



INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO MICROCLIMA EM AMBIENTE SIMULADO CONTROLADO

Eleonora S. de Assis (1); Camila A. de Sirqueira (2); Angelina M. Bamberg (3)

(1) D.Sc., Professora do Dep. Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo, eleonorasad@yahoo.com.br

(2) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e

Patrimônio Sustentável, milasirqueira@gmail.com

(3) Graduanda em Engenharia Civil, angellbamberg@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Lab. Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído, Rua Paraíba, 697, Belo Horizonte – MG, 30130-140, Tel.: (31)3409-8873

RESUMO

O estudo da vegetação inserida no ambiente urbano tem sido feito no Brasil geralmente através de medições *in loco*, mas ainda com pouca capacidade de generalização de seu comportamento termo-higrométrico. Neste trabalho o comportamento da vegetação é analisado com base em simulações computacionais desenvolvidas no modelo micrometeorológico ENVI-met® versão 3.1, buscando detalhar melhor a influência de diferentes tipos e da área de cobertura de vegetação no local onde ela está inserida. A área de estudo utilizada é baseada numa fração da região da Pampulha, em Belo Horizonte, Minas Gerais, utilizando suas características de clima e de solo para configuração da entrada de dados no modelo, considerando o período de verão, que é quente e chuvoso, e o período de inverno, mais seco. Foram considerados tipos diferentes de cobertura, partindo do solo nu (argiloso) como referência, tais como revestimento de concreto, de grama e áreas de vegetação de porte arbóreo parcial e total dentro do recorte trabalhado. Os resultados obtidos demonstram que a influência da vegetação no microclima é sensível, mesmo em pequenas porções de área do terreno, quando comparada ao solo nu e à pavimentação de concreto, e que a variação termo-higrométrica observada se deve principalmente a sua interação com os parâmetros de disponibilidade de água e de energia (radiação solar) no ambiente.

Palavras-chave: microclima, efeito da vegetação, simulação computacional, modelo ENVI-met®.

ABSTRACT

The study of vegetation within the urban environment in Brazil has been generally carried on through in situ measurements but yet with poor ability of generalization. In this paper the vegetation effects are analyzed using computational simulations developed in the micrometeorological model ENVI-met® version 3.1 aiming to better detail the influence of vary kind and covered area of vegetation in a given site. The study area is based on a fraction of the Pampulha district in the city of Belo Horizonte, Minas Gerais state, using its characteristics of climate and soil type for the model input configuration. Two annual periods were considered, the rainy and warm summer (January) and the driest time of winter (August). Different materials covering the ground were simulated such as the bare local soil (loamy), concrete pavement, lawn and woods in part or over the entire plot of ground. The results show a significant influence of vegetation on the local microclimate even though when they are in small areas of the plot as compared to the bare soil or the concrete pavement situations. The thermo-hygrometric variation was thought to be mainly because of the interaction between vegetation and the environment availability of water and energy (solar radiation).

Keywords: microclimate, vegetation effects, computer simulation, ENVI-met® model.

1. INTRODUÇÃO

O clima urbano nas suas diversas escalas é um tema atualmente bastante estudado e analisado por profissionais de formações diferentes, sendo que os diversos autores possuem visões diferenciadas sobre as causas ou os fatores que afetam as condições climáticas locais (ROAF *et al*, 2009). Uns consideram principalmente o enfoque meteorológico acima da camada do “dossel” urbano (UCL – *urban canopy layer*), enquanto outros enfocam a interação homem, meio urbano e clima, com abordagem geográfica, e no campo da arquitetura e urbanismo leva-se mais em conta essa interação homem-ambiente com relação às construções e seu entorno urbanizado imediato.

As áreas urbanas apresentam uma grande diversidade de tipos de superfície, devido à substituição de elementos naturais por materiais e objetos artificiais, com isso provocando mudanças na rugosidade da superfície e em suas características (tais como albedo, capacidade térmica, emissividade, etc.), na capacidade de infiltração de água no solo, na composição química da atmosfera local, etc.. Particularmente a cobertura vegetal natural tende a diminuir cada vez mais pela atuação humana, seja pela sua substituição por edifícios, construções de vias, calçamentos, seja por jardins com espécies vegetais exóticas, ou até mesmo pelo desmatamento, deixando o solo à mostra. Tais mudanças levam a uma significativa alteração no microclima das cidades, visto que interferem no balanço de energia da área urbana, bem como nas condições locais de vento, temperatura, umidade do ar e no ritmo das chuvas, podendo resultar em problemas ambientais e sócio-econômicos (LANDSBERG, 1981; ARNFIELD, 2003). As variações climáticas locais decorrentes dos diferentes tipos de superfícies e de coberturas do solo têm sido facilmente percebidas desde os primeiros estudos sobre o clima das cidades (CHANDLER, 1976).

Katzschner (2010) relatou um experimento feito em Kassel, Alemanha, onde a medição de temperaturas superficiais e do ar a 40 cm de altura sobre amostras de diferentes tipos de revestimentos urbanos, nas mesmas condições microclimáticas, resultou em variações significativas, como por exemplo, diferenças de mais de 10°C nas temperaturas superficiais destes revestimentos. Alves e Vecchia (2012) mediram e analisaram a variabilidade da temperatura superficial em seis diferentes tipos de cobertura do solo na cidade de Israelândia, GO, observando a ocorrência das maiores temperaturas superficiais em solos asfaltados ou pavimentados com concreto e as menores em gramados, situação que se manteve mesmo em períodos nublados. Os autores também constataram que o fluxo de energia emitido pela superfície asfaltada era em média 12% maior que no gramado e 9% maior que no solo nu.

Vários autores reconhecem que o uso da vegetação é uma das principais estratégias para o resfriamento de frações urbanas, regulando o clima local e assim ajudando a diminuir os efeitos das ilhas de calor (SHASUA-BAR e HOFFMAN, 2000; DIMOUNDI e NIKOLOPOULOU, 2003). Áreas vegetadas são consideradas por Higuera (1997) como as melhores proteções para espaços livres urbanos, onde mantém o equilíbrio climático do ambiente, melhorando também a qualidade do ar. Santamouris (2001) estudou o papel que as áreas verdes desempenham em áreas urbanas, principalmente naquelas propícias a formação de ilhas de calor. Segundo o autor, as árvores proporcionam uma sensação de “oásis” mais fresco por causa da evapotranspiração, sendo tal resfriamento sentido pelos usuários e passível, também, de interferir no consumo local de energia, ajudando a diminuir o desperdício de eletricidade para climatização dos edifícios. Porém, foi verificado que as áreas arborizadas influenciam apenas seu arredor e seria necessária a implantação de várias áreas verdes, distribuídas no espaço urbano para que houvesse um melhor aproveitamento de seus benefícios sobre o clima urbano. Eumorfopoulou e Kontoleon (2009) observaram que o uso de vegetação tem um impacto importante sobre o desempenho térmico de edifícios, tanto no inverno como no verão, pois as plantas absorvem uma quantidade significativa da radiação solar para as suas funções biológicas e de crescimento, funcionando como uma barreira que impede a absorção excessiva de calor pelos edifícios.

A vegetação participa dos processos locais e regionais de trocas de calor, momento, umidade e gases com a atmosfera. Os estômatos (poros microscópicos na superfície das folhas), ao abrirem para absorver CO₂ durante a fotossíntese, perdem água por transpiração; porém, são capazes de regular tal perda, dependendo principalmente da quantidade de água que o vegetal pode retirar do solo, da umidade do ar e da magnitude de radiação solar incidente (BONAN, 2002). Esta, por sua vez, não pode ser considerada constante numa área vegetada de porte arbóreo, já que a transferência de energia através da copa das árvores é um processo complexo, que depende de propriedades óticas da superfície (dossel) e da geometria da copa, envolvendo múltiplas reflexões e absorção através dela, e transmissão para o ambiente de entorno, inclusive o solo (ROBITU *et al*, 2006). Assim, o processo de fotossíntese também não é constante através do dossel, ocorrendo a uma taxa menor nas partes mais sombreadas e, além disso, variando sazonalmente em função da disponibilidade de luz e de umidade. A inserção de esquemas da fotossíntese e da condutância estomatal de

espécies vegetais em modelos climáticos, inclusive em escala de aplicação urbana (LAHME e BRUSE, 2003; BRAZEL *et al*, 2008), tem contribuído para identificar melhor seu papel como reguladoras do clima.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da vegetação no microclima de uma área delimitada de 120m x 120m (tamanho típico de uma quadra em Belo Horizonte) a partir de simulações computacionais desenvolvidas no modelo ENVI-met® (BRUSE, 2007) de modo a obter resultados comparativos com outros tipos de superfícies urbanas. Como objetivos específicos, tem-se:

- Caracterizar a área estudada através de seus elementos urbanos, tipo do solo, de revestimentos superficiais e de vegetação;
- Identificar possíveis variações das condições térmicas da área estudada resultantes do tipo de revestimento do solo, distribuição espacial da área verde e posição do ponto de observação (denominado “receptor” no modelo).

3. MÉTODO

O método utilizado nesse trabalho é o de simulação em modelo computacional de um ambiente exterior e segue as seguintes etapas:

- Levantamento de dados para caracterização das condições locais;
- Calibração do modelo ENVI-met® para condições climáticas locais representativas dos períodos de verão e inverno;
- Elaboração do experimento de simulação;
- Análise dos resultados obtidos.

3.1. Delimitação da área de estudo e condições climáticas características

A área de estudo foi delimitada como uma área de 120m x 120m tomando como base uma quadra qualquer na região da Pampulha, em Belo Horizonte, com dimensões de 67,5m x 208,6m (figura 1, A, área real na região), de modo que tivessem áreas aproximadamente equivalentes, mas formando uma praça (figura 1, B, área redefinida para simulação).

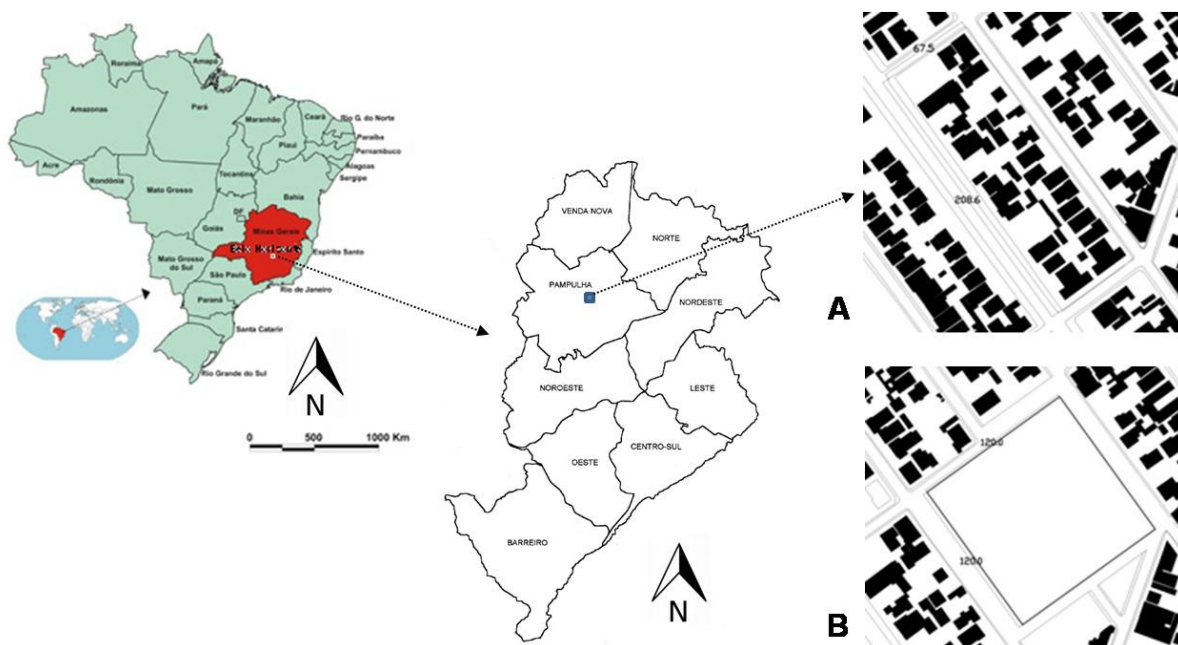


Figura 1 – Localização e delimitação da área de estudo. Fonte: elaboração própria.

Segundo Meyer *et al* (2004) a Região Metropolitana de Belo Horizonte localiza-se entre os domínios de Mata Atlântica e de Cerrado; seu solo enquadra-se no tipo latossolo vermelho escuro. É um solo argiloso com ocorrência de vegetação sub-perenifólia de porte alto.

Belo Horizonte está situada numa região de clima tropical de altitude, com verões quentes e chuvosos, e invernos secos, porém Ribeiro e Mól (1985) observam que uma classificação do tipo climático da cidade

usando dados mais recentes a situam como Aw (tropical com distinta estação seca no inverno), o que poderia ser creditado ao efeito de ilha de calor urbana. De acordo com os dados das Normais Climatológicas (BRASIL, 2009), as temperaturas médias máximas e mínimas variam anualmente entre 28,8°C (fevereiro) e 13,1 (julho), a umidade relativa média entre 79% (janeiro) e 64,5% (agosto). A insolação média anual diária é de 7,0 horas, com máximo de 8,3 horas diárias em julho e mínimo de 5,5 horas diárias em dezembro. O vento tem direção predominante leste o ano todo, com velocidade média anual de 1,52±0,18 m/s.

3.2. Calibração e configurações do modelo de simulação

Para as simulações foi utilizado o modelo microclimático ENVI-met® (BRUSE, 2007), de acesso gratuito. Antes de mais nada, o modelo deve ser calibrado para as condições locais. Para tanto, algumas de suas características têm que ser consideradas, tais como:

- É um modelo tridimensional em seu módulo principal, com um “entorno” unidimensional composto, no plano horizontal, pela área de aninhamento (*nesting area*) e um perfil vertical de mesoescala, que vai até a altitude de 2500m acima do nível do mar. O modelo não assimila dados, ou seja, há uma única entrada de dados que descrevem as condições iniciais nas suas várias camadas: solo (três sub-camadas até a profundidade de 1,75m), superfície (incluindo os perfis de pavimentação, edificações e vegetação) e atmosfera;
- Na camada da atmosfera, o modelo faz o prognóstico da evolução do fluxo de ar (velocidade e direção), turbulência, temperatura potencial¹, umidade e fluxos de radiação de onda curta e longa, com base nas leis fundamentais da dinâmica e termodinâmica de fluidos, usando a forma incompressível não-hidrostática das equações de Navier-Stokes, mais apropriada para terrenos complexos, bem como um modelo de fechamento das equações de ordem 1,5 (modelo E-ε), o que permite a simulação de processos de advecção e a consideração da não-homogeneidade horizontal, desejável para lidar com o ambiente urbano. Na camada do solo, o modelo calcula o perfil vertical de temperatura e umidade desde a superfície, considerando os processos hidrológicos e termodinâmicos que variam de acordo com as propriedades de cada tipo de solo e/ou composição de pavimento. O sub-programa de vegetação, que é acoplado ao de solo, leva em consideração a sua interação biológica e não apenas física com o entorno, através de trocas térmicas e de vapor d’água, incluindo o processo de fotossíntese, de modo que uma série de parâmetros fisiológicos das plantas deve ser conhecido, tais como as densidades de área foliar e radicular, a resistência do estômato, a natureza da planta (se decídua ou perene) e o albedo da folhagem.
- A inicialização do modelo pressupõe condições de atmosfera neutra (do ponto de vista da estabilidade estática), onde a temperatura potencial pode ser considerada constante ao longo da altura da camada de mistura atmosférica (STULL, 1988). É, portanto, recomendável iniciar a simulação no período noturno, após o por do sol ou antes do nascer do sol.
- A resolução típica espacial vai de 0,5m a 10m e a temporal é de 10 segundos. Desse modo, a escala urbana apropriada de aplicação do modelo é a do desenho ou projeto urbano, isto é, frações de bairros ou vizinhanças.

Neste trabalho, devido às condições do experimento, ou seja, o tamanho da área ser relativamente pequeno e a falta de detalhes mais complexos, pode-se usar uma grade horizontal de 4m x 4m e um módulo vertical equidistante de 3m na edição do mapa da área de estudo. No total o modelo 3D da área tem 30 x 30 pontos de grade horizontal e 20 pontos de grade vertical. Desse modo, foi possível usar a menor versão de área de grade do ENVI-met® (100x100x30), o que também permite uma velocidade maior de processamento. Todas as simulações foram iniciadas às 21 horas no modelo, perfazendo 48 horas. Para usar dados horários, um procedimento de tratamento de dados médios proposto por Alucci (1992) foi aplicado aos dados normais da estação meteorológica de Belo Horizonte (BRASIL, 2009).

A única informação não disponível nas Normais Climatológicas para a inicialização do modelo é a umidade específica. Visto que a altitude da estação padrão de Belo Horizonte é 915m, a umidade específica deve ser coletada a 1585m. Estes dados estão disponíveis no *site* do dep. Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming², para 0 hora UTC (21h local).

¹ Temperatura potencial é, de acordo com Vianello e Alves (2012), a temperatura que teria uma parcela de ar, inicialmente em um nível qualquer da atmosfera (pressão P), se fosse levada adiabaticamente seca a uma pressão padrão (P₀, em geral correspondente a 1000 hPa). O conceito é útil para comparar temperaturas a diferentes alturas, eliminando o efeito da variação da pressão.

