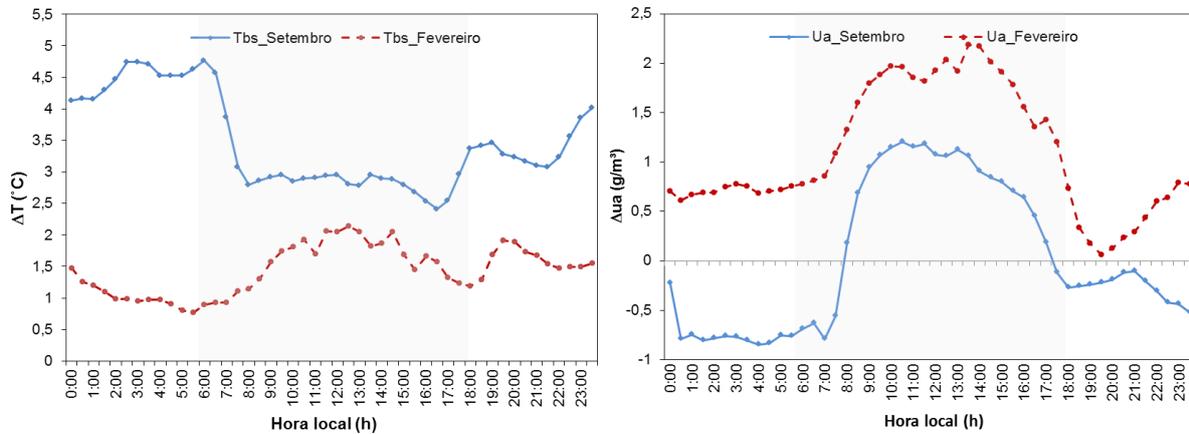
A temperatura e umidade absoluta do ar média no sítio urbano no mês de setembro foram de 32,7°C e 12,3g/m³, enquanto no rural foram de 29,2°C e 12,3g/m³. No mês de fevereiro, observou-se no sítio urbano que os valores médios foram de 27,7°C e 20,7g/m³, enquanto no rural foram de 26,0°C e 19,6g/m³. O sítio urbano apresentou maiores temperaturas e umidade absoluta que o rural, tanto no período de estiagem quanto no período chuvoso. A variável temperatura do ar média foi maior no sítio densamente urbanizado e menor no sítio rural com maior fração de área vegetada. Esta relação se mostrou diretamente proporcional à fração do solo impermeabilizado e inversamente proporcional à densidade de área vegetada. Ficou evidenciado em ambos os períodos o comportamento do fenômeno de Ilha de Calor Urbana na região.

A Figura 5 apresenta as diferenças de temperaturas do ar e umidades absolutas entre os sítios urbano e rural, nos meses pesquisados. No mês de setembro, período de estiagem na região, nota-se que a maior diferença encontrada para a temperatura e umidade absoluta do ar foi de 4,8°C às 6h e 1,2g/m³ às 13h. No período noturno, a umidade absoluta no sítio rural é maior que no urbano, enquanto no período diurno, ocorre comportamento inverso, semelhantemente ao observado por Oliveira et al. (2009), em estudo no período de estiagem. Justifica-se o comportamento noturno devido a maior quantidade de massa vegetada no entorno do sítio rural, que contribui para o processo de evapotranspiração, aumentando desta forma a concentração de vapor d'água no meio. Por outro lado, durante o período diurno, devido à ação antropogênica, a liberação de água no meio pode se dar devido ao consumo de combustíveis fósseis e, também, devido à irrigação dos jardins nas residências e canteiros centrais da cidade, o que contribui para maior disponibilidade de água na atmosfera da cidade, por meio de evapotranspiração.

No mês de fevereiro, período chuvoso, a maior diferença encontrada ocorreu no início do período vespertino, com intensidade de 2,1°C e 2,0g/m³, ambos às 12h30min, comportamento inverso ao observado no período seco. Diferentemente do que aconteceu no período seco, o sítio urbano permaneceu mais úmido que o sítio rural durante todo o dia. Oke (1987) destaca que o comportamento das diferenças entre o meio urbano e rural são pequenas e seu padrão é complexo, como se pode perceber nos resultados encontrados neste trabalho. O comportamento apresentado durante o período de estiagem é oposto ao observado em estudo de cidades situadas em zonas temperadas, onde a tendência da umidade absoluta é ser menor no período noturno e maior no período diurno no sítio rural. As diferenças entre as temperaturas de ar estão coerentes com os apresentados por Santos (2012), que realizou

transectos noturnos e encontrou na estação de inverno, intensidade de ilha de calor de até 5,5°C e no verão de até 2,4°C.

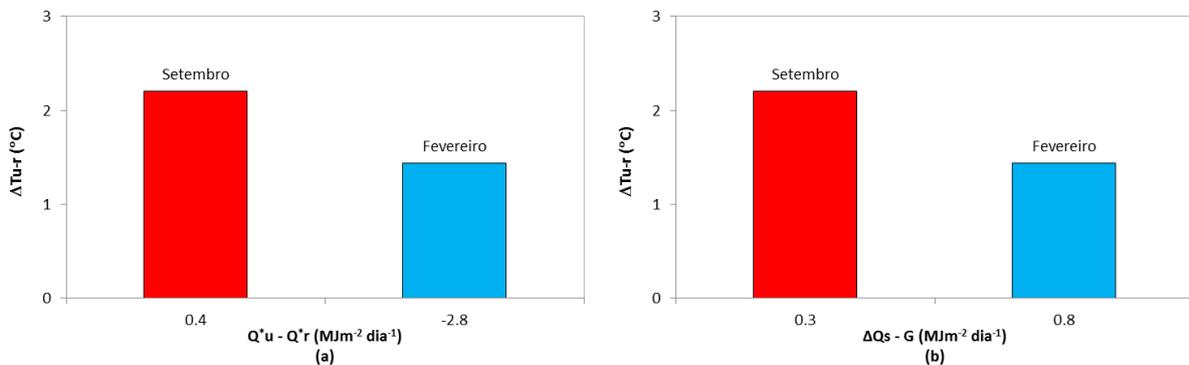
Figura 5 - Diferença entre médias horárias mensais da temperatura e umidade absoluta do ar entre os Sítios 1 e 2.



4.4 Relação entre Saldo de Energia Armazenada no dossel urbano com Intensidade de Ilha de Calor Urbana (ICU)

É possível relacionar a intensidade de ilha de calor urbana com a diferença do saldo de energia disponível nos meios urbano e rural ($Q_u^* - Q_r^*$) e energia armazenada no dossel urbano e rural ($\Delta Q_s - G$). Verificou-se que no mês de setembro (seco), a energia disponível no meio urbano foi superior ao rural em $0,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e que houve maior estoque de energia no dossel urbano que no rural ($0,30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), resultando em elevação da intensidade média diária da ICU de $2,20^\circ\text{C}$. No mês de fevereiro (chuvoso), observou-se maior disponibilidade de energia no meio rural ($-2,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e maior estoque de energia no dossel urbano que no rural ($0,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Apesar de maior estoque, a intensidade de energia armazenada no dossel urbano foi inferior a do período seco ($\sim 60\%$). Este comportamento explica a redução de intensidade média diária de ICU para $1,40^\circ\text{C}$ (Figura 6). No mês seco, para cada $0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ estocado a mais no meio urbano em relação ao rural, observou-se uma taxa de elevação da temperatura do ar em $2,2^\circ\text{C}$ (taxa de $0,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para cada 1°C). Por outro lado, no mês chuvoso, necessitou-se $0,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de energia estocada a mais no meio urbano para que elevasse apenas $1,4^\circ\text{C}$, ou seja, uma taxa 4,5 maior ($0,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para cada 1°C). Nas relações entre a temperatura do ar entre o dossel urbano e rural, observou-se que não ocorreu relação linear entre as diferenças do saldo de energia disponível ($Q_u^* - Q_r^*$) e o calor armazenado ($\Delta Q_s - G$).

Figura 6 – Relação entre (a) $(Q_u^* - Q_r^*) \times \Delta T_{u-r}$ e (b) $(\Delta Q_s - G) \times \Delta T_{u-r}$



