

Condições de ventilação intra-urbana e correlações entre atributos da morfologia urbana e variáveis climáticas

Homero Jorge Matos de Carvalho

homerojmc@uol.com.br

Resumo: Este trabalho apresenta alguns resultados da aplicação de uma nova metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima (CARVALHO, 2006), baseada na metodologia de avaliação das ações do vento no planejamento da ocupação do solo (SILVA, 1999) e na teoria do sistema clima urbano (MONTEIRO, 1975). Através de experimentos em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, medições de variáveis microclimáticas em João Pessoa e de análises estatísticas, constatou-se que a correlação entre a forma urbana e a variação da temperatura do clima urbano depende das condições de ventilação intra-urbana (velocidade e direção), e, ao mesmo tempo, da orientação da malha urbana, da rugosidade e da permeabilidade da forma urbana.

Palavras Chave: planejamento urbano, clima urbano, ventilação intra-urbana, conforto ambiental

1. Introdução

O clima urbano, entendido como síntese das relações decorrentes do entrosamento e articulação entre os fatos naturais e urbanos, é abordado como um sistema: aberto - uma vez que é sujeito à entrada e saída de energia; singular - pois restrito à cidade; complexo - dado à variedade e intensidade de relações que nele se estabelecem; evolutivo - pois segue a dinâmica do fato urbano bem como a climática, e ainda auto-regulável - visto ser passível de ações de *feedback* por parte do Homem (MONTEIRO, 1975).

Estudos já existentes revelam que o processo de urbanização altera os escoamentos do vento, elevando a camada limite atmosférica e reduzindo a velocidade próxima da superfície (CHANDLER, 1976), sendo tal efeito potencializado à medida que se aumenta a rugosidade da superfície. Outros estudos, como os de Assis (2000) e de Sakamoto (1994) suspeitam de haver possibilidade de o comportamento térmico de algumas porções urbanas estar sendo influenciado pela ventilação, ao passo que Romero (1988) afirma que as diferenças de temperatura entre porções distintas da cidade podem provocar uma circulação interna de ar, das áreas mais aquecidas para as menos aquecidas, mais evidenciadas em períodos de calmaria.

Serra (1984) e Assis (2000) acreditam que a baixa correlação entre a forma urbana e a temperatura do ar em cidades litorâneas se deve à ventilação mais abundante e forte nessa região, com incidência típica dos ventos alíseos. Entretanto, estudos realizados em algumas cidades litorâneas

como Salvador (SAMPAIO, 1981), João Pessoa (SILVA, 1999) e Rio de Janeiro (CORBELLA & YANNAS, 2003; SOUZA E SILVA, 2003), indicam que há aí uma relação mais complexa, em que a forma urbana (orientação, dimensões e organização das edificações no espaço) condiciona a ventilação, que, por conseguinte, influencia de maneira diferenciada o comportamento térmico de uma determinada parcela urbana. Isso explica, em parte, porque Sampaio (1981) não identificou correlações significativas entre a forma urbana e a temperatura do ar em Salvador, e porque Corbella & Yannas (2003) e Souza e Silva (2003) as encontraram no Rio de Janeiro.

Grande parte dos trabalhos sobre clima urbano não medem a velocidade e a direção do vento no local onde foram realizados, considerando, apenas, a temperatura e a umidade relativa do ar. Quando o fizeram, consideraram-se apenas, as medições em campo, não sendo foi suficiente para assegurar tais afirmações, visto que não tiveram o controle da direção e da velocidade dos ventos incidentes na cidade, nem das mudanças ocorridas em seu escoamento intra-urbano.

Neste contexto, este trabalho objetiva demonstrar como as condições de ventilação intra-urbana (velocidade e direção) interferem nas correlações entre a temperatura do ar e a forma urbana, tomando como estudo de caso, uma porção da cidade de João Pessoa – PB, no litoral do Nordeste brasileiro.

2. Descrição da área estudada

O estudo foi realizado em uma porção da cidade de João Pessoa – PB limitada a leste pelo Oceano Atlântico, a oeste pelo Rio Jaguaribe, a norte pela Av. Sen. Rui Carneiro e R. Helena Maria Lima e a

sul pela Av. José Américo de Almeida (Fig.1), englobando parte dos bairros de Tambaú e do Cabo Branco, correspondendo a uma área de aproximadamente 563.000m², dividida (excluindo-se as vias) em 758 lotes distribuídos em 49 quadras, praticamente todos ocupados.

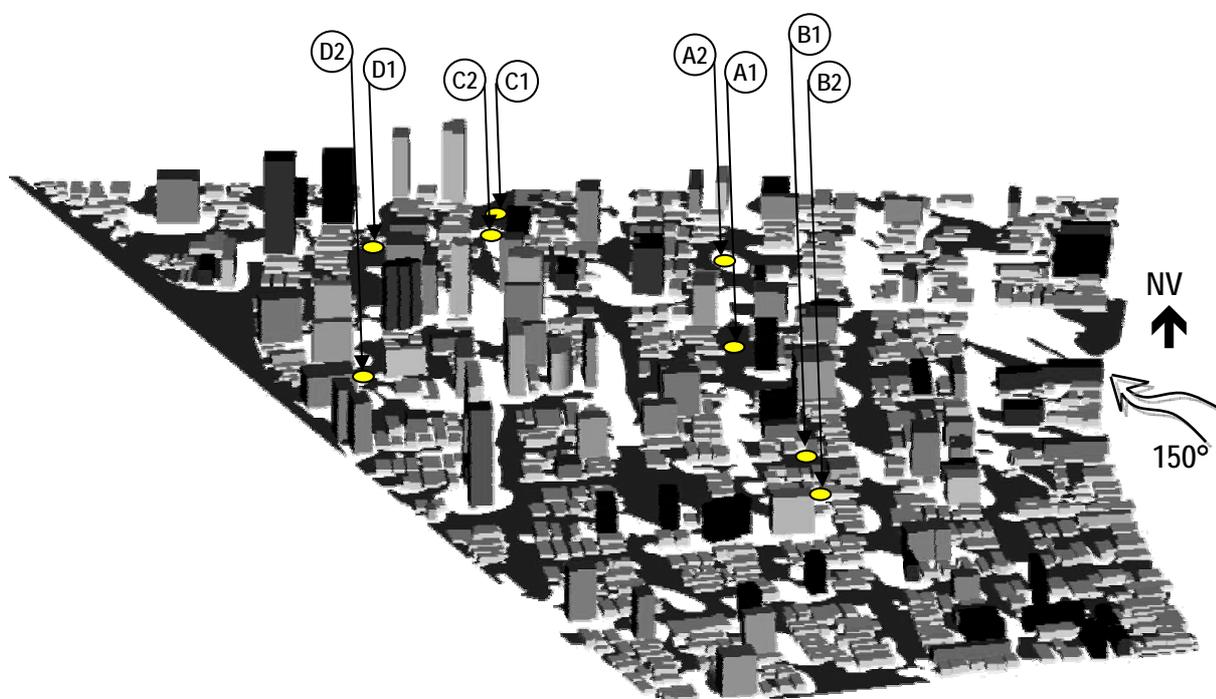


Figura 1. Perspectiva da área com a indicação dos pontos de medição e figura de erosão de areia para vento sudeste.

No zoneamento determinado pelo Plano Diretor de João Pessoa (1992), a área selecionada está situada na Zona Adensável Prioritária¹ (ZAP), cujo adensamento populacional previsto é de até 150 hab./ha, e índice de aproveitamento construtivo máximo de 4,0. No entanto, estes índices permanecem aquém do previsto em lei, dada à predominância de edificações com um e dois pavimentos.

Obedecendo à Constituição do Estado da Paraíba (Art. 229) e a Lei Orgânica para o Município de João Pessoa (Art. 175), o Plano Diretor de João Pessoa (Art. 25) ainda prevê restrições, para uma porção desta área, relacionadas ao controle do gabarito em altura dos edifícios. A porção é denominada “Orla Marítima” e corresponde a uma faixa linear de 500m medidos a partir da preamar de

sizígia² em direção ao interior do continente. Nesta faixa, o gabarito é escalonado, iniciando-se a 12,90m na primeira linha de lotes, à beira-mar, alcançando aproximadamente 35m na última. Predomina, na área, o uso residencial, com a presença de um comércio local e de serviços, especialmente, hotéis, pousadas, bares e restaurantes.

3. Metodologia

¹ “Zona Adensável Prioritária é aquela onde a disponibilidade de infra-estrutura básica, a rede viária e o meio ambiente permitem a intensificação do uso e ocupação do solo e na qual o índice de aproveitamento é 4,0, e nos termos desta lei” (Lei Complementar n.º 3, de dezembro de 1992, atualizada até a Lei Complementar n.º 4, de abril de 1993 – Plano Diretor da Cidade de João Pessoa).

² O movimento de translação da Lua, também conhecido como dia lunar, tem a duração aproximada de 24h e 50 min., dividindo-se este tempo em 4 períodos, teremos quatro turnos de aproximadamente 6h e 12 minutos, que é a duração de cada maré e suas variações, de preamar a baixa-mar. Nos períodos de Luas grandes (Cheias e Novas), onde a Terra, o Sol e a Lua estão em oposição ou conjunção, ocorre uma somatória de forças desses astros, e o movimento das marés atinge seu ponto extremo (tanto nas preamares quanto nas baixa-mares), fazendo assim que ocorram as marés de sizígia ou de águas-vivas (marés de grande amplitude).

A aplicação da metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima (CARVALHO, 2006) parte de levantamentos em campo e documental que possibilitaram a elaboração da base cartográfica da área de estudo na escala 1:5000, constando das plantas de uso do solo, gabarito em altura, topografia, taxa de ocupação por quadra e índice de aproveitamento por quadra, todas desenhadas em CAD e plotadas em acetato transparente para posterior sobreposição.

A partir desta base cartográfica, foram confeccionadas maquetes da área de estudo destinadas à realização de ensaios em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, utilizando a técnica de erosão de areia (JANEIRO BORGES & SARAIVA, 1981). Os ensaios foram feitos, considerando o padrão dos escoamentos locais definidos por Silva (1999) para o rumo 150°, predominante no local em estudo. Desses ensaios resultaram figuras de erosão, que foram plotadas na mesma escala das plantas confeccionadas na etapa anterior. As figuras de erosão de areia são constituídas de diversas isolinhas correspondentes, cada uma, a um valor da velocidade exterior.

Com base na cartografia e nas figuras de erosão de areia, foram feitas as análises do tipo de uso e ocupação do solo e dos escoamentos de vento no local, a partir dos critérios definidos para a seleção dos pontos, nos quais foram feitas medições microclimáticas:

- quantidade de pontos compatível com a disponibilidade de instrumentos e de tempo;
- os pares de pontos deveriam ser formados por pontos com características de uso e ocupação semelhantes, distinguindo-se, entretanto, as condições de ventilação;
- cada par de pontos deveria ter afastamento diferenciado em relação ao mar e diferentes tipos de uso e de ocupação do solo.

A confirmação de cada ponto foi feita através da visita *in loco*, em que foram observados outros detalhes não constantes das plantas, como fluxo de veículos e de pedestres, árvores, cores e materiais das superfícies das construções. Assim, selecionaram-se quatro pares de pontos (Fig. 1), cujas características foram anotadas em uma ficha-padrão elaborada para este fim e para facilitar a análise posterior.

A escolha do período de medição se deu a partir dos resultados dos trabalhos de Silva (1999) e Carvalho (2001). Assim, optou-se por se fazerem as medições durante o mês de novembro, período de verão, com baixo índice pluviométrico, pela maior frequência das velocidades mais altas dos ventos de sudeste (predominantes) e pela menor frequência de calmaria (ventos de até 1,2 m/s).

Devido às limitações de recursos, as medições foram feitas durante 28 dias ininterruptos, das 8h às 9h, das 14h às 15h e das 20h e 21h. Como só havia um par de instrumentos, as medições foram feitas em transecto móvel, utilizando-se um automóvel. Foram destinados 10 minutos para as medições em cada par de pontos, e o percurso entre estes pares durou em média 6 minutos, totalizando 60 minutos para a realização de todo o transecto.

Em cada ponto foram medidas e registradas a velocidade e a direção média do vento em 10 minutos, a umidade relativa do ar, a insolação a cada minuto (dez registros) e as condições do céu de acordo com a seguinte escala: claro, predominante claro, parcialmente nublado, predominante nublado, nublado e nublado com chuva fina.

As medições foram feitas a 1,5m de altura em relação ao piso, para o que utilizou-se uma estação experimental composta por dois aparelhos registradores para a medição de temperatura e umidade relativa do ar, dois anemômetros portáteis para a medição de velocidade do vento, dois cata-ventos, fabricados artesanalmente, para a medição da direção do vento, um solarímetro para a medição da insolação e dois rádios de comunicação portáteis.

Os dados referentes à insolação, à direção do vento e à condição do céu foram anotados numa caderneta elaborada para este fim. Os de temperatura e de umidade relativa do ar foram armazenados nos *dataloggers* e transferidos para um computador ao final de cada dia de medição. A partir do que foram sistematizados para posteriores análises de correlação e de regressão linear múltipla, utilizando-se o *software* SPSS. Para as análises de correlação foi utilizado o método de Pearson e para as análises de regressão o método *Stepwise*.

4. Descrição e análise dos dados medidos em campo

4.1 Caracterização dos pontos de medição

a) Pontos representativos da área observada

As medições microclimáticas foram realizadas em quatro pares de pontos (Fig. 1), cujas características foram anotadas em uma ficha-padrão elaborada para este fim e para facilitar a análise posterior.

Os pontos A1 e A2 estão situados a 350m do mar, numa via asfaltada com trânsito intenso de veículos. O uso do entorno desses pontos é diversificado, com a presença de restaurante, salão de beleza, pousada e academia de ginástica, além das habitações. A taxa de ocupação é, respectivamente, de 42,7% e 43,8%, o índice de aproveitamento de 1,5 e 1,7 e o coeficiente de visão do céu de 60,2% e 61,1%.

Os pontos B1 e B2 estavam situados numa porção próxima do mar (aproximadamente 290m), em uma área com elevada taxa de ocupação (54,3% e 51,5%), baixo índice de aproveitamento (1,3 e 0,7) e fator de visão de céu alto (71,24% e 66,94%), configurando uma área de ocupação mais horizontalizada. As vias são pavimentadas com paralelepípedos, com pequeno fluxo de veículos e de pedestres. O uso no entorno é predominantemente residencial, com a presença de alguns estabelecimentos comerciais e instituições públicas, como uma delegacia e um edifício comercial.

Os pontos C1 e C2 estão situados em uma via asfaltada, com trânsito leve de veículos e pequeno de pedestre. Ficam acerca de 550m do mar, numa área residencial, com índice de aproveitamento 1,0 e 1,1, taxa de ocupação de 46,9% e 46,3% e fator de visão do céu alto (70,02% e 69,36%).

Os pontos D1 e D2 estão situados a uma distância de aproximadamente 650m em relação ao mar, numa área com taxa de ocupação um pouco mais baixa (42,1% e 37,9%), índice de aproveitamento mais elevado (1,6 e 1,9) e com fator de visão do céu mais baixo do que no primeiro par (62,04% e 59,16%), indicando uma área mais verticalizada. A via onde se situam esses dois pontos também é pavimentada com paralelepípedos, sendo trafegada por pequeno fluxo de veículos e de pedestres. O uso é residencial, observando-se, apenas, a presença de uma escola de nível básico.

b) Estação de referência

O monitoramento das condições ambientais dos pontos observados foi feito a partir da comparação dos dados ali medidos com os registrados numa estação meteorológica, de referência, situada no Aeroporto Internacional Castro Pinto, fora da zona urbana.

4.2 Descrição e análise dos dados medidos em campo

Para a análise climática urbana baseada no ritmo das variações do tempo, é necessário tomar como referência os fenômenos atmosféricos (em escala global e local) ocorridos no período do levantamento de dados, a fim de se identificar possíveis alterações rítmicas que possam modificar as relações entre as variáveis envolvidas no estudo em desenvolvimento. Para este fim, tomaram-se como referência mapas sinóticos de temperatura do ar e umidade relativa do

ar³ e registros horários de pressão atmosférica e de velocidade e direção do vento medidos na estação de referência.

Embora o período para a realização das medições (3 a 30 de novembro de 2004) tenha sido selecionado a partir de registros anteriores, tratados na forma de normais climatológicas, verificou-se uma mudança significativa da direção e da velocidade do vento incidente na cidade de João Pessoa, medidos na estação de referência, situada em área não urbanizada da cidade. Na primeira parte do período de medições, aproximadamente de 3/11 a 18/11, predominou a incidência dos ventos do quadrante sudeste, enquanto que na segunda parte predominaram os ventos de leste e nordeste.

Percebeu-se, também, que a variação da velocidade do vento esteve associada à sua direção, sendo mais elevada quando o vento soprou de sudeste. A mesma relação foi verificada para a temperatura do ar, que se elevou quando os ventos passaram a soprar de leste e nordeste.

Essas modificações se devem à chegada dos meses mais quentes (novembro a março), quando a frequência dos ventos é modificada através dos ventos de leste e de nordeste, vindos das áreas equatoriais na corrente de deslocamento em direção sul da Zona de Convergência Tropical Interna⁴. Quando isso ocorre, forma-se uma massa de ar quente que barra a passagem dos ventos oriundos do oceano atlântico, tornando-os mais fracos.

Devido a essas condições, as correlações entre a forma urbana e a temperatura do ar e entre esta e as variáveis climáticas consideradas, modificam-se em função do horário de medição e da direção do vento predominante no período determinado, como se observa na descrição a seguir.

4.2.1 Análise de correlação e regressão linear múltipla

Nesta análise foram considerados os dados obtidos em todos os pontos de medição, de maneira que fosse possível acrescentar ao grupo das variáveis independentes as variáveis relacionadas à forma

³ Os mapas sinóticos foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, publicados no site www.inmet.gov.br.

⁴ Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é composta de um aglomerado de nuvens distintas, com escala de poucas centenas de quilômetros, os quais estão associadas a uma zona alongada de baixa pressão. Trata-se do encontro dos ventos alísios de NE e SE, localizando-se entre as duas altas subtropicais dos hemisférios Norte e Sul. Nesse ponto, sofre um deslocamento sazonal (varia com a estação do ano). Situa-se em latitudes próximas ao equador, no verão do hemisfério sul, e desloca-se para latitudes do hemisfério Norte, no verão do hemisfério Norte.

urbana. Da mesma maneira que as análises ponto a ponto, estas foram feitas por turno e para os estratos de dias diferenciados pela direção dos ventos incidentes.

As Figuras (2) e (4) mostram a complexidade das relações entre as variáveis climáticas e as variáveis da forma urbana, quando o vento soprou de sudeste, e as Fig. (3), (5) e (6) mostram as relações verificadas quando os ventos sopraram de leste e nordeste nos três turnos considerados. Essas figuras apresentam apenas as correlações significativas existentes entre as variáveis consideradas na análise. Para simplificar as figuras e facilitar a sua interpretação, não são apresentadas as correlações entre os elementos da morfologia.

4.2.1.1 Manhã

Durante a manhã, com vento sudeste, a variável que obteve a correlação mais forte com a temperatura do ar foi a distância do ponto de medição em relação ao mar, com $r = 0,43$, ao nível de significância $p = 0,00$, demonstrando que neste período a temperatura tendeu a elevar-se à medida que se afastava do mar (Fig. 2).

As análises indicaram também que a temperatura tendeu a diminuir nos pontos situados em porções com taxas de ocupação mais elevadas ($r = -0,380$ e $p = 0,000$). Entretanto, identificou-se nessas condições o efeito de colinearidade provocado pela taxa de ocupação e a distância em relação ao mar, de maneira que apenas esta última comporá o modelo explicativo das variações de temperatura.

Quanto às correlações com as outras variáveis climáticas, verificou-se que ocorreu o efeito de colinearidade provocado pela condição de céu e pela insolação. A umidade relativa do ar e a condição de céu se correlacionaram inversamente com a temperatura ($r = -0,38$ e $-0,36$, respectivamente).

Com $R^2 = 44,1\%$, o modelo explicativo das variações da temperatura com o vento sudeste foi formado pelas variáveis umidade relativa do ar ($r^2=22,2\%$), distância em relação ao mar ($r^2=9,0\%$), condição de céu ($r^2=4,8\%$), tipo de pavimento ($r^2=4,6\%$) e fator de visão do céu ($r^2=2,5\%$), estas duas últimas integrando o modelo mesmo com correlações insignificantes.

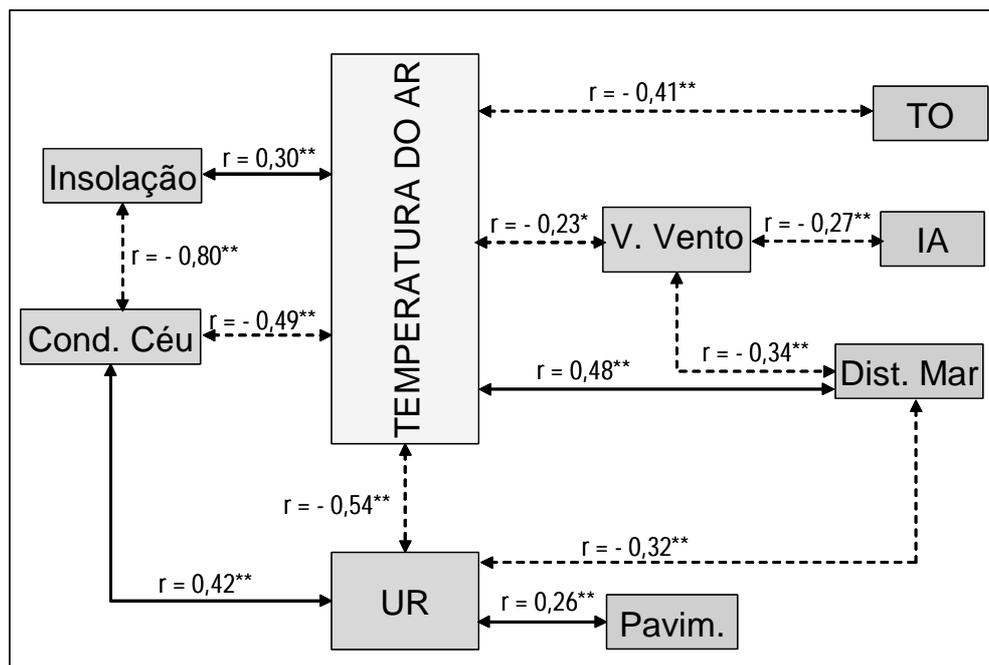


Figura 2. Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com vento sudeste.

Legenda: r – Correlação de Pearson - * Correlação significativa ao nível de 0,05 - ** Correlação significativa ao nível de 0,01 - UR – Umidade relativa do ar; V. Vento – Velocidade do vento; Cond. Céu – Condição do céu; T.O. – Taxa de ocupação; I.A. – Índice de aproveitamento; FVC – Obstrução do céu; Pavim. – Tipo de pavimento; Dist. Mar – Distância em relação ao mar.

Com ventos leste e nordeste, uma maior quantidade de variáveis se correlacionou significativamente com a temperatura do ar (Fig. 3), sendo a correlação com a umidade relativa do ar a mais forte ($r = -0,639$), seguida das correlações com a insolação ($r = 0,527$) e com a velocidade do vento ($r = -0,453$). As correlações entre a temperatura do ar e demais variáveis foram fracas, no entanto, os valores de significância indicam que essas variáveis devam ser consideradas co-responsáveis pela alteração do comportamento da temperatura.

Na análise de regressão *stepwise* verificou-se que houve o efeito de colinearidade provocado pela relação entre a insolação e a condição do céu, e de multicolinearidade provocado pela taxa de ocupação, pelo índice de aproveitamento e pelo fator de visão do céu. Assim, fazendo-se um ajustamento, obtém-se a umidade relativa do ar ($r^2=40,8\%$), a velocidade do vento ($r^2=10,6\%$), a insolação ($r^2=6,5\%$), a taxa de ocupação ($r^2=8,1\%$) e o fator de visão do céu ($r^2=4,4\%$). Juntas, essas variáveis explicaram 70,4% das variações da temperatura do ar.

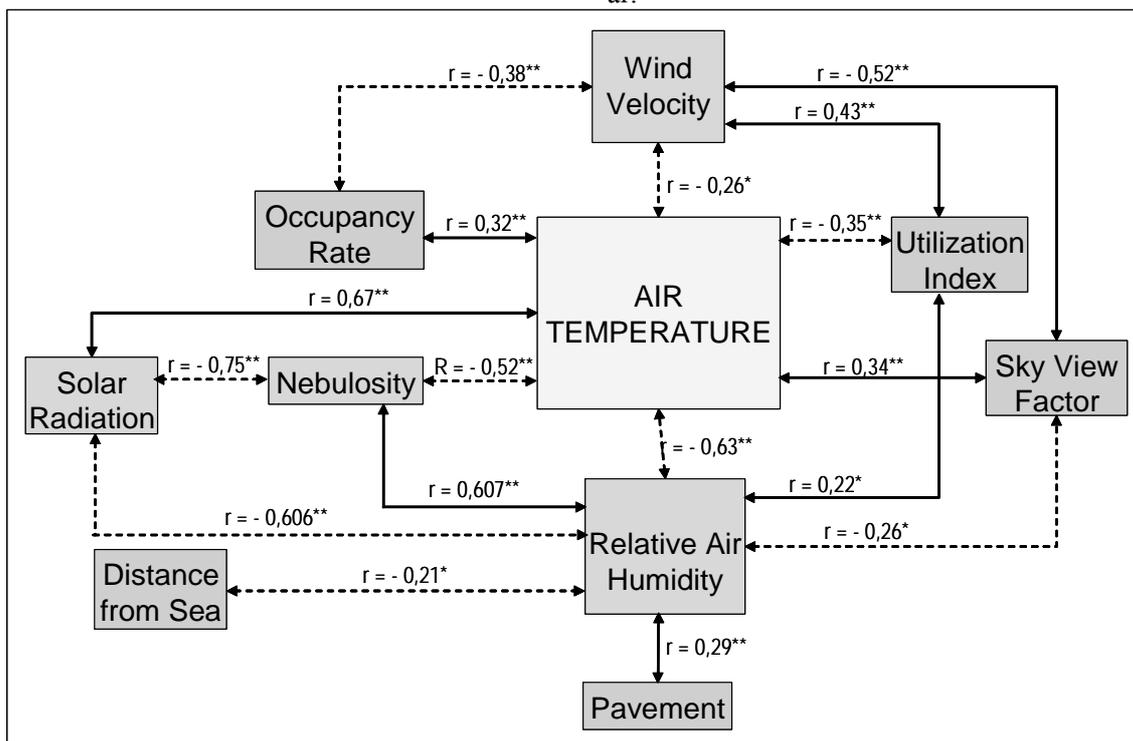


Figura 3. Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com ventos leste e nordeste.

Legenda: *Idem* Figura 2.

4.2.1.2 Tarde

À tarde, com vento sudeste, a variável velocidade do vento passou a manter uma correlação mais forte com a temperatura do ar, com $r = -0,494$ e $p = 0,00$, indicando que a temperatura tende a diminuir à medida que a velocidade do vento aumenta (Fig. 4). Entretanto, o tipo de pavimento foi a variável que mais fortemente se correlacionou com a temperatura ($r=0,634$), indicando que a temperatura tendeu a permanecer mais elevada nos pontos situados nas vias pavimentadas com asfalto.

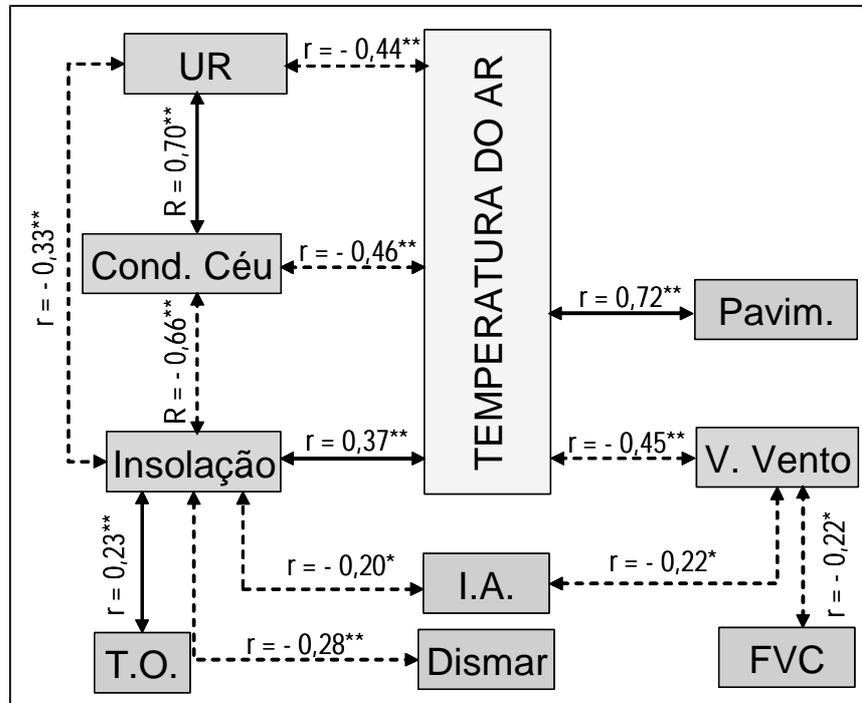


Figura 4. Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com vento sudeste.

Legenda: *Idem* Figura 2.

O modelo explicativo das variações foi formado por sete das nove variáveis consideradas, excluindo-se apenas a insolação e a umidade relativa do ar, que provocaram o efeito de multicolinearidade junto com a condição de céu. O tipo de pavimento explicou 40,2%, a condição do céu 16,7%, a velocidade do vento 8,7%, o índice de aproveitamento 2,9%, a taxa de ocupação 1,8%, a distância em relação ao mar 1,6% e o fator de visão do céu 0,9%, totalizando 72,8%.

Com ventos de leste e nordeste, o fator de visão do céu ($r=0,529$) e a velocidade do vento ($r=-0,517$), seguidos do índice de aproveitamento ($r=-0,415$), foram as variáveis que mais fortemente se correlacionaram com a temperatura do ar (Fig. 5). As demais mantiveram uma correlação fraca, no entanto, os níveis de significância indicam que estas contribuem, em alguma medida, para as variações de comportamento da temperatura.

Neste caso, o modelo explicativo das variações da temperatura foi composto pelo fator de visão do céu

($r^2=28,0\%$), pela velocidade do vento ($r^2=8,1\%$), pelo tipo de pavimento ($r^2=6,2\%$) e pela condição do céu ($r^2=3,7\%$).

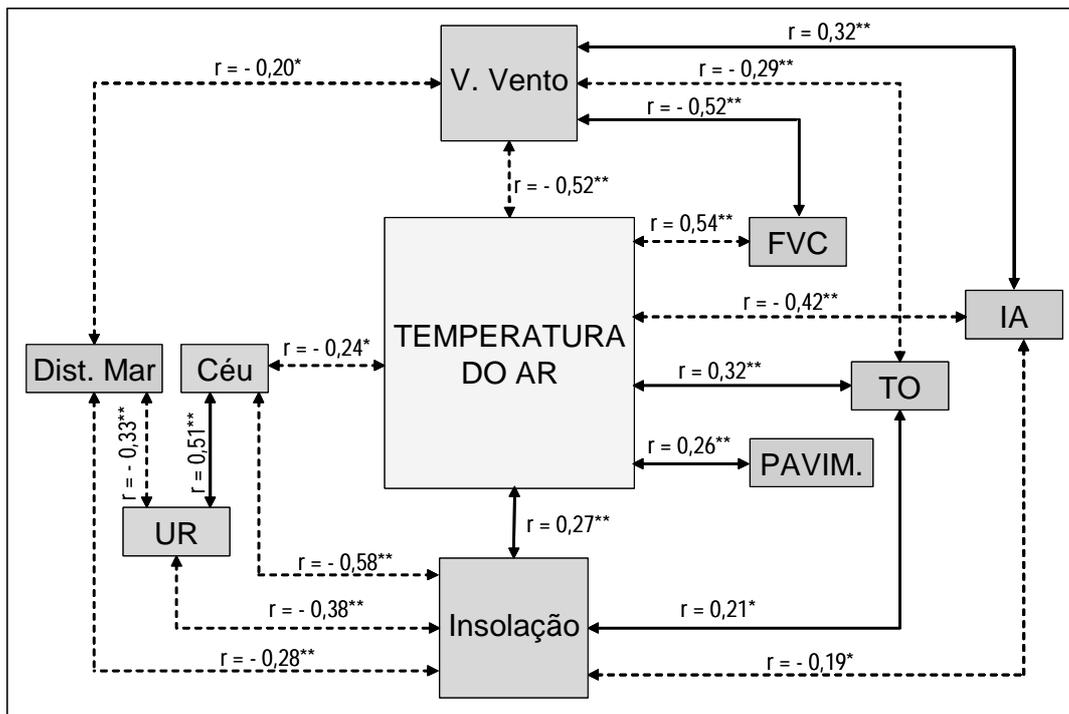


Figura 5. Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com ventos leste e nordeste.

Legenda: *Idem* Figura 2.

4.2.1.3 Noite

À noite não foram verificadas correlações significativas com a temperatura do ar quando o vento soprou de sudeste, possivelmente pela pequena diferença nos valores de temperatura entre os pontos medidos, verificada ao longo de todo o período de medição.

Com ventos leste e nordeste as correlações verificadas foram fracas, porém significativas (Fig. 6). A condição de céu ($r=0,494$ e $p=0,000$), a velocidade do vento ($r= -0,464$ e $p=0,000$) e o fator de visão do céu ($r=0,443$ e $p=0,000$) foram as variáveis que mais fortemente se correlacionaram com a temperatura do ar.

Como ocorreu o efeito de colinearidade provocado pela velocidade do vento e o fator de visão do céu, apenas a condição de céu ($r^2=24,4\%$) e

a velocidade do vento ($r^2=24,9\%$) compuseram o modelo explicativo das variações da temperatura do ar, com $R^2=49,3\%$.

4.2.2 Análise comparativa entre os pontos: discussão teórica dos resultados

As correlações foram mais nítidas com os ventos mais lentos de leste e nordeste. A moderada correlação entre a temperatura do ar e a forma urbana, através das variáveis taxa de ocupação, índice de aproveitamento e fator de visão do céu, indica um alto grau de homogeneidade na ocupação da área estudada, notando-se um leve adensamento da porção oeste com edifícios mais altos e maior espaçamento entre eles, e uma ocupação mais horizontal na porção leste, com a predominância de edificações com até dois pavimentos.

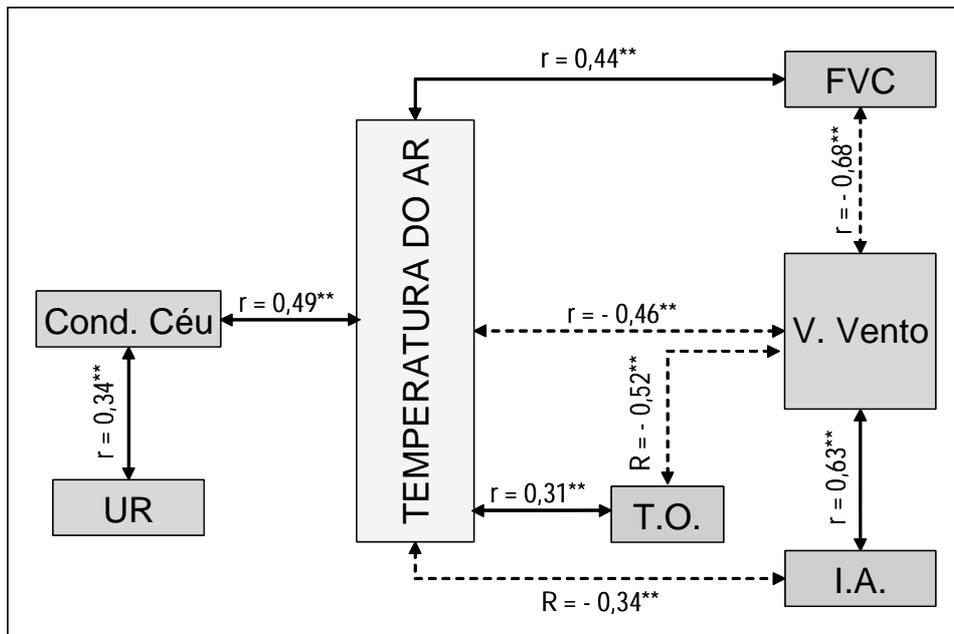


Figura 6. Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da noite com ventos leste e nordeste.

Legenda: *Idem* Figura 2.

Também se deve ao grande número de variáveis envolvidas, muitas delas se relacionando fortemente e causando efeitos de colinearidade e multicolinearidade. Entretanto, pelos níveis de significância e coeficientes de determinação encontrados (r^2) verificados, os índices de correlação parecem ser satisfatórios para o campo da climatologia urbana.

O comportamento climático do ambiente observado ao longo do dia se explica através da compreensão dos processos físicos de trocas térmicas, condicionados pela interação clima-estrutura urbana, que devem ser esclarecidos nos próximos itens, sempre separando as análises por turno e pela direção dos ventos.

4.2.2.1 Manhã

O Gráfico 1 mostra o quanto a temperatura do ar se elevou quando os ventos incidentes mudaram da direção sudeste para as leste e nordeste durante o período de medição, sendo mais marcante nos pontos B1 e B2. Por um lado essa condição pode ser explicada pela elevação natural das temperaturas devida às mudanças atmosféricas referidas no item 4.2. Por outro, as figuras de erosão obtidas dos experimentos no túnel aerodinâmico revelaram que as alterações do comportamento térmico nos pontos observados também estão associadas à alteração dos escoamentos no interior da malha urbana com a mudança de direção do vento (Fig. 7). Note-se que o percentual de áreas de estagnação é maior com ventos soprando a 90° (leste). Também é possível

perceber que com ventos a 90° há um aumento significativo da zona de estagnação em torno dos pontos B1 e B2 em relação aos ventos incidentes de 150° .

Observando as médias das temperaturas registradas no período de medição no turno da manhã, verifica-se que quando o vento soprou de sudeste os pontos que permaneceram mais aquecidos foram D2 e C1, seguidos de C2 e D1, enquanto que B1, B2, A2 e A1, nesta ordem, permaneceram menos aquecidos (Graf. 1).

Essa diferença pode ser atribuída, em parte, ao horário de medição, visto que as medições sempre se iniciaram nos pontos A1 e A2, das 8h às 8h10min, e concluídas nos pontos D1 e D2 às 9h, tempo suficiente para haver um aumento significativo da radiação solar, e, conseqüentemente, do aquecimento do ambiente. Mas também está associada à umidade relativa do ar, que permaneceu mais elevada nos pontos A2, A1 e B1 (Graf. 2), resultados coerentes com as análises de correlação, que indicaram que os pontos mais úmidos tendem a permanecer com a temperatura mais baixa (Fig. 2) neste turno e com o vento sudeste.

Essas afirmações podem ser reforçadas, ainda, pelas correlações entre a umidade relativa do ar e a distância em relação ao mar e entre esta variável e a temperatura do ar (Fig. 2). Pela manhã a temperatura tende a diminuir e a umidade a elevar-se nos pontos mais afastados do mar, exatamente os pontos C1, C2, D1 e D2. Verificou-se, também, que os pontos mais ventilados tenderam a permanecer menos aquecidos, principalmente A1, A2 e B2. (Graf. 3).

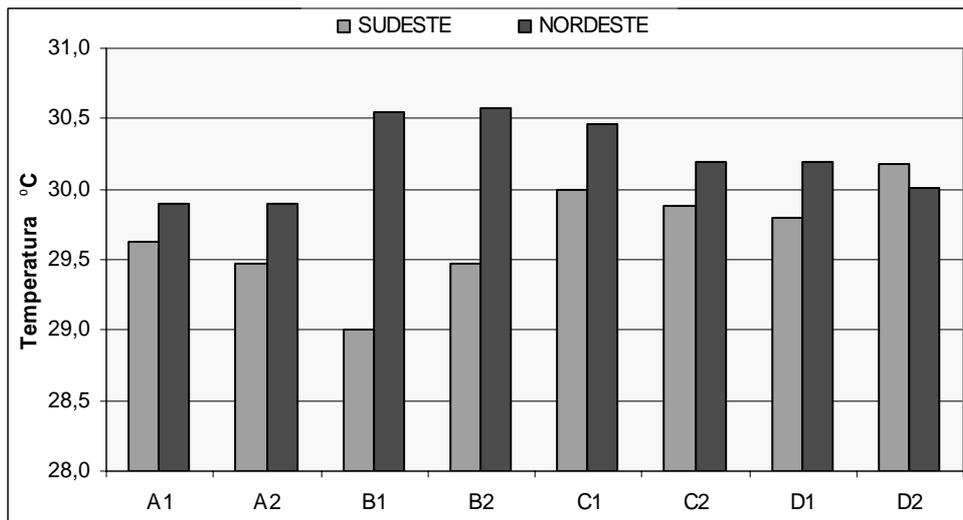


Gráfico 1. Média da temperatura no turno da manhã para as direções de vento sudeste e leste e nordeste.

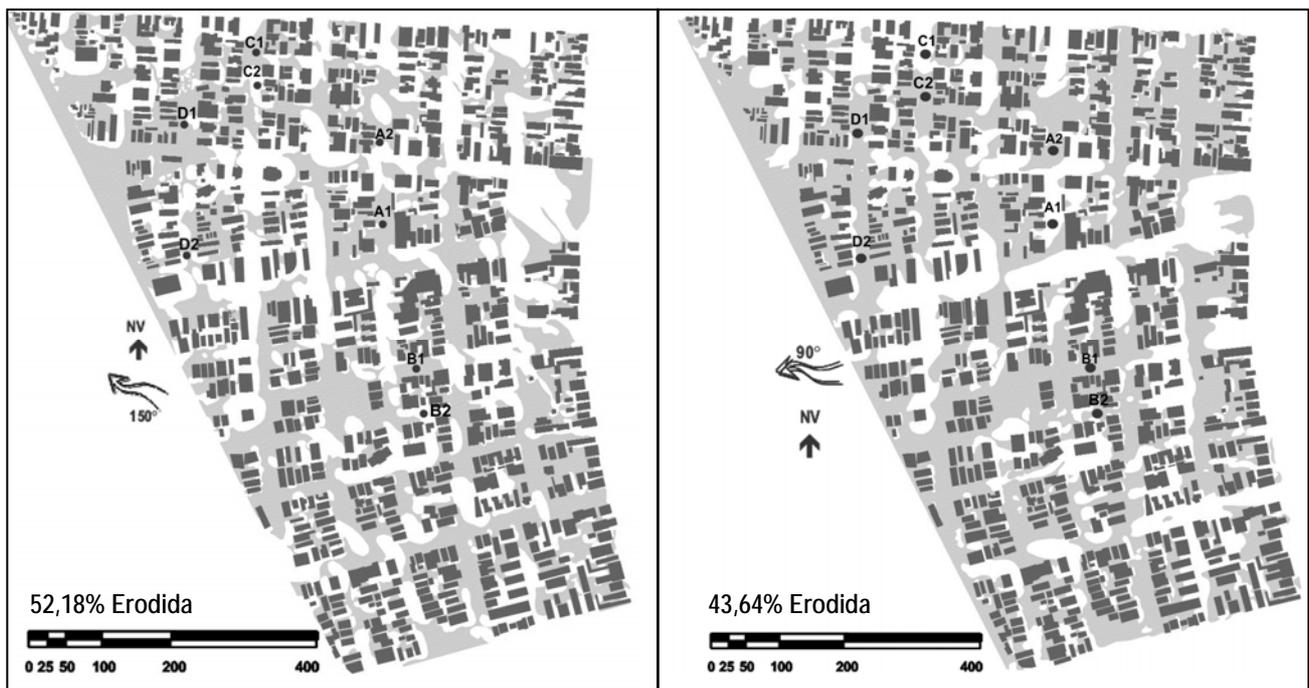


Figura 7. Comparação entre as figuras de erosão para as direções de vento 150° e 90° a 330rpm.

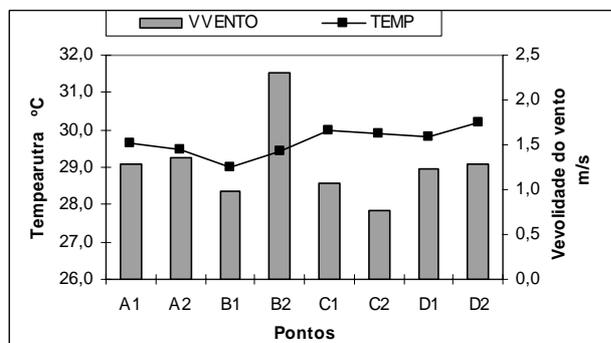


Gráfico 2: Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com vento sudeste, pela manhã.

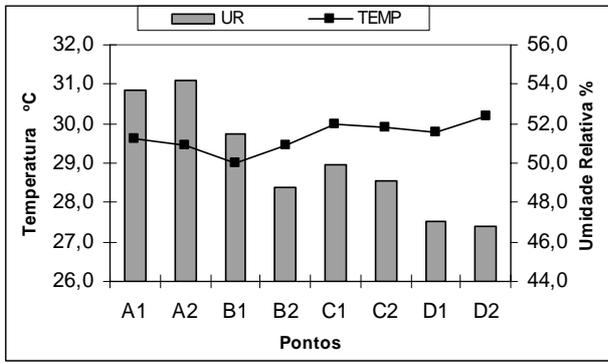


Gráfico 3: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com vento sudeste, pela manhã.

Com ventos de leste e nordeste o comportamento da temperatura em relação à umidade relativa do ar é semelhante ao período de vento sudeste, ou seja, os pontos mais úmidos tenderam a permanecer menos quentes (Graf. 4). Neste período, os pontos mais aquecidos foram B2, B1 e C1, e os menos quentes, A1 e A2.

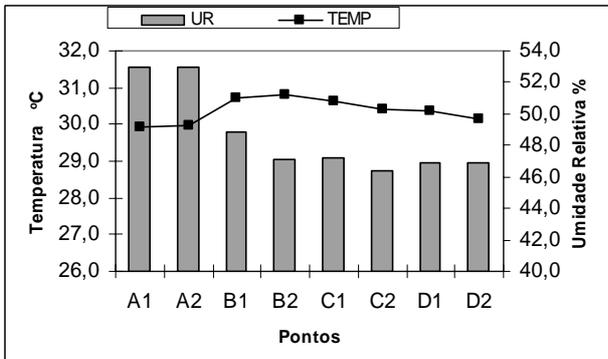


Gráfico 4: Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com vento nordeste, pela manhã.

A velocidade do vento também contribuiu para a redução da temperatura do ar, especialmente nos pontos A1, A2 e D2, os mais ventilados (Graf. 5).

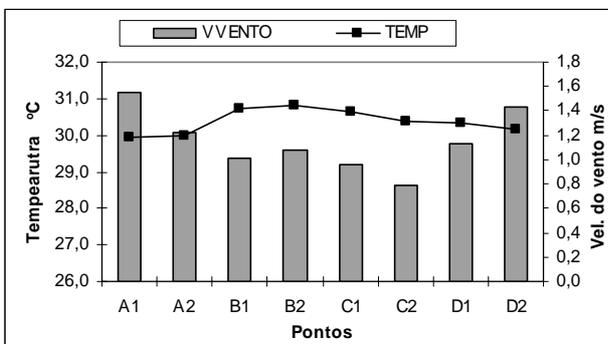


Gráfico 5: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com vento nordeste, pela manhã.

Com a mudança de direção do vento e a redução da sua velocidade, as correlações entre a temperatura

do ar e os elementos da forma urbana se mostraram mais evidentes. Percebeu-se o quanto os pontos situados em porções com taxas de ocupação mais elevadas tenderam a permanecer mais aquecidos (Graf. 6). Essa tendência está, em parte, relacionada à correlação inversa entre a taxa de ocupação e a velocidade do vento (Fig. 3), ou seja, a velocidade do vento tende a diminuir nas porções com taxa de ocupação mais elevada. Isso se deve à menor porosidade da malha urbana, visto que nessas áreas os afastamentos entre os edifícios são menores.

Por fim, verificou-se que a temperatura tendeu a permanecer mais elevada naqueles pontos situados em porções com menor índice de aproveitamento (Graf. 7) e maior fator de visão do céu (Graf. 8), ou seja, mais expostos à radiação solar direta, e, conseqüentemente, a maior insolação e menor ventilação, segundo as análises de correlação.

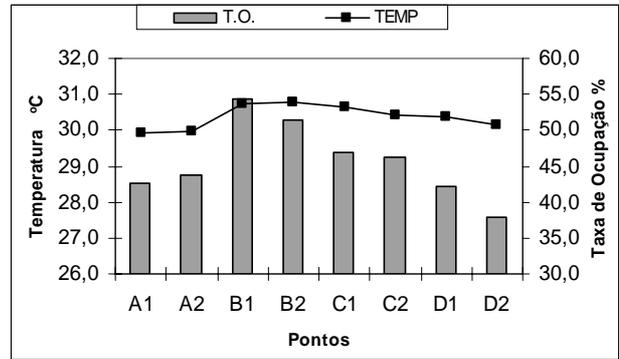


Gráfico 6: Comparativo entre as médias de temperatura e taxa de ocupação com vento nordeste, pela manhã.

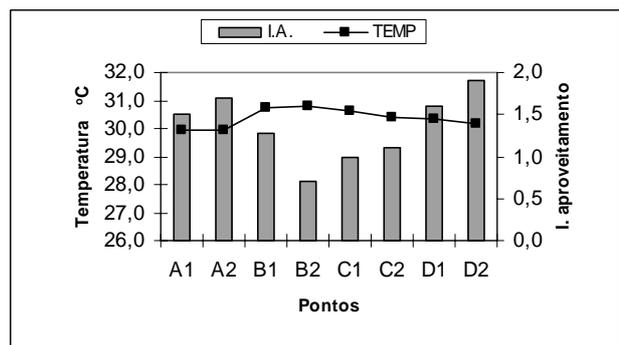


Gráfico 7: Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento com vento nordeste, pela manhã.

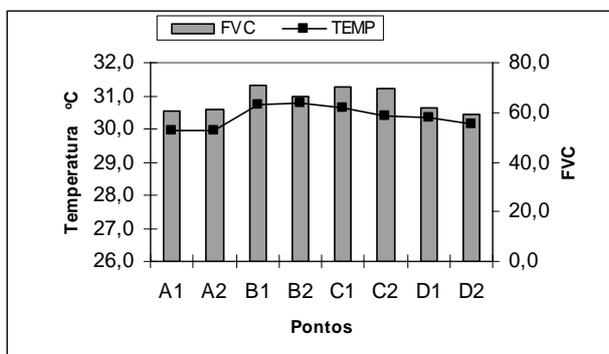


Gráfico 8: Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu com vento nordeste, pela manhã.

A influência da umidade relativa do ar no comportamento da temperatura nos dois períodos de direção do vento é típica das primeiras horas da manhã, quando os valores de umidade ainda estão elevados. Isso significa que, neste horário, há uma grande quantidade de partículas de água em suspensão no ar, que funciona como uma barreira da radiação solar, atingindo a estrutura urbana e retardando o seu aquecimento.

É verdade que essas partículas também se aquecem com a incidência da radiação solar, entretanto, esse aquecimento é mais lento devido ao alto calor específico da água.

Essa condição proporciona um campo térmico mais homogêneo, com diferenças menores de temperatura entre os pontos, especialmente com ventos mais brandos, como os de leste e nordeste. Pela manhã, com vento sudeste, a diferença média de temperatura foi de 1,2°C, entre os pontos D2 e B1 (30,2°C e 29,0°C, respectivamente). Com ventos

leste e nordeste essa diferença caiu para 0,7°C, entre os pontos B2 (30,6°C) e A1 e A2 (29,9°C).

4.2.2.2 Tarde

À tarde, há a tendência natural de aumento das velocidades de vento, que, associado à redução da radiação solar incidente, tornam mais evidentes as trocas térmicas através dos processos radiativos, evaporativos e convectivos, ou seja, a estrutura urbana, mais aquecida, cede calor ao ar em movimento e com temperatura mais baixa, resfriando-se.

No caso de João Pessoa, essas trocas começam a repercutir na redução da temperatura do ar exterior, geralmente após as 14h, quando os valores de temperatura e de umidade relativa atingem seus extremos diários (máximos e mínimos, respectivamente).

Com exceção do ponto A1, os demais pontos se tornaram mais quentes, quando os ventos passaram a soprar de leste e nordeste, sendo maior a elevação da temperatura nos pontos B1, B2, C1, C2 e D1 (Graf. 9), que possuem maior absorvidade e tiveram também a ventilação reduzida neste período.

Note-se que com vento sudeste os pontos mais aquecidos foram aqueles situados em vias pavimentadas com asfalto (A1, A2, C1 e C2), e a ocorrência das menores temperaturas foram registradas nos pontos mais ventilados (Graf. 10).

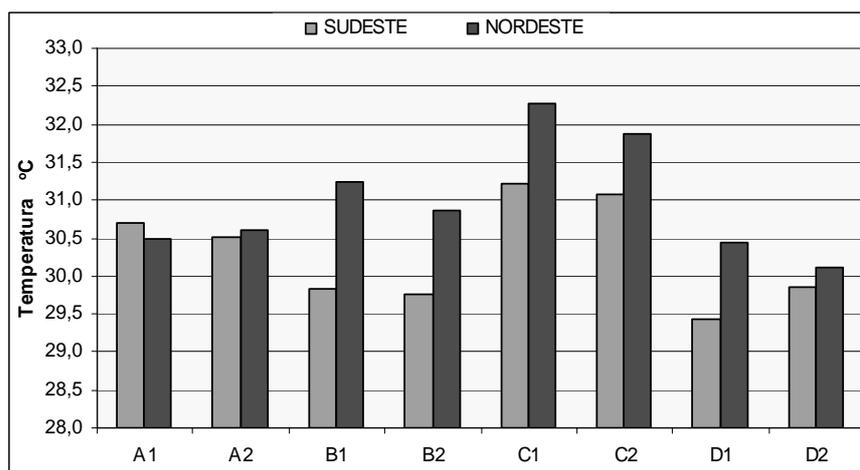


Gráfico 9: Média da temperatura no turno da tarde para as direções de vento consideradas.

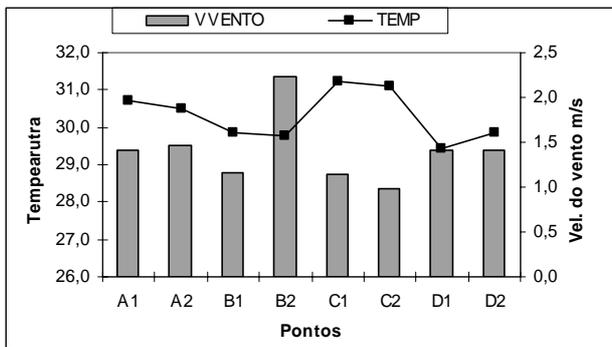


Gráfico 10: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com vento sudeste, à tarde.

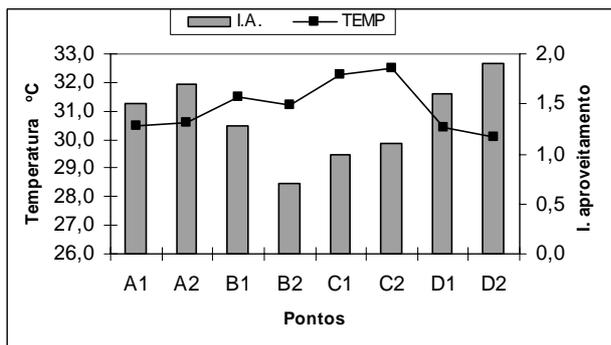


Gráfico 11: Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento, à tarde e com vento nordeste, à tarde.

Com ventos leste e nordeste, os pontos mais quentes foram C1, C2, B1 e B2, exatamente os situados em porções com menor índice de aproveitamento (Graf. 11), maior fator de visão do céu (Graf. 12) e menos ventiladas (Graf. 13). A diferença entre os pares C1-C2 e B1-B2 se deve ao fator de visão de céu, que é maior no primeiro par, o que proporciona uma maior exposição à radiação solar direta.

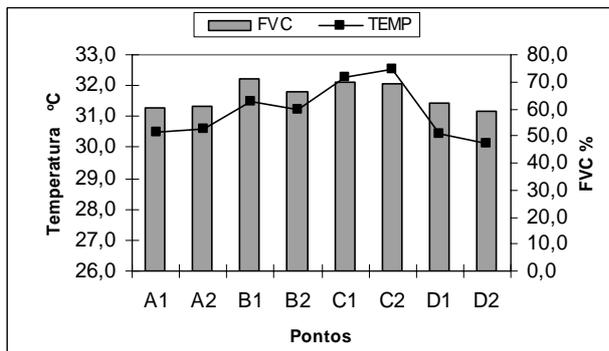


Gráfico 12: Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu, à tarde e com vento nordeste, à tarde.

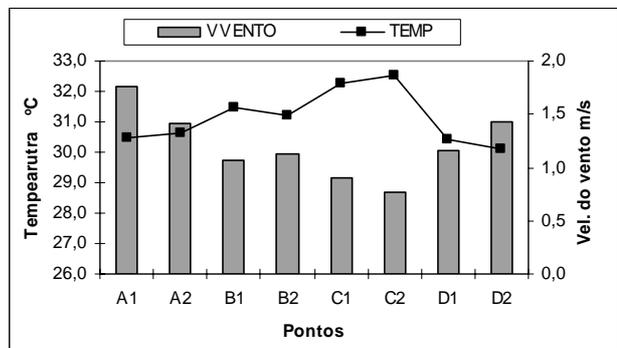


Gráfico 13: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com vento nordeste, à tarde.

O pavimento asfáltico e a maior exposição à radiação solar direta são o motivo pelo qual os pares C1-C2 e A1-A2 se aquecem mais rapidamente da manhã para a tarde, com valores entre 1,0°C e 1,2°C, enquanto os pontos D1 e D2 tiveram a sua temperatura reduzida da manhã para a tarde, com valores entre 0,3°C e 0,4°C a menos. Com ventos leste e nordeste os pontos C1 e C2 têm, respectivamente, um aumento de 1,7°C e 1,8°C da manhã para a tarde, enquanto que os pontos D1 e D2 aquecem-se apenas em 0,2°C e 0,1°C.

Esses valores médios confirmam os índices de correlação obtidos. Pelas análises de correlação com dados medidos no período de vento sudeste, percebe-se que o tipo de pavimento influenciou mais significativamente o comportamento da temperatura, enquanto que, com ventos leste e nordeste, passaram a ter maior influência (Fig. 4 e 5) a velocidade do vento, o fator de visão do céu e o índice de aproveitamento.

Como os índices de correlação mostraram, a ventilação exerce maior influência no comportamento térmico à tarde, de maneira que ao observar as figuras de erosão (Fig. 7) percebe-se que com ventos a 90° ocorre uma maior concentração de zonas de estagnação em torno dos pontos de medição, a exceção do ponto A1, onde ocorreu a redução da temperatura com ventos leste e nordeste.

A influência significativa dessas variáveis no comportamento térmico do ambiente estudado à tarde se revela, ainda, pelo aumento da diferença de temperatura entre os pontos observados. Quando o vento soprou de sudeste, essa diferença chegou, em média, a 1,8°C entre C1 (31,2°C) e D1 (29,4°C), e atingiu 2,2°C entre os pontos C1 (32,3°C) e D2 (30,1°C), com ventos leste e nordeste.

Em síntese, verificou-se que o melhor desempenho térmico ocorreu nos pontos B1 e B2, situados em via pavimentada com pedras e com menor fator de visão do céu. O pior desempenho foi o dos pontos C1 e C2, situados em via asfáltica e com maior fator de visão do céu.

4.2.2.3 Noite

Se, por um lado, o maior fator de visão do céu e o pavimento asfáltico contribuem para o ganho mais elevado de calor durante o dia, à noite essas variáveis possibilitam a dispersão mais rápida do calor acumulado, principalmente se houver uma boa ventilação. No caso do pavimento asfáltico, a perda de calor é mais rápida porque tal material tem grande efusividade. E quanto ao fator de visão do céu, os resultados corroboram com outros estudos já realizados, os quais afirmam que ambientes com grande obstrução do céu tendem a reter o calor acumulado por mais tempo.

Para se ter uma idéia, entre a tarde e a noite, percebeu-se no ponto C1 – situado em via asfaltada e com elevado fator de visão do céu – a redução da temperatura, em média, 4,6°C com vento sudeste e 5,5°C com ventos leste e nordeste, enquanto que no

ponto D1 essa redução foi de apenas 2,9°C com vento sudeste, e em D2, 3,3°C com ventos leste e nordeste (Graf. 14).

Com vento sudeste, os pontos mais quentes foram A2, B2, C2 e D2, todos com 26,7°C em média. O menos quente foi A1, com 26,4°C. Com vento leste e nordeste, C2 continuou sendo o ponto mais quente e A1 e D1 permaneceram, em média, mais frios.

De acordo com os coeficientes de correlação encontrados só se percebe a influência mais significativas das variáveis climáticas e urbanas no comportamento térmico do ambiente estudado, quando os ventos sopram de leste a nordeste. Neste caso, a nebulosidade e a umidade relativa do ar tenderam a dificultar a dispersão do calor, enquanto a ventilação tendeu a favorecê-la (Fig. 6).

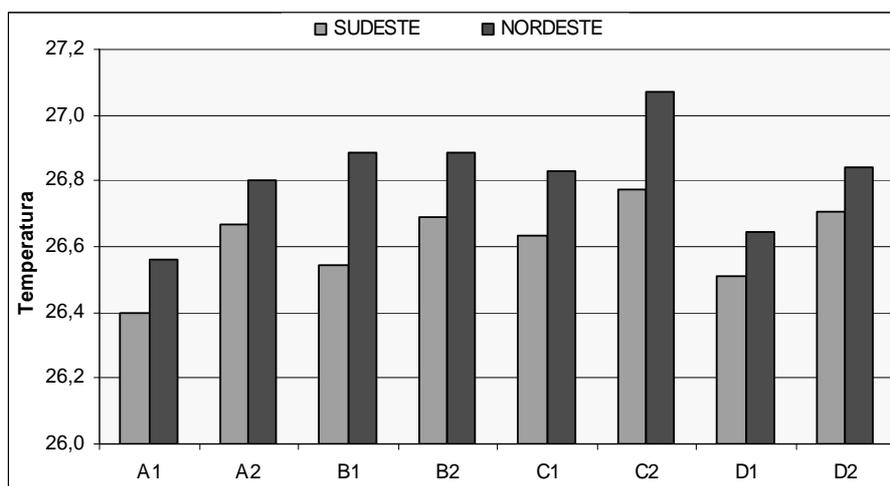


Gráfico 14: Média da temperatura no turno da noite para as direções de vento consideradas.

Com relação à umidade e à nebulosidade, ao contrário do que ocorre pela manhã, as partículas de água suspensas no ar e as nuvens criam, durante a noite, uma barreira que dificulta a dispersão da radiação térmica acumulada pela estrutura urbana, mantendo o ar aquecido por mais tempo.

As pequenas diferenças de temperatura entre os pontos se devem, em parte, à baixa velocidade dos ventos noturnos e à baixa densidade construída da área, o que torna o campo térmico mais homogêneo.

5. Conclusões

Dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

– não é possível estabelecer como regra que o aumento da densidade construída (e assim, a

verticalização das construções) provoque a elevação da temperatura. Os resultados apresentados aqui indicaram exatamente o contrário, o que remete à hipótese de que até um certo limite a verticalização das edificações contribui para a redução da temperatura, pois aumenta o sombreamento das ruas e, em alguns casos, provoca a aceleração dos ventos;

– deve-se, no caso dos climas tropicais úmidos, buscar uma forma urbana que proporcione ambientes com uma menor quantidade de horas de exposição ao sol (apenas o suficiente para a higienização) e ventilação abundante, com velocidades dentro dos limites de conforto e segurança aos pedestres; o comportamento verificado nos pontos D1 e D2, à tarde, com temperatura do ar variando, em média, de -0,18°C

- a +0,48°C em relação ao aeroporto, reforça a essa afirmativa;
- os resultados apresentados mostraram o quanto a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, a condição de céu e a radiação solar interferem na temperatura, estando essas variáveis também condicionadas à forma urbana, cuja função no sistema é, em parte, controlar os escoamentos e a incidência da radiação solar no ambiente;
 - é equivocado atribuir-se à maior incidência de ventos mais fortes e constantes nas cidades litorâneas à fraca correlação entre a forma urbana e a temperatura do ar, como afirmam ASSIS (2000) e SERRA (1984). Em primeiro lugar há que ser considerada a temperatura do escoamento (de vento). Em segundo lugar, se a forma urbana não for permeável à ventilação predominante no local, essa (mesmo com temperatura inferior à estrutura urbana) não será capaz de retirar o calor armazenado no interior da cidade. Em João Pessoa, as maiores correlações entre a temperatura do ar e a forma urbana ocorreram exatamente quando estas também foram boas com a velocidade do vento, principalmente, quando os ventos sopraram de leste e de nordeste à tarde. Daí a importância dos experimentos em túnel aerodinâmico para o conhecimento mais aprofundado do comportamento desta variável;
 - a correlação inversa entre a temperatura do ar e a condição do céu (nebulosidade) também não é absoluta. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que essas correlações tendem a ser inversas, pela manhã e à tarde, e diretas à noite. A nebulosidade forma uma barreira à passagem da radiação, da atmosfera para a cidade durante o dia, e da cidade para a atmosfera durante a noite;
 - as correlações verificadas indicam que a velocidade do vento tende a diminuir à medida que se adentra ao continente, resultado coerente com os perfis de velocidade do vento medidos por PEREGRINO (2005) no túnel aerodinâmico para esta mesma área. Já se faz perceber o efeito negativo do escalonamento do gabarito em altura dos edifícios desta área, conforme induz a legislação urbana local;
 - a ilha de calor diurna verificada no local apresenta uma magnitude de 2,3°C em média e máxima de 3,7°C com ventos leste e nordeste no período observado, valores preocupantes, já que a área estudada ainda é pouco adensada e se encontra no primeiro plano em relação à incidência dos ventos dominantes, o que leva a crer que as porções mais centrais da cidade podem estar ainda mais aquecidas;
 - o crescimento da urbanização da área estudada tem provocado a redução da cobertura vegetal e das áreas de solo permeável, agravado pela inexistência de áreas verdes no local. Assim, devem ser revistos os valores das taxas de permeabilidade do solo a ser reservada em cada empreendimento; e o poder público municipal, por sua vez, deve desenvolver um programa de arborização, contribuindo assim para o sombreamento dos passeios públicos e praças e, conseqüentemente, para redução dos ganhos de calor pela estrutura urbana.

6. Referências

ASSIS, Eleonora Sad de. *Impactos da forma urbana na mudança climática; método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. São Paulo: FAUUSP, 2000. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).

CARVALHO, Homero Jorge Matos de. *Parâmetros climatológicos para o estudo do balanço termo-energético de edificações da cidade de João Pessoa – PB*. Natal: UFRN, 2001. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo).

_____. *Metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima: aplicação a uma cidade brasileira de clima litorâneo com baixa latitude*. Rio de Janeiro: PROURB/FAU/UFRJ, 2006. (Tese, Doutorado em Urbanismo).

CHANDLER, T. J. *Urban climatology and its relevance to urban design*. WMO – Nº 438, Geneva: 1976.

Constituição Estadual da Paraíba. Capítulo IV – Da proteção do meio ambiente e do solo, Art. 229. Promulgada em 1989.

CORBELLA, Oscar D.; YANNAS, Simos. *Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos*. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

JANEIRO BORGES, A. R. e SARAIVA, J. A. G., *Erosion technique for assessing ground level winds*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981.

JOÃO PESSOA. Lei Orgânica do Município. Art. 175, 1990.

MONTEIRO, C. A. de F. *Teoria e clima urbano*. São Paulo: FFLCH-USP, 1975. (Tese, Livre-Docência em Geografia).

PEREGRINO, P. *Inter-relações existentes entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo nos bairros do Cabo Branco e Tambau/João Pessoa – PB*. João Pessoa: UFPB, 2005. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Urbana).

PLANO DIRETOR DE JOÃO PESSOA. Prefeitura Municipal de João Pessoa, 1992.

ROMERO, Marta Adriane Bustos. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: Projeto, 1988.

SAKAMOTO, Luiza L. S. *Relações entre a temperatura do ar e a configuração do céu na área central da metrópole paulistana: análise de dois episódios diários*. São Paulo: FFLCH/USP, 1994. (Dissertação, Mestrado em Geografia).

SAMPAIO, A. H. L. *Correlações entre uso do solo ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador*. São Paulo: FFLCH/USP, 1981. (Dissertação, Mestrado em Geografia).

SERRA, Geraldo Gomes. *O espaço natural e a forma urbana*. São Paulo: Nobel, 1984.

SILVA, Francisco A.. *O vento como ferramenta no desenho do ambiente construído; uma aplicação ao Nordeste do Brasil*. São Paulo: FAUUSP, 1999. (Tese, Doutorado em Arquitetura).

SOUZA E SILVA, C. A. de. *Critérios para aquisição e análise de dados bioclimáticos urbanos em espaços abertos visando o conforto ambiental*. Rio de Janeiro: PROURB/ FAU/UFRJ, 2003. (Dissertação, Mestrado em Urbanismo).

Responsabilidade de autoria

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores. As opiniões nele emitidas não representam, necessariamente, pontos de vista da Instituição e/ou do Conselho Editorial.