

# Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre

*Sky view factor and urban heat islands intensity at the pedestrian level*

Lea Cristina Lucas de Souza  
Cezar Mecozzi Tente  
Mariene Benutti Giunta  
Camila Mayumi Nakata

## Resumo

**A** falta de ferramentas disponíveis para a tomada de decisões no planejamento urbano baseado nas interações entre clima e cidade é um desafio para o arquiteto e para o urbanista. Apesar da existência de alguns modelos destinados a esse fim, as limitações para sua aplicação dificultam ainda mais o quadro. Procurando gerar informações que colaborem com essa área, este artigo tem por objetivo avaliar o papel do fator de visão do céu na intensidade de ilhas de calor em um bairro residencial. Primeiro, foram feitas caracterizações da área de estudo e determinação da geometria urbana, utilizando-se como unidade geométrica o fator de visão do céu. Foram selecionados pontos de referência e realizadas medições de temperatura do ar em cânions urbanos. A partir de dados disponibilizados pela estação meteorológica localizada em área rural, foram feitas comparações entre os pontos e a área rural, gerando dados de intensidade das ilhas de calor. Através da identificação das tendências térmicas da área, os dados de máxima intensidade da ilha noturna em cada ponto serviram de base para a comparação com um modelo empírico. Propôs-se uma equação de correção, e dados reais de pesquisas anteriores foram comparados com dados simulados pela nova equação. Os resultados indicam que a temperatura urbana noturna varia de acordo com a faixa de fator de visão do céu considerada.

**Palavras-chave:** Fator de visão do céu. Ilha térmica urbana. Geometria urbana.

**Lea Cristina Lucas de Souza**  
Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Universidade Federal de São Carlos  
Rodovia Washington Luis, km 235, Monjolinho  
Caixa Postal 676  
São Carlos - SP - Brasil  
CEP 13565-905  
Tel.: (16) 3351-9692  
Email: leacrist@ufscar.br

**Cezar Mecozzi Tente**  
Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo  
Universidade Estadual Paulista Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, Bauru - SP- Brazil  
CEP 17033-360  
Tel.: (14) 3301-6059  
E-Mail: cezar\_malu@yahoo.com.br

**Mariene Benutti Giunta**  
Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo  
Universidade Estadual Paulista  
Tel.: (14) 3301-6059  
E-mail: marigiunta@hotmail.com

**Camila Mayumi Nakata**  
Pós-Graduação em Design  
Universidade Estadual Paulista  
Tel.: (14) 3301-6057  
E-mail: camilanakata@yahoo.com.br

Recebido em 07/03/10  
Aceito em 04/08/10

## Abstract

*The lack of available tools to support planning decisions based on the interactions between climate and the city is a challenge for architects and urban planners. Although there are models designed for this specific purpose, the restrictions faced in their application further complicate the situation. This study aims contribute with additional information on the subject by focusing on the role played by the sky view factor in the urban heat island intensity. First, the residential neighbourhood taken as study area was characterized and its urban geometry determined. The geometric unit in this case was the sky view factor. Subsequently, reference points in urban canyons were selected and their air temperatures measured. The urban heat island intensity was identified by comparing temperatures measured by a rural meteorological station and those registered at the urban spots at the same time. Through the identification of the area's thermal trends, the data on the nocturnal urban islands' maximum intensity were compared with those obtained through an empirical model. A correction equation was suggested and real data from previous studies in the same area were compared with these adjusted results. The results indicate that the nocturnal urban temperature in this area varied according to the range of the sky view factors considered.*

**Keywords:** Sky view factor. Urban heat island. Urban geometry.

## Introdução

A interação entre o clima e as formas de ocupação e uso do solo é um dos grandes desafios atuais para o planejamento urbano. Em consequência das trocas de calor e alterações apresentadas no balanço de energia, o clima da cidade apresenta características específicas que o fazem diferir das áreas rurais, sendo a formação de ilhas de calor urbana um dos fenômenos climáticos mais característicos dessa modificação térmica.

Apesar dos diversos estudos hoje existentes sobre esse assunto, poucas são as ferramentas práticas disponíveis para que possam ser estabelecidas diretrizes de planejamento urbano. Esse quadro se agrava ainda mais quando considerado o caso de cidades localizadas em países em desenvolvimento, para os quais frequentemente existe uma carência de dados básicos para esse fim. Erell e Williamson (2007) comentam que a maioria dos trabalhos de campo sobre ilha de calor está baseada em uma amostragem de curto espaço de tempo, porque o custo de manutenção ou, muitas vezes, atos de vandalismo limitam os experimentos. Grande parte dos estudos que apresentam uma base de dados climáticos de longo período está concentrada em pesquisas para cidades de latitude média e, na maioria das vezes, para situação de inverno.

Na busca por um melhor entendimento das interações entre o clima e a cidade, pesquisadores desenvolvem modelos que encontram suas bases em fatores meteorológicos ou em características genéricas da estrutura urbana (KARATASOU; SANTAMOURIS; GEROS, 2006). Quanto a este último, destacam-se os modelos desenvolvidos por Oke (1981, 1982). Raydan e Stemeers (2006) apontam que os trabalhos de Oke foram pioneiros na inter-relação entre a forma urbana e o desempenho ambiental. Oke (1981), citando que as causas da ilha de calor estão no calor antropogênico, na poluição do ar, nas superfícies urbanas e suas propriedades térmicas e na geometria urbana, estabelece uma correlação entre a geometria urbana e a máxima intensidade da ilha de calor. Seu trabalho verifica que a geometria urbana é o controle físico básico e um bom indicador para a ilha de calor noturna em dias calmos e sem nuvens.

