

## **INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA URBANA E DA INÉRCIA TÉRMICA NA ALTERAÇÃO DO CLIMA URBANO: UMA ABORDAGEM PREDITIVA**

**Iara Gonçalves dos Santos; Henrique Gazzola de Lima; Eleonora Sad de Assis**

Escola de Arquitetura - Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Paraíba, 697 - 30130-140 -

Belo Horizonte - MG, Fone (31) 32691823, FAX (31) 32691822

e-mail: [iaragds@yahoo.com.br](mailto:iaragds@yahoo.com.br)

### **RESUMO**

Os assentamentos urbanos podem impactar o clima local em menor ou maior grau, conforme a interação das características do espaço natural e construído. Este trabalho apresenta um procedimento para o estudo e previsão de alterações climáticas para efeito de planejamento urbano, a partir do monitoramento de uma área do bairro Floresta, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Desenvolve-se em torno da análise de dois aspectos da configuração urbana influenciados pela legislação construtiva, numa perspectiva de geração de parâmetros para um planejamento urbano climaticamente responsável. São eles: o Fator de Visão de Céu (FVC) e a Massa Construída (MC), as duas principais variáveis urbanas da ilha de calor noturna. Apresenta-se aqui a associação das duas variáveis com dados climáticos obtidos através de levantamento de campo, usando uma estação climatológica móvel. Os resultados indicam correlações e tendências capazes de servirem como base de previsão e instrumento para a incorporação de parâmetros ambientais no planejamento urbano.

### **ABSTRACT**

The urban settlements can effect the local climate in minor or greater degree, according to the interaction between natural and built space characteristics. This paper presents a procedure for the study and forecast of the climatic alterations from the point of view of the decision making in urban planning, taking as case-study a neighborhood in the city of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. It approaches two aspects of the urban configuration directly influenced by the building legislation, in order to contribute for the generation of parameters for a climatically responsible urban planning: the Sky View Factor (FVC) and the Building Mass (MC). These are the two main urban variables of the nocturnal heat island. The association of these terms with climatic data collected through field survey is presented here. The results indicate correlations and trends capable of serving as a base of predictive climate and urban fabric interactions and instrument for incorporation of environment parameters in urban planning.

### **1. INTRODUÇÃO**

Apesar dos extensos estudos da climatologia urbana, há uma escassez de trabalhos em áreas tropicais, principalmente os de caráter quantitativo e preditivo. São mais comuns as pesquisas descritivas, que ajudam a compreender o comportamento climático na cidade, porém não contêm perspectivas de aplicação prática no planejamento urbano.

Para tanto, é necessário desenvolver modelos preditivos que possam auxiliar a tomada de decisão no processo de planejamento. Assim, este estudo procura desenvolver abordagens quantitativas e de caráter

preditivo, avaliando a influência da geometria urbana e da inércia térmica das construções na alteração do clima urbano. Estas são as principais variáveis urbanas envolvidas na alteração do balanço energético local (OKE, 1981), sendo, ademais, controláveis pela legislação urbana.

A cidade pode ser entendida como um sistema físico pelo qual flui energia térmica, nas suas diversas formas, e a maneira como se dão esses fluxos influencia o conforto térmico urbano. Sabe-se, pela primeira lei da termodinâmica, que a energia não é criada nem destruída, mas convertida de uma forma para outra, o que implica que a quantidade de energia aportada na cidade é equivalente à quantidade de energia dissipada, somada a uma parcela que fica armazenada internamente no sistema (OKE, 1978). A parcela armazenada no balanço energético local é substancialmente modificada com a urbanização, com o desenvolvimento de um perfil urbano pouco adequado à dissipação de calor, bem como com o aumento da quantidade de massa passível de armazenar energia térmica.

Um dos fatores apontados como causa da formação da ilha de calor noturna é a geometria urbana, que pode ser descrita pelo Fator de Visão de Céu (FVC), ou ângulo de obstrução do horizonte local. Tendo-se em vista fatores como dimensões da caixa viária, o grau de arborização e o tipo de pavimentação, demonstrou-se que quanto menor o valor de FVC, ou seja, quanto mais obstruído é um local no meio urbanizado, menor a troca térmica radiativa com o meio (OKE, 1981). Isso provoca aumento de temperatura pela dificuldade de irradiação térmica, favorecendo a ocorrência da ilha de calor nas áreas urbanas mais densas e verticalizadas.

O segundo fator, a inércia térmica, foi abordado através da análise da correlação entre a Massa Construída (MC) e a temperatura do ar seco de determinadas áreas urbanas. Sabe-se que a curva horária de temperatura ao longo das 24h tende a diminuir de amplitude em locais com mais massa construída, já que as construções armazenam parte do calor do balanço energético durante o dia, dissipando-o à noite. Dessa maneira, locais mais adensados tendem a apresentar menores picos de temperatura.

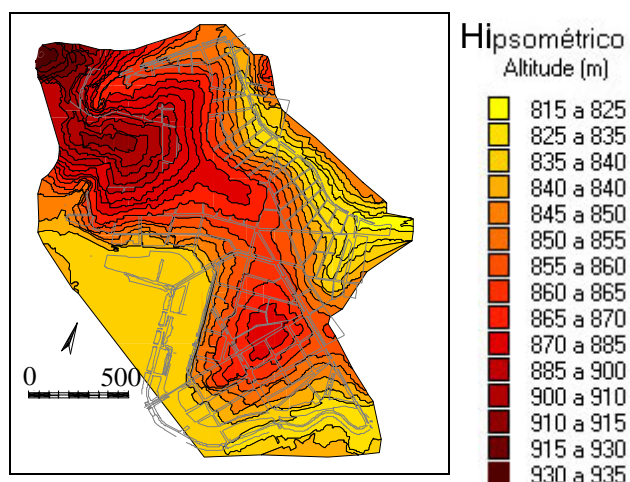
Este trabalho apresenta uma abordagem experimental, correlacionando esses dois fatores com dados de temperatura obtidos em pesquisa de campo.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no pericentro da cidade de Belo Horizonte, metrópole localizada a uma altitude média de 875m, a 19°55' de latitude sul e 43°56' de longitude oeste no estado de Minas Gerais, Brasil. Abrange o bairro Floresta, cuja topografia é constituída por duas colinas cercadas por avenidas sanitárias de fundo de vale e um ribeirão canalizado – o Arrudas – além de outras importantes vias de ligação regional da cidade (figura 1).



**Figura 1a – Localização da área de estudo no município de Belo Horizonte**



**Figura 1b – Topografia do bairro Floresta.**

É predominantemente ocupado por residências de um pavimento, mas propenso a fortes transformações de uso e ocupação devido à legislação atual classificá-lo como zona de adensamento preferencial, implicando em um dos mais altos coeficientes construtivos da cidade.

### 3. METODOLOGIA

Para este estudo foram selecionados pontos na área urbana para amostragem dos parâmetros de FVC e MC, nos quais mediu-se dados de temperatura, umidade relativa e direção e velocidade de ventos. Para maior segurança da plotagem automática dos dados climáticos, evitando-se distorções de interpolação dos dados na área limítrofe aos pontos selecionados, e determinação do FVC e da MC, em vários outros pontos do bairro também foram realizadas medidas. Os valores de FVC e MC foram calculados segundo metodologias específicas (ASSIS, 2000; TSO, 1990, respectivamente) e correlacionados aos dados de temperatura do ar obtidos em campo, usando gráficos de dispersão.

#### 3.1 Escolha dos pontos

Selecionaram-se no bairro 33 pontos de medição. Nove deles foram referência para estudo do Fator de Visão de Céu (FVC) e cinco para a Massa Construída (MC). O número total de pontos amostrados foi programada para um tempo máximo de medição por circuito, segundo recomendação da literatura especializada (KATZSCHENER, 1994; ASSIS, 2000).

A escolha dos pontos foi feita sobre um mapa-base de altura das edificações na qual também constava em escala as dimensões das respectivas caixas viárias, dado importante para o FVC. Utilizou-se também o mapa topográfico da área, prevendo-se a relação das variáveis em estudo com esta característica física do local. Evitou-se as ruas inclinadas a mais de 30°, pois se exigiria nivelar o equipamento para se medir a direção de vento corretamente.

Os pontos foram localizados preferencialmente no meio de quarteirões, como mostra a figura 2 (OKE, 1981). Formavam entre si triângulos, aproximadamente equiláteros, próximos o suficiente para cobrir toda a malha da área ou extrapolando-a quando para garantir maior coerência na geração computacional das isolinhas relativas às variáveis climáticas (figura 3).

Os pontos foram agrupados para formar dois circuitos cujo percurso em automóvel, somando-se o tempo de espera para estabilização da leitura dos sensores, não excedesse o total de 60 minutos para cada um, a partir do qual haveria uma grande discrepância em relação à medição simultânea de todos os pontos, o que seria o ideal. Para estimativa do tempo máximo gasto em cada medição foram feitos testes preliminares na área, nos quais a velocidade do veículo foi mantida a 40km/h. Permaneceu-se dois minutos em cada ponto para simular o tempo necessário para estabilização dos sensores.

Para o estudo do FVC, tentou-se identificar pares de pontos pouco distantes entre si (o que suporia semelhança climática e altimétrica) com ângulos de obstrução contrastantes, mas em locais parecidos quanto aos materiais de revestimento das edificações do entorno imediato, dimensões e tipo de pavimentação da caixa viária, orientação solar, para que a comparação dos resultados fosse mais fácil.

Para a escolha dos cinco pontos específicos para o estudo da MC, dividiu-se o bairro em cinco sub-áreas que apresentam certa homogeneidade interna quanto à tipologia dos edifícios e densidade construtiva. Estas sub-áreas tiveram seus respectivos valores de parâmetro MC calculados, com auxílio de um software GIS, como detalhado adiante. A cada um dos 33 pontos medidos em campo, foi atribuído o valor da MC das sub-áreas que os contém, para geração de um gráfico de dispersão, tendo os valores de MC no eixo das abcissas e as temperaturas no eixo das ordenadas. Os cinco pontos que mais se aproximavam da linha de tendência foram selecionados como os pontos típicos, obedecendo, também, à condição de não se situarem muito próximos aos limites do bairro, além dos quais não se dispunha de dados sobre a ocupação do solo. A partir de cada um desses pontos típicos, desenhou-se um círculo com 300m de raio<sup>1</sup>, formando áreas circulares em torno dos pontos, que

---

<sup>1</sup> O valor escolhido do raio é o mesmo do parâmetro altura que no modelo de TSO (1990) define a escala vertical da camada limite urbana ao nível das coberturas, que é a escala climática de interesse para os estudos de aplicação no, planejamento urbano.

tiveram também os valores de MC calculados. Algumas partes dessas áreas circulares transcenderam os limites do bairro e foram removidas do cálculo.

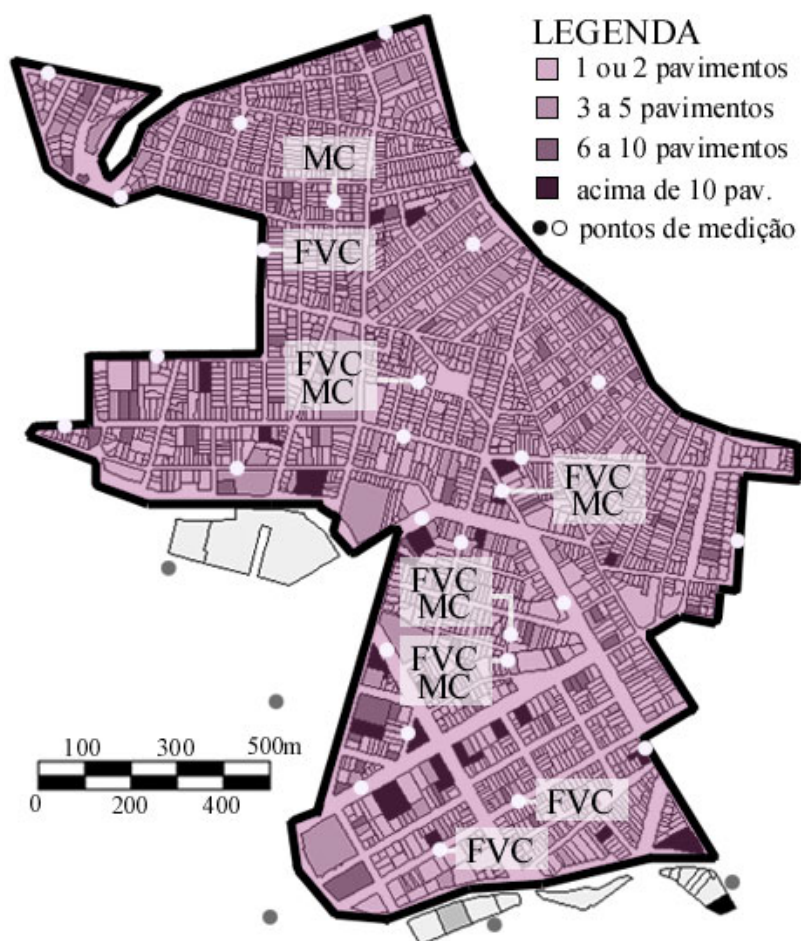


Figura 2 – Mapa de verticalização do bairro e localização dos pontos de medição

### 3.2 Instrumentação de Medição

O equipamento utilizado foi uma estação climática ELE MM900-8 composta dos sensores de temperatura e umidade integrados, velocidade e direção de ventos ligados a um *datalogger*. A estação foi montada em um suporte projetado para ficar sobre o carro de forma que as medidas fossem tomadas a 2,00m do chão. As hastes do suporte, em metalon, foram pintadas de branco para evitar absorver radiação solar. A placa de sustentação foi feita em compensado de madeira pintado de verde para diminuir a influência da reflexão da luz solar ou da carga térmica emitida pela carcaça do automóvel.

Para as imagens necessárias ao cálculo do FVC foi usada uma câmera fotográfica digital com lente olho-de-peixe, que produz imagens em projeção equidistante. Sugere-se que o Norte esteja marcado na lente e que ela esteja nivelada sobre o solo. Qualquer elemento não inerente à paisagem urbana que se registra deve ser evitado para não interferir na correta marcação da linha de obstrução do céu.

### 3.3 Medição dos Dados Climáticos

As medidas foram feitas no verão, em um dia de tempo calmo e céu claro (OKE, 1981), entre 13 e 14 de fevereiro de 2003, durante três períodos. O primeiro, das 14:30 às 16:00, passaria pelo ponto de intercessão dos circuitos às 15:00 (período previsto de ocorrência das máximas temperaturas do dia). O segundo, de 19:00 às 21:20, chegaria ao ponto de intercessão às 18:30, horário estimado pela carta

solar local como o de pôr do sol. Por último, das 04:30 às 06:00, com nascer do sol estimado para as 05:45 horas. A primeira medida foi tomada à tarde, já que a condição climática favorável neste horário costuma se prolongar até o dia seguinte, evitando-se, com isso, perda da medida por mudança no tempo atmosférico (SEZERINO e MONTEIRO, 1990).

Deu-se preferência a medidas com trânsito parado (semáforo fechado), evitando rajadas de vento provocadas por veículos em movimento. Os medidores de vento foram imobilizados manualmente em cada ponto, para que a velocidade inerente à inércia do automóvel fosse desconsiderada. Não foi possível medir em um dia de trânsito menos congestionado, como em um final de semana ou feriado, como seria ideal. Em conseqüência, ultrapassou-se o tempo previsto em alguns minutos, o que não chegou a prejudicar o experimento significativamente.

### 3.4 Tratamento de dados

A correção dos dados climáticos em cada horário foi linear (ASSIS, 2000), tomando como referência os valores medidos no ponto de interseção dos circuitos. Com estes resultados, gerou-se mapas de isolinhas de temperatura e umidade através de um software gerador de superfícies para interpretação do comportamento destas variáveis no período (figura 3).

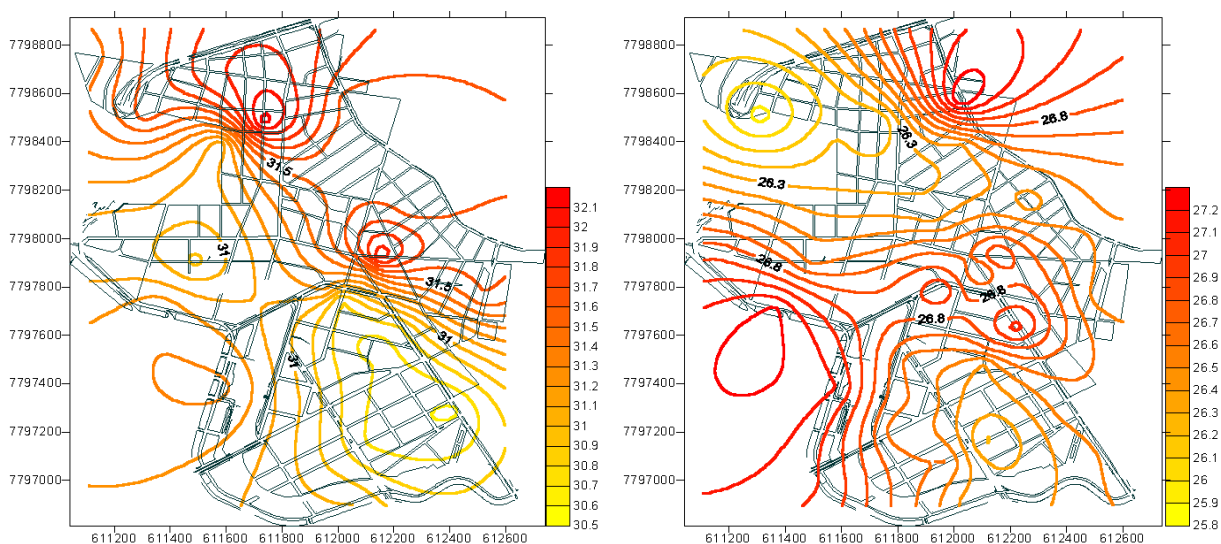


Figura 3 – Isotermas do dia 13/02/2003, às 15h e 19h, respectivamente.

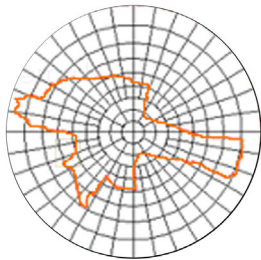
Para cálculo do FVC utilizou-se como ferramenta dois programas computacionais: através de um programa de desenho, fez-se o contorno da obstrução em cada um dos pontos a partir das fotografias; com um programa de geoprocessamento sobrepôs-se cada contorno a um diagrama de fator de forma da abóbada celeste (SOUZA, 1997), de projeção também equidistante, calculando automaticamente as áreas de obstrução de céu pelas construções (figura 4).

O cálculo da MC baseou-se na área total de planta e na área de fachada de cada edificação contida dentro dos limites de cada uma das cinco sub-áreas urbanas, considerando-se todas as construções compostas por concreto, devido às suas propriedades térmicas semelhantes às de outros materiais de construção comuns (TSO et al., 1990). A área total de uma edificação foi calculada através da área de projeção, multiplicada pelo número de pavimentos. Já a área de fachada obteve-se a partir do perímetro multiplicado pela altura da construção. Consideraram-se as lajes com a espessura de 10cm e as paredes externas com 20cm, para a estimativa do volume de material utilizado. As paredes internas foram desconsideradas por não alterarem significativamente a inércia térmica de uma construção. O volume de material foi multiplicado pela densidade média do concreto e dividido pela área na qual está contido, obtendo-se um valor de massa por unidade de área (figura 5). A Tabela 1 mostra os resultados obtidos.



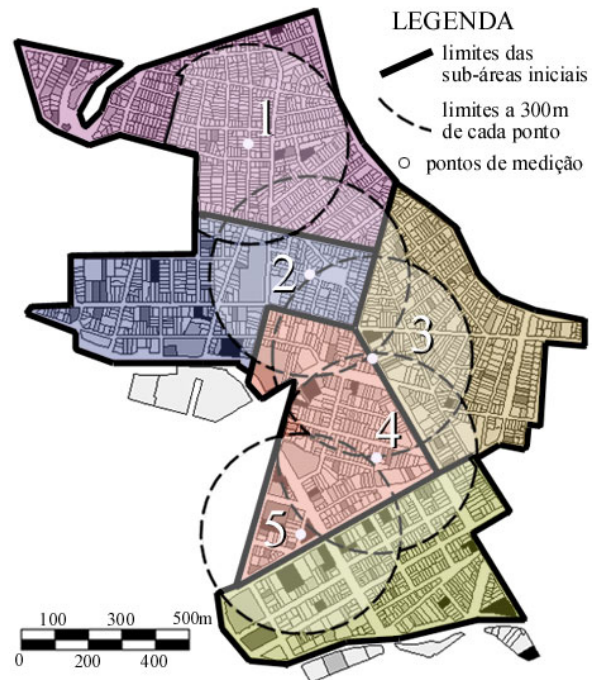


(a)



(b)