No período seco, a ausência de umidade no meio, faz com que exista relação mais direta entre a energia estocada e a respectiva elevação da temperatura do ar (CALLEJAS, 2012). No período úmido, esta relação não é direta, pois outros fatores influenciam no estoque de energia tanto no meio urbano quanto no rural. Entre estes fatores pode-se citar as trocas térmicas por condução ocorridas durante os períodos de chuva e maior destinação de energia para evaporação da água (fluxo de calor latente). A maior disponibilidade de umidade nos materiais também influencia o comportamento do estoque de energia tanto nos materiais naturais quanto nos artificiais, com destaque para os artificiais que tem sua capacidade térmica mais afetada do que os naturais (OKE, 1987). Assim, nota-se que, tanto as diferenças entre energia disponível quanto a armazenada dentro do dossel urbano e rural são variáveis que influenciam na intensidade de ilha de calor observada no meio urbano pesquisado. Diante destas observações, levanta-se a hipótese de que a ilha de calor urbana observada terá impacto direto no computo dos Graus-Hora de Resfriamento (CDH) e consumo energético para refrigeração (Q_c) das edificações hipoteticamente implantadas no meio urbano e rural.

4.5 Graus-Horas de Resfriamento (CHD) e Consumo Energético para refrigeração (Q_c)

Os Graus-Hora de Resfriamento e o consumo energético para refrigeração dos dormitórios da edificação são apresentados na Tabela 5 com intuito de demonstrar a influência da ilha de calor na cidade. No mês de setembro (seco), no meio rural, foram quantificados um total de 3043°Ch de resfriamento, 306°Ch durante o período noturno, o que requer 39kWh/mês de consumo energético para refrigerar os quartos da edificação. No meio urbano, foram quantificados 4250°Ch de resfriamento, 938°Ch durante o período noturno, consumindo 119kWh/mês para refrigeração dos ambientes. Isso representa uma elevação de aproximadamente 40% nos Graus-Horas de Resfriamento e de 33% no consumo energético, devido ao fato da edificação estar implantada nas proximidades do centro da cidade. No mês de fevereiro (chuvoso), notou-se que os Graus-Horas de Resfriamento e consumo energético no meio rural reduziram para 835°Ch e 41°Ch, respectivamente, no período noturno, havendo a necessidade de 5kWh/mês para refrigerar os dormitórios, enquanto no meio urbano, reduziram para 1511°Ch e 230°Ch no período noturno, o que demanda o consumo de 29kWh/mês. Desta forma, durante o período chuvoso há decréscimo médio nos Graus-Horas de Resfriamento e de consumo energético em 80% e 70%, respectivamente, entre os meios urbano e rural.

Demonstra-se, desta forma, que os edifícios localizados na cidade necessitam de maior quantidade de energia para manter as mesmas condições térmicas de um edifício instalado no meio rural. Dividindo-se a diferença de consumos entre o meio urbano e rural pela área dos dormitórios, constata-se que no mês de setembro foram utilizados 4,6 kW/(m² mês) a mais de energia que no mês de fevereiro, cujo consumo foi de 1,4kW/mês m². A maior redução observada no período chuvoso está associada a menor diferença de energia disponível no meio, bem como a menor diferença de estoque de energia verificado entre o meio urbano e rural. Como já destacado anteriormente, as trocas térmicas por condução ocorridas durante os períodos de chuva, a maior destinação de energia para evaporação da água (fluxo de calor latente) e a maior disponibilidade de umidade nos materiais também influenciaram o comportamento observado. Mesmo havendo maior equilíbrio entre as temperaturas dos meios urbano e rural no mês chuvoso, ratifica-se novamente a hipótese de que as edificações sob o efeito do fenômeno de ilha de calor urbana requerem maior dispêndio energético para a manutenção das mesmas condições de habitabilidade.

Dados disponibilizados pelo Grupo Energisa, distribuidora de energia local (ENERGISA, 2013), indicam que o consumo médio residencial por unidade habitacional, no local onde o modelo pesquisado de edificação foi implantado, foi de 270,36kWh/mês no mês

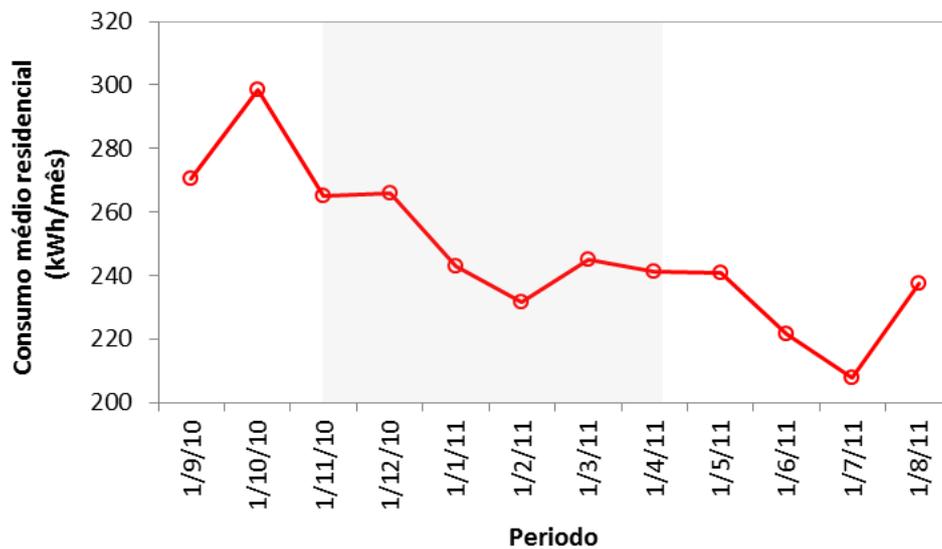
de setembro e 231,60kWh/mês no de fevereiro (Figura 7), o que representa uma redução de 17% entre o período seco e chuvoso. Observa-se redução do consumo no mês de fevereiro em relação ao de setembro, menos expressiva que a estimada no trabalho (70%). Isso se deve ao fato de que o consumo para refrigeração representar apenas uns dos componentes do consumo energético da edificação, que em média representa 18% do consumo total (BRASIL, 2012). Destaca-se que, em visita ao local de implantação da habitação, constatou-se que uma minoria de edificações apresenta condicionadores de ar instalados nos dois dormitórios.

Tabela 5 – Valores mensais totais (noturnos) de Graus-Hora de Resfriamento e consumo mensal energético de refrigeração nas edificações implantadas no meio urbano e rural.

Meses	CHD – Total Graus-Hora mês (noturno)* °Ch/mês			Qc - Consumo energético mensal de refrigeração noturno para os quartos** KWh/mês		
	Urbano	Rural	Diferença	Urbano	Rural	Diferença
Setembro	4250 (938)	3043 (306)	1207 (632)	119	39	80
Fevereiro	1511 (230)	835 (41)	679 (189)	29	5	24
	°Ch/dia			KWh/dia		
Meses	Urbano	Rural	Diferença	Urbano	Rural	Diferença
Setembro	142 (31)	101 (10)	41 (21)	4,0	1,3	2,7
Fevereiro	54 (8)	28 (1,5)	26 (6,5)	1,0	0,2	0,8

*CHD e **Qc noturno – das 21 às 7h

Figura 7 – Consumo energético médio residencial na cidade de Cuiabá - MT por unidade consumidora (período chuvoso destacado em cinza).



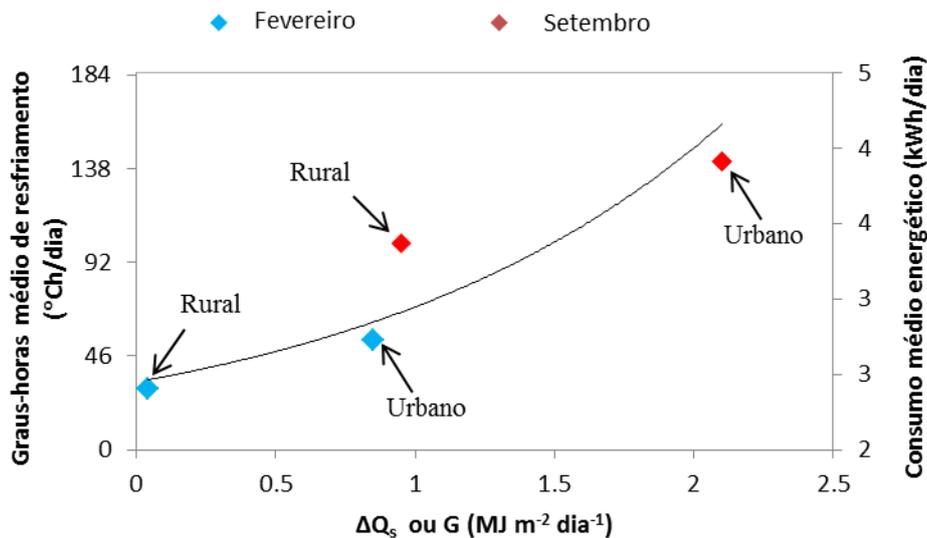
4.6 Relação entre Graus-Hora de Resfriamento (CHD) e Consumo Energético (Qc) e Energia Armazenada nos Dosséis Urbano (ΔQ_s) e Rural (G)

Os comportamentos observados e descritos estão relacionados à disponibilidade de energia no meio, bem como à energia armazenada no dossel urbano. Quanto maior a quantidade de energia disponível e armazenada no dossel, maior a quantidade de graus-hora necessários para resfriamento e consumo energético nas edificações. Com intuito de exemplificar a afirmação, plotou-se na Figura 8, o valor médio diário dos Graus-Hora de Resfriamento (CHD) e o consumo médio diário de energia para refrigeração (Qc) em função da energia armazenada no dossel urbano, para os períodos pesquisados. Tanto a energia

armazenada (ΔQ_s ou G) quanto os Graus-Hora de Refrigeração e o consumo energético na cidade e no meio rural, no mês seco, foram superiores ao mês chuvoso, sendo no meio urbano superior ao rural, nos dois meses pesquisados (Tabela 5, Figura 8). Quanto maior a energia estocada nos materiais (solo), maiores são as intensidades de trocas térmicas por condução e convecção entre o meio e a massa de ar que o envolve, elevando a temperatura do ar, o que demanda maior energia para promover a refrigeração dos ambientes da edificação, comportamento semelhante ao descrito anteriormente entre a energia armazenada no dossel urbano e a respectiva elevação da temperatura do ar.

Diante do comportamento observado, confirma-se a hipótese levantada anteriormente de que as edificações instaladas no meio urbano e no rural apresentam maiores valores de Graus-Hora de Resfriamento e consumo energético no mês de setembro em relação ao mês de fevereiro, em virtude da maior disponibilidade de energia no meio e maior estoque de energia. Assim como ocorreu com o estoque de energia, não se conseguiu estabelecer uma relação direta entre a energia disponível nos meios pesquisados com Graus-Hora de Resfriamento e consumo energético. Mais dados precisam ser coletados e pesquisados com visando estabelecer uma curva semelhante a plotada para o estoque de energia.

Figura 8 – Relação (ΔQ_s ou G) x CHD / Consumo energético para meses setembro (seco) e fevereiro (chuvoso).

