

0064/99

	Class
	Aut
	Títul

APLICAÇÃO DE MODELO DE BALANÇO DE ENERGIA PARA ANÁLISE DO AMBIENTE TÉRMICO URBANO DE MACEIÓ-AL

DEDALUS - Acervo - EESC



31100006897



GIANNA MELO BARBIRATO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arthur Mattos

São Carlos
1998

Class.	TESE
Cutt.	0586
Tombo	0064/99

31100006897

S/S 1030969

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B237a Barbirato, Gianna Melo
Aplicação de modelo de balanço de energia para
análise do ambiente térmico urbano de Maceió - AL /
Gianna Melo Barbirato. -- São Carlos, 1998.


Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Ciências da Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos.

1. Climatologia urbana. 2. Ilha de calor.
3. Modelagem climática. 4. Clima tropical. I. Título.

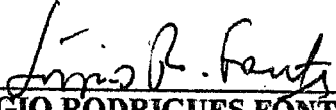
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Arquitecta **GIANNA MELO BARBIRATO**

Tese defendida e aprovada em 18.12.98
pela Comissão Julgadora:



Prof. Assoc. **ARTHUR MATTOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



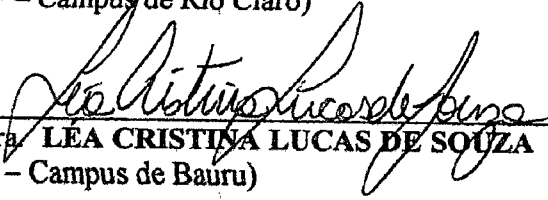
Prof. Dr. **SÉRGIO RODRIGUES FONTES**
(UNESP - Campus de Jaboticabal)



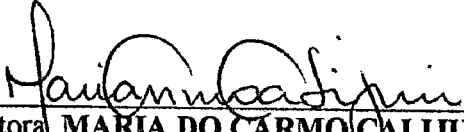
Prof. Assoc. **EDUARDO CLETO PIRES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS TAVARES**
(UNESP - Campus de Rio Claro)



Profª. Dra. **LEA CRISTINA LUCAS DE SOUZA**
(UNESP - Campus de Bauru)



Profª. Doutora **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora da Área de Ciências da Engenharia Ambiental



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ao meu marido João Carlos
e ao meu filho João Gabriel.

AGRADECIMENTOS

A João Carlos, pela indispensável ajuda no campo da programação computacional, no trabalho experimental e nas pertinentes sugestões e revisões ao longo de toda a pesquisa.

Ao Professor Dr. Arthur Mattos, pela orientação e amizade.

Aos amigos da pós graduação no CRHEA pelo incentivo e amizade, e em especial ao apoio das amigas Dra. Maria Solange G. C. Fontes e Professora Dra. Léa Cristina L. de Souza.

Ao Professor Dr. Sérgio Fontes (UNESP- Jaboticabal), pela ajuda no campo da Física.

Ao Professor Dr. Antônio Nelson Silva (EESC-USP) pelos esclarecimentos no âmbito do planejamento urbano.

Ao Professor Dr. Roberto Lyra (Depto. Meteorologia - UFAL) pelos dados meteorológicos cedidos.

Aos professores do SHS/CRHEA, pelo incentivo, e particularmente à Prof. Dra. Maria do Carmo Calijuri e ao Prof. Dr. Fazal Hussein Chaudry.

Aos funcionários do SHS e do CRHEA, em especial à Claudete e à Regina.

A todos os que colaboraram direta ou indiretamente com este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2 O AMBIENTE URBANO.....	9
2.1 ILHA DE CALOR URBANA.....	10
2.2 AS CAMADAS ATMOSFÉRICAS URBANAS.....	14
2.3 A CLIMATOLOGIA URBANA.....	16
2.4 A CLIMATOLOGIA URBANA NOS PAÍSES TROPICAIS.....	17
3 A MODELAGEM NUMÉRICA DO CLIMA.....	24
3.1 O BALANÇO DE ENERGIA URBANO.....	24
3.2 OS MODELOS DE BALANÇO DE ENERGIA.....	30
3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS DE BALANÇO DE ENERGIA.....	39
3.4 OS MODELOS CLIMÁTICOS BI E TRIDIMENSIONAIS.....	43
4 O MODELO CLIMÁTICO URBANO ADOTADO.....	47
4.1 JUSTIFICATIVA DO MODELO.....	47
4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO: DESENVOLVIMENTO TEÓRICO..	49

4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO.....	58
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: MACEIÓ-AL.....	60
5.1 ASPECTOS DO MEIO BIOFÍSICO.....	60
5.2 USO DO SOLO URBANO.....	64
5.3 PERFIL CLIMÁTICO.....	68
6 ANÁLISE DO AMBIENTE TÉRMICO URBANO.....	73
6.1 O TRABALHO EXPERIMENTAL.....	73
6.1.1 INSTRUMENTAÇÃO.....	73
6.1.2 LOCAIS DE MEDIÇÃO.....	76
6.1.3 PERÍODO DE MEDIÇÃO.....	79
6.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	79
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
6.4 RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO AR E A MORFOLOGIA URBANA.....	93
7 APLICAÇÃO DO MODELO DE BALANÇO DE ENERGIA.....	96
7.1 ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE URBANA...	97
7.2 O AJUSTE (CALIBRAÇÃO) DO MODELO.....	114
7.3 ANÁLISE DO MODELO.....	115
7.3.1 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBSERVADOS E CALCULADOS.....	116
7.3.2 SIMULAÇÃO DE SITUAÇÕES FUTURAS.....	127
7.3.3 TESTES DE SENSIBILIDADE.....	130
7.4 AVALIAÇÃO DO MODELO.....	138
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	141
ANEXO – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	146
BIBLIOGRAFIA.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da atmosfera urbana.....	15
Figura 2 - Representação esquemática dos fluxos envolvidos no balanço de energia de um volume urbano construção - ar.....	26
Figura 3 - Esquema do modelo.....	49
Figura 4 - Temperaturas do ar T_0 (simuladas e observadas) e do solo T_s (simuladas).....	56
Figura 5 - Curvas das parcelas de balanço de energia (W/m^2).....	57
Figura 6 - temperaturas do ar T_0 (simuladas) para diversos valores da massa de concreto m_c	57
Figura 7 - A área de estudo – Maceió – AL.....	61
Figura 8 - Sítio Físico de Maceió – AL.....	63
Figura 9 - Evolução Urbana de Maceió – AL.....	66
Figura 10 - Valores médios mensais das temperaturas médias de Maceió – AL.....	71
Figura 11 - Valores médios mensais das temperaturas máximas de Maceió – AL.....	71
Figura 12 - Valores médios mensais das temperaturas mínimas de Maceió – AL.....	71
Figura 13 - Umidades relativas médias de Maceió – AL.....	72

Figura 14 - Precipitação média de Maceió – AL.....	72
Figura 15 - Instrumento utilizado nas medições móveis.....	74
Figura 16 - Localização dos pontos de observação.....	75
Figura 17 - Fração urbana equivalente ao ponto 1 de observação móvel.....	77
Figura 18 - Fração urbana equivalente ao ponto 2 de observação móvel.....	78
Figura 19 - Fração urbana equivalente ao ponto 3 de observação móvel.....	78
Figura 20 - Temperaturas do ar médias para o período observado.....	85
Figura 21 - Diferença média de temperatura (°C) dos pontos de medição, em relação à estação meteorológica.....	91
Figura 22 - Correlação entre temperatura máxima observada em função da vegetação.....	94
Figura 23 - Correlação entre temperatura máxima observada em função da massa de concreto	94
Figura 24 - Correlação entre temperatura máxima observada em função da rugosidade.....	95
Figura 25 - Variação da intensidade solar.....	111
Figura 26 - Comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação 1.....	117
Figura 27 - Comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação 2.....	118
Figura 28 - Comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação 3.....	119
Figura 29 - Comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas da estação meteorológica.....	120
Figura 30 - Comparação entre as temperaturas do ar simuladas para os diversos pontos de observação e estação meteorológica e suas respectivas massas de concreto.....	121

Figura 31 - Comparação entre as médias ponderadas de temperatura do ar observadas e simuladas dos diversos pontos de observação	122
Figura 32 - Componentes calculadas do balanço de energia - ponto 1.....	124
Figura 33 - Componentes calculadas do balanço de energia - ponto 2.....	125
Figura 34 - Componentes calculadas do balanço de energia - ponto 3.....	125
Figura 35 - Componentes calculadas do balanço de energia - média ponderada dos pontos.....	126
Figura 36 - Componentes calculadas do balanço de energia estação meteorológica.....	126
Figura 37 - Simulação de situação futura - ponto 3.....	127
Figura 38 - Simulação de situação futura - ponto 1.....	128
Figura 39 - Simulação de situação futura - ponto 2.....	129
Figura 40 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de U_2 (m/s).....	132
Figura 41 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de Z_0 (m).....	133
Figura 42 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de m_c (kg/m ²).....	134
Figura 43 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de T_2 (°C).....	135
Figura 44 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de q_2	136
Figura 45 - Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de E_f (%).....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças típicas urbanas - rurais de parâmetros climáticos.....	12
Tabela 2 – Influência típica urbana no balanço de energia.....	28
Tabela 3 – Influência típica urbana na radiação líquida.....	29
Tabela 4 – Parâmetros de entrada do modelo de Tso et al. (1990).....	54
Tabela 5 -Comportamento médio dos principais parâmetros meteorológicos em Maceió – AL.....	70
Tabela 6 - Pontos de medições móveis.....	76
Tabela 7 – Temperaturas do ar (°C) no dia 30/04/98.....	80
Tabela 8 – Temperaturas do ar (°C) no dia 01/05/98.....	81
Tabela 9 – Temperaturas do ar (°C) no dia 02/05/98.....	82
Tabela 10 – Temperaturas do ar (°C) no dia 03/05/98.....	83
Tabela 11 – Temperaturas do ar (°C) no dia 04/05/98.....	84
Tabela 12 - Comportamento médio das temperaturas do ar para o período observado.....	86
Tabela 13 - Desvios padrão para o período de análise.....	87
Tabela 14 - Análise estatística com os valores médios dos pontos de medição.....	87
Tabela 15 - Diferença média de temperatura (°C) dos pontos de medição, em relação à estação meteorológica.....	90

Tabela 16 - Critérios para um sistema de classificação urbana.....	98
Tabela 17 - Valores típicos da rugosidade Z_0 para terrenos urbanizados.....	99
Tabela 18 - estimativa da altura média das construções (h).....	102
Tabela 19 - Massa média de concreto (m_{ct}) para cada terreno dos locais observados.....	104
Tabela 20 - massa média de concreto por unidade de área (m_c) dos locais observados.....	106
Tabela 21 - Coeficientes de terreno para a equação de perfil de vento.....	107
Tabela 22 - Radiação líquida máxima R	110
Tabela 23 - Parâmetros de entrada usados para ajuste do modelo.....	113
Tabela 24 - valores de partida das variáveis.....	114
Tabela 25 - Temperaturas médias calculadas e observadas - ponto 1 de observação.....	117
Tabela 26 - Temperaturas médias calculadas e observadas - ponto 2 de observação.....	118
Tabela 27 - Temperaturas médias calculadas e observadas - ponto 3 de observação.....	119
Tabela 28 - Temperaturas médias calculadas e observadas - estação meteorológica.....	120
Tabela 29 - Valores de partida das variáveis.....	122
Tabela 30 - Temperaturas calculadas e observadas - médias ponderadas dos pontos.....	123
Tabela 31 - Comparação estatística entre temperaturas calculadas e observadas.....	123
Tabela 32 - Valores de partida ponto 3 - situação futura.....	127
Tabela 33 - Valores de partida ponto 1 - situação futura.....	128
Tabela 34 - Valores de partida ponto 2 - situação futura.....	129

Tabela 35 - Parâmetros de entrada incluindo valores médios utilizados para testes de sensibilidade com o modelo.....	131
Tabela 36 - Teste de sensibilidade com o parâmetro U_2 (m/s).....	132
Tabela 37 - Teste de sensibilidade com o parâmetro Z_0 (m).....	133
Tabela 38 - Teste de sensibilidade com o parâmetro m_c (kg/m ²).....	134
Tabela 39 - Teste de sensibilidade com o parâmetro T_2 (°C).....	135
Tabela 40 - Teste de sensibilidade com o parâmetro q_2	136
Tabela 41 - Teste de sensibilidade com o parâmetro E_f (%).....	137
Tabela 42 - Análise de sensibilidade para a temperatura máxima.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

METROMEX - Metropolitan Meteorological Experiment.

NMRH-AL - Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas.

OMM - Organização Mundial de Meteorologia.

PMM - Prefeitura Municipal de Maceió.

SIMET - Secretaria de Planejamento do Estado de Alagoas.

UBL - Urban Boundary Layer (Camada Limite Urbana).

UCL - Urban Canopy Layer (Camada Intra - Urbana).

LISTA DE SÍMBOLOS

A - área construída; m^2 .

A^* - área de silhueta; m^2 .

A' - área ocupada pelo elemento; m^2 .

A_{cob} - área da cobertura, m^2 .

A_f - área total da fração urbana, m^2 .

A_t - área total construída por terreno, m^2 .

a - coeficiente empírico.

a - constante de Brunt (= 0,66).

a_i - coeficiente derivado de análise estatística.

B - base das construções; m.

b - coeficiente empírico.

b - constante de Brunt (= 0,039).

b' - base das construções, m.

b_w - espessura média do concreto, m.

C_p - calor específico do ar à pressão constante; $J/kg^\circ C$.

C_c - calor específico da massa construída, à pressão constante; kJ/kgK .

C_s - calor específico do solo; $J/Kg^\circ C$.

COA - coeficiente de ocupação da área urbana.

CVF - Fator Volume de Concreto (“Concrete Volume Factor”).

d - profundidade do solo; m.

E - taxa de evaporação; $\text{Kg/m}^2\text{s}$

E_f - fração de evaporação, %.

e - pressão parcial de vapor; mb.

H - fluxo de calor turbulento sensível; W/m^2 .

h - altura das construções ou elementos de rugosidade; m.

h - altura das construções ou elemento de rugosidade; m.

I^* - radiação líquida de ondas longas, W/m^2 .

I_{at} - radiação de ondas longas, da atmosfera; W/m^2 .

I_s - radiação de ondas longas, da superfície do solo; W/m^2 .

K - constante de von Kármán; $\cong 0,40$.

k - coeficiente empírico.

k_s - condutividade térmica do solo; $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

L - calor latente da água; J/kg .

LE - fluxo de calor turbulento latente; W/m^2 .

l - lateral da construção; m.

M - Armazenamento de energia das construções urbanas; W/m^2

m_c - massa de concreto por unidade de área; kg/m^2 .

m_{ct} - massa de concreto por unidade de terreno; kg/m^2 .

n - duração do brilho solar; h.

N - duração máxima do brilho solar; h.

n' - número de andares.

Q^* - fluxo de radiação líquida; W/m^2 .

ΔQ_A - advecção líquida; W/m^2 .

Q_F - fluxo de calor antropogênico; W/m^2 .

Q_H - fluxo de calor turbulento sensível; W/m^2 .

Q_E - fluxo de calor turbulento latente; W/m^2 .

q_0, q_2 - umidades específicas aos níveis 0 e 2, respectivamente; g/g.

ΔQ_S - densidade de fluxo de armazenamento de energia no solo; W/m^2 .

r - altura do telhado, m.

R - fluxo de radiação líquida; W/m^2 .

R_0 - radiação solar no topo da atmosfera ; W/m^2 .

R_g - radiação solar global no solo; W/m^2 .

S - densidade de fluxo de armazenamento de energia no solo; W/m^2 .

T - temperatura; $^{\circ}C, K$.

T_0 - temperatura do solo, construções e ar no nível 0; $^{\circ}C$.

T_2 - temperatura do ar a 300m; $^{\circ}C$.

T_a - temperatura do ar calculada (simulada); $^{\circ}C$.

T_b - temperatura do solo; $^{\circ}C$.

$T_{c\acute{e}u}$ - temperatura atmosférica absoluta; $^{\circ}C, K$.

T_{obs} - temperatura observada (medida); $^{\circ}C$.

T_s - temperatura do solo no nível S; $^{\circ}C$.

T_s' - temperatura do solo ao nível S, do passo de tempo anterior; $^{\circ}C$.

t - tempo; h, s.

Δt - passo de tempo; s.

U_2 - velocidade do vento a 300m; m/s.

V - velocidade média do vento; m/s.

V_C - volume de concreto; m^3 .

V_{ct} - volume de concreto, por unidade de terreno; m^3 .

V_m - velocidade média do vento na estação meteorológica; m/s

w - frequência angular; 1/s, 1/h.

Z_0 - rugosidade da superfície; m.

Z_2 - altura da camada limite urbana; m.

α - albedo.

ρ_a - densidade do ar; kg/m^3 .

ρ_s - densidade do solo; kg/m^3 .

Δ - aproximação por diferenças finitas; diferença ou mudança líquida.

β - Razão de Bowen (Q_H / Q_E).

δ, d - taxa de mudança, derivada.

σ - constante de Stefan Boltzmann; $5,67 \times 10^{-8}$; $\text{W/m}^2\text{K}^4$.

ε - emissividade da superfície.

γ_c - densidade do concreto; kg/m^2

φ - latitude do local; $^\circ$.

RESUMO

BARBIRATO, G. M. *Análise do ambiente térmico urbano e aplicação de modelo de balanço de energia*. São Carlos, 1998. 173p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho analisa o ambiente térmico urbano de Maceió - AL, visando a adaptação de um modelo climático urbano de balanço de energia às condições climáticas típicas da cidade, objetivando contribuir para o entendimento de sistemas climáticos urbanos tropicais, para subsidiar o planejamento urbano na identificação dos efeitos da tipologia dos espaços na temperatura do ar e na simulação de situações futuras (previsões) e efeitos térmicos consequentes. Os resultados do trabalho experimental permitiram verificar, em três frações urbanas com morfologias distintas, pequenas variações térmicas que evidenciaram a influência da massa de construção na temperatura do ar resultante e permitiram a calibração do modelo matemático, de forma a ser obtida boa concordância entre valores de temperatura observados e calculados. A partir do ajuste do modelo, foi possível ainda a simulação de possíveis situações futuras de morfologia desses espaços urbanos.

Palavras-chave: Climatologia urbana; Ilha de calor; modelagem climática; clima tropical.

ABSTRACT

BARBIRATO, G. M. *Thermal analysis of the urban environment and an energy balance model application*. São Carlos, 1998. 173p. PhD Thesis - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In order to contribute to the understanding of tropical urban climatic systems, this work analyses the urban thermal environment of Maceió - AL, to adapt a climate model of urban energy balance to the typical climatic conditions of the city, to identify the effects of space typology on the air temperature and in the simulation of future situations (predictions) and its further thermal effects. The results of the experimental work showed few thermal variations in three different parts of the city, and confirmed the influence of the construction mass on the final air temperature and it permitted the calibration of the mathematical model, obtaining good agreement between observed and calculated temperature values. After this calibration, simulations of possible future configurations of those urban scenarios were made.

Key words: Urban climatology; Heat Island; climatic modeling,
tropical climate.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

As principais conseqüências da Revolução Industrial foram o desenvolvimento tecnológico, o crescimento populacional e a urbanização¹. Do ponto de vista ambiental, estes fatos implicaram na degradação do meio natural, decorrente tanto do processo de obtenção de matéria prima - desmatamentos, escavações - como do processo de sua transformação - poluição das águas por despejos industriais, aumento da temperatura devido aos adensamentos urbanos provocando o aparecimento de "ilhas de calor", etc. Todos estes exemplos têm conseqüências graves sobre a qualidade de vida e podem não ficar restritos apenas ao local de ocorrência.

A preocupação com o fenômeno urbano ocupa, ainda hoje, um pequeno espaço. Sabe-se que é nas áreas urbanas que ocorrem os maiores impactos sobre o meio ambiente.

Segundo McDONNEL & PICKETT (1990), a urbanização pode ser caracterizada como um aumento na habitação humana, acoplado a um maior consumo energético "per capita" e extensa modificação na paisagem, de modo a criar um sistema que não depende, especialmente, dos recursos naturais locais para subsistir. Em face disso, e se os problemas ambientais decorrem do impacto dos assentamentos humanos sobre o meio natural, a

¹ O termo urbanização é aqui entendido como o "fenômeno caracterizado pela concentração cada vez mais densa de população, em aglomerações de caráter urbano" (FERREIRA, 1986, p.1741).

urbanização e as questões ambientais sempre deveriam ser examinadas e tratadas de forma integrada.

Segundo BROWN & JACOBSON (1987), a urbanização excessiva é responsável pelo disparate de padrões de vida dentro das cidades, e entre assentamentos urbanos e rurais. Enfatizam ainda que a escassez de terra e água, o uso ineficiente de energia e os problemas resultantes da poluição contribuem para o aumento do custo ecológico e econômico de suporte das cidades modernas.

Por outro lado, é inegável que, apesar de todos os prejuízos ecológicos, os moradores das cidades vivem mais e melhor que os moradores do campo, especialmente sob o ponto de vista de higiene, saúde e oportunidades culturais. Certamente o cuidado com a saúde, educação e outros itens são mais facilmente providos pelas populações urbanas do que as rurais.

Historicamente, até o início do século XX, a relação do meio ambiente com os assentamentos humanos era vista de forma nostálgica. A natureza era encarada não pelos seus aspectos dinâmicos e interativos, mas unicamente como paisagem. Da mesma forma, a qualidade do meio ambiente urbano significava um mal a ser reparado exclusivamente pelo desenvolvimento tecnológico. Consequentemente, os problemas ambientais das cidades eram resolvidos através de soluções técnicas de caráter imediato.

Entretanto, essas soluções técnicas logo demonstraram suas limitações frente aos problemas ambientais urbanos, levando as discussões desses processos para outras áreas - a econômica, a social e a política. E com o enfoque ecológico mais uma vez posto de lado, continuou a visão inerte, estática e limitada da natureza, demonstrada até mesmo nas tentativas complexas dos planejadores da segunda metade deste século.

A dificuldade de se encarar o planejamento urbano com as questões vitais da qualidade do meio ambiente nas cidades ainda persiste, embora haja algum reconhecimento, por parte dos planejadores e cidadãos em geral, da importância desse enfoque.

Hoje, a preocupação com a qualidade do meio ambiente, em particular com o impacto dos assentamentos humanos sobre o clima urbano é motivo de inúmeras investigações, já que se dispõe de uma gama de conhecimentos, legislação e avanço tecnológico que permitem auxiliar nessas questões.

No entanto, as discussões ainda não têm permitido solucionar a grande questão ambiental que é o processo de urbanização, e sem esse enfoque, qualquer discussão sobre meio ambiente é ineficaz.

Nesse contexto, é importante ressaltar que qualquer intervenção no meio urbano pressupõe, como recurso indispensável ao planejamento, a investigação climática. E é sob esse enfoque que se fundamenta e se justifica a presente pesquisa.

A forma de ocupação e crescimento das cidades geraram mudanças ambientais e conseqüências inquestionáveis no meio natural, especialmente no clima.

A massa construída das cidades (edificações, pavimentação) produz alterações na paisagem natural, resultando em inúmeros microclimas. O fenômeno de "ilhas de calor" (e ilhas frias coexistentes, devido ao sombreamento de edifícios altos), já bastante estudado, tornou-se na verdade sinônimo da própria climatologia urbana (TERJUNG & O'ROURKE, 1980).

YAMASHITA & SEKINE(1991) enfatizam que, do ponto de vista climatológico, a história humana pode ser definida como a história da urbanização. É evidente a importância hoje de, cada vez mais, estudos relativos ao ambiente climático urbano, já que a população urbana, segundo estimativas, ocupará no ano 2000, aproximadamente 50%, 60% e 80% da população mundial², respectivamente para os anos 2000, 2025 e 2100.

² MYERS(1993) aponta uma população global de 5,6 bilhões de pessoas, com projeções, para o ano de 2100, de 4 bilhões a mais.

Por outro lado, a urbanização dos países tropicais não foi consequência direta da industrialização, mas o resultado da migração de áreas rurais (na forma de um crescimento rápido e desordenado até os dias de hoje), tornando mais difícil o suprimento das necessidades básicas de habitação, saneamento básico, alimentação, entre outros. Tudo isso resultou, entre outros fatores, na degradação do ambiente urbano.

No contexto dos climas tropicais de baixa latitude, e segundo OKE et al. (1991), o papel da climatologia urbana ainda é fraco em base científica própria e fundamentada. Estima-se que menos de 10% do que é hoje publicado sobre climatologia urbana dizem respeito ao estado da atmosfera tropical ou seus processos fundamentais. Da mesma forma, TSO (1996) confirma a existência de pequena quantidade de estudos nos trópicos, em especial as avaliações quantitativas.

A maioria dos trabalhos sobre climas tropicais baseia-se unicamente em dados de estações-padrão já existentes, localizadas frequentemente em áreas suburbanas de aeroportos, e que raramente são ideais para o monitoramento urbano. Dessa forma, os pesquisadores não podem contar com uma rede meteorológica densa, e isso inclui ainda escassez de equipamentos apropriados para estudos adequados da camada limite urbana.

Essas dificuldades em parte explicam o baixo progresso no campo da climatologia urbana tropical. É preciso que haja cada vez mais estudos básicos, com a utilização de técnicas simples que não requeiram tecnologia sofisticada para seu suporte, segundo avaliações da própria Organização Mundial de Meteorologia (OMM) - e que sirvam como ponto de partida para investigações urbanas mais elaboradas (OKE, 1986).

Da mesma forma, a American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers - ASHRAE - tem realizado projetos de desenvolvimento de métodos para estimativa de variáveis climáticas urbanas de significância para projetos de edificações, com a adaptação e

desenvolvimento de modelos matemáticos de simulação urbana (DUFNER et al., 1993).

Segundo resoluções da OMM (OKE, 1986), as pesquisas básicas para sistemas climáticos tropicais devem, ao invés de descritivas, dar mais ênfase a uma abordagem física e de previsão, e, entre os tópicos identificados de interesse para futuras investigações nesse contexto estão os estudos numéricos relacionados ao balanço de energia urbano e validação de modelos climáticos urbanos usando medidas de campo.

Com base nessa exposição, este trabalho desenvolveu-se visando contribuir para o entendimento dos sistemas climáticos urbanos de países tropicais, tendo como metodologia de abordagem a análise térmica de espaços urbanos na cidade de Maceió-AL, com a finalidade de conhecer a influência da morfologia dos espaços na qualidade térmica urbana. Essa análise permitiu a calibração³ de um modelo de balanço de energia às condições climáticas da região estudada e, com isso, mostrou a aplicabilidade desse instrumental no planejamento urbano e projetos ambientais.

Os modelos de balanço de energia envolvem um grande número de parâmetros que intervêm no meio ambiente climático urbano, o que dificulta a sua aplicação. Mas, de qualquer forma, é necessário hoje na climatologia urbana uma abordagem mais quantitativa dos fenômenos, para que as decisões tomadas no âmbito do planejamento urbano sejam baseadas em informações mensuráveis.

O trabalho tem, portanto, como objetivo principal, a análise do ambiente térmico urbano visando a aplicação do balanço de energia para desenvolvimento de subsídios e calibração de um modelo, adaptando-o para as condições climáticas típicas da cidade de Maceió (AL), de forma a auxiliar o planejamento urbano na orientação das diversas tipologias dos espaços, no

³ "calibração", ou "calibragem", significa uma "operação em que se estabelece uma correspondência entre as leituras de um instrumento e valores de uma grandeza física que é medida diretamente, ou indiretamente, pelo instrumento" (FERREIRA, 1986, p.321).

teste de soluções e na previsão de possíveis efeitos térmicos de diferentes usos do solo urbano.

Maceió apresenta-se hoje como uma cidade cuja complexidade urbana e política de uso de solo justificam um estudo que mostre a necessidade de um planejamento urbano dos espaços com ênfase no enfoque climático. É evidente na cidade hoje um acelerado processo de crescimento e urbanização, em consequência da dinâmica da especulação imobiliária, bem como a valorização da orla marítima para fins especulativos e turísticos (indústria hoteleira, lazer, etc.), o que tem resultado em sérios problemas urbanos que se refletem, sem dúvida, no desenho e no conforto térmico dos espaços.

A partir do estabelecimento do objetivo principal e da definição da área de estudo, foram necessários os seguintes passos teóricos (objetivos específicos) para o desenvolvimento da pesquisa:

- análise do comportamento térmico de frações urbanas distintas de Maceió-AL através de trabalho experimental (pesquisa de campo), consistindo de medições de temperatura do ar sobre 03 frações urbanas da cidade de Maceió, com padrões de uso e ocupação do solo diferenciados;
- ajuste de um modelo de balanço de energia com a sua adaptação para as condições climáticas típicas de Maceió-AL, de modo a identificar os efeitos da tipologia diferenciada de uso de solo das frações urbanas estudadas na temperatura do ar resultante, e simular situações futuras (previsões) e os possíveis efeitos térmicos consequentes;
- avaliação do potencial do modelo, quanto à sua sensibilidade às variações observadas, e quanto à sua aplicabilidade prática como ferramenta auxiliar nos trabalhos de planejamento e controle térmico de ambientes urbanos.

Inicialmente, o trabalho mostra, como referencial teórico, a natureza particular do ambiente urbano, destacando a natureza das cidades, a ilha de calor urbana e as camadas diferenciadas, geradas pelo espaço urbanizado. Em seguida, é mostrado o estado da arte da climatologia urbana.

O capítulo 3 enfoca a modelagem numérica do clima, em especial os modelos de balanço de energia existentes na literatura técnica disponível. São ainda apresentados e analisados diversos modelos para a camada limite urbana e camada intra-urbana, quanto à sua formulação (componentes da equação do balanço), parâmetros envolvidos nos cálculos dos fluxos e que intervêm no meio ambiente climático urbano, resultados obtidos, limitações e possíveis simplificações para a modelagem adequada dos fenômenos térmicos urbanos envolvidos e/ou adaptação para outros sistemas climáticos.

O modelo climático urbano adotado é justificado e descrito no capítulo 4, quanto à sua formulação, parâmetros de entrada requeridos e resultados obtidos para o caso original descrito.

O capítulo 5 caracteriza a região de estudo – Maceió, AL – quanto aos seus aspectos geofísicos, de uso do solo e perfil climático.

No capítulo 6 é feita a análise térmica urbana de Maceió-AL, a partir do trabalho experimental, e são mostrados e analisados os resultados de temperatura do ar obtidos nos diferentes locais de observação definidos.

A seguir (capítulo 7), é mostrada a aplicação do modelo climático urbano adotado e adaptado para a região de estudo: são apresentados os dados de entrada com os ajustes necessários para a adaptação do modelo, é feita a comparação entre os resultados observados e calculados e são mostrados os testes de sensibilidade com os diversos parâmetros envolvidos.

Nesse capítulo é discutida, ainda, a aplicabilidade prática do modelo frente aos resultados obtidos com as simulações.

Por fim, são elaboradas algumas conclusões e recomendações da pesquisa. O trabalho é complementado pela inclusão da bibliografia (referência e consultas) e anexo referente ao tratamento estatístico dos dados experimentais.

CAPÍTULO 2

O AMBIENTE URBANO

O ambiente urbano é diferenciado pela ação antrópica sobre o meio natural, e gera o chamado “clima urbano”, ou situação climática típica das cidades.

Os climas urbanos distinguem-se daqueles com áreas menos construídas por diferenças de temperaturas do ar, umidade, velocidade e direção dos ventos e quantidade de precipitação. Essas diferenças são atribuídas, em grande parte, a alterações do terreno natural, através da construção de estruturas e superfícies artificiais.

LOMBARDO (1997, p.60) resume os principais aspectos que caracterizam o clima urbano:

- o clima urbano é uma modificação substancial de um clima local;
- o desenvolvimento urbano tende a acentuar ou eliminar as diferenças causadas pela posição do sítio;
- sobre a relação cidade - campo:
 - 1) a cidade modifica o clima através de alterações complexas na superfície;
 - 2) a cidade tem fontes adicionais de calor, de caráter antropogênico, além de se constituir de materiais, na sua maioria, bons condutores térmicos e com grande capacidade calorífica;

- 3) a cidade aumenta a produção de calor, com conseqüente modificação na ventilação, umidade e precipitações;
- 4) a cidade altera a composição da atmosfera resultando, na maioria das vezes, em condições adversas.

2.1 - A ILHA DE CALOR URBANA

Sabe-se que, devido à sua natureza física particular, os centros urbanos podem ter temperaturas maiores que as áreas adjacentes, especialmente durante a noite (LANDSBERG, 1981) e de maneira proporcional ao tamanho da cidade (OKE, 1972).

Na verdade, desde o trabalho pioneiro de HOWARD⁴ apud LANDSBERG (1981) para a cidade de Londres em 1833, muito se tem estudado sobre o clima urbano. A maioria dessas inúmeras investigações tem como objetivo a comprovação do já bem conhecido e documentado fenômeno da “ilha de calor urbana”, um exemplo de modificação da atmosfera devido à urbanização (OKE, 1981).

LANDSBERG (1981, p.84) define a ilha de calor urbana como “...um reflexo da totalidade das mudanças microclimáticas trazidas pelas alterações humanas na superfície urbana”.

Segundo OKE(1996), o fenômeno da ilha de calor da camada intra-urbana (“Urban Canopy Layer - UCL”) pode resultar dos seguintes fatores:

⁴ HOWARD, L. (1833) *Climate of London deduced from meteorological observations*. Harvey and Darton, London (3rd edition) apud LANDSBERG, H.E.(1981). *The Urban Climate*. New York, Academic Press, p.4.

- fonte de calor antropogênico;
- propriedades térmicas dos materiais de construção, que ocasionam maior armazenamento de energia durante o dia e liberação do calor absorvido à noite;
- aumento de absorção de radiação de ondas curtas devido à geometria urbana;
- diminuição das perdas de calor sensível face à redução da velocidade do vento nas construções;
- redução da evaporação pela impermeabilização das superfícies e diminuição de vegetação;
- aumento da reemissão de radiação de ondas longas pelas construções, conseqüente do aumento de absorção da radiação por poluentes da atmosfera;
- redução da perda de radiação de ondas pela diminuição do fator de visão do céu.

A tabela 1 mostra as diferenças típicas urbanas - rurais dos diversos parâmetros climáticos.

TABELA 1 - Diferenças típicas urbanas - rurais de parâmetros climáticos

PARÂMETRO	OBSERVAÇÃO	DIF. URBANA - RURAL
Temperatura de bulbo seco	máx. verão	+1°C a 3°C (Landsberg, 1981)
	mín. inverno	+1°C a 2°C (Landsberg, 1981)
	média anual	+0,5°C a 2°C (Landsberg, 1981)
Umidade relativa	verão	-8% (Landsberg, 1981)
	inverno	-2% (Landsberg, 1981)
	média anual	1-6% (Landsberg, 1981)
Velocidade do vento	média anual	-20% a -30% (Landsberg, 1981)
	rajada de vento extrema	-10% a -20% (Landsberg, 1981)
	calmo	+5% a 20% (Landsberg, 1981)
Direção do vento	ventos leves (até aprox. 5-7m/s, segundo Beaufort)	± 180°
	ventos fortes (acima de 7m/s)	10° a 20° (OKE, 1996)
Nebulosidade	hora do dia e estação não especificada	+5% a 10% (Landsberg, 1981)
Insolação	total em superf. Horizontal, hora do dia e estação não especificada	0 a - 20% (Landsberg, 1981)
	duração da luz do sol	-5% a -15% (Landsberg, 1981)

(adaptado de DUFNER et al., 1993)

Segundo LANDSBERG (1981), os contrastes entre as temperaturas urbanas - rurais são maiores em condições de céu claro e ar calmo, e mais óbvios ao cair da tarde e após o pôr do sol (diferença máxima de temperatura, de duas a três horas depois).

Durante o dia, as ilhas de calor são menos intensas. Na verdade, as "ilhas frias", ou temperaturas urbanas menores que as rurais, nesse período, podem ocorrer devido ao efeito térmico de atraso (retardamento) de áreas como os centros urbanos com alta capacidade térmica dos materiais, e devido ao sombreamento, por edifícios altos, de ruas, jardins e pátios (CHANDLER, 1976).

Ainda sobre as anomalias de temperatura urbana - rural, sabe-se bem que o desenvolvimento noturno da ilha de calor em cidades de latitudes médias sob condições de céu claro e ar calmo no verão são atribuídas à diminuição da perda de radiação de ondas longas (devido à geometria urbana) e aumento do armazenamento de calor (devido a diferenças das características térmicas da superfície) em comparação ao ambiente rural (OKE, 1981; OKE, 1992).

Por outro lado, OKE & CLEUGH (1987) afirmam que, apesar de a maioria dos materiais de construção possuírem densidade e propriedades térmicas que os fazem bons condutores e armazenadores de calor, investigações mais rigorosas - incluindo-se aí imagens térmicas derivadas de satélite - mostram pequenas diferenças de temperatura entre os solos urbanos e rurais, especialmente quando estes últimos são úmidos ou se é levada em conta a estrutura porosa dos edifícios.

De qualquer forma, OKE & CLEUGH (1987) enfatizam que a geometria urbana fornece uma área maior à superfície urbana, e que o solo rural com vegetação ou neve produz efeitos isolantes térmicos. Esses dois argumentos reforçam, sem dúvida, um maior armazenamento de energia nas cidades.

MORIYAMA & MATSