

## VERIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO DOS PADRÕES DE VENTO DEVIDO À OCUPAÇÃO URBANA NA CIDADE DE BELO HORIZONTE, MG

**Daniele Gomes Ferreira (1), Eleonora Sad de Assis (2), Clara Maíra Oliveira Ferreira (3)**

(1) Mestre, Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, dani.gferreira@yahoo.com.br

(2) Dra., Professora do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo, elsad@ufmg.br

(3) Bolsista de graduação, Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo,  
claramaira02@yahoo.com.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo,  
Laboratório de Conforto e Eficiência Energética em Edificações, Rua Paraíba, 697, sala 124, Funcionários,  
Belo Horizonte-MG, 30130-140 Tel.: (31) 3409-8825

### RESUMO

Em regiões de clima tropical, o vento desempenha papel importante na qualidade e conforto ambiental das cidades, sendo que a incorporação de estudos desta variável no planejamento urbano poderia evitar conseqüências negativas de uma ocupação urbana inadequada. Neste sentido, o presente trabalho objetiva verificar a influência da cidade sobre os padrões de vento através da comparação de dois momentos da ocupação urbana do município de Belo Horizonte, representados pelos anos de 1987 e 2006, utilizando princípios da climatologia dinâmica e técnica de simulação computacional, aplicando o programa WindMap™. O vento foi descrito por meio da seleção de episódios típicos das condições de estabilidade e instabilidade atmosférica, que caracterizam, respectivamente, o inverno e o verão na cidade. A ocupação urbana, por sua vez, foi representada pelo parâmetro comprimento de rugosidade ( $z_0$ ). Estes dois parâmetros, além da topografia local, consistiram nos inputs do modelo computacional. Como resultado foi possível observar a variação da velocidade do vento diante da evolução da cidade e da condição de estabilidade atmosférica. Obteve-se uma correlação negativa entre a variação de  $z_0$  e a velocidade, notando-se que quanto maior o valor de  $z_0$ , maior foi a redução da magnitude do vento nos episódios analisados.

Palavras-chave: vento, ocupação urbana, simulação computacional.

### ABSTRACT

In tropical climate, wind is important to maintain the quality and comfort in cities. Studies about this parameter could be incorporate in urban planning strategies to avoid negative results of improper land use. This work investigated the city influence on wind patterns, comparing land use in 1987 and 2006 in the city of Belo Horizonte. The methodology applied was based on fundamentals of dynamic climatology and computational simulation, using WindMap™ software. Wind was represented by episodes which established different conditions of atmospheric circulation in local scale. They show stable and unstable atmospheric situations which are representative of winter and summer conditions, respectively. To demonstrate aerodynamic characteristics of land use, it was used the parameter roughness length ( $z_0$ ). These data combined with local topography were inputs for computer simulation. Results pointed out wind speed changes caused by urban increase and atmospheric stability conditions. Also, they showed that increase in  $z_0$  followed in wind speed decrease.

Keywords: wind, land use, computer simulation.

# 1. INTRODUÇÃO

O vento desempenha papel importante na qualidade e conforto ambiental, principalmente em regiões localizadas em clima tropical, onde a ventilação favorece as trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente e atua como uma estratégia bioclimática eficiente para a obtenção do controle térmico e conforto humano. No contexto urbano, o estudo desta variável e sua incorporação em planejamento urbano poderiam mitigar efeitos produzidos pela urbanização e evitar conseqüências negativas de uma ocupação urbana inadequada, tais como a ocupação e o adensamento de áreas que naturalmente não apresentam boa ventilação, a implantação de áreas industriais e a alteração de padrões de uso do solo.

Nota-se que pesquisas que abordam o vento e outras variáveis climáticas associadas ao planejamento urbano são cada vez mais realizadas, contudo, ainda são pouco aplicadas ao zoneamento das cidades. Uma das razões geralmente apontadas é a dificuldade de comunicação entre pesquisadores e planejadores, em que as informações produzidas pelos primeiros não conseguem ser aplicadas em atividades de planejamento, sendo necessária uma aproximação entre ambas as abordagens. Outro obstáculo para a aplicação dos estudos climáticos é a abordagem realizada nas pesquisas. Muitas vezes as análises descrevem a ocorrência de fenômenos causados pela urbanização, ou seja, é uma ciência descritiva. Para fins de planejamento, no entanto, é necessário um enfoque na previsão de cenários futuros, verificando o impacto da atmosfera urbana no ambiente construído e analisando seus efeitos na saúde e conforto dos ocupantes (PAGE, 1970).

Um método que se mostra eficiente em estudos de ventilação é a simulação computacional. Esta é uma ferramenta que produz resultados relativamente rápidos se comparada a experimentos realizados no ambiente real. Uma outra vantagem desta técnica é o custo reduzido da sua aplicação, se comparado com testes *in loco* ou em modelo reduzido, e a possibilidade de previsão de cenários futuros, demanda que se faz presente em abordagens de planejamento urbano.

Geralmente, a escolha do modelo computacional está associada à escala de análise dos estudos e ao desempenho dos programas. Na escala microclimática<sup>1</sup>, os programas do tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) são extensamente utilizados. Outros modelos mais sofisticados em termos dos métodos numéricos, da estrutura da malha que os compõem e dos modelos de abordagem de turbulência estão cada vez mais desenvolvidos e são capazes de prever o comportamento do ar em escala mesoclimática. É o caso, por exemplo, dos modelos LES (*Large Eddy Simulation*), RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation*) e MM5 (*Mesoscale Model*).

Os programas de meso-escala, no entanto, nem sempre conseguem prever o comportamento do vento próximo à superfície devido à resolução mínima da malha ser geralmente superior a dezenas de metros, o que dificulta sua utilização para fins de planejamento. Já os modelos de CFD exigem representação detalhada da superfície urbana. O tempo de processamento destes programas é elevado e, quanto maior a extensão da área, mais complexa é a solução e mais tempo será despendido no processo, tornando-se inviável sua aplicação para representação da totalidade de uma cidade.

Para simulações que envolvem a extensão de um município ou de áreas menores, como bairros, podem ser empregados aplicativos de previsão de potencial eólico para estimativa das condições de vento. Exemplos destes programas são o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), aplicados em trabalhos de Lopes (2003) e Prata (2005) e o WindMap<sup>TM</sup>, utilizado por Vasconcelos (2006), por exemplo.

O WindMap<sup>TM</sup> é um aplicativo desenvolvido pela empresa americana Brower and Company utilizado para previsão de áreas com potencial de geração de energia eólica. Foi aplicado na elaboração do Atlas do Potencial Eólico do Brasil, assim como em mapeamentos eólicos dos estados brasileiros com potenciais favoráveis de geração deste tipo de energia<sup>2</sup>. Em estudos urbanos, este programa foi utilizado por Vasconcelos (2006) para simular cenários de expansão da cidade de Lisboa (Portugal), com enfoque na verificação da influência da ocupação urbana na alteração da circulação das brisas do estuário do Rio Tejo. A velocidade de vento a 10 m de altura foi calculada para condições médias de brisa e para três mapas de rugosidade (2001, 2005 e cenário futuro). Foi identificada uma redução da velocidade média de vento de cerca de 7% entre os cenários de 2005 e 2001 devido ao aumento da rugosidade. Para uma perspectiva de ocupação futura, estimou-se que a velocidade média seria diminuída em 6% face ao cenário considerado atual (2005).

As pesquisas realizadas por Lopes (2003), e Vasconcelos (2006), ambos em Lisboa, e Prata (2005) na cidade de Santos (São Paulo), consideram médias de velocidade e predominância da direção do vento de

<sup>1</sup> A nomenclatura adotada para as escalas climáticas foi definida por Oke (2006).

<sup>2</sup> A empresa Camargo Schubert foi a responsável pelo desenvolvimento destes estudos, contemplando o mapeamento eólico dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, Santo Catarina, Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.camargo-schubert.com/>>. Acesso em dezembro/2008.

longos períodos de observações climáticas. Neste tipo de tratamento de dados, é possível observar o comportamento atmosférico de uma forma genérica, sem revelar suas particularidades. Um outro tipo de abordagem que se pode adotar é o tratamento dinâmico do vento, que pretende expressar as variações no tempo e as particularidades dos fenômenos por meio de amostragem de individualidades que sejam expressões reais dos mecanismos de circulação atmosférica de uma região (MONTEIRO, 1969).

A amostragem de individualidades pode ser feita através da seleção de episódios representativos da circulação atmosférica de uma determinada região, sendo que esta garante a validade dos modelos construídos por meio deste método, reduzindo a necessidade de se examinar uma série longa de dados meteorológicos. Além disso, diminui o tempo despendido nos estudos descritivos, já que o foco do planejamento é a previsão de cenários e a dinâmica da cidade exige uma agilidade na tomada de decisão. A abordagem dinâmica permite também a identificação de diferentes condições de estabilidade atmosférica, parâmetro influenciado pelos perfis verticais de temperatura e velocidade do vento e considerado nos modelos de simulação computacional. Nota-se então que o tratamento dinâmico do vento, com a representação de particularidades dos fenômenos atmosféricos, aliado à simulação computacional, apresenta-se como uma metodologia que pode ser empregada em estudos urbanos, produzindo resultados que auxiliam na descrição do comportamento do vento e na previsão de possíveis alterações dos padrões de ventilação em função da mudança da ocupação urbana.

Neste artigo, o foco dos estudos é o município de Belo Horizonte. Cidade continental e capital do estado de Minas Gerais localiza-se na região central do estado e apresenta uma área equivalente a 331 km<sup>2</sup>. O clima local pode ser classificado como tropical de altitude, com temperatura média de 21°C e vento predominante de leste com velocidade de 1,4 m/s.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência da cidade sobre os padrões de vento para o caso do município de Belo Horizonte, através da comparação de dois momentos da ocupação urbana municipal, representados pelos anos de 1987 e 2006.

## 3. MÉTODO

A metodologia aplicada utiliza princípios da climatologia dinâmica e técnica de simulação computacional, aplicando o programa WindMap<sup>TM</sup>. Pode ser sintetizada em quatro etapas: recorte temporal representativo da alteração da ocupação urbana, coleta e tratamento de dados de entrada do modelo computacional, realização da simulação computacional e seleção de pontos para verificar a premissa de que a ocupação urbana altera os padrões de vento em Belo Horizonte. A seguir, são descritos os métodos e técnicas adotados em cada etapa.

### 3.1. Recorte temporal e seleção de episódios

A definição do recorte temporal foi norteada por três critérios básicos: o período comum de localização da estação meteorológica principal de Belo Horizonte, o intervalo de tempo em que as transformações urbanas fossem relevantes e contrastantes - considerando-se como marco destas transformações a aprovação de leis municipais de uso e ocupação do solo (LUOS) - e a ocorrência de anomalias climáticas. A estação padrão de Belo Horizonte foi instalada no local onde se encontra atualmente no ano de 1986. Nas décadas de 1980 e 1990, duas LUOS foram aprovadas na cidade nos anos de 1985 e 1996. A partir destes critérios, verificou-se a ocorrência de anomalias climáticas, determinadas pela presença de El Niño e La Niña durante o período entre 1987 e 2007, verificando que estes dois anos correspondem, respectivamente, à ocorrência de El Niño moderado e El Niño fraco, e estes satisfazem os critérios básicos determinados previamente<sup>3</sup>.

A seleção de episódios, por sua vez, considerou os princípios da climatologia dinâmica, baseada na amostragem de individualidades dos mecanismos de circulação atmosférica. Para Belo Horizonte, dois períodos de comportamento distinto do vento durante o ano foram identificados: o período estável, durante o inverno seco, e o instável, durante o verão chuvoso (FERREIRA, 2009). Reconhecendo esta dinâmica, foram determinados, então, dois episódios representativos do comportamento atmosférico para cada ano de estudo, sendo que cada episódio compreendeu um período de 5 dias consecutivos. O período estável foi delimitado nos meses de junho e julho, constatando-se que não houve ocorrência de chuva em dias anteriores ou

---

<sup>3</sup> No trabalho original (FERREIRA, 2009), além dos anos de 1987 e 2007, o ano de 1997 também foi analisado. Neste artigo, contudo, este período não será abordado.

posteriores aos períodos escolhidos e que a moda da direção dos ventos correspondia à predominância em Belo Horizonte. Já os episódios de instabilidade foram caracterizados pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), com dias consecutivos de chuvas e alteração no quadrante de direção predominante dos ventos. A Tabela 1 apresenta os intervalos de dias escolhidos para cada ano.

Tabela 1 - Seleção dos episódios para cada ano de estudo

Ano	Período instável	Período estável
1987	09 a 13/01	15 a 19/07
2007	12 a 16/01	17 a 21/06

Para representação da ocupação urbana, foram selecionadas imagens do satélite LANDSAT 5, coletadas em 17/07/1987 e 21/07/2006<sup>4</sup>. Esta última representou a ocupação na análise de 2007, já que não havia disponibilidade de imagens deste ano no período de execução desta parte do procedimento metodológico. Ambas as imagens foram tratadas e submetidas à classificação supervisionada pelo método estatístico de Máxima Verossimilhança (MAXVER), procedimentos realizados no programa Spring<sup>®</sup>.

### 3.2. Coleta e tratamento de dados

Para a realização de simulação computacional utilizando o programa WindMap<sup>™</sup> foram necessários três parâmetros principais de entrada: topografia local, mapa de rugosidade e dados de vento. A topografia foi representada por um modelo digital de terreno (MDT), de resolução equivalente a 114 metros e com limites definidos pelos pares de coordenadas UTM (*datum* SAD69): 591.057, 7.781.085m e 624.915, 7.814.943m.

Um modelo digital de elevação (MDE), com os mesmos limites do MDT, reproduziu a rugosidade local. Este foi elaborado com base na classificação de imagens de satélite LANDSAT e a esta classificação foram incorporados valores de comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) determinados pelo método morfométrico Regra Prática, no caso de classes de cobertura do solo urbano (GRIMMOND e OKE, 1999), e valores publicados por Wieringa et al (2001) para classes que não representam áreas urbanas (FERREIRA et al., 2008). Foram definidas três classes representativas de áreas urbanas e quatro classes de elementos naturais (Tabela 2).

Tabela 2: Descrição das classes de cobertura do solo adotadas na classificação de imagens de satélite

Classes de cobertura do solo	Descrição	$z_0$ (m)
Água	Áreas representadas por lagoas e represas	0,0002
Solo exposto	Regiões não ocupadas por edificações, caracterizadas por extensões de terra sem qualquer tipo de cobertura vegetal.	0,03
Vegetação rasteira	Vegetação de pequeno porte ou com obstáculos esparsos em altura que podem ser árvores ou construções.	0,1
Vegetação arbórea	Áreas com vegetação arbórea significativa, que podem ser remanescentes de florestas, parques urbanos ou conjunto de árvores de grande porte,	1,0
Área urbana residencial	Regiões com edificações de até dois pavimentos, tipologia característica de bairros residenciais.	0,33
Área urbana densa de altura média	Áreas compostas por residências unifamiliares e prédios de até 8 pavimentos, com pequenos afastamentos entre eles.	0,39
Área urbana de alta densidade	Regiões de densidade elevada que apresentam edificações acima de 10 pavimentos, com pequenos afastamentos entre elas, representadas principalmente pelo centro da cidade de Belo Horizonte.	3,8

O terceiro parâmetro de entrada do programa computacional constitui-se de dados de vento de superfície e de vento geostrófico. O primeiro foi representado por informações coletadas por quatro estações meteorológicas fixas, sendo uma delas a estação padrão de Belo Horizonte e as demais localizadas nos municípios de Sete Lagoas, Florestal e Divinópolis, monitoradas pelo 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET). Dados de direção e velocidade do vento,

<sup>4</sup> Imagens disponíveis no site <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em julho de 2007.

registrados nos três horários sinóticos de medição das estações meteorológicas e correspondentes aos episódios dos anos de 1987 e 2007 foram tratados por método estatístico, extraindo-se as médias de velocidade e a direção predominante para cada episódio e para cada estação.

Os dados de vento geostrófico foram determinados a partir de sondagem do Aeroporto Internacional de Confins e diagramas Skew-T do horário 12 GMT<sup>5</sup>. Definiu-se que a melhor representação dos episódios seria através do perfil vertical de velocidade que mais se aproximasse da média do período analisado. A partir destas informações foi possível determinar a altura da camada limite atmosférica (CLA) e a altura da camada de superfície, que corresponde a 10% da altura da CLA (LOPES, 2003). Já as velocidades e direções do vento geostrófico foram extraídas das sondagens em alturas correspondentes às pressões de 700, 500 e 400 hPa (PEDRO *et al.*, 2006) para os mesmos perfis utilizados na determinação da altura da CLA. Todos estes parâmetros determinam os *inputs* necessários para a realização da simulação computacional.

### 3.3. Simulação computacional

As simulações no programa WindMap<sup>TM</sup> foram feitas para cada episódio dos anos de 1987 e 2007, utilizando dados de vento e rugosidade correspondentes a cada período. Conforme a característica dos episódios, escolheu-se o tipo de atmosfera mais frequente, sendo classificada como estável ou instável. A altura de simulação utilizada foi de 10 metros. Para verificar o efeito isolado da ocupação, efetuou-se uma subtração dos resultados obtidos nos testes para cada episódio com aqueles realizados para verificar apenas o efeito da topografia (MDT)<sup>6</sup>. As simulações com o Modelo Digital de Terreno mostraram-se necessárias já que o relevo da área de estudo é complexo e este poderia desempenhar papel importante na circulação dos fluxos de ar, dificultando a observação da influência específica da cidade nos padrões de vento.

### 3.4. Seleção de pontos para verificação da alteração dos padrões de vento diante da ocupação urbana

A análise de pontos selecionados no município de Belo Horizonte pretendeu demonstrar como a alteração da ocupação do solo ao longo do tempo pode influenciar a velocidade de vento. Foram escolhidos 19 pontos localizados dentro dos limites do município de Belo Horizonte, amostragem determinada visualmente através da comparação das imagens de classificação de cobertura do solo (Figura 1).

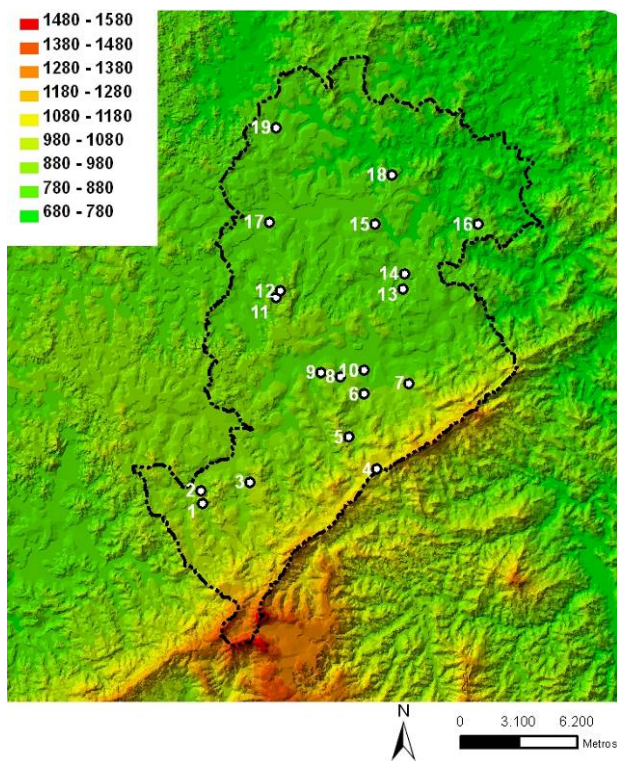


Figura 1 – Topografia de Belo Horizonte e localização dos pontos selecionados para análise dos resultados.

Tabela 3 – Valores de  $z_0$  para cada ponto analisado

Ponto	Comprimento de rugosidade ( $z_0$ )		
	terreno	1987	2006
1	0,03	1	0,39
2	0,03	0,39	3,8
3	0,03	0,03	0,33
4	0,03	0,1	3,8
5	0,03	0,1	0,33
6	0,03	0,33	3,8
7	0,03	0,1	0,39
8	0,03	0,39	3,8
9	0,03	0,33	0,39
10	0,03	0,39	3,8
11	0,03	0,03	0,39
12	0,03	0,39	3,8
13	0,03	0,33	3,8
14	0,03	0,33	0,39
15	0,03	0,03	0,33
16	0,03	0,1	0,33
17	0,03	0,03	0,33
18	0,03	0,33	0,39
19	0,03	0,03	0,33

<sup>5</sup> Disponíveis em <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em julho de 2008.

<sup>6</sup> Neste caso, o valor atribuído ao comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) foi de 0,03m para toda a área de estudo.

Procurou-se identificar áreas em que classes de solo exposto e vegetação foram substituídas por área urbana e também locais onde ocorreram adensamentos da ocupação urbana, como apresentado na Tabela 3. Em seguida foram extraídos os valores de alteração da velocidade para cada ponto a partir dos arquivos resultantes da operação de subtração, descrita anteriormente. Através de tratamento estatístico, obteve-se uma correlação entre a alteração da velocidade e o comprimento de rugosidade ( $z_0$ ).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Alteração da ocupação urbana

A classificação de imagens do satélite LANDSAT correspondente aos anos de 1987 e 2006 mostra uma ampliação das áreas de ocupação urbana, conforme apresentado na Figura 2. Nota-se que as classes de cobertura relativas a solo exposto (S) e vegetação rasteira (VR) sofreram redução significativa no intervalo de aproximadamente 20 anos, sendo que a primeira, concentrada principalmente na porção norte da imagem classificada de 1987, praticamente não existe mais na figura relativa ao ano de 2006. No município de Belo Horizonte, este tipo de cobertura se restringe a uma pequena extensão territorial na região oeste e de forma esparsa no norte e leste da cidade, demonstrando que, atualmente, não há grandes áreas sem ocupação urbana como ainda existiam no ano de 1987.

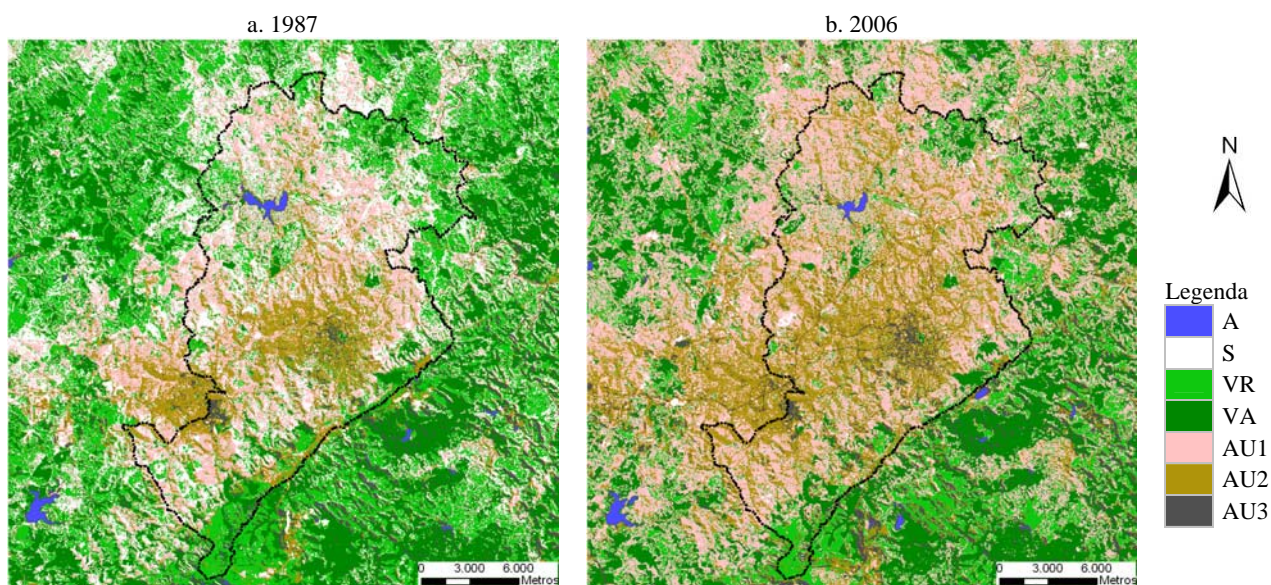


Figura 2a e b: Classificação das imagens de satélite de 1987 e 2006. A linha preta representa o limite da cidade de Belo Horizonte.

No que se refere às áreas urbanas, aquela correspondente ao uso residencial (AU1) foi a que mais sofreu expansão e praticamente dobrou no intervalo de tempo analisado, passando de cerca de 20% para 40% do total da área de estudo. As regiões sul e norte de Belo Horizonte são as que reúnem a maior parte deste tipo de classe na imagem de 2006. Houve também um aumento significativo da área urbana de altura média (AU2) ao longo do tempo. Inicialmente concentrada na região central de Belo Horizonte, tal tipo de ocupação expandiu-se para a porção oeste e norte nos anos posteriores. Em 1987, este tipo de cobertura do solo correspondia a 8,5% do território analisado, sendo que em 2006 passou a ocupar 17% da área total. Quanto à classe urbana de alta densidade (AU3), é possível observar sua ampliação na área central do município e ao longo do eixo que segue no sentido oeste a partir do centro de Belo Horizonte. Entre o período de 1987 e 2006 houve aumento de 1% deste tipo de cobertura do solo, passando de 4 para 5% do total da área estudada.

### 4.2. Análise dos dados de vento

A análise dos dados de vento representativos de cada episódio revela um aumento de sua velocidade quando comparados os anos de 1987 e 2007 (Tabela 4). Nos episódios de verão, ou seja, de atmosfera instável, há uma variação de cerca de 10% entre a média de magnitude do vento de 1987 e 2007 no que diz respeito à estação meteorológica de Belo Horizonte, enquanto que nos eventos caracterizados pela estabilidade atmosférica, a velocidade média praticamente dobrou. Se verificarmos as médias em relação à incerteza de medição dos equipamentos, que equivale a  $\pm 0,5$  m/s, pode-se dizer que os valores são praticamente iguais em todos os episódios para todas as estações, com exceção daquela localizada em

Divinópolis. Apesar de verificar o aumento da velocidade, não é possível extrair conclusões desta ocorrência a partir da análise dos episódios. Quanto à direção do vento, nota-se que, para a estação de Belo Horizonte, os episódios estáveis apresentam direção leste, equivalente àquela predominante na cidade. Já em condição de instabilidade, observa-se a alteração do quadrante dominante, com direção de noroeste.

Tabela 4 - Velocidades médias e direção predominante do vento das estações meteorológicas para cada episódio

Estação meteorológica	Velocidade do vento (m/s)*			
	*Incerteza das médias de velocidade: $\pm 0,5$ m/s.			
	Episódios instáveis		Episódios estáveis	
	1987	2007	1987	2007
Belo Horizonte	1,17	1,28	1,00	1,94
Sete Lagoas	1,36	0,68	1,09	1,71
Divinópolis	-	2,47	-	2,87
Florestal	1,13	-	1,00	-
Direção do vento				
Belo Horizonte	NW	NW	E	E
Sete Lagoas	S	N	S	E
Divinópolis	-	N	-	N
Florestal	NW	-	W	-

### 4.3. Análise das simulações computacionais

Analisando os mapas de velocidade do vento que resultaram das simulações computacionais (Figuras 3 e 4, a e b), nota-se que a região sul e sudeste da área de estudo são as que apresentam maiores amplitudes de velocidade em virtude da concentração de altitudes mais elevadas e de topografia movimentada (Figura 1). Na porção norte, onde a topografia é mais plana, as manchas são mais constantes e de intensidades mais baixas se comparadas às áreas mais elevadas do território analisado, não ultrapassando velocidades de 2 m/s em todas as simulações. As áreas do mapa representadas pela cor branca revelam locais onde o programa computacional não conseguiu simular o valor da velocidade, atribuindo a elas valores negativos.

Quanto ao comportamento do vento nos episódios, verifica-se que nas simulações com atmosfera instável (Figura 3a e b), as manchas de velocidades mais baixas são homogêneas, se comparadas aos episódios estáveis, e estão reunidas majoritariamente ao norte e oeste da área de estudo. Em mais de 80% do território foram obtidas velocidade entre 0 e 2 m/s, valor considerado próximo à média de 1,4 m/s para Belo Horizonte.

Nos testes com atmosfera estável (Figura 4a e b), há maior dispersão das manchas de mesma velocidade, mas ainda assim é possível perceber a influência da topografia. Em 1987, cerca de 90% do território analisado apresentou velocidades entre 0 e 2 m/s. No ano de 2007 houve um aumento da magnitude dos ventos em toda a área analisada sendo que mais de 85% desta ficou com velocidades inferiores a 3 m/s. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da velocidade média do vento em todas as estações meteorológicas analisadas.

Observando o efeito isolado da ocupação urbana (Figuras 3 e 4, c e d), é possível notar que as manchas de velocidades mais baixas aumentam em todos os testes. Nos resultados da subtração das simulações com atmosfera instável, o efeito da ocupação urbana é nítido. No ano de 1987, a velocidade do vento sofreu redução em cerca de 80% do território analisado. A área correspondente ao aumento da velocidade, que equivalia a 18,5% em 1987, foi reduzida a apenas 1% em 2007 devido à expansão de áreas urbanas e o consequente aumento dos valores do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ). Na região central da Figura 3c nota-se a presença de uma mancha cujos valores tiveram redução entre 0,3 m/s e 0,6 m/s. Esta zona corresponde ao centro da cidade de Belo Horizonte, que sofreu expansão das áreas de alta densidade ao longo do tempo. A redução de velocidade é ainda maior no ano de 2007 (Figura 3d), período em que ocorreu maior adensamento urbano no local, sendo que as magnitudes de vento sofreram diminuição de até 0,9 m/s.

Nos episódios caracterizados por atmosfera estável, as manchas que apontam redução da velocidade do vento também representam a maior porcentagem de área (Figura 4c e d). Sua maior concentração está nos intervalos que representam a diminuição da magnitude entre 0 e 0,8 m/s. No ano de 2007 é possível observar uma redução das áreas de intervalos negativos, o que mostra o aumento de velocidade do vento na simulação deste período. As áreas com esta característica situam-se, principalmente nos topos de morro ao sul do município de Belo Horizonte, região em que o aumento da velocidade do vento é mais evidente se comparado aos demais episódios.

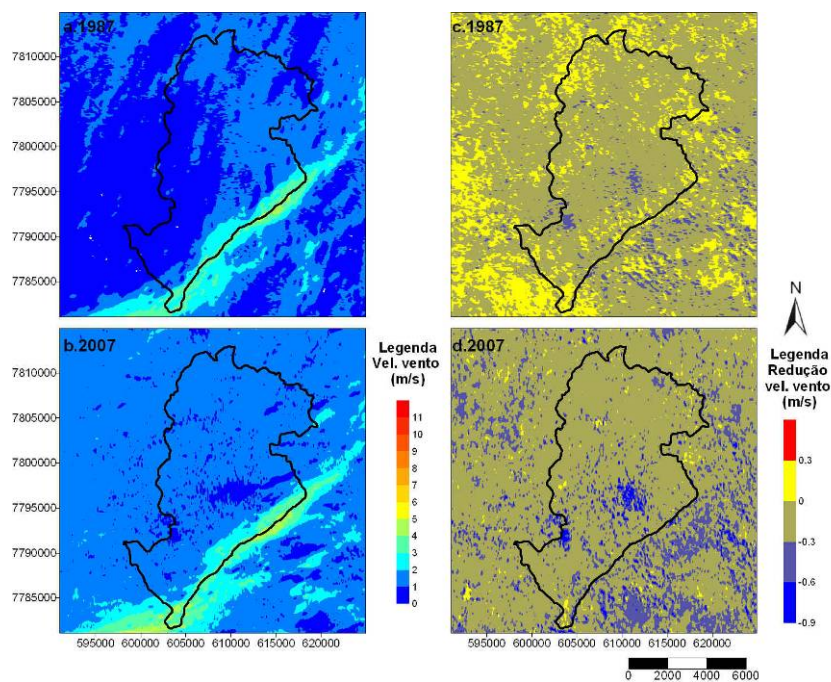


Figura 3: Episódios instáveis. (a) e (b): Simulação da velocidade do vento. (c) e (d): Efeito isolado da ocupação

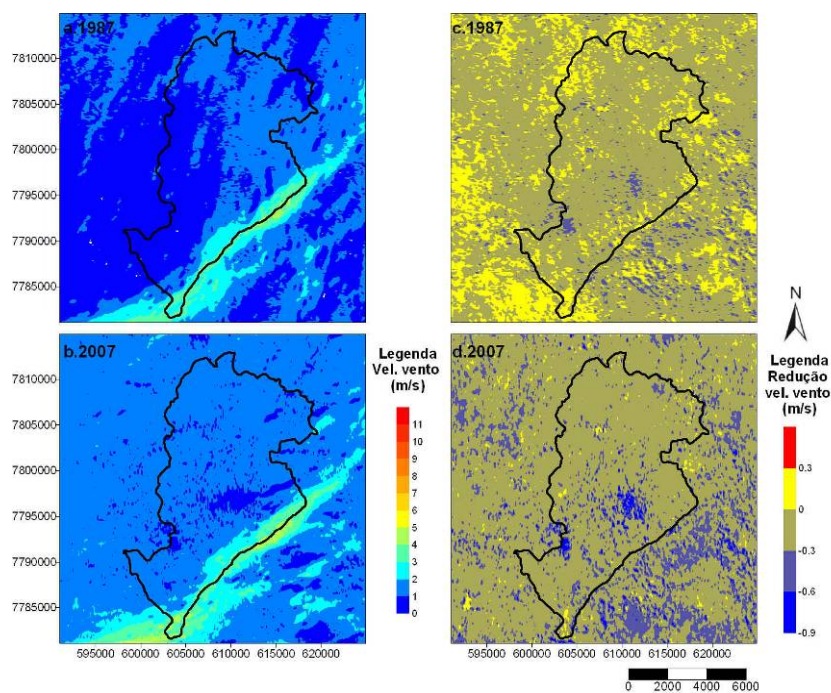


Figura 4: Episódios estáveis. (a) e (b): Simulação da velocidade do vento. (c) e (d): Efeito isolado da ocupação

Nas simulações de episódios estáveis parece ser menos evidente o efeito da ocupação urbana se comparadas com aquelas realizadas com atmosfera instável. Esta constatação pode estar relacionada com a limitação do programa em simular as características térmicas da cidade, as quais se tornam mais evidentes em condições de estabilidade atmosférica. O aumento da temperatura da superfície e as trocas térmicas entre esta e a atmosfera contribuem para a formação de vórtices turbulentos próximos aos obstáculos, efeito este desconsiderado pelo programa WindMap™.

Os resultados obtidos nos testes computacionais apontam que o aumento da rugosidade contribui para a redução da magnitude do vento. Ou seja, há uma relação inversa entre  $z_0$  e a velocidade dos fluxos de ar, já apontadas por Lopes (2003) e Vasconcelos (2006) para o caso de Lisboa. A análise específica dos pontos, apresentada a seguir, mostra de forma mais clara esta correspondência.



### 4.3. Análise dos pontos: correlação entre comprimento de rugosidade e velocidade do vento

Através dos valores obtidos pela diferença entre os testes com modelo digital de elevação (MDE) e com topografia, extraiu-se uma correlação entre a variação do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) e da velocidade do vento reduzida para cada condição de atmosfera (Figuras 5 e 6). A correlação encontrada entre as variáveis foi negativa para ambas as condições de estabilidade atmosférica, representada por 86% em condição de atmosfera instável e 58% para atmosfera estável. Esta diferença entre as condições atmosféricas pode ser causada pela limitação do modelo computacional em considerar as características térmicas das superfícies. Observa-se que quanto maior o valor de  $z_0$ , maior foi a redução de velocidade do vento nos episódios analisados.

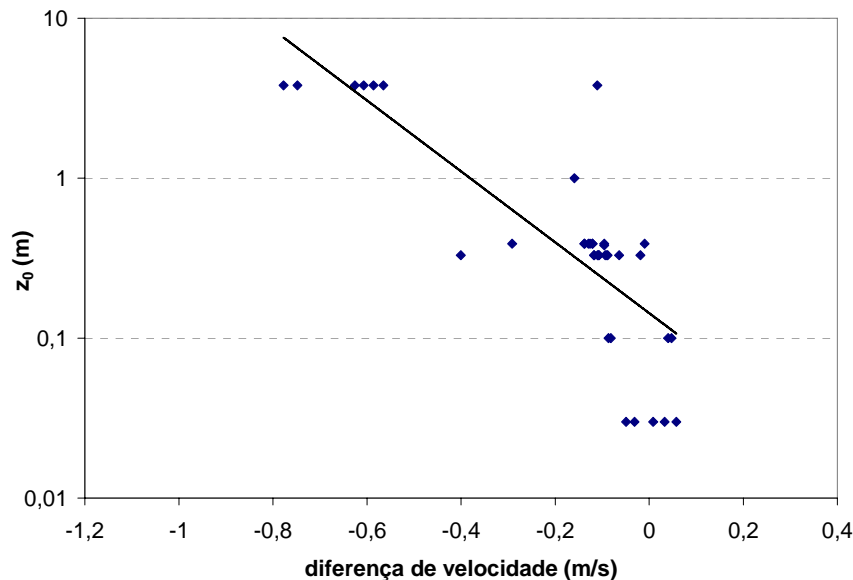


Figura 5: Gráfico de correlação entre a redução da velocidade do vento e  $z_0$  para episódios instáveis

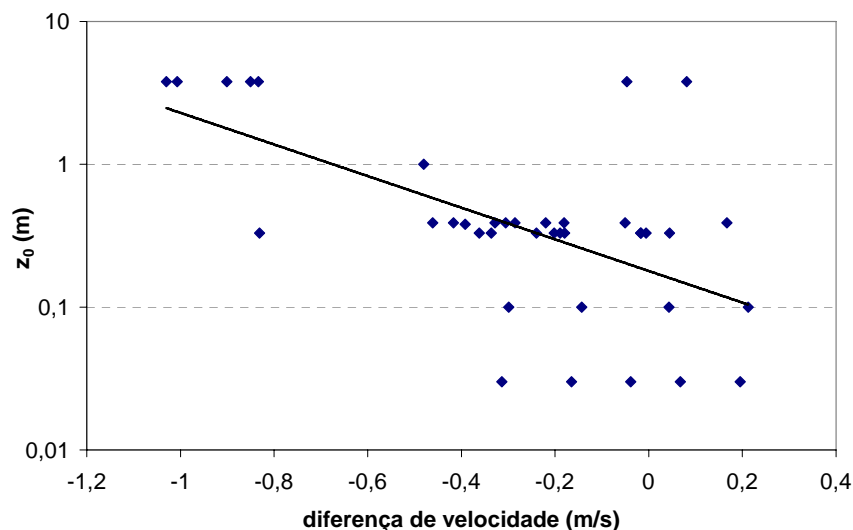


Figura 6: Gráfico de correlação entre a redução da velocidade do vento e  $z_0$  para episódios estáveis

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes computacionais mostraram que a caracterização da condição de estabilidade atmosférica é um parâmetro relevante nas simulações com o programa WindMap<sup>TM</sup>. Outros trabalhos realizados (LOPES, 2003; VASCONCELOS, 2006) caracterizam a atmosfera como neutra, o que parece não ser pertinente para o caso de Belo Horizonte, cidade tropical continental em que as velocidades médias do vento são baixas e a topografia tem grande influência no escoamento do ar. Prata (2005) também utiliza este tipo de condição de estabilidade para estudos em São Paulo, contudo a escala de abordagem é diferenciada em relação àqueles realizados em Lisboa. Assim, quando a abordagem é direcionada para o planejamento urbano, envolvendo todo o território de uma cidade de clima tropical continental, a caracterização da estabilidade atmosférica

mostra-se importante na verificação da influência da ocupação urbana, o que interfere também na previsão de impactos futuros de diretrizes de planejamento urbano.

Outro resultado relevante extraído das simulações computacionais refere-se à alteração do comportamento do vento diante da evolução da ocupação urbana. As áreas que sofreram maior redução da velocidade, comparando os episódios de 1987 e 2007, foram aquelas em que houve substituição do tipo de ocupação e o respectivo aumento do comprimento de rugosidade. Estas se concentram principalmente na porção central do município, onde ocorreu maior verticalização e adensamento no tecido urbano.

O programa WindMap™ apresenta limitações quanto à representação da cidade, desprezando efeitos de trocas térmicas convectivas que podem alterar o comportamento do vento na escala de análise utilizada no presente estudo. Mostra-se, assim, a necessidade de desenvolvimento de modelos que sejam capazes de considerar estes parâmetros na escala local.

Quanto à prática da tomada de decisão em cidades, espera-se que estudos que envolvam a análise de variáveis climáticas sejam cada vez mais incorporados visando à melhoria da qualidade de vida urbana.

## 6. REFERÊNCIAS

- FERREIRA, D. G.; FERREIRA, C. M. O.; COSTA, S. M. M.; ASSIS, E. S. Comparação entre métodos morfométricos para determinação de parâmetros de rugosidade para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. Congresso Latinoamericano de Ingeniería del Viento. 1, 2008, Montevideo. **Anales...** Montevideo, 2008.
- FERREIRA, D. G. **O uso do solo e os padrões de vento: o caso da cidade de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**. v. 38, 1999. 1262-1292.
- LOPES, A. M. S. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: Vento, Ilha de Calor de Superfície e Balanço Energético**. Lisboa, 2003. Tese (Doutorado) - Universidade de Lisboa.
- MONTEIRO, C. A. F. **A Frente Polar Atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul-Oriental do Brasil**: (contribuição metodológica a análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil). São Paulo: USP, 1969. Série Teses e monografias.
- OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods. n° 1250. Canadá: WMO/TD, Report n° 81, 2006.
- PAGE, J. K. The fundamental problems of building climatology considered from the point of view of decision-making by the architect and urban designer. In: Symposium on Urban Climates and Building Climatology, 1968, Brussels. **Proceedings...** Geneva: WMO, 1970. 10-21.
- PEDRO, G.; MATTIO, H.; PALESE, C.; WARCHOMICKA, N.; LASSIG, J. Recurso eólico de la provincia del Neuquén. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, vol. 10, 2006. 15-21.
- PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- VASCONCELOS, J. V. **Avaliação climática para o planeamento urbano de Lisboa: Influência do crescimento urbano no sistema de brisas do estuário do Tejo**. Lisboa, 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

## 7. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Sr. Michael Brower, idealizador do software WindMap™, por disponibilizar o programa para uso acadêmico, bem como à agência FAPEMIG pelo apoio ao Programa de Bolsas de Mestrado e Iniciação Científica da UFMG, ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET) e à Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, respectivamente pela cessão de dados meteorológicos e cartográficos.