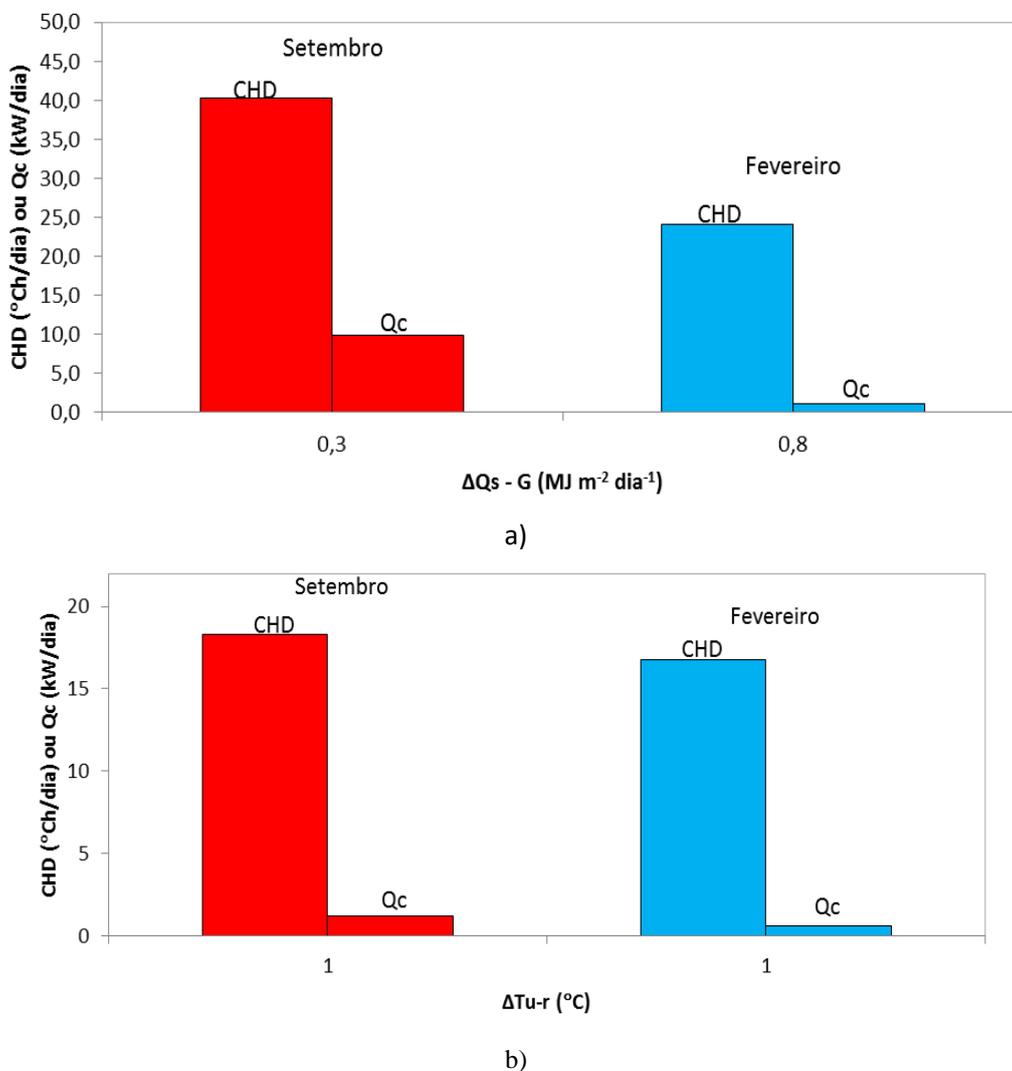


Ao se relacionar as diferenças entre Graus-Hora de Resfriamento e consumo energético para refrigeração com as diferenças entre energia armazenada nos dosséis urbano e rural, constata-se que $0,3\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de energia armazenada a mais na cidade foi responsável, no mês seco (setembro), por elevar em média CHD e o Q_c em aproximadamente 41°Ch/dia e $2,7\text{kWh/dia}$. No mês chuvoso (fevereiro), apesar da maior disponibilidade de energia no dossel urbano ($0,8\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), a elevação foi menor, em média 26°Ch/dia e $0,8\text{kWh/dia}$ (Figura 9). Isso se deve ao fato de ter havido maior quantidade de energia disponível no sítio rural, pouco armazenamento de energia no solo e grande quantidade de energia sendo destinada para promover a evaporação da água nesse meio (fluxo de calor latente), além da menor quantidade de energia sendo destinada para os fluxos convectivos (em média 30% menores) (CALLEJAS, 2016).

Ao se relacionar a ICU com os CHD e Q_c , observa-se que houve elevação de $1,0^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar do meio urbano em relação ao rural durante o mês setembro (seco) e elevação em, aproximadamente, 18°Ch/dia nos CHD e $1,2\text{kWh/dia}$ no Q_c . No mês de fevereiro (chuvoso), essa mesma elevação de $1,0^{\circ}\text{C}$ provocou em média 17°Ch/dia no CHD e $0,6\text{kWh/dia}$ no Q_c . Nota-se que a elevação nos Graus-Hora de Resfriamento ocorreu de forma

semelhante em ambos os períodos e que o consumo energético de refrigeração foi metade do observado no mês seco. Isso se deve ao fato de que o desenvolvimento da ICU ocorre, principalmente, pela maior dissipação dos fluxos turbulentos convectivos de calor sensível para o ar na cidade, principalmente no período noturno, e como houve maior intensidade de calor sensível por condução térmica armazenado nos materiais artificiais instalados na cidade no período seco, este acabou provocando maior elevação de consumo energético para refrigeração nesse período. É importante destacar que os fluxos de calor sensível convectivos se mantiveram com intensidades superiores no meio urbano em relação ao meio rural (em média 30%) tanto em setembro quanto em fevereiro. Por outro lado, o fluxo de calor latente no meio rural foi em média 50% superior ao meio urbano em ambos os períodos (CALLEJAS et al., 2016). Isso justifica as maiores intensidades tanto de CHD quanto de Q_c observadas durante o mês seco em relação ao mês úmido. Constata-se que elevação dos Graus-Hora de Resfriamento e consumo energético não se relacionaram de forma direta com a elevação da ICU por ser esta dependente tanto dos fluxos de calor sensível quanto dos fluxos de calor condutivo entre os meios.

Figura 9 – Relações mensais entre (a) $(\Delta Q_s - G)$ ou (b) ΔT_{u-r} e CHD ou Q_c .