A geometria urbana pode ser determinada tanto pela relação entre a altura e a largura da via (a relação H/W), como pelo fator de visão do céu (FVC). Para Oke (1981), o FVC é uma medida mais apropriada para a geometria de radiação de determinado local, pois representa a fração de céu disponível para a troca de calor. O FVC é uma estimativa da área visível do céu a partir de um

ponto de observação na malha urbana e está relacionado com diversos processos ambientais urbanos. É também chamado de fator de forma ou de configuração. É, portanto, um parâmetro adimensional que indica a quantidade do céu visível em um ponto. Dessa forma, a área resulta de limites impostos pelos elementos urbanos e suas inter-relações. A geometria urbana, que pode muitas vezes ser descrita pelo fator de visão do céu, é uma das principais causas da ilha de calor urbana, conforme apontado por Oke (1982). O resfriamento das superfícies terrestres é proporcional à área de céu visível para um ponto nessa superfície.

Considerando tais elementos, esse trabalho procura estudar a influência da geometria urbana no ambiente térmico do pedestre para um bairro residencial na cidade de Bauru-SP, demonstrando algumas diferenças encontradas entre a literatura e o trabalho de campo. Para o desenvolvimento da pesquisa foram levados em consideração o potencial oferecido pela geometria e desenho urbano, a necessidade de serem disponibilizadas ferramentas para o planejamento urbano e a aplicabilidade do modelo desenvolvido por Oke, que correlaciona o FVC com a máxima intensidade da ilha de calor.

O objetivo é avaliar o papel do fator de visão do céu na intensidade da ilha de calor na escala do pedestre em um bairro residencial e compará-lo com aquele modelo de regressão linear desenvolvido por Oke (1981).

## Importância térmica do fator de visão do céu

O fator de visão do céu (FVC) é um parâmetro adimensional também chamado de fator de configuração ou ainda fator angular. Ele indica uma relação geométrica entre a Terra e o céu e representa uma estimativa da área visível de céu. O céu, por apresentar normalmente sua temperatura inferior à da superfície terrestre, é elemento essencial no balanço de energia.

Em termos geométricos, qualquer edificação, elemento ou equipamento urbano pertencente ao plano do observador posicionado na camada intraurbana representa uma obstrução à abóbada celeste. A projeção dessa edificação na abóbada celeste é a fração do céu por ela obstruída para o observador (ou ainda, representa a parte obstruída do fluxo de radiação, que deixa o observador, em direção ao céu). Seu valor numérico é sempre menor que a unidade, pois dificilmente se

encontram regiões urbanas que não apresentem nenhuma obstrução do horizonte (situação para a qual seu valor seria a unidade).

A estimativa do fator de visão do céu pode ser feita por processos analíticos, por fotografia, por processamento de imagens, por diagramas ou por gráficos. Tanto pelo processo analítico, como pelo uso de diagramas e gráficos, é necessária uma base de dados angulares relativos às edificações existentes no entorno urbano, sendo esta uma das problemáticas mais constantes nesse tipo de determinação. No caso de fotografias e processamento de imagens, são necessários equipamentos específicos, podendo-se contar com uma câmera, com possibilidade de nela ser acoplada uma lente do tipo “olho de peixe” com abertura de 180°.

Para Chapman (2000), não existe uma técnica definitiva para o cálculo do FVC e os métodos geométricos estão sujeitos a imprecisões. É apontado que o cálculo por imagens obtidas por fotografias geradas com lente olho de peixe é mais preciso, porém o processamento dessas imagens é lento e pode se tornar um procedimento de longa duração. Ratti e Richens (1999), também desenvolvendo técnica para processamento de imagem, indicam o FVC como parâmetro para previsão de máxima intensidade de ilha urbana de calor, conforme proposto por Oke (1981). Explorando as relações entre o fator de visão do céu e o ambiente térmico urbano, o estudo de Blankenstein e Kuttler (2003) relaciona o FVC com a quantidade de radiação de onda longa. O estudo mostra que essa radiação chegou a aumentar 27,3% onde o FVC era de aproximadamente 0,4, ou seja, houve uma quantidade adicional de ondas longas armazenadas pela configuração dos edifícios.

Apesar de existir um consenso de que o FVC é um fator importante no balanço energético e nas temperaturas da cidade, nem todos os estudos conseguem provar isso, como mostra a pesquisa de Svensson (2004). Sobre esse assunto, vale salientar que muitas vezes as influências da área urbana na temperatura do ar apresentam ordem de grandeza diferenciada em função das diferentes situações climáticas, sob diferentes tipos de tempo.

É importante aqui esclarecer que as pesquisas de clima urbano necessitam de um detalhamento prévio das diferenças do sítio e uso do solo, identificando-se quais são os “bolsões” climáticos intraurbanos diferenciados, para que se possa realmente obter informações significativas.

Monteiro e Mendonça (2003) mostram, por exemplo, que em sua pesquisa na cidade de Londrina, a maioria dos locais mais aquecidos foi representada por aqueles de mais densa urbanização e poucos espaços verdes, e não necessariamente o centro urbano. Isso demonstrou uma clara relação com a topografia e a exposição de vertentes daquela cidade.

Trabalhando diretamente com o FVC em situação brasileira, Souza (1996) estudou a relação entre o FVC e a temperatura do ar, tendo constatado apenas uma pequena relação para a área estudada, acreditando que esta se deva à intensa ventilação na parcela estudada dentro da malha urbana daquela área de estudo.

## Método de pesquisa

O desenvolvimento da metodologia desta pesquisa constituiu-se das seguintes etapas básicas:

- (a) seleção da área de estudo;
- (b) caracterização da geometria urbana na área de estudo;
- (c) levantamento térmico;
- (d) considerações e comparação com o modelo de Oke; e
- (e) testes de aplicação da equação corrigida.

## Seleção da área de estudo

Inicialmente foi selecionada como área de estudo uma fração urbana da cidade de Bauru-SP, no interior paulista. A cidade encontra-se geograficamente implantada entre as coordenadas 22°15' e 22°24' de latitude sul e 48°57' e 49°08' de longitude oeste, e entre 500 m e 630 m de altitude (Figura 1). Fundada em 1896, é o centro de um município de 673 km<sup>2</sup>, onde vivem 347.601 habitantes (IBGE, 2007). Localiza-se a 354 km da capital, São Paulo, e apresenta clima quente, com chuvas no verão e secas no inverno.

Nessa cidade, a fração urbana estudada compreende o Bairro Vila Cidade Universitária, que apresenta uso predominantemente residencial e vem sofrendo um processo de verticalização, o que causa uma grande diversidade construtiva em relação à altura dos edifícios. Para o estudo foram selecionados 10 pontos de observação (Figura 2), para os quais foi feita a caracterização da geometria urbana através da determinação de seus fatores de visão do céu (FVC).



Figura 1 - Localização da cidade de Bauru



Fonte: adaptado do *Google Earth*.

Figura 2 - Foto aérea da área de estudo e marcação dos pontos de referência

Como demonstram Nakata e Souza (2007) para essa mesma área, verifica-se pouca vegetação, com a presença apenas de amostras individuais de árvores isoladas implantadas ao longo dos passeios (calçadas) para pedestres. O estudo anterior indicou formação de ilhas de calor influenciadas pela geometria urbana, enquanto a presença de ilhas de frescor encontrou relação com a pequena presença de vegetação.

### Determinação da geometria urbana

Para a determinação da geometria urbana foi adotado o FVC como parâmetro. Para isso foi aplicada a extensão 3DSkyView, desenvolvida por Souza, Rodrigues e Mendes (2003), que funciona incorporada a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Nesse algoritmo, o cálculo do FVC é feito pelo princípio da sobreposição

espacial de uma malha estereográfica de pontos da abóbada celeste sobre a projeção estereográfica da camada intraurbana em plano horizontal. Em termos práticos, a sub-rotina obtém novas coordenadas cartesianas para pontos que representem os vértices das arestas das edificações ou elementos urbanos que compõem a cena. Assim, a área total da malha estereográfica pode ser comparada à área obstruída pelos elementos urbanos.

Para a aplicação da extensão 3DSkyView, foram gerados arquivos digitais representando a área de estudo e incorporados ao SIG. Esses arquivos foram preparados de forma a que os elementos urbanos fossem representados por polígonos, e os atributos referentes à elevação (nível do polígono) e à altura (coordenada Z do polígono) estivessem predefinidos como atributos dos polígonos.

Essa rotina de cálculo foi aplicada aos 10 pontos de observação selecionados para a área de estudo. Os valores obtidos para o FVC de cada ponto são expressos na Tabela 1.

### Levantamento térmico

Para aqueles mesmos pontos, realizou-se uma coleta de dados de temperatura do ar durante 15 dias consecutivos do verão de dezembro de 2007 a janeiro de 2008. Para o registro das temperaturas do ar, em cada ponto de referência foram instalados *data-loggers* do modelo Hobo H8 Pro Series, com acurácia  $\pm 0,3$  °C (para alta resolução), e tempo de resposta para o ar parado menor que 5 min, programados para o registro de dados horários simultaneamente em todos os pontos. Esses equipamentos foram instalados a 2 m do solo, em postes de luz situados na frente dos lotes das edificações, em suas superfícies verticais voltadas para o sul e protegidos de radiação solar direta por meio de dispositivos de proteção confeccionados especificamente para esse fim, de forma a impedir o confinamento de ar parado e permitir a ventilação natural nos sensores.

Paralelamente, foram acessadas as temperaturas horárias rurais registradas e disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) da Unesp-Bauru. Esse procedimento permitiu estabelecer as diferenças térmicas horárias entre os pontos de referência na área urbana e a estação meteorológica na área periférica à cidade.

Entre os dias de medições foram selecionados aqueles correspondentes a dias com céu claro e baixa velocidade do ar (abaixo de 2 m/s), sendo descartados os dados para os dias em que essa condição de tempo não pôde ser verificada.

Apenas os dados noturnos foram utilizados para que pudesse ser determinada exclusivamente a

formação de ilhas de calor noturna. Para essa separação, consideraram-se como dados noturnos aqueles registrados entre as 19h e as 6h. Os dados foram inseridos em uma planilha eletrônica e determinados os parâmetros estatísticos simples de diferenças médias, máximas e mínimas da temperatura do ar ocorridas entre cada ponto e a estação meteorológica.

### Considerações e comparação com o modelo de Oke

Para a avaliação da influência do FVC na intensidade da ilha de calor na escala do pedestre para a área de estudo, aplicou-se o modelo desenvolvido por Oke (1981), que relaciona o FVC com a intensidade máxima da ilha de calor. Desenvolvido por regressão linear, com  $r^2 = 0,88$  e erro de  $\pm 0,92$  °C, o modelo de Oke é expresso pela Equação 1.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 15,27 - 13,88\Psi_s \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$\Delta T_{u-r(\max)}$  é a intensidade máxima da ilha de calor em °C; e

$\Psi_s$  é o fator de visão do céu.

Com base no próprio autor do modelo, este não deve ser aplicado indiscriminadamente em outras situações, sendo necessárias considerações sobre as seguintes condições restritivas, sob as quais foi desenvolvido:

- (a) noites calmas, céu claro e época de verão;
- (b) centro da cidade sem grandes influências de massas vegetativas na determinação do FVC;
- (c) geração do calor antropogênico insignificante; e
- (d) diferenças na admitância térmica ignoradas.

Pontos	Valores de FVC
1	0,76
2	0,90
3	0,68
4	0,74
5	0,86
6	0,75
7	0,82
8	0,86
9	0,89
10	0,88

Tabela 1 - Valores dos FVC dos pontos de referência

A aplicação do modelo, portanto, só é adequada se forem realizadas considerações prévias, para que ele possa evidenciar o comportamento térmico da área de estudo.

Para o procedimento de comparação, as intensidades máximas da ilha de calor noturna registrada em cada ponto de observação na escala do pedestre foram comparadas às intensidades que seriam obtidas caso fosse aplicado diretamente o modelo de Oke (1981). Isso permitiu estabelecer a diferença entre os dados reais e os dados obtidos pela Equação 1, revelando as limitações e aderências ao modelo para essa área de estudo. Também foi possível sugerir um modelo de regressão linear específico para a região da curva para a qual os dados medidos não aderem ao modelo de Oke.