**Figura 4 – Superposição de uma imagem do local (a) ao Diagrama de fator de forma (b) para cálculo do FVC.**



**Figura 5 – Localização dos pontos e suas áreas adjacentes e delimitação das sub-áreas iniciais para o cálculo da MC.**

**Tabela 1 – Características das cinco áreas analisadas (MC)**

Ponto	Área adjacente (m <sup>2</sup> )	Área piso (m <sup>2</sup> )	Área fachadas (m <sup>2</sup> )	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	MC (kg/m <sup>2</sup> )
1	247,411	186,133	45,505	27,714.30	268.84
2	283,710	272,317	43,284	27,714.30	303.59
3	281,077	302,028	44,290	39,060.80	333.52
4	320,291	320,291	38,036	39,636.30	337.34
5	283,709	283,709	25,118	38,640.00	326.87

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o tratamento dos dados, fez-se uma seleção dos pontos mais representativos, eliminando-se aqueles nos quais havia dúvidas sobre a qualidade da medida, interferência de correntes de ar ou outros fenômenos indesejados. Através de planilha eletrônica foram gerados os gráficos de dispersão mostrados nas figuras 6 e 7.

Na primeira seqüência, que trata do FVC, encontrou-se uma correlação negativa de 67,94% para o horário das 19h (após o pôr do sol). Isto traduz uma tendência de haver aquecimento maior neste período do dia nas áreas mais obstruídas, horário característico de formação da ilha de calor urbana. Esta tendência mantém-se até às 5h, para o qual encontrou-se uma correlação negativa de 55,81%, o que demonstra a maior dificuldade de dissipação do calor acumulado durante o dia também nas áreas mais obstruídas, como previsto. No horário das 15h, a correlação foi praticamente nula. As equações de correlação encontradas estão expressas a seguir. Como indicam tendências reais, com elas pode-se estimar as alterações locais na temperatura do ar (T), dadas as alterações na variável FVC, relacionada ao processo de adensamento e verticalização previsto pela lei.

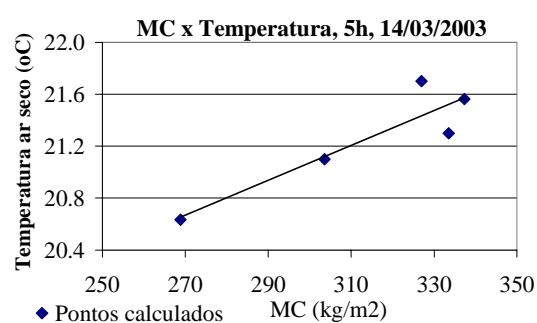
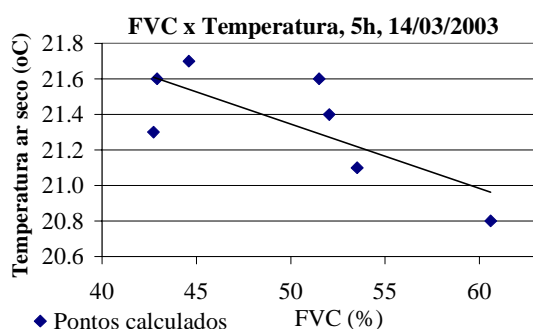
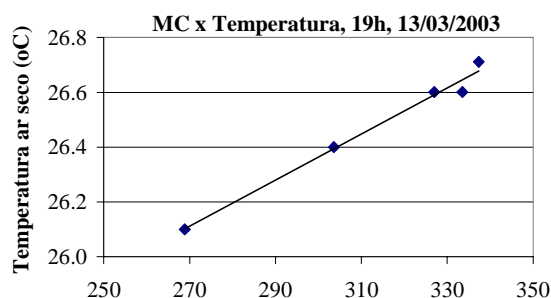
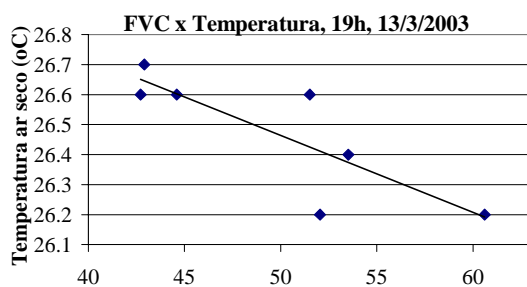
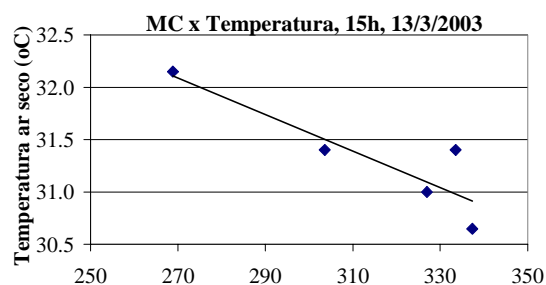
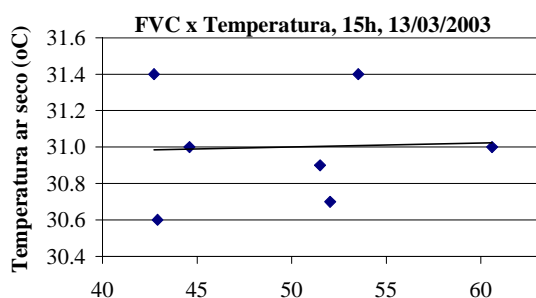
$$T = (-2,56 \times 10^{-2} \times FVC) + 27,75 \quad (\text{para as 19h}) \quad [\text{Eq.01}]$$