5. CONCLUSÕES

O saldo de energia disponível (Q^*) no meio urbano, no mês seco, foi superior no meio rural, enquanto no mês chuvoso ocorreu comportamento inverso. O estoque de calor sensível condutivo (ΔQ_s) no meio urbano sempre se manteve superior ao rural em ambos os meses pesquisados, em virtude dos materiais artificiais utilizados no meio urbano e a maior quantidade de superfícies ativas (cânions urbanos). Estes comportamentos ajudam a explicar o fenômeno de ilha de calor urbana (ICU) evidenciada na região pesquisada, com maior intensidade observada em setembro.

Na relação entre a intensidade de ilha de calor urbana e a diferença entre a energia armazenada nos dosséis urbano e rural ($\Delta Q_s - G$) e /ou saldo de energia disponível nos meios urbano e rural ($Q_u^* - Q_r^*$), no mês seco, cada $0,3\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de energia estocada a mais no meio urbano do que no rural corroborou para elevar a temperatura do ar em $2,2^\circ\text{C}$, em média. No mês chuvoso, a diferença reduziu para $1,8^\circ\text{C}$ para cada $0,8\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A menor taxa no período úmido ocorreu em função da maior disponibilidade de energia no meio rural e menor diferença de estoque de energia entre os meios. Outros fatores influenciaram, como as trocas térmicas por condução ocorridas durante os períodos de chuva, maior destinação de energia para evaporação da água (fluxo de calor latente) e maior disponibilidade de umidade nos materiais. Não foi possível estabelecer uma relação direta da energia disponível entre o meio urbano e rural e a intensidade de ICU.

A ICU impactou tanto nos Graus-Hora de Resfriamento quanto no consumo do energético das edificações hipoteticamente instaladas nos meios urbano e rural. A taxa de elevação de CHD por unidade de diferença de temperatura foram praticamente iguais entre os períodos. Porém, em relação ao consumo energético, constatou-se redução de 50% no consumo da cidade entre o mês seco e chuvoso. Atribui-se o comportamento às mesmas razões e fatores exemplificados no parágrafo anterior.

Notou-se que existe relação não linear entre o fluxo de calor sensível armazenado por condução térmica nos materiais presentes entre os meios e os Graus-Hora de Resfriamento e consumo energético na edificação pesquisada. Duas conclusões puderam ser estabelecidas: quanto maior o estoque de calor sensível armazenado no meio, maior a quantidade de Graus-Hora de Resfriamento e maior o consumo energético nas edificações; e que, no mês chuvoso, houve menores taxas de armazenamento de calor sensível por condução devido as trocas térmicas que ocorrem durante o período de chuva e, também, devido a parcela de energia ser utilizada para a evaporação da água (calor latente de evaporação), provocando redução tanto nos graus-horas de resfriamento quanto no consumo energético nas edificações neste período.

A intensidade de ilha de calor urbana foi responsável por influenciar os Graus-Hora de Resfriamento e o consumo energético das edificações. Nota-se que desenvolvimento da ICU se dá, principalmente, pela maior dissipação dos fluxos turbulentos convectivos de calor sensível para o ar na cidade, principalmente no período noturno, em virtude da maior taxa de armazenamento de calor sensível por condução térmica nos materiais artificiais instalados, responsável por alimentar a convecção no período noturno. Devido a sua dependência com o fluxo de calor sensível armazenado no dossel urbano, a relação não se dá de forma direta, havendo a necessidade de se analisar tanto a intensidade dos fluxos de turbulentos de calor sensível convectivos quanto os fluxos de calor sensível condutivo ($Q_H/\Delta Q_s$).

Concluiu-se que, no mês de setembro, foram utilizados $4,6\text{kW}/(\text{m}^2 \text{ mês})$ a mais de energia no meio urbano do que no rural para manter as mesmas condições térmicas dos dormitórios, enquanto no mês de fevereiro, utilizou-se $1,4\text{kW}/(\text{m}^2 \text{ mês})$. Os resultados encontrados ratificaram a hipótese de que as edificações sob o efeito do fenômeno de ilha de calor urbana requerem maior dispêndio energético para a manutenção das mesmas condições de habitabilidade de uma habitação instalada no meio rural.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 449, de 25 de novembro de 2010**, Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:< [http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/ RTAC 001462. pdf](http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC_001462.pdf)>. Acesso em: 03 Ago, 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2012: Ano Base 2011**. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

BUYUKALACA, O.; BULUT, H.; YILMAZ, T. Analysis of variable-base heating and cooling degree-day for Turkey. **Applied Energy**, v. 68, n. 3, p. 269-283, 2001.

CALLEJAS, I. J. A.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; BIUDES, M. S.; DURANTE, L. C. Seasonal variation of surface energy balance of a Central Brazil City. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n. 3, p.85-106, 2016.

CALLEJAS, I. J. A. **Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT**. Cuiabá, 2012. 265f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; SILVA, R. A. F.; OLIVEIRA, A. S. Verificação dos requisitos normativos de desempenho térmico em habitação de interesse social implantada em zona bioclimática 7. **In: 5 Seminário de Habitação de Interesse Social, V SHIS, Cuiabá-MT, 2013. Anais do 5º Seminário de Habitação de Interesse Social, 2013.**

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**

CANEPPELE, L. B.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Validação do modelo de simulação térmica em edifício residencial unifamiliar localizado em clima tropical continental. **In: 1º Encontro de Engenharia de Edificações e Ambiental, 2013, Cuiabá-MT. Anais do 1º Encontro de Engenharia de Edificações e Ambiental, 2013.**

ENERGISA. Rede Energisa. **Dados Estatísticos**. Disponível em: <<http://www.redenergia.com/>>. Acesso em: 4 julho 2013.

COSTA, J. E. F. M. **Estudo da influência da área verde no clima urbano: o caso do Parque Mãe Bonifácia em Cuiabá- MT.** Trabalho de conclusão de Curso, Departamento de Geografia. Universidade Federal do Mato Grosso, 1999.

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. Brasil, 2010.

DURMAYAZ, A.; KADIOGLU, M.; SEM, Z. An application of the degree-hours method to estimate the residential heating energy requirement and fuel consumption in Istanbul. **Energy**, n. 25, p. 1245 – 1256, 2000.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R. Dados climáticos para uso em cálculos simplificados de consumo de energia. **In:** Conforto no ambiente construído, III Encontro Nacional – I Encontro Latino – Americano, 1995.

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.

IBGE. Instituto Brasileiro de Pesquisas Geográficas. **Estimativas Populacionais 2010.** Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: mar/ 2022.

IPDU. Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento Urbano. **Perfil Socioeconômico de Cuiabá, V. III**, Cuiabá: Central de Texto, 2007.

KIM, Y. H. e BAIK, J. J. Spatial and temporal structure of urban heat island in Seoul. **American Meteorological Society**, 44, p. 591-605, 2005.

LI, J.; WANG, X. R.; WANG, X. J.; MA, W.; ZHANG, H. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China. **Ecological Complexity**. v.6, 4ed. , p. 413-420, 2009.

LINDBERG, F.; GRIMMOND, C.S.B.; YOGESWARAN, N.; KOTTHAUS, S.; ALLEN, L. Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995–2015. **Urban Climate**, v.4, p. 1–15, 2013.

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.

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. Disponível em: http://www.forumpatrimonio.com.br/view_full.php?articleID=183&modo=1. Acesso em: 4 julho 2021.

MENDONÇA, F. O. Clima Urbano de Cidade de Porte Médio e Pequeno: Aspectos Teórico-Metodológicos e Estudos de Caso. Sant’Anna Neto, J. L.; Zavantini, J.A. (orgs).

Variabilidade e Mudanças Climáticas: Implicações Ambientais e Socioeconômicas. Maringá: Eduem, 2000.

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.

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. 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. **World Meteorological Organization.** Canadá, 2006.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** 2ed. Routledge and John Wiley and Son; London, New York, 1987.

Oliveira, A.S.; Santos, F.M.S.; Nogueira, M.C.J.A. et al. / Análise da variação de temperatura e umidade. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 1, p. 240-251, 2009.

PINHO, J. G. **A Evolução da Intensidade da Ilha de Calor em Cuiabá–MT: 1990 a 2002.** Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geografia, Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2003.

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.

SANTOS, F. M. M. **Influência da ocupação do solo na variação termo higrométrica na cidade de Cuiabá-MT.** Cuiabá, 2012. 88f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

SANT’ANNA NETO, J. L. Mudanças Climáticas Globais: Implicações no Desenvolvimento Econômico e na Dinâmica Natural. *Revista Pantaneira*, v. 2, n. 2, p. 66-78, 2000.

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, 1990–1991.