² <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Além dos dados-padrão de entrada, mostrados na tabela 1, outras seções de configuração do modelo devem ser utilizadas, a começar dos dados de radiação solar, que são ajustados nas seções “*clouds*” e “*solar adjustment*”; a primeira é responsável pelo ajuste da radiação solar difusa a partir de dados locais de nebulosidade e a segunda, responsável pelo ajuste da radiação solar global incidente. Foram usados dados normais de nebulosidade média mensal e os dados de radiação solar foram estimados usando o programa Radasol® versão 2³.

Na seção “*soil data*” os dados de temperatura e umidade do solo nas três sub-camadas devem ser informados, no mesmo horário de inicialização do modelo. Entretanto, estes são dados difíceis de obter em estações localizadas em áreas urbanas no país, onde os termômetros de solo em geral não são instalados. Uma alternativa é usar dados estimados pelo CPTEC/INPE⁴ a partir de imagens satelitais para 0 hora UTC (21h local) e/ou dados medidos por estações agrometeorológicas⁵ do SINDA (Sistema Nacional Integrado de Dados Ambientais).

Além disso, é importante verificar, nos bancos de dados do modelo, as informações sobre os coeficientes de reflexão (albedo) das superfícies (solos e pavimentos) e da vegetação. No caso da vegetação, por exemplo, a literatura mostra uma variação sazonal do albedo para radiação de onda curta de biomas brasileiros que pode diferir bastante dos valores constantes no banco de dados do ENVI-met® sobre vegetação. No caso de Belo Horizonte, foram usados dados de albedo relativos aos biomas de floresta úmida, cerrado e pastagens (AGUIAR *et al.*, 2006; LIBERATO, 2011); albedos de superfícies artificiais foram extraídos de Ferreira e Prado (2003).

Tabela 1– Configuração de entrada no modelo utilizada na simulação

Variáveis		Dados Utilizados	
		15 de janeiro (verão)	15 de agosto (inverno)
Dados de entrada	Velocidade do vento a altura de 10m (m/s)	1,41	1,69
	Direção do vento (graus)	70,0	86,0
	Temperatura (potencial) do ar (°C)	22,2	18,6
	Umidade relativa do ar (%)	82,0	65,5
	Umidade específica do ar a 2500m (g/kg)	12,47	8,03
Temperatura do solo (°C)	0 a 20 cm	29,4	24,0
	20 a 50 cm	29,4	24,0
	abaixo de 50 cm	29,4	24,0
Umidade do solo (%)	0 a 20 cm	30,0	7,5
	20 a 50 cm	30,0	10,0
	abaixo de 50 cm	30,0	12,0
Albedos	Solo nu (solo local)	0,20	0,20
	Concreto envelhecido	0,13	0,26
	Gramado	0,24	0,27
	Floresta em bioma de cerrado	0,13	0,11
Dados para a calibração inicial do modelo para radiação solar			
Nebulosidade (oitavas)		5,6	2,4
Radiação Difusa às 12h (W/m ²)		476,0	147,0
Radiação Global às 12h (W/m ²)		595,0	888,0

Fonte: elaboração própria.

3.3. Elaboração do experimento de simulação

A quadra de estudo de 120m x 120m foi simulada considerando os seguintes casos:

1. Solo nu natural (**sn**) em toda a área, adotando o tipo de solo da região – argiloso;
2. Pavimento de concreto envelhecido (**con**) em toda a área, típico de passeios públicos e praças na região;
3. Gramado sobre solo natural (**gr**) em toda a área, com 10 cm de altura;
4. Bosque sobre solo natural em 25% da área (**bos25**), usando como padrão uma árvore com 10m de altura e copa distinta, profundidade do sistema radicular de 2m, colocadas em arranjo denso sem espaçamento entre as copas;
5. Bosque sobre solo natural em 50% da área (**bos50**), usando o mesmo padrão de árvore;

³ <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>

⁴ <http://agricultura.cptec.inpe.br/>

⁵ <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD>

6. Bosque sobre solo natural em 100% da área (**bos100**), usando o mesmo padrão de árvore.

Cada tipo de revestimento gerou uma área específica dentro da quadra, de modo que em cada área foi colocado pelo menos um receptor, sendo que os casos 4 e 5 possuem, respectivamente, 3 e 2 receptores. A figura 2 mostra os 6 casos e a localização dos receptores.



Figura 2 - Caracterização da quadra por tipo de revestimento de solo, vegetação e receptor utilizado.
Fonte: elaboração própria.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados a seguir foram obtidos após a calibração do modelo e são referentes às 12 simulações, 6 para o período úmido do verão (utilizando como referência o mês de janeiro) e 6 para o período seco do inverno (considerando o mês de agosto). Os gráficos apresentados mostram os valores de temperatura potencial do ar (a 1,5m e 10,5 metros do chão), temperatura da superfície, temperatura radiante média, umidade específica e relativa do ar.

Para os resultados apresentados a seguir, a legenda padrão utilizada, relativa aos receptores em cada caso, é mostrada na figura 3. No eixo das abscissas dos gráficos, observa-se o período considerado da simulação (recorte de 24h dentro das 48 horas simuladas, em minutos) e o valor correspondente logo abaixo, em horas. O período inicial da simulação foi descartado. O eixo duplo das ordenadas mostra os resultados para janeiro e agosto.

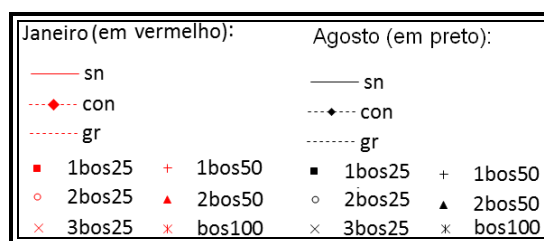


Figura 3 - Legenda dos gráficos

4.1. Temperaturas

As figuras 4 a 7 mostram os gráficos de variação das temperaturas ao longo de 24 horas, no verão e inverno. No caso da temperatura potencial do ar (figuras 4 e 5), foram feitas leituras dos resultados nos pontos receptores em duas alturas: a 1,5 metros do solo (altura padrão de medição das estações meteorológicas da rede OMM – Organização Mundial de Meteorologia) e na altura de 10,5 metros acima do solo (acima do “dossel” urbano/vegetação, considerando que a maioria das edificações locais não ultrapassa os dois pavimentos).

Observa-se que as amplitudes térmicas diminuem com a altura, para todos os tipos de revestimento do solo, tanto no período úmido quanto no seco, mas há, também, mudanças no comportamento microclimático. Na altura de 1,5m, as maiores temperaturas potenciais ocorrem sobre o pavimento de concreto, tanto de dia quanto à noite e em ambos os períodos úmido e seco. Durante o verão úmido (janeiro), solo e gramado, que têm comportamento similar, se mantém mais frios durante o dia, inclusive em relação às áreas de vegetação de porte arbóreo. Chega-se a uma diferença no momento mais quente do dia de cerca de 1,0°C entre solo nu/gramado e o pavimento de concreto, e de 0,5°C entre o solo nu/gramado e o caso 6 (100% da área de bosque). As demais áreas vegetadas de porte arbóreo (25% e 50% de área de bosque) têm valores máximos mais baixos que o caso 6 e mais altos que o solo nu/gramado. Durante a noite, não se observa diferença significativa entre o solo nu e as áreas vegetadas, sejam gramadas ou arborizadas. Já no inverno seco (agosto), as diferenças entre os revestimentos são mais marcadas. O solo nu se comporta muito semelhantemente ao pavimento de concreto durante o dia, mas à noite permanece ligeiramente mais frio. O gramado segue de perto a variação do solo nu, apenas ficando um pouco mais frio no momento mais quente

do dia. Inverte-se a tendência de comportamento da vegetação de porte arbóreo com relação ao verão: agora, a área totalmente arborizada (caso 6) permanece mais fria durante o dia e à noite do que todos os outros revestimentos. A diferença das temperaturas máximas entre esse caso e os do solo nu/pavimento de concreto é de cerca de 1,3°C e de 1,0°C em relação à temperatura máxima do ponto receptor 3BOS25.

Há, também uma diferenciação quanto aos receptores no solo nu: o ponto 1BOS25 permanece mais quente que o ponto 2BOS50 durante as 24 horas, enquanto que o ponto 2BOS25 fica mais quente que os demais durante o dia e ligeiramente mais frio à noite. Isso mostra que a posição relativa do ponto de medição sobre o solo em relação ao entorno, vegetado ou não, e provavelmente em relação aos ventos, faz diferença.

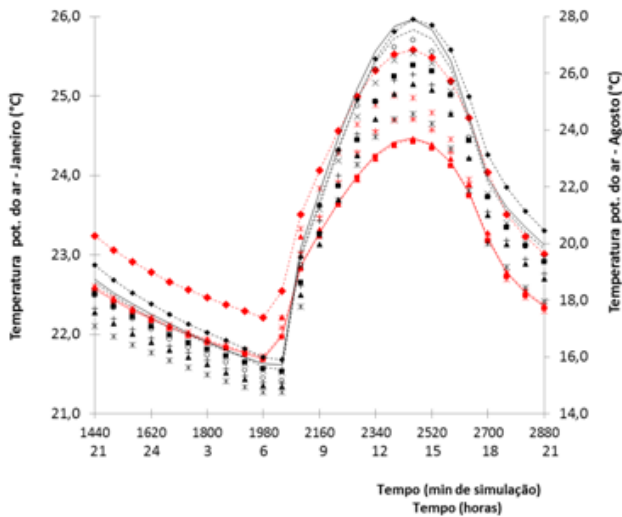


Figura 4 - Temperatura potencial do ar à altura de 1,5m acima da superfície do solo.

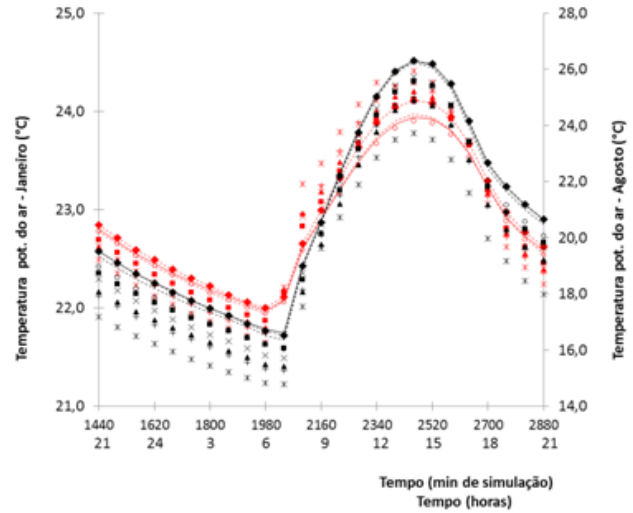


Figura 5 - Temperatura potencial do ar à altura de 10,5m acima da superfície do solo.

Já a altura de 10,5m outras variações são observadas, ficando a temperatura máxima sobre a vegetação de porte arbóreo, notadamente no caso 6, acima da temperatura sobre o pavimento de concreto em cerca de 0,5°C no período úmido e 0,7°C acima da temperatura máxima sobre o solo nu e gramado, que mais uma vez mostram comportamento semelhante. No período seco, ao contrário, as menores temperaturas ocorreram no caso 6 durante as 24 horas, sendo que sobre o solo nu, pavimento de concreto e gramado tiveram comportamentos semelhantes, sendo a temperatura máxima cerca de 1,0°C maior que a do caso 6 e de 0,6°C mais alta que no caso 6 no momento mais frio da noite.

As temperaturas superficiais (figura 6) e radiante médias (figura 7) têm uma amplitude de variação muito maior que as temperaturas do ar, como era de se esperar.

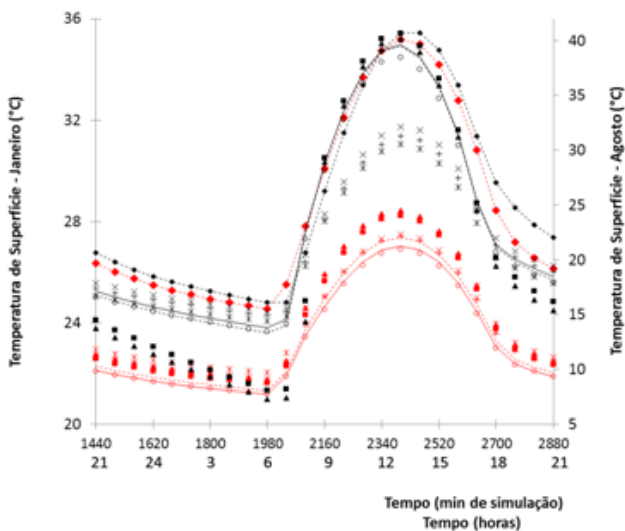


Figura 6 – Temperatura superficial.

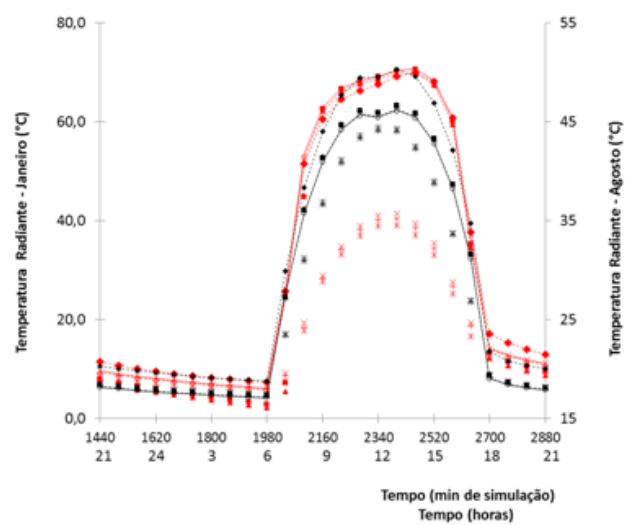


Figura 7 – Temperatura radiante média.

Observa-se na figura 6 que há marcante diferença entre o período chuvoso e o seco, em termos das amplitudes térmicas tanto diárias quanto sazonais. As maiores temperaturas superficiais são atingidas pelo

pavimento de concreto, tanto de dia quanto de noite, nos dois períodos, mostrando um aquecimento ligeiramente maior na seca. No verão úmido, a variação de temperatura deste revestimento mostrou-se sistematicamente muito maior que nos demais, em média de 7,0°C na hora mais quente do dia e de 3,0°C na hora mais fria, à noite. Já no inverno seco, tal diferença foi muito menor, cerca de 1,0°C e 2,0°C respectivamente em relação ao solo nu e maior em relação às áreas verdes durante o dia, em média 10,0°C.

As áreas vegetadas mostram no verão úmido uma variação de temperatura superficial muito menor em relação ao solo nu, sendo que as áreas de vegetação de porte arbóreo tendem a permanecer mais quentes que o solo nu e o gramado, tanto durante o dia quanto à noite. Já no período seco essa tendência se inverte, com as áreas arborizadas atingindo cerca de 8,0°C a menos que o solo nu durante o dia e ficando apenas ligeiramente mais quentes durante a noite. O gramado, porém, segue de perto a variação do solo nu.

Percebe-se uma diferença entre os pontos receptores num mesmo caso de estudo, mais uma vez evidenciando que há mudanças de comportamento térmico relativas à posição do ponto durante uma amostragem de dados. De fato, os pontos 1BOS25, 2BOS25 e 2BOS50, que estão sobre o solo nu nos casos 4 e 5, mostram variações distintas entre si no período úmido e no seco: 1BOS25 e 2BOS50, que estariam ao abrigo do vento leste pela vegetação à montante, apresentam as maiores amplitudes térmicas superficiais diárias e o maior aquecimento durante o dia, exceto quando comparados ao ponto sobre o pavimento de concreto (caso 2). Já o ponto 2BOS25 tem comportamento semelhante ao do caso 1 (100% da área em solo nu), ligeiramente mais frio que o gramado durante o verão.

Além disso, o percentual de cobertura vegetal de porte arbóreo também faz alguma diferença, menos perceptível durante o dia no verão úmido, ligeiramente mais quente durante a noite no caso 6. No período seco, as diferenças são maiores, sendo a área totalmente arborizada mais fresca durante o dia e à noite, enquanto o caso 4 (25% de área de bosque) fica de 1,0°C (para a temperatura mínima) a 1,5°C (para a temperatura máxima) mais quente. O ponto receptor 1BOS50 fica intermediário aos dois outros.

Na figura 7, a temperatura radiante média (T_{mr}) mostra, no período úmido, uma diferença de cerca de 13,0°C entre as temperaturas máximas sobre o solo nu e o pavimento de concreto, de um lado, e as áreas vegetadas, de outro, à exceção do gramado. Sobre o pavimento de concreto as T_{mr} são ligeiramente mais altas que sobre o solo nu, mas o interessante é observar que nesse período praticamente não ocorreu diferença entre o solo nu e o gramado. No período seco, as diferenças entre as T_{mr} sobre os revestimentos são muito menores quando comparadas às temperaturas superficiais, porém o pavimento de concreto continua se destacando dos demais, sendo cerca de 5,0°C mais quente que o solo nu e 6,0°C mais quente que a área vegetada durante o dia; à noite também permanece mais quente, mas a diferença cai para cerca de 1,5°C. Como se vê, ao contrário das temperaturas superficiais, durante a seca, a T_{mr} da área vegetada não tem um comportamento térmico tão diferente do solo nu como no período úmido, praticamente não havendo diferença durante a noite e durante o momento mais quente do dia, a vegetação de porte arbóreo fica apenas cerca de 2,0°C mais fria que o solo nu e o gramado.

4.2. Umidades

As umidades, relativa e específica, foram comparadas apenas na altura de 1,5 metros do chão (figuras 8 e 9). Observa-se que, no período seco, a variação da umidade relativa sobre o solo nu e o pavimento de concreto deve-se mais à variação da temperatura do ar, já que há pouca água disponível nesse período, nas duas situações. Entretanto, no caso da vegetação é bem diferente: a umidade específica tem um aumento sensível a partir das 7 horas, principalmente no caso 6, indicando o processo de evapotranspiração das plantas associado ao momento em que iniciam a fotossíntese, na presença de radiação solar. O gramado, entretanto, apresenta pouca variação na umidade específica, mas também há um aumento desta a partir das 7 horas. É interessante notar que os pontos receptores sobre o solo nu próximos a áreas de vegetação de porte arbóreo também apresentaram um aumento expressivo da umidade específica durante o dia, ao contrário do caso 1.

No período úmido de verão, o ponto sobre o pavimento de concreto passa a apresentar um aumento da umidade específica após o nascer do sol até às 15 horas, provavelmente devido à ocorrência de condensação superficial durante a noite, mas com valores muito inferiores que os demais revestimentos, de modo que a umidade relativa mantém-se a mais baixa de todas, principalmente durante a noite. Solo nu e gramado apresentam agora umidades específicas muito mais elevadas que no período seco, e com a mesma tendência de aumento após as 7 horas. As áreas arborizadas são novamente as que apresentam as umidades específicas mais elevadas, sendo o maior valor observado no caso 6. Com isso, nota-se uma estabilização da umidade relativa nessas áreas, onde ocorrem as menores amplitudes ao longo das 24 horas. Isso também é observado no período seco, porém as amplitudes são maiores, pois a própria umidade da massa de ar é bem menor que no período úmido. Por outro lado, também se pode notar nesse período uma grande redução da

umidade específica nos pontos sobre as áreas arborizadas, principalmente aquelas apenas parcialmente arborizadas (3BOS25; 2BOS50), quando comparadas com o período úmido.

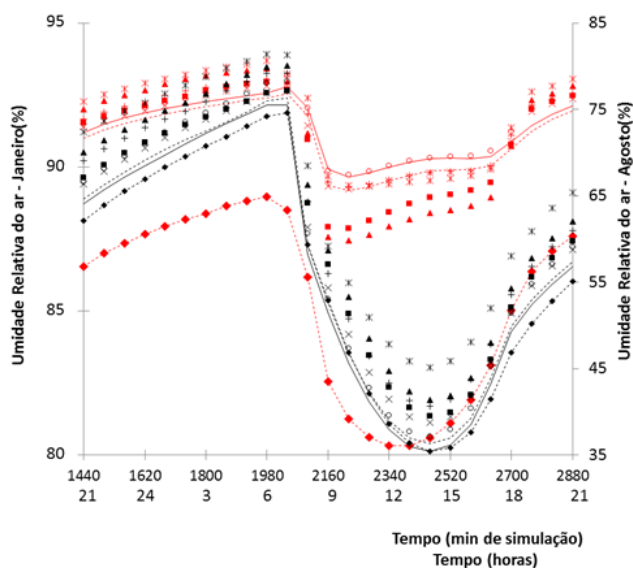


Figura 8 – Umidade Relativa do ar referente à altura de 1,5m acima da superfície do solo.

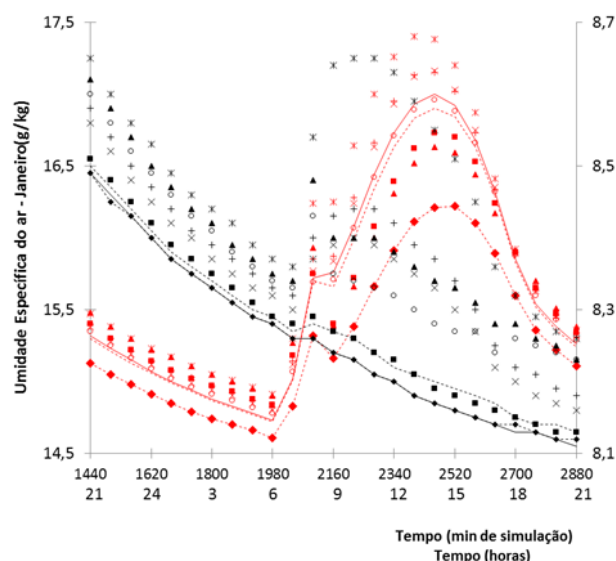


Figura 9 - Umidade Específica do ar referente à altura de 1,5m acima da superfície do solo.

5. CONCLUSÕES

Foram observadas diferenças relevantes no comportamento termo-higrométrico entre os tipos de revestimento do solo. Contudo, tal comportamento sofre a influência sazonal da disponibilidade de água no sistema e a influência diária da disponibilidade de energia. Nas condições climáticas de Belo Horizonte, do tipo local de solo e de vegetação, notou-se que:

- Em ambos os períodos úmido e seco, e para todas as variáveis de temperatura analisadas, o ponto receptor sobre o pavimento de concreto apresentou os maiores valores;
- A variação do comportamento térmico do gramado seguiu de perto a do solo nu, em todos os casos simulados, o que pode se dever a baixa altura da grama (10 cm) e ao tipo de solo argiloso;
- No período úmido, a vegetação de porte arbóreo apresentou temperatura do ar e superficial mais elevadas que as do solo nu/gramado durante o dia, porém a T_{mr} ficou mais baixa, provavelmente porque o albedo do bosque é maior nessa época do ano. Já no período seco a situação se inverte, com a área arborizada apresentando temperaturas do ar e superficial mais baixas que as do solo nu/gramado. Com relação à T_{rm} apenas o caso 6 seguiu tal tendência durante a seca, sendo que as áreas de arborização parcial tiveram comportamento térmico mais semelhante ao do solo nu;
- As amplitudes térmicas sobre os revestimentos foram maiores para a temperatura superficial e muito menores para a temperatura do ar. Como esperado, as maiores amplitudes termo-higrométricas ocorreram durante o período seco, no inverno. Nesse período, observa-se também a maior contribuição da vegetação de porte arbóreo na umidificação do ar, mesmo com o solo tão seco.

Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos experimentais com relação às temperaturas do ar e superficial, embora ainda seja relativamente rara literatura nacional sobre o assunto. Entretanto, neste trabalho, as observações puderam ser ampliadas, através da simulação, permitindo notar que:

- Há diferenças sensíveis entre os resultados nas alturas abaixo e acima do “dossel” urbano/vegetação, indicando a possibilidade de interpretações diferentes da influência da vegetação e/ou de revestimentos artificiais, ao usar modelos climáticos de meso ou de microescala;
- Há diferenças sensíveis entre os resultados no período úmido e seco, para um mesmo revestimento e entre revestimentos diferentes;
- O comportamento das variáveis de temperatura é, também, diferente, chegando a ser inverso entre si quando comparadas num mesmo período do ano ou ao longo do ano;
- A posição do ponto de coleta dos dados (medição em campo ou simulação) é importante, pois sofre a influência das condições de seu entorno imediato e do vento.

Tais observações podem ser úteis na orientação de medições em campo. Alguns limites da abordagem

adotada também devem ser indicados, como: a simplificação dos modelos de área de estudo; as limitações numéricas e paramétricas do próprio modelo climático; os resultados restritos às condições locais. Outros trabalhos seriam necessários em domínios climáticos diferentes e com outros tipos de solo e vegetação para se obter parâmetros de comparação e identificação das melhores estratégias de uso da vegetação em cada lugar do país.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. J. G.; COSTA, J. M. N.; AGUIAR, R. G. et al. Albedos em áreas de pastagem e de floresta no sudoeste da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14^o, 2006, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: SBMET, 2006, 6 p. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-fd3a630b6d0138508bbeb070eec9e88b.pdf>.
- ALUCCI, M. P. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica: procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projeto de edificações**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 1992.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. **Ambiência**, Guarapuava (PR), v. 8, n. 1, 2012, p. 101-111.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review on turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, 2003, p. 1-26.
- CHANDLER, T. J. **Urban Climatology and its Relevance to Urban Design**. Geneva: WMO Technical Note 149, 1976.
- BONAN, G. B. **Ecological Climatology: concepts and applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- BRAZEL, A.; GOBER, P.; CLARKE, S. G. et al. Mitigating urban heat island effects with water- and energy-sensitive urban designs. In: SYMPOSIUM ON THE URBAN ENVIRONMENT, 8th, ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 89th, 2009, Phoenix, EUA. **Proceedings...** Phoenix: AMS, 2009, 3p. Disponível em <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/145231.pdf>. Acesso em janeiro de 2013.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. CD-ROM
- BRUSE, M. **ENVI-Met® model homepage**. 2007. Disponível em: <http://www.envi-met.com/>. Acesso em janeiro de 2012.
- DIMOUNDI, A.; NIKOLOPOULOU, M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, 2003, p. 69-76.
- EUMORFOPOULOU, E. A.; KONTOLEON, K. J. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. **Building and Environment**, v. 44, 2009, p. 1024-1038.
- FERREIRA, F. L.; PRADO, R. T. A. **Medição de albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil**. Boletim Técnico Série BT/PCC no. 351. São Paulo: Escola Politécnica/USP, 2003.
- HIGUERAS, E. **Urbanismo bioclimático - critérios medioambientales en la ordenación de asentamientos**. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1997.
- KATSZCHNER, L. Thermal comfort evaluation for planning in cities under consideration of global climate change. **Forum Patrimônio: ambiente construído e patrimônio sustentável, (on-line)**, Belo Horizonte (MG), v. 4, n. 1, 2010, 14p. Disponível em http://www.forumpatrimonio.com.br/seer/index.php/forum_patrimonio/article/view/39/34
- LAHME, E.; BRUSE, M. Microclimatic effects of a small urban park in a densely build up area: measurements and model simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 5th, 2003, Lodz, Poland. **Proceedings...**, Lodz: University of Lodz/Faculty of Geographical Sciences, 2003, 4 p. CD-ROM
- LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. New York, Academic Press, 1981.
- LIBERATO, A. M. Albedo à superfície a partir de imagens LANDSAT 5 – TM em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista de Geografia, (on-line)**, Recife (UFPE), v. 28, n. 1, 2011, 10 p. Disponível em <http://www.revista.ufpe.br/revistageografia/index.php/revista/article/viewFile/368/345>
- MAYER, S. T.; SILVA, A. F.; MARCO JR, P.; MEIRA NETO, J. A. A. Composição florística da vegetação arbórea de um trecho de floresta de galeria do Parque Estadual do Rola-Moça na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil, **Acta bot. bras.**, v. 18, n. 4, 2004, p. 701-709.
- RIBEIRO, C.M.; MÓL, C. R. Avaliação das mudanças climáticas em Belo Horizonte: análise dos parâmetros temperatura e precipitação. In: SIMPÓSIO SITUAÇÃO AMBIENTAL E QUALIDADE DE VIDA NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE, MG, 1985, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/Instituto de Geociências da UFMG, 1985, p. 67-77.
- ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas**. Tradução Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- ROBITU, M.; MUSY, M.; INARD, C.; GROLEAU, D. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. **Solar Energy**, v. 80, 2006. p 435-447.
- SANTAMOURIS, M. The role of green spaces. In: Santamouris, M. (ed.). **Energy and Climate in the Built Environment**, Londres: James & James, 2001, p. 97-109.
- SHASHUA-BAR, M. E.; HOFFMAN, L. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, v. 31, 2000, p. 221-235.
- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2ª edição. Viçosa: Editora UFV, 2012.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a CAPES e a FAPEMIG que apoiaram este trabalho através da concessão, respectivamente, de bolsa de mestrado e de iniciação científica.