### Testes e aplicação da equação corrigida

Após a determinação do modelo de correção, foram feitas simulações para outros pontos dentro da mesma área, para os quais estavam disponíveis dados térmicos reais já coletados em pesquisas realizadas em anos anteriores. No teste de validação do modelo, os resultados dessas simulações puderam ser comparados com os dados reais, e assim se verificou o potencial de simulação de uma nova equação.

Por último, o modelo corrigido foi ainda aplicado a outros pontos da região de estudo que possuíam valores de FVC dentro da faixa daqueles que geraram o modelo (aqueles dos pontos originais de referência), respeitando-se, assim, os limites da própria correção proposta. Esses novos pontos foram posicionados no centro da via de circulação de veículos e distribuídos a cada quadra. Os

resultados gerados foram incluídos como atributos dentro do mesmo SIG anteriormente utilizado, o que permitiu aplicar ferramentas de interpolação de valores e a consequente geração de um mapa de tendência do desenvolvimento da ilha de calor máxima na fração urbana de estudo.

## Análise e discussões

Os resultados obtidos são apresentados e analisados a seguir.

### Tendência térmica noturna dos pontos

Considerando-se o período entre o pôr do sol, a partir das 19h, e antes do nascer do sol, às 6h da manhã, os dados das diferenças médias diárias entre área rural e urbana são indicados na Figura 3.

Observam-se pequenas diferenças de comportamento das curvas dos pontos entre os horários das 19h e 21h. Para os pontos 1 e 10 as diferenças entre as temperaturas urbanas e rurais tendem a decair, enquanto para os demais pontos existe uma pequena tendência ao acúmulo térmico com valores similares entre eles. Apesar de as diferenças poderem estar associadas às admitâncias térmicas das superfícies que compõem esses pontos, cabe também lembrar que Oke resalta que normalmente as diferenças de admitâncias são muito pequenas. Ainda que aquela observação tenha sido baseada em cidades europeias e americanas, não é esperado que as características nas cidades brasileiras sejam diferentes, uma vez que a forma urbana também bastante diferenciada entre aquelas cidades observadas por Oke não resultou em diferença significativa na admitância.

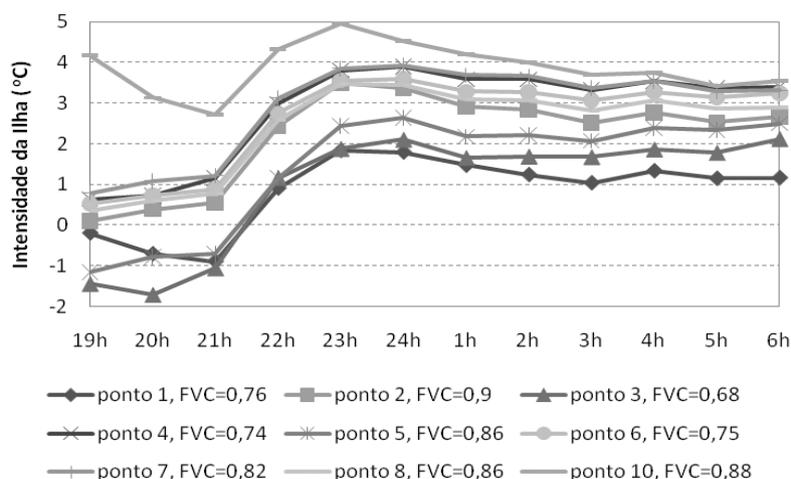


Figura 3 - Dados noturnos das diferenças médias horárias entre os pontos de medição e a área rural

Em função desse desempenho diferenciado entre as curvas, para a análise inicial, foram feitas considerações também diferenciadas para esses dois grupos de curvas, deixando claro que são observações exploratórias e não se pode ainda extrair constatações definitivas.

Para verificar a tendência dos posicionamentos das curvas de cada faixa de horário de comportamento diferenciado (entre 19h e 21h, entre 21h e 23h e entre 23h e 6h), os coeficientes das retas foram calculados. O coeficiente é estabelecido através da razão entre o valor dos intervalos da intensidade das ilhas de calor e o valor do intervalo de tempo daquela faixa de comportamento. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Inicialmente, observando-se os pontos 1 e 10 para aquele mesmo intervalo de horas (entre 19h e 21h), os coeficientes das retas indicam que a taxa de resfriamento do ponto 10 é maior do que a de resfriamento do ponto 1. Como o FVC do ponto 10 equivale a 0,88 e o do ponto 1 é de 0,76, esse comportamento revela a influência térmica do FVC, sendo encontradas maiores taxas de resfriamento à medida que o FVC aumenta. No entanto, apesar da maior taxa de resfriamento encontrada, esse comportamento não é suficiente para que as temperaturas alcancem valores mais baixos que o ponto 1, e o ponto 10 acaba apresentando intensidades de ilhas de calor mais altas por todo o período analisado. Como o maior FVC possibilita também maior tempo de acesso solar, o calor armazenado pelos materiais das superfícies não consegue ser totalmente eliminado pela radiação de ondas longas durante a noite, acumulando-se e formando as ilhas de calor. Estudos anteriores de Souza *et al.* (2005) encontraram situação semelhante para essa mesma área de estudo em outros pontos, indicando uma

possibilidade de haver uma geometria urbana de melhor desempenho térmico, que equilibre as vantagens do sombreamento e as desvantagens da obstrução de perda por ondas longas. Ressalta-se, no entanto, que aquele estudo tinha uma abordagem baseada em médias diárias e não somente em dados do período noturno, ou seja, nela estavam englobados os efeitos do FVC sobre a incidência de ondas curtas, resultante do acesso solar, e o efeito noturno das ondas longas.

Já para o outro grupo de curvas, composto de todos os demais pontos, os coeficientes das retas são similares, e, assim como ocorreu no outro grupo, o acúmulo de calor é maior entre 21h e 22h, alcançando às 23 h seu valor máximo em quase todos os cânions. A partir desse horário ocorre maior estabilidade nas diferenças entre as temperaturas urbanas e rurais. O fato que volta a chamar a atenção é o desempenho do ponto de maior FVC, que é representado pelo ponto 2 com o FVC de 0,90. Este não está associado ao cânion urbano de menores temperaturas.

