



A ABORDAGEM DO CLIMA URBANO E APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DA CIDADE: REFLEXÕES SOBRE UMA TRAJETÓRIA

Eleonora Sad de Assis

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Escola de Arquitetura, Dep. Tecnologia da
Arquitetura e do Urbanismo, Rua Paraíba, 697, Funcionários, 30130-140, Belo Horizonte, Minas
Gerais, Brasil, tel. +(55)31-3269-1851, e-mail: elsad@arq.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão crítica das abordagens do clima urbano, buscando identificar os avanços dos resultados para aplicações no planejamento e projeto urbano. Nas últimas duas décadas, houve um grande aumento do número de trabalhos na área, porém as contribuições aos estudos dos climas tropicais urbanos continua muito pequena, sendo poucos os trabalhos que tratam da modelização para dar base aos estudos exploratórios que subsidiam a tomada de decisão em planejamento e projeto urbano. Constatam-se avanços na abordagem preditiva da influência da geometria urbana e da inércia térmica na variação dos parâmetros de temperatura e umidade do ar; na avaliação da ventilação urbana na dispersão de poluentes atmosféricos, bem como na consideração do conforto térmico do usuário em área externa. Porém, a maior parte desses modelos são empíricos ou muito simples, o que restringe sua aplicação generalizada, havendo provavelmente maior potencial de aplicação para o planejamento no desenvolvimento de modelos termodinâmicos baseados no balanço de energia urbano.

ABSTRACT

This paper presents a critical review on the urban climate approaches intending to identify its results and advances for urban planning and design applications. In the last two decades there was an increase in the number of works dealing with urban climates but tropical urban climate studies are still small and a few of these works present modeling approaches to base exploratory studies that may aid the decision making in urban planning and design. Advances are noticeable on the predictive approach of the urban geometry and thermal inertia influence in the air temperature and humidity; on the analysis of urban ventilation in the air pollutants dispersion and on the pedestrians thermal comfort. However the great part of these models are empirical or very simple which is the cause of their restrict application. It seems the main potential for urban planning applications is from the development of the thermodynamic models based on the urban energy balance.

1. INTRODUÇÃO

As áreas urbanas abrigam atualmente a maior parte das atividades econômico-financeiras, sociais e culturais, concentrando grandes contingentes populacionais, o que resulta, por sua vez, em áreas de grande demanda e consumo de energia, água e matérias primas. Estima-se que a energia consumida pelos edifícios dos setores residencial e comercial chega a 40% do total consumido na Europa e 36% nos EUA, enquanto no Brasil, nesses mesmos setores chega-se a um consumo total de 18%, quase a metade do total consumido no setor industrial, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2003).

A grande quantidade de energia usada nas áreas urbanas as transforma nas maiores fontes indiretas de produção de gases causadores do efeito estufa; por outro lado, o rápido crescimento das populações urbanas provoca uma pressão cada vez maior sobre o sítio local, pela intensificação do uso e ocupação do solo, aumentando o potencial da mudança climática, com a ocorrência mais freqüente de episódios severos e enchentes (WMO, 1996). Estudos realizados com séries climáticas dos últimos 100 anos da rede meteorológica mundial sugerem que o incremento médio observado na temperatura do planeta poderia ser devido à urbanização (CHANGNON, 1992). Apesar de ser polêmica a idéia da influência da urbanização na mudança climática global, alguns autores levantam a questão de que os climas urbanos podem representar um microcosmo dos climas de larga escala do futuro, tendo em vista o processo de aquecimento global (CHANGNON, 1992; OKE, 1994) e os pesquisadores geralmente concordam sobre o impacto do ambiente construído no clima, pelo menos em nível local ou mesoclimático. Além disso, a compartimentação urbana provoca diferenciações nos níveis topo e microclimáticos que são também importantes para a investigação sobre o conforto térmico urbano e suas conseqüências para o planejamento da cidade.

Embora se reconheça atualmente a importância da climatologia urbana para o planejamento e a preservação da qualidade ambiental do meio urbano, sua aplicação às atividades de planejamento e projeto das cidades ainda é muito limitada, em parte devido à uma abordagem fragmentada e desintegrada entre os diversos campos do conhecimento envolvidos, em parte devido ao fato de que a grande maioria dos trabalhos nessa área, tanto no Brasil como no exterior, são descritivos e, portanto, seus resultados ficam restritos ao caso em estudo. Além disso, em boa parte da literatura especializada, as recomendações para o planejamento e projeto urbano climaticamente responsáveis são muito genéricas. Por exemplo, em WMO (1996) encontram-se as seguintes diretrizes:

- melhoria do conforto ambiental dos habitantes, tanto no exterior quanto no interior das edificações;
- redução da demanda de energia operante para condicionamento artificial dos edifícios;
- redução da quantidade e melhoria da qualidade do escoamento superficial das águas;
- preservação dos corredores locais de ventilação sobre o assentamento urbano, principalmente das massas noturnas descendentes de ar, responsáveis pela exaustão do calor acumulado durante o dia;
- variação da altura dos edifícios para melhorar as condições locais de ventilação;
- adequada orientação solar e arranjo dos edifícios.

Esse tipo de diretrizes considera implicitamente que certas variáveis condicionantes da forma urbana estão diretamente ligadas à mudança climática local e que, portanto, o fenômeno tem estreita relação com as atividades de planejamento e projeto urbano, como já apontavam, há muito, pesquisadores importantes no cenário mundial, como Chandler (1976), Landsberg (1976), Bitan (1992) e Akbari e Rosenfeld (1997), dentre outros. É necessário, entretanto, desenvolver critérios e métodos de projeto de caráter menos genérico para aplicação no processo de síntese da forma urbana. Neste contexto, a análise espacial sistemática de realidades urbanas, o uso de modelos para a simulação de variações climáticas e a interação desses dois processos, que são complementares, podem ajudar na concepção desses critérios e métodos.

De fato, Echenique (1975) mostra que o processo de elaboração de modelos é importante para um planejamento mais conseqüente das ações humanas sobre a realidade. Do ponto de vista da categoria de uso, os modelos são identificados por este autor como descritivos, preditivos, exploratórios e de planejamento, e estão interligados num processo temporal para se chegar às metas socialmente estabelecidas de melhorias da realidade abordada. Desse modo, entende-se que, para ser útil à abordagem de planejamento (nesse caso, de planejamento urbano), um modelo descritivo deve evoluir ou dar base ao desenvolvimento de modelos exploratórios, já que planejar implica em tomar decisões entre cenários futuros possíveis. A figura 1 ilustra essa perspectiva.

Já se discutiu anteriormente (ASSIS, 1997; ASSIS, 2000) que as dificuldades para tornar operacional, ao urbanismo, o conceito de clima urbano (isto é, para utilizar as capacidades preditivas e exploratórias dos modelos para gerar subsídios para o planejamento da cidade), estão na diferença de enfoques (e objetivos) das bases teóricas que dão suporte ao desenvolvimento desses modelos (inclusive na definição das escalas climáticas e sua integração às escalas de planejamento), na falta de uma representação dos resultados da análise climática voltada para as aplicações no planejamento e projeto urbano, mas também na relativa simplicidade e/ou empirismo dos modelos numéricos

existentes do clima urbano, o que restringe sua aplicação aos sítios urbanos para que foram produzidos ou para situações muito mais simples do que aquelas tipicamente encontradas em áreas urbanas.

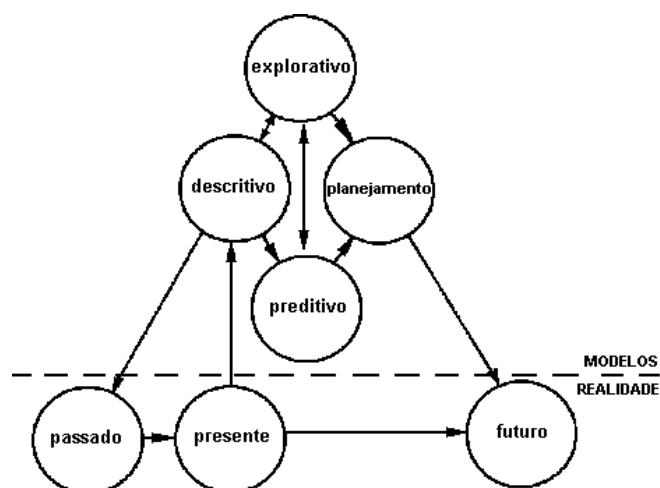


Fig. 1 - Processo ideal de elaboração de modelos em relação à realidade, segundo Echenique (1975)

Diante desse quadro, este trabalho objetiva examinar as contribuições das abordagens do clima urbano para subsidiar os processos de planejamento e projeto urbano, principalmente em áreas tropicais. Não se pretende fazer uma revisão exaustiva dessas abordagens, dada a natureza do trabalho, mas tentar pontuar as contribuições mais significativas dentro de uma visão geral dos estudos sobre o clima urbano, que trazem potencial para as aplicações no planejamento das cidades.

2. TRAJETÓRIAS DAS ABORDAGENS DO CLIMA URBANO

Os estudos científicos sobre o clima urbano tiveram início ainda no século XIX, na Europa, com o trabalho de Luke Howard sobre o clima da cidade de Londres, publicado pela primeira vez em 1818¹. Ele foi o primeiro a observar que as temperaturas do ar são freqüentemente mais altas na cidade que na área rural à sua volta. Estudos deste tipo multiplicaram-se na segunda metade do século XIX na França e na Alemanha, em virtude da expansão das redes de observação meteorológica. Assim, em 1855, Emilien Renou publicou um trabalho expressivo sobre a alteração climática em Paris, analisando, além do problema da temperatura, a questão da ventilação na cidade (LANDSBERG, 1981).

A utilização de dados das redes-padrão foi, entretanto, muito discutida, com a emergência da micro-meteorologia, especialmente na Alemanha e na Áustria, durante os anos 1930. Sua ênfase era em pequenas escalas de espaço e de tempo, a partir da introdução da técnica de transectos móveis por Schmidt, em 1927 (citado por OKE, 1984b). À época da 2ª Grande Guerra, a América do Norte e o Japão já estavam envolvidos em trabalhos semelhantes. Depois da guerra, ocorreu um interesse renovado sobre o assunto e muitos trabalhos foram desenvolvidos nestes países, concentrando-se na distribuição horizontal de vários elementos climáticos, sendo a temperatura a variável dominante. Havia também um enfoque na relação da temperatura com o uso do solo urbano; nas relações estatísticas entre as diferenças urbano-rurais e as condições predominantes de tempo; na exploração do efeito do tamanho da cidade em tais diferenças e na investigação da extensão vertical da influência urbana. Muitos destes trabalhos foram feitos por meteorologistas, mas havia uma crescente expansão da participação de geógrafos climatologistas.

No final dos anos 1960 e início dos 1970, ocorreu um forte e súbito aumento do interesse e do número de trabalhos sobre a atmosfera urbana, originados provavelmente da maior consciência do papel do ser humano na mudança ambiental, especialmente sobre a poluição do ar (OKE, 1984b). Houve uma grande ênfase no estudo dos processos atmosféricos e na construção de modelos, a partir da contribuição dos meteorologistas. Paralelamente, desenvolvia-se uma nova climatologia física no exterior, onde os conceitos de balanço energético e hidrológico tornaram-se temas centrais. Muitos destes trabalhos estavam associados a grandes programas de observação que ocorreram em cidades

americanas e russas. O grande número de trabalhos produzidos neste período levou a Organização Mundial de Meteorologia (WMO) a patrocinar uma série de revisões sobre o assunto.

Nas duas últimas décadas do século XX, os trabalhos consolidaram métodos e técnicas de pesquisa e monitoramento do clima urbano (OKE, 1984a; TAESLER, 1986), focalizando os processos e estados atmosféricos sobre a cidade como base para a modelização física e numérica. Nesse período, tem início também um grande interesse pelos estudos em áreas tropicais.

Os estudos de climatologia urbana nos trópicos ainda são muito limitados, se comparados à produção em latitudes médias. Jáuregui (2000) verificou que, embora a produção de trabalhos em áreas tropicais tenha mais que dobrado dos anos 1980 para os anos 1990, representavam apenas cerca de 20% das publicações em climatologia urbana referentes às cidades das latitudes médias e altas. Os estudos descritivos, básicos para investigações mais elaboradas, ficam prejudicados por uma rede meteorológica pouco densa nesta região, além da deficiência de equipamentos apropriados à pesquisa na escala do urbano, que requer uma instrumentação cada vez mais sofisticada e cara. Para tentar promover a pesquisa do clima urbano em áreas tropicais e melhorar a base de conhecimento para a tomada de decisão em planejamento e projeto urbanos, a WMO lançou, em 1993, o Experimento em Clima Tropical Urbano (TRUCE – Tropical Urban Climate Experiment). Entretanto, devido a restrições orçamentárias da Organização, o programa ficou limitado à investigação de questões específicas por grupos indicados de especialistas (WMO, 1998).

Assim, enquanto a pesquisa nos países desenvolvidos vem se aprofundando na modelização física e numérica, a maior parte dos estudos em áreas tropicais ainda focaliza principalmente a abordagem descritiva das ilhas de calor e da qualidade do ar, com pouca atenção à abordagem de balanço energético, modelamento e desenvolvimento de aplicações para o planejamento urbano. Jáuregui (2000) recomendou o desenvolvimento prioritário de pesquisas em áreas urbanas tropicais sobre os seguintes tópicos:

- efeitos da vegetação urbana na troca radiativa e no processo de resfriamento evaporativo;
- comportamento hidrológico das cidades tropicais diante de episódios climáticos severos;
- atividade de incidência de raios e seus impactos sobre a segurança das populações, devido à predominância de chuvas convectivas nessas regiões;
- processos físicos do clima urbano tropical, pois muitas condições de fronteira são diferentes daquelas dos climas urbanos em áreas temperadas.

Examinando a produção brasileira, observa-se que boa parte dos estudos sobre o clima urbano, especialmente os realizados por geógrafos, partem da contribuição teórica de Monteiro (1976), onde o clima urbano é abordado como sistema a partir dos canais da percepção humana (conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteórico). Dez anos depois da publicação de *Teoria e Clima Urbano*, o autor, ao analisar criticamente a produção brasileira naquele período, já chamava a atenção para a necessidade de diversificação dos estudos urbanos nos vários sistemas climáticos do país, bem como do desenvolvimento de modelagem para a simulação, tomando por base as situações observadas (MONTEIRO, 1986).

Por outro lado, se a modelagem do clima urbano tem avançado, principalmente no que diz respeito à abordagem termodinâmica, através do conceito de balanço de energia, praticamente não há estudos lidando com a relação entre a(s) matriz(es) energética(s) da cidade, o estilo de vida e atividades dos habitantes, e os impactos sobre o clima local. Page (1980) observou que, embora no passado as edificações e, mesmo, os assentamentos humanos, tivessem uma concepção muito mais relacionada com o clima do lugar, atualmente o desenvolvimento urbano pouco considera o clima como um recurso renovável e um risco periódico. Enquanto *recurso*, o clima pode contribuir para uma maior utilização de fontes renováveis de energia no espaço urbano, tais como a solar e a eólica, bem como para a recarga dos aquíferos que abastecem a cidade. Os recursos climáticos locais também podem ser mobilizados para a adequação ambiental dos edifícios, tornando-os menos dependentes de energia operante, através do controle da acessibilidade ao sol e aos ventos, e das trocas térmicas através das suas envoltórias. Enquanto *risco*, a consideração do clima pode ajudar a prevenir, através do planejamento e projeto urbano, os prejuízos materiais e sociais decorrentes de tempestades e enchentes que representam condições de curto período. Entretanto, as políticas contemporâneas que consideram a economia de energia como uma estratégia importante para diminuir a velocidade da mudança climática em escala mundial se restringem ainda, na maior parte dos países que as adotam, à escala dos

edifícios, havendo muito poucas iniciativas no sentido de compreender o impacto da forma urbana na demanda de energia pelos edifícios, para a construção, para o transporte e outras funções urbanas.

3. PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO URBANO

3.1 O Papel dos Modelos Descritivos e Semi-Quantitativos no Desenvolvimento de uma Base para o Planejamento e Projeto Urbano

Os estudos descritivos do clima urbano têm mostrado que, tanto em área tropical quanto temperada, a mudança climática local está associada a efeitos de transformação de energia na área urbana em função de sua morfologia, das propriedades térmicas dos materiais das superfícies e da produção de calor antropogênico, provocando a redução das taxas de resfriamento evaporativo e convectivo, em função da impermeabilização do solo, da diminuição da superfície coberta por vegetação e da redução da velocidade dos ventos pelo aumento da rugosidade superficial. Uma visão geral sobre os estudos descritivos do clima urbano em várias cidades mostra, entretanto, que o peso das características urbanas no comportamento climático local pode variar muito, em função do tipo de clima e do entorno (natural, rural ou industrial) da área, da compartimentação do relevo, da influência de grandes massas d'água e do próprio tamanho da área urbanizada. No caso das áreas tropicais, o aumento da temperatura do ar nos centros mais densos, a alteração no regime de ventos e de chuvas pode resultar em estresse bioclimático, danos sociais e materiais através do aumento do risco em episódios climáticos severos, problemas de saúde nos habitantes, aumento do consumo de energia para refrigeração e dos custos de manutenção dos edifícios e de seus sistemas artificiais de climatização.

Uma das vantagens que o enfoque descritivo traz para o planejamento, principalmente aquele que se originou da proposta de Monteiro (1976), no Brasil, e da escola alemã (MAYER e HÖPE, 1987; KATZSCHENER, 1997 e outros), é partir do *referencial humano*, descrevendo a condição de qualidade que o clima da cidade deve cumprir para satisfazer as exigências humanas de conforto térmico e pureza do ar e, então, identificar quais os elementos relevantes do contexto geocológico para o conforto ou atenuação da situação de aquecimento, e que devem ser *preservados* ou *mobilizados* racionalmente pelo traçado urbano (MONTEIRO e TARIFA, 1977). Nesse enfoque, é possível se chegar à escala microclimática, onde intervenções específicas podem ser implementadas em cada área urbana (a partir da visão de unidades geocológicas), com o objetivo de melhoria das condições climáticas da cidade como um todo. Nakagawa (1996), inclusive, levantou a possibilidade de controlar a qualidade do clima urbano através, basicamente, de três elementos do planejamento e projeto: *arranjo dos edifícios*, *áreas verdes urbanas* e *corpos d'água*. Tal percepção está de acordo com os resultados que vêm sendo obtidos com a modelização do clima urbano, pois relaciona-se com as variáveis identificadas do balanço de energia, como se verá adiante.

O limite dessa abordagem é que não possibilita uma indicação objetiva dos melhores arranjos dos edifícios, do tamanho e disposição das áreas verdes e/ou corpos d'água necessários para a efetiva melhoria das condições climáticas locais. Para tanto, a modelização torna-se fundamental.

3.2 Modelos do Clima Urbano e seu Potencial para Subsidiar o Planejamento e Projeto da Cidade

As abordagens descritivas do clima urbano podem, numa primeira etapa, gerar modelos empíricos que ajudam a entender as relações básicas e o peso que as variáveis consideradas têm numa determinada área urbana, sob determinada condição climática. Observa-se, na literatura internacional, que houve um certo investimento nesse tipo de modelagem até os anos 1980, quando o uso de modelos de balanço de energia urbana, cujo desenvolvimento teve início ainda nos anos 1970², mostrou ser uma abordagem mais adequada.

Oke (1982) apresentou uma correlação entre a *magnitude* da ilha de calor urbana e a *população* para uma série de cidades da América do Norte e Europa, mas não encontrou um padrão consistente para as cidades da Ásia, Austrália e Terceiro Mundo. Por outro lado, o autor verificou uma forte correlação entre o fator de visão do céu, medido nas áreas centrais desse conjunto de cidades, e a intensidade máxima da ilha de calor. Givoni (1998, citado por DUARTE, 2002), observa ser mais adequado substituir o parâmetro população pela *densidade construída* nos modelos de correlação com a ilha de

calor, uma vez que esta variável apresenta uma relação causal com o aquecimento urbano. Fezer (1982) fez uma abordagem mais útil para o planejamento urbano propondo, a partir do estudo de várias cidades alemãs, um modelo empírico simples para avaliar o gradiente de temperatura numa área urbana, usando o *número de edifícios*, de *andares*, de quadras sem *áreas livres* e ponderando a influência de áreas livres e da localização junto a núcleos mais quentes ou a grandes espaços abertos.

No Brasil, os estudos desse tipo são mais recentes, sendo a maioria deles desenvolvidos por arquitetos. Assis (1990) correlacionou dados de temperatura máxima e mínima do ar de 4 estações climatológicas localizadas dentro do município de Belo Horizonte, MG, com a *densidade de ocupação do solo*, o percentual de *cobertura vegetal de porte arbóreo* e a *tipologia de edifícios*. Duarte (2002) verificou o grau de correlação entre variáveis mais ligadas à legislação urbana, tais como a *taxa de ocupação*, o *coeficiente de aproveitamento*, a presença de *água* e de *vegetação*, com a temperatura do ar na cidade de Cuiabá, MT. Roriz e Barbugli (2003) também relacionaram algumas variáveis da ocupação urbana na cidade de Araraquara, SP, à variação de temperatura do ar e umidade relativa. Santos et al (2003) correlacionaram as variações de temperatura e umidade do ar de uma área da cidade de Belo Horizonte ao *fator de visão de céu* e à *massa construída* de 5 recintos urbanos diferentes dentro dessa área, verificando a influência da geometria urbana e da inércia térmica respectivamente representados por aquelas variáveis.

Os resultados desses trabalhos não podem ser generalizados, ficando restritos, quanto à aplicação e às conclusões, às áreas estudadas. Porém, as metodologias desenvolvidas podem ser aplicadas a outras áreas, talvez com alguns ajustes, o que, eventualmente contribuiria para gerar recomendações mais objetivas ao planejamento e, principalmente, ao projeto urbano.

A partir da síntese de Oke (1982; 1988) quanto aos resultados alcançados pela pesquisa mundial sobre o clima urbano, pode-se perceber que a diferença primária entre os processos térmicos da área urbana e de seu entorno natural ou rural está na repartição entre os fluxos turbulentos de calor sensível (trocas térmicas secas, Q_H) e de calor latente (trocas térmicas úmidas, Q_E) e que, portanto, o clima urbano e a influência do ambiente construído poderiam ser melhor entendidos sob a ótica dos balanços de energia. Verificou-se que, de modo geral, as áreas naturais ou rurais adjacentes à cidade perdem mais calor por meio do resfriamento evaporativo. Nas cidades, onde as superfícies têm mais capacidade térmica e o grau de impermeabilização é muito maior, ao contrário, a maior parte do fluxo térmico é de calor sensível. As estruturas urbanas favorecem, ainda, o estoque de calor (ΔQ_s), aumentando a importância desse termo no sistema, pois, durante a noite, a intensidade da perda térmica é função da quantidade de calor armazenado e disponibilizado na superfície.

Muitos estudos vêm demonstrando, desde os anos 1980, em várias partes do mundo (para citar alguns, veja OKE, 1981; JOHNSON, 1985; YAMASHITA et al, 1986), que duas variáveis condicionantes da forma urbana – a configuração geométrica da área (arranjo entre os edifícios e demais elementos urbanos) e a inércia térmica das superfícies – são particularmente relevantes na alteração das características climáticas locais, especialmente na formação do fenômeno da ilha de calor. Entretanto, se tais variáveis têm um papel claro nas trocas radiativas (OKE, 1981; ASSIS, 2000), afetando a variação local da temperatura e umidade em uma área urbana (SANTOS et al, 2003), ainda não há elementos suficientes para compreender bem a influência dessas variáveis nos demais termos de Q_H e ΔQ_s , bem como a interação com outras variáveis que influem sobre o termo Q_E , que depende, por sua vez, da disponibilidade de água no sistema, através das áreas de vegetação, do tipo (porte, principalmente) de vegetação, da presença de corpos d'água, etc.. Oke et al (1999), ao compararem a relação entre esses termos para uma série de cidades em áreas tropicais e temperadas, concluíram que a influência da morfologia urbana sobre Q_H não parece ser linear, sendo essa relação provavelmente modulada pela disponibilidade de água e pela eficiência do armazenamento de calor na estrutura urbana.

Maitelli (1994) foi quem primeiro apresentou um trabalho lidando com a perspectiva do balanço de energia em área urbana no Brasil, investigando os efeitos da urbanização na temperatura e umidade do ar na cidade de Cuiabá, sendo este um dos poucos estudos em área continental do país. As medidas do balanço de energia no centro urbano mostraram altas taxas de calor armazenado, sendo que o comportamento das variáveis do balanço puderam explicar aspectos da ilha de calor e do regime de umidade na cidade.

Barbirato (1998) aplicou um modelo de balanço de energia urbano unidimensional (TSO, 1990), adaptando-o para as condições climáticas típicas da cidade de Maceió, AL (clima quente e úmido). É um trabalho pioneiro no país no uso da modelagem climática numérica com objetivo primordial de auxílio ao planejamento urbano, possibilitando simulações e previsões de ambientes térmicos diferenciados em função de diversas tipologias de uso do solo. A autora avaliou o potencial de aplicação deste modelo, através da correlação entre os valores observados e calculados relativos a áreas urbanas distintas. O modelo utilizado dá ênfase à *massa construída* como descritor da morfologia urbana, não considerando o parâmetro de *geometria* da malha urbana, pouco expressivo naquela condição climática.

Assis (2000) abordou especificamente este último parâmetro, mostrando sua relevância no contexto das trocas térmicas por radiação numa área urbana de Belo Horizonte (clima misto continental, de verões quentes e chuvosos e invernos suaves e secos), quando predominam as condições que favorecem o desenvolvimento da ilha de calor. Através da utilização simultânea de dados de trabalho de campo, modelagem física e numérica, foi possível demonstrar que um modelo físico é capaz representar bem os fatos da ilha de calor, enquanto fenômeno noturno, em uma área urbana real e que, no caso da cidade estudada, obstruções da abóbada celeste da ordem de 40% (fator de visão de céu de cerca de 60%) já são suficientes para causar o efeito de ilha térmica.

O estudo do clima urbano sob a ótica do balanço de energia tem fornecido uma estrutura que possibilita não apenas o desenvolvimento de um modelo genérico, com as variáveis importantes e suas relações mais claramente definidas, mas também a comparação de resultados entre cidades e/ou recintos urbanos diferentes, o que é interessante para o planejamento, do ponto de vista da comparação entre soluções possíveis para uma área ou da análise de impacto provável resultante de diretrizes de desenvolvimento (caso das legislações construtivas).

Entretanto, na maior parte dos trabalhos nessa área, a questão do conforto térmico humano não é considerada. Porém, os planejadores urbanos e arquitetos precisam avaliar como diferentes soluções de projeto podem interferir nas condições de conforto térmico e no comportamento por elas guiado, para promoverem, de fato, a melhoria da qualidade ambiental urbana. Bruse (2003) observou que os diversos índices biometeorológicos existentes não são capazes de lidar com os efeitos dinâmicos dos usuários que se deslocam através de um sítio urbano e desse modo, ocorrem diferenças significativas entre os resultados da aplicação desses índices e as respostas dos usuários obtidas por métodos empíricos, tais como entrevistas. Assim, desenvolveu um modelo multi-usuário capaz de simular as interações entre os indivíduos, considerando suas características (idade, tipo de vestimenta, etc.), preferências microclimáticas e objetivos (atividades, linhas de movimentação) para ser integrado a um modelo de simulação do clima urbano e assim poder analisar o padrão de uso de uma determinada área e a resposta de conforto mais provável dos usuários, dentro de um dado “complexo térmico”.

Deste modo, observa-se mais recentemente que tem havido um esforço para integrar as necessidades do planejamento e projeto urbano à abordagem termodinâmica do clima urbano, o que pode vir a resolver o problema principal desse tipo de abordagem para as aplicações em planejamento e projeto urbano, que é a falta de referencial humano. Por outro lado, a maior complexidade desses modelos e a dificuldade de acesso aos grupos que os desenvolvem se constituem em fortes obstáculos à generalização de seu uso.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que ambas as abordagens descritiva e preditiva (modelos numéricos) do clima urbano são importantes e necessárias para o desenvolvimento de aplicações para o planejamento e projeto urbano. Em função das limitações da abordagem descritiva para o desenvolvimento dessas aplicações e da grande quantidade de trabalhos já existentes sobre várias cidades no Brasil, deve haver um esforço para avançar em direção aos estudos de modelização. Entretanto, esses estudos devem levar em conta as múltiplas variáveis envolvidas e o caráter *termodinâmico* do processo físico de interação entre os elementos da atmosfera e os da cidade e seu entorno, bem como o significado desses resultados para o conforto térmico humano e para o equilíbrio do ecossistema urbano.

Nesse sentido, a abordagem do balanço de energia parece a mais promissora, pois pode superar os limites dos modelos empíricos em busca de uma generalização que permita comparar distintas

soluções de projeto, desempenhos diferentes das estruturas urbanas face a condições climáticas variadas e dinâmicas, etc.. Nesse sentido, a experiência japonesa de integração interdisciplinar entre geógrafos, meteorologistas, arquitetos e engenheiros (NAKAGAWA, 1996) na modelização do clima urbano e desenvolvimento de aplicações para o planejamento mostrou que avanços significativos podem ser obtidos num curto espaço de tempo, e deve nos servir de inspiração.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBARI, H.; ROSENFELD, A. H. (1997) "Cool buildings and cool communities", in: International Conference on Buildings and the Environment, 2nd, 1997, Paris, France. *Proceedings...* Paris: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), vol. 2, p. 301-308.
- ASSIS, E. S. (1997) "Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano", in: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 4^o, 1997, Salvador. *Anais...* Salvador: FAU/UFBA, ANTAC, 1997, p. 134-139.
- ASSIS, E. S. (2000) *Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ASSIS, E. S. (1990) *Mecanismos de desenho urbano apropriados à atenuação da ilha de calor urbana: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BARBIRATO, G. M. (1998) *Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió - AL*. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BITAN, A. (1992) "The high climatic quality city of the future", *Atmospheric Environment*, n. 26B, p. 313-329.
- BRASIL, Ministério das Minas e Energia (2003). *Balanço Energético Nacional 2003*. Brasília: Secretaria de Energia. ISS: 0101-6636.
- BRUSE, M. (2003) "Assessing urban microclimate using multi-agent simulations: a new approach to answer an old problem?", in: International Conference on Urban Climate, 5th, 2003, Lódź, Poland. *Proceedings...* Lódź: University of Lódź, 2003, 4p. ISBN: 8391672808 CD-ROM.
- CHANDLER, T. J. (1976) *Urban climatology and its relevance to urban design*. Geneva: WMO Technical Note 149.
- CHANGNON, S. A. (1992) "Inadverted weather modification in urban areas: lessons for global climate change", *Bulletin American Meteorological Society*, n. 73, p. 619-627.
- DUARTE, D. H. S. (2002) "Estado da arte em clima urbano e planejamento", in: NUTAU'2002: Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano, 2002, São Paulo. *Anais...* São Paulo: NUTAU/USP, p. 1102-1111.
- ECHENIQUE, M. (1975) "Modelos: una discusión", in: MARTIN, L.; MARCH, L.; ECHENIQUE, M. *La Estructura del Espacio Urbano*, Barcelona: G. Gili, p. 235-248.
- FEZER, F. (1982) "The influence of building and location on the climate of settlements", *Energy and Buildings*, n. 4, p. 91-97.
- JÁUREGUI, E. (2000) "Tropical urban climatology at the turn of the millennium: an overview", in:

- International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, 1999, Sydney, Australia. *Selected Papers...* Geneva: World Meteorological Organization, WCASP-50, WMO-TD 1026, p. 537-540.
- JOHNSON, D. B. (1985) "Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham, U.K.", *Journal of Climatology*, n. 5, p. 221-225.
- KATZCHNER, L. (1997) "Urban climate studies as tools for urban planning and architecture", in: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 4º, Salvador, 1997. *Anais...* Salvador: FAU/UFBA, ANTAC, p. 49-58.
- LANDSBERG, H. E. (1976) *Special environmental report n. 7 - weather, climate and human settlements*. Geneva: WMO n. 448.
- LANDSBERG, H. E. (1981) *The urban climate*. New York: Academic Press.
- MAITELLI, G. T. (1994) *Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá, MT*. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MAYER, H.; HÖPE, P. (1987) "Thermal comfort of man in different urban environments", *Theoretical and Applied Climatology*, n. 38, p. 43-49.
- MONTEIRO, C. A. F. (1986) "Some aspects of the urban climate of tropical South America: the Brazilian contribution", in: Technical Conference on Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas, 1984, Ciudad de Mexico, Mexico. *Proceedings...* Geneva: WMO No. 652, p. 166-197.
- MONTEIRO, C. A. F. (1976) *Teoria e clima urbano*. Tese (Livre Docência em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MONTEIRO, C. A. F.; TARIFA, J. R. (1977) "Contribuição ao estudo do clima de Marabá: uma abordagem de campo subsidiária ao planejamento urbano", *Climatologia*, n. 7, p. 1-52.
- NAKAGAWA, K. (1996) "Recent trends of urban climatological studies in Japan, with special emphasis on the thermal environments of urban areas", *Geographical Review of Japan*, n. 69B, p. 206-224.
- OKE, T. R. (1981) "Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations", *Journal of Climatology*, n. 1, p. 237-254.
- OKE, T. R. (1994) "Keynote Address", in: Technical Conference on Tropical Urban Climates, 1993, Dhaka, Bangladesh. *Report...* Geneva: WMO TD No. 647, WCASP – 30, p. xxiii-xxvii.
- OKE, T. R. (1984a) "Methods in urban climatology", *Applied Climatology*, n. 14, p. 19-29.
- OKE, T. R. (1982) "The energetic basis of the urban heat island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n. 108, p. 1-24.
- OKE, T. R. (1988) "The urban energy balance", *Progress in Physical Geography*, n. 12, p. 471-508.
- OKE, T. R. (1984b) "Towards a prescription of the greater use of climatic principles in settlement planning", *Energy and Buildings*, n. 7, p. 1-10.
- OKE, T. R.; SPRONKEN-SMITH, R. A.; JÁUREGUI, E. et al. (1999) "The energy balance of central Mexico City during the dry season", *Atmospheric Environment*, n. 33, p. 3919-3930.

- PAGE, J. K. (1980) "Climate considerations and energy conservation", in: BACH, W.; PANKRATH, J.; WILLIAMS, J. *Interactions of Energy and Climate*. Dordrecht: D. Reidel Publishing, p. 73-88.
- RORIZ, M.; BARBUGLI, R. A. (2003) "Mapeamento e análise de micro-climas urbanos", in: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 7º, 2003, Curitiba. *Anais...* São Paulo: ANTAC, p. 592-599. CD-ROM.
- SANTOS, I. G.; LIMA, H. G.; ASSIS, E. S. (2003) "Influência da geometria urbana e da inércia térmica na alteração do clima urbano: uma abordagem preditiva", in: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 7º, 2003, Curitiba. *Anais...* São Paulo: ANTAC, p. 706-713. CD-ROM.
- TAESLER, R. (1986) "Urban climatological methods and data", in: Technical Conference on Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas, 1984, Ciudad de Mexico, Mexico. *Proceedings...* Geneva: WMO No. 652, p. 199-236.
- TSO, C. P. et al. (1990) "An improvement to the energy balance model for urban thermal environment analysis", *Energy and Buildings*, n.14, p. 143-152.
- WORLD Meteorological Organization (1996). *Climate and Urban Development*. Geneva: WMO No. 844.
- WORLD Meteorological Organization (1998). *Report of the eleventh session of the advisory working group of the Commission for Climatology, WCASP-47*, disponível em www.wmo.ch, acessado em 04/03/05.
- YAMASHITA, S.; SEKINE, K.; SHODA, M. et al. (1986) "On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan", *Atmospheric Environment*, n. 20B, p. 681-686.

Notas:

¹ Landsberg (1981) cita registros da Antigüidade e da Idade Média, onde se percebe a consciência sobre o problema da poluição do ar em algumas cidades e a tomada de medidas mitigadoras pela autoridade governamental.

² O primeiro trabalho de que se tem notícia usando um modelo simples de balanço de energia urbano foi o de Myrup, em 1969, publicado no oitavo número do *Journal of Applied Meteorology* com o título "A numerical model of the urban heat island".