$$T = (-3,62 \times 10^{-2} \times FVC) + 23,16 \quad (\text{para as 05h}) \quad [\text{Eq.02}]$$

A correlação entre a temperatura do ar e a MC também foi mais significativa para a medição das 19h, atingindo um coeficiente de correlação bastante elevado (98,59%). Nos outros horários, também confirmou-se a tendência de alteração do comportamento da temperatura em função da maior inércia térmica nas áreas mais densas, com linhas de tendências de inclinações positiva às 5h e negativa às 15h (coeficientes de correlação 82,86% e 78,63% respectivamente). Com base nesses resultados, é possível prever o impacto do adensamento sobre variáveis do clima ligadas ao conforto térmico, com base nas seguintes funções lineares:

$$T = (8,40 \times 10^{-3} \times MC) + 23,84 \quad (\text{para as 19h}) \quad [\text{Eq.03}]$$

$$T = (1,34 \times 10^{-2} \times MC) + 17,04 \quad (\text{para as 05h}) \quad [\text{Eq.04}]$$



**Figura 6 – Gráficos de dispersão FVC x Temperatura, com linhas de tendência.**

**Figura 7 – Gráficos de dispersão MC x Temperatura, com linhas de tendência.**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relativa homogeneidade da paisagem urbana na área de estudo não permitiu a obtenção de FVC's muito variados, o que provocou uma concentração de pontos com valores entre 45% e 55%, dificultando a percepção da variação da temperatura e umidade, o que provavelmente acarretou a indeterminação de correlações significativas entre os recintos urbanos e das variáveis medidas. Ainda assim, apontaram a tendência de ocorrência de temperaturas mais elevadas e umidades mais baixas nos pontos mais obstruídos (com menor FVC).

Apesar da simplicidade da abordagem da MC, boas correlações com a temperatura do ar foram alcançadas, fornecendo base para previsões de alterações climáticas futuras no recinto urbano a partir da análise de cenários de adensamento previstos no bairro. As equações obtidas somente são válidas para a região estudada e o estudo somente foi feito para o verão. O monitoramento deverá ser estendido para outros períodos do ano, de modo a gerar um quadro mais amplo das condições locais. Para uma aplicação mais genérica, estão também em estudo modelos mais complexos, já aplicados em outras cidades em diferentes continentes, capazes de gerar uma curva horária de temperatura estimada, a partir de dados locais da estrutura urbana.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, patrocinadora do Programa de Aprimoramento Discente (PAD), dentro do qual este trabalho foi desenvolvido.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, E. S. (2000) *Impactos da forma urbana na mudança climática: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. São Paulo, 273p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de São Paulo.
- KATZSCHNER, L. (1994). *Stadtklima und Städtebauliche Struktur Folgenrungen für die Planung*. Kassel, Tese (Doutorado em Engenharia) – Universität Gesamthochschule Kassel.
- OKE, T. R. (1978) *Boundary Layer Climates*. New York: Halsted, 372p.
- OKE, T. R. (1981) Canyon geometry and the nocturnal heat island: comparisons of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, vol.1. p. 237-254, 1981.
- SEZERINO, M.L. e MONTEIRO, C.A.F. (1990). O campo térmico da cidade de Florianópolis: primeiros experimentos. *Geosul*, nº 9, p.20-60.
- SOUZA, R. V. G. (1997) *Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias-desenvolvimento de ferramenta simplificada*. Florianópolis, 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- TSO, C. P. et al. (1990) An improvement to the energy balance model for urban thermal environment analysis. *Energy and Buildings*. nº14, p. 143-152.