Os experimentos de Oke (1981), em modelos reduzidos e com perfis de ruas uniformes, mostram que normalmente perfis de ruas mais estreitos e profundos captam mais radiação solar durante o dia do que os perfis mais abertos e rasos, porque múltiplas reflexões entre as superfícies das vias estreitas reduzem a quantidade de radiação solar refletida para fora do cânion. No entanto, como observaram Erell e Williamson (2007), como a altura dos cânions urbanos é variável, e não exatamente como se apresenta no modelo de Oke, uma grande quantidade da energia solar é interceptada nas paredes acima do solo, não chegando a atingir ou atingindo baixa proporção no nível da rua.

FVC	Pontos	Coeficientes das retas de tendência		
		Das 19h às 21h	Das 21 às 23h	Das 23 às 6h
0,68	3	-0,19	-1,47	-0,03
0,74	4	-0,26	-1,32	0,05
0,75	6	-0,18	-1,33	0,04
0,76	1	0,35	-1,37	0,10
0,82	7	-0,22	-1,32	0,08
0,86	5	-0,23	-1,58	0,01
0,86	8	-0,22	-1,35	0,08
0,88	10	0,73	-1,11	0,20
0,90	2	-0,23	-1,47	0,11

Tabela 2 - Coeficientes das retas de tendência das diferenças térmicas por faixas horárias

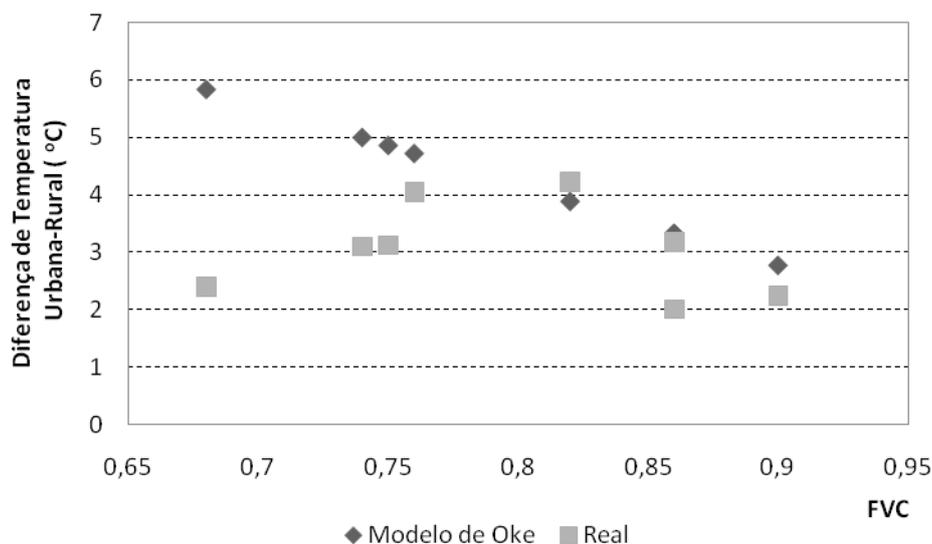


Figura 4 - Comparação entre dados gerados por aplicação do modelo de Oke e os dados reais registrados

FVC	Diferenças (°C) (Valores Oke – Valor reais)
0,68	3,44
0,74	1,90
0,75	1,74
0,76	0,68
0,82	-0,33
0,86	1,32
0,86	0,15
0,88	-1,12
0,90	0,54

Tabela 3 - Diferenças entre os dados calculados por aplicação do modelo de Oke e os dados reais

A observação daqueles autores merece maior detalhamento em estudos futuros, uma vez que também no estudo aqui apresentado os dados registrados durante a noite, em alguns pontos de observação que possuem fatores de visão do céu mais baixos, não desenvolveram as ilhas térmicas mais intensas. Além disso, alguns fatores de visão do céu maiores estão associados a temperaturas mais altas do que as esperadas. Esses resultados enfatizam a grande complexidade do tema e a dificuldade em serem obtidas respostas simplificadas para os fenômenos térmicos ocorridos no ambiente urbano.

### Comparação com o modelo de Oke

A aplicação do modelo de Oke (Equação 1) aos valores de FVC encontrados nos pontos de observação permitiu uma comparação dos valores calculados com os dados reais, como é demonstrado na Figura 4 e na Tabela 3.

Nota-se que a intensidade da ilha de calor de pontos com valores de FVC acima de 0,82 apresenta boa aderência ao modelo de Oke. Nesse ponto, o padrão de comportamento se altera. Para valores de FVC de 0,90 a 0,82 foi encontrada uma tendência de ocorrerem maiores diferenças de temperatura à medida que o valor de FVC diminui, enquanto para a faixa de FVC de 0,82 a 0,68 essa situação se inverte. Observa-se também que existe ainda uma tendência de maiores erros à medida que os FVC são menores, o que pode ser justificado não só pela não uniformidade das edificações no meio urbano como também pelas diferentes massas térmicas dos cânions. Para os FVC menores que 0,82, a proporção de raios solares interceptados pelas edificações antes de atingir a escala do pedestre provoca maior sombreamento e, conseqüentemente, menores temperaturas que os pontos com maiores FVC. Assim, mesmo às 23h, já não mais sob a influência da radiação solar, apesar das maiores taxas de resfriamento dos pontos com maiores FVC, não

foram alcançadas menores temperaturas do que os locais com FVC menores. Calculando-se os erros médios gerados para a intensidade máxima da ilha na escala do pedestre em função dos valores do FVC, foi possível estabelecer uma curva de estimativa do erro do modelo para a faixa abaixo de 0,82, que é expressa pela Equação 2.

$$\kappa = 24,106 - 30,261\psi_s \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo  $R^2 = 0,91$  e erro de  $\pm 0,67^\circ\text{C}$ .

Onde:

$K$  é o valor da correção em  $^\circ\text{C}$ ; e

$\Psi_s$  é o fator de visão do céu.

Em função desses resultados, para calcular o valor da máxima intensidade da ilha de calor na escala do pedestre em cada ponto específico da área de estudo, propõe-se que o modelo de Oke tenha aplicação direta para os valores de FVC acima de 0,82. Para a faixa entre 0,68 e 0,82 deve ser aplicada uma correção, calculada pela Equação 3.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 15,27 - 13,88\psi_s - \kappa \quad \text{Eq. 3}$$

Destaca-se, no entanto, que essa correção pode ser facultativa para as faixas de FVC entre 0,82 e 0,76. Isso é possível porque, apesar de a mudança de tendência ocorrer a partir de 0,82, os valores de erros calculados pelo modelo de Oke para o valor de 0,76 estão dentro do limite de erro pressuposto pelo modelo original, que é de  $1^\circ\text{C}$  (os erros encontrados para o modelo de Oke para o valor de FVC de 0,76 foi de apenas  $0,68^\circ\text{C}$ , conforme demonstrado na Tabela 3). Entre 0,82 e 0,76 não existem registros que permitam fixar o limite exato entre os modelos; por isso, essa faixa pode ser considerada de transição entre o modelo original e o modelo de correção.

A Equação 3 é de aplicação restrita a valores de FVC que estejam dentro dos limites daqueles que geraram a regressão, ou seja, valores incluídos entre 0,68 e 0,82 ou iguais a esses limites. Para valores fora dessa faixa não se conhece o comportamento do modelo original em relação à área de estudo. Chama-se ainda a atenção para o fato de o modelo explicar a formação da ilha de calor prioritariamente pela geometria urbana, não levando em conta muitos outros fatores que podem estar a ela associados.

Cabe lembrar também que o modelo de Oke foi encontrado para grandes variações do FVC (entre 0,28 e 0,86). No entanto, para a situação aqui estudada, a variação do FVC é pequena, o que restringe sua aplicação.

Essa comparação entre os dados reais e o modelo de Oke sugere ainda a possibilidade de existir uma faixa de FVC que propicie melhor desempenho térmico urbano, promovendo menor ganho de calor durante o dia e menores intensidades de ilha de calor noturna. Essa hipótese merece maior atenção futura.

### Teste para o modelo de correção proposto para a faixa entre 0,68 e 0,82

Alguns dados reais coletados em pesquisas anteriores ao verão do ano de 2007 para a mesma área, porém em outros pontos, cujo FVC estivesse entre 0,68 e 0,82, foram a base para comparação entre dados reais e dados calculados. A aderência dos valores medidos em 2007 ao modelo aqui sugerido para a faixa em questão resultou em um coeficiente de correlação de 0,91, conforme pode ser verificado na Figura 5.

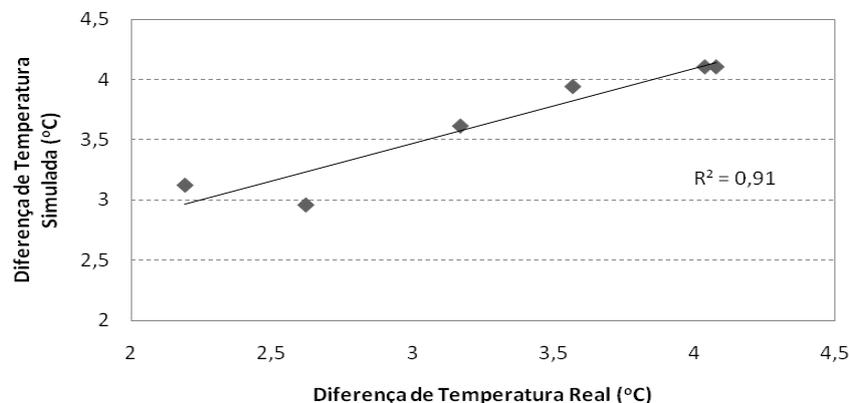


Figura 5 - Comparação entre dados reais do verão do ano de 2007 com dados calculados pelo modelo sugerido para a faixa de FVC entre 0,68 e 0,82

Acredita-se, portanto, que o modelo de Oke para os FVC acima de 0,82, associado à Equação 3 para a faixa entre 0,68 e 0,82, pode ser aplicado como uma forma de expressar a importância do FVC na formação da ilha de calor na área específica do estudo, desde que sejam respeitadas as restrições anteriormente comentadas. As próprias limitações destacadas por Oke (1981) devem ser sempre consideradas.

### Aplicação do modelo para outros pontos da área

Explorando o potencial que esse tipo de modelagem e calibração poderá trazer ao planejamento urbano e conjugando-o às vantagens apresentadas por um Sistema de Informações Geográficas, é aqui exemplificada uma aplicação do modelo corrigido para a mesma área de estudo. Ressalta-se, no entanto, que essa é apenas uma aproximação para a situação específica da região de estudo e que a extrapolação para outras áreas da mesma cidade só é possível com uma nova calibração e verificação do comportamento térmico em função da geometria urbana daquela região, feita a partir do aumento da base de dados.

O exemplo apresentado utiliza-se do mesmo ambiente SIG (i.e., ArcView) anteriormente utilizado na determinação do FVC. Inicialmente,

foram determinados os FVC de toda a área, fixando-se pontos de observação a cada quadra e excluindo-se pontos com valores fora da faixa restritiva do modelo. Por conseguinte, a exclusão desses pontos levou à restrição dos limites de abrangência da área para a qual foi criado o mapa. Em seguida, foram calculados os valores da máxima intensidade de ilha de calor de cada ponto do observador e foi promovida sua interpolação simples. Essa operação permitiu a geração do mapa de tendência atual da influência do FVC na formação das ilhas de calor noturna (Figura 6).

É possível, assim, visualizar no mapa as regiões que hoje apresentam tendência para formação da máxima ilha de calor em função do FVC. Pode ser verificado que existem áreas situadas no centro do mapa que estão sob condições de menores intensidades da ilha de calor e apresentam menores FVC, já que esse é o pressuposto do modelo calibrado.

Seguindo-se o mesmo procedimento no SIG, foi ainda criado um cenário hipotético de adensamento. Nesse cenário somente os pontos cujos comportamentos podem ser expressos pelo modelo sugerido por Oke foram adensados, reduzindo-se seus valores de FVC para 0,82, enquanto os demais foram mantidos em seus valores atuais. O resultado pode ser observado na Figura 7.

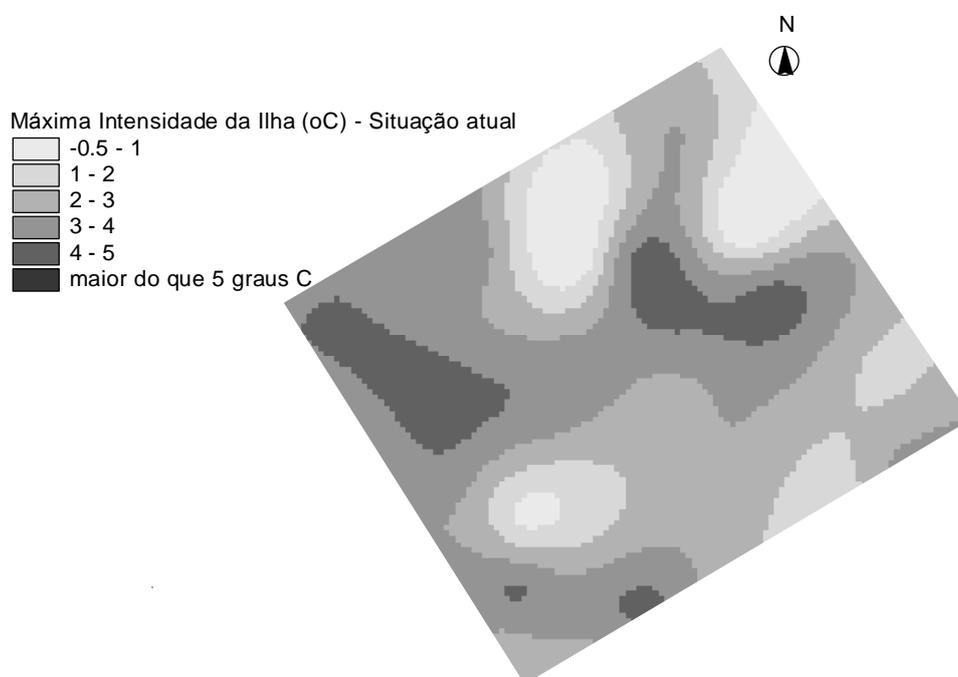


Figura 6 - Mapa de tendência da influência do FVC na máxima intensidade da ilha de calor no verão na área de estudo, considerando-se dias calmos e sem nuvens

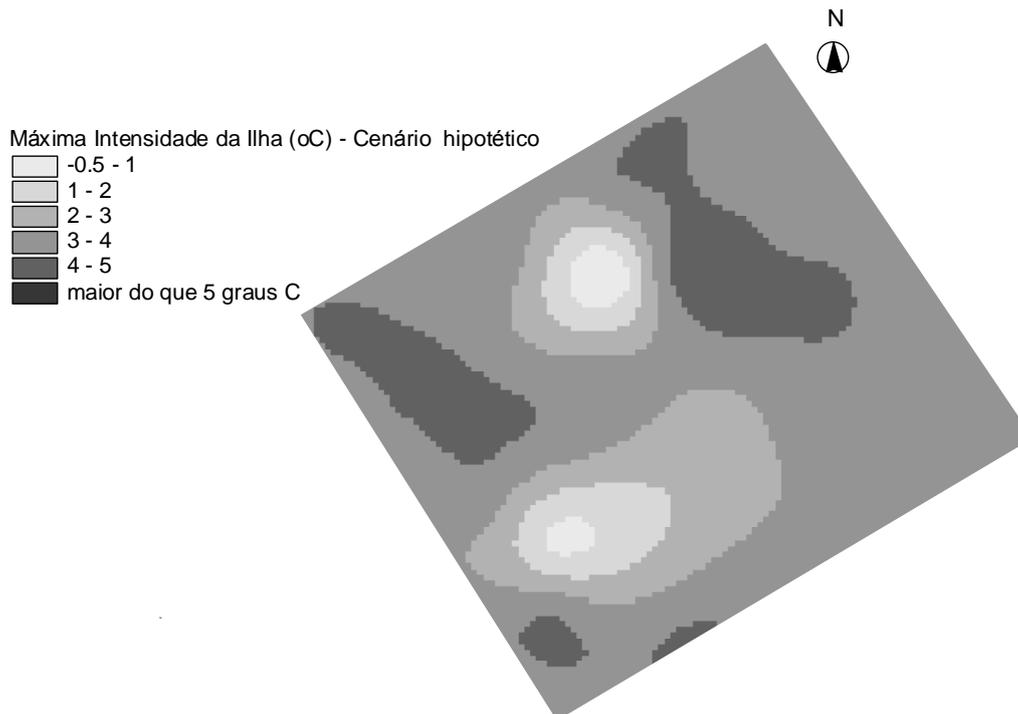


Figura 7 - Mapa de tendência para o cenário hipotético

A comparação da situação atual (Figura 6) com o cenário hipotético (Figura 7) revela que a redução do FVC em alguns pontos da área tem um impacto térmico significativo. As médias das diferenças de temperatura entre as áreas rural e urbana para a situação atual é de 2,7 °C, enquanto para o cenário hipotético atinge 3,6 °C. As regiões com menores ilhas de calor ficam mais restritas e localizadas como consequência da expansão das regiões correspondentes às ilhas de calor com valores maiores do que 4 °C.

Essa expansão das áreas de temperaturas mais altas é um resultado semelhante ao apontado por Vilela (2007) para a cidade de Belo Horizonte, MG. No entanto, aquela pesquisa considera por regressão múltipla o aumento linear da temperatura em função do FVC e da massa construída, acrescentando que a influência do FVC foi maior do que a da massa construída. No caso aqui estudado, com consideração exclusiva do FVC, o comportamento linear não pôde ser verificado. Porém, o resultado encontrado demonstra o impacto térmico que pode ser causado, levando ao aumento de temperatura mesmo para valores mais altos de FVC.

De qualquer forma, esse resultado ainda não pode ser considerado definitivo e representa apenas uma demonstração do potencial existente entre a associação de modelos empíricos já desenvolvidos em literatura e as ferramentas SIG disponíveis.

## Conclusões

Uma das conclusões mais importantes e ao mesmo tempo polêmicas levantadas pela pesquisa é o fato de não ter sido encontrada uma relação linear constante que cause o decréscimo de temperatura à medida que o FVC aumente. Existe uma clara mudança de padrão de comportamento ao ser atingido o valor de fator de visão do céu de 0,82. Conforme já discutido, a configuração da área urbana estudada é de um perfil bastante variado; alguns dos locais com FVC menores podem estar sujeitos durante o dia à influência do sombreamento e das superfícies verticais mais altas, alterando, assim, o comportamento que seria esperado durante a noite. Dessa forma, as superfícies mais altas do que as circunvizinhas podem estar promovendo a reflexão da radiação solar para fora do cânion urbano, fazendo com que as temperaturas do ar próximo ao solo não sejam diretamente influenciadas por essa característica, conforme já mencionado e discutido também por outros autores. Esse fato explicaria a inversão da relação entre a ilha de calor e o FVC para a faixa entre 0,68 e 0,82 de céu visível, se comparado ao que poderia ser esperado na literatura.

Os dados aqui coletados são apenas uma pequena amostra diante da diversidade climática e das condições de tempo a que o local pode estar sujeito, assim como o número de pontos monitorados também é restrito. Por outro lado, o comportamento térmico dos pontos de observação

confirma algumas tendências que já vinham sendo registradas para a mesma área em pesquisas anteriores. Isso destaca a necessidade de serem coletadas amostras mais significativas, dando, assim, continuidade aos estudos e verificando os indícios aqui apontados.

A pesquisa revelou ainda o potencial do modelo genérico de Oke, atribuindo-lhe um caráter prático e ao mesmo tempo demonstrando a necessidade de serem considerados parâmetros locais para uma calibração adequada às condições específicas do local de estudo. A aplicação do modelo ajustado permitiu identificar na área de estudo o papel que o FVC exerce sobre a máxima intensidade da ilha de calor.

Pesquisas de campo para estudos do clima urbano são de difícil controle de parâmetros e o fator de visão do céu não é um fator único de determinação da ilha de calor. A calibração aqui promovida tem uma finalidade muito mais exploratória e de discussão do que de confirmação teórica, chamando a atenção para a necessidade de serem criados instrumentos diretamente ligados ao planejamento urbano. Em função dos resultados alcançados, um dos aspectos mais relevantes para futuras discussões seria identificar se existe uma faixa ideal de adensamento que minimize a formação de ilhas de calor.

## Referências

- BLANKENSTEIN, S.; KUTTLER, W. Mobile Measurements of Downward Longwave Radiation in Urban Street Canyons. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 5., 2003, Lódz. **Proceedings...** Lódz: Faculty of Geographical Sciences Department of Metereology and Climatology, University of Lódz, 2003. 1 CD-ROM.
- CHAPMAN, L. Improved One Dimensional Energy Balance Modelling Utilizing Sky-View Factors Determined from Digital Imagery. In: SIRWEC CONFERENCE, 10., Davos-Switzerland. **Proceedings...** Davos, March, 2000. Disponível em: <[www.sirwec.org/conferences/davos2000.html](http://www.sirwec.org/conferences/davos2000.html)>. Acesso em: 15 mar. 2010.
- ERELL, E.; WILLIAMSON, T. The Spatial Variability of Air Temperature in the Urban Canopy Layer. In: PALENC CONFERENCE, 2.; AIVC CONFERENCE, 28., Ilha de Creta, 2007. **Proceedings...** Ilha de Creta: PALENC, 2007. p. 304-308.
- GOOGLE Earth. **Bauru**: coordenadas: -22.340034 e-49.052625. Acesso em: 20 jan. 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home>>. Acesso em: 4 mar. 2009.
- KARATASOU, S.; SANTAMOURIS, M.; GEROS, V. Urban Building Climatology. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.) **Environmental Design of Urban Buildings**. London: Earthscan Publications, 2006. p. 1-35.
- MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.
- NAKATA, C. M.; SOUZA, L. C. L. de. Contribuição Térmica da Geometria Urbana e da Arborização em um Bairro Residencial. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 9.; LATINOAMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2007. **Anais...** ANTAC: Ouro Preto, 2007.
- OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 1/4, p. 237-254, 1981.
- OKE, T. R. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, p. 1-24, 1982a.
- OKE, T. R. Overview of Interactions Between Settlements and Their Environments. In: WMO EXPERT MEETING ON URBAN AND BUILDING CLIMATOLOGY, Genebra, 1982. **Proceedings...** Genebra: WCP-37, 1982b.
- RATTI, C. F.; RICHENS, P. Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques. In: CAADFUTURES 99, Atlanta, 1999. **Proceedings...** Atlanta: GE, 1999.
- RAYDAN, D.; STEEMERS, K. Environmental Urban Design. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.) **Environmental Design of Urban Buildings**. London: Earthscan Publications, 2006. p. 1-35.

SOUZA, L. C. L. *et al.* Consumo de Energia Urbano: influência do perfil do usuário, da geometria urbana e da temperatura. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8.; LATINOAMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: Antac, 2005. p. 1960-1969.

SOUZA, L. C. L. de. **Influência da Geometria Urbana na Temperatura do Ar ao Nível do Pedestre**. 1996. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S.; MENDES, J. F. G. A 3D-GIS Extension for Sky View Factors Assessment in Urban Environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT, 8., 2003, Sendai. **Proceedings...** Sendai: CUPUM, 2003.

SVENSSON. M. K. **Sky View Factor Analysis: implications for urban air temperature differences**. 2004. Göteborg, Suíça. Disponível em: <<http://www.phys.uu.nl/~nvdelden/skyviewfactoranalsys.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2004.

VILELA, J. A. **Variáveis do Clima Urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG**. 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPESP e FUNDUNESP pelos recursos financeiros aplicados em diversas etapas deste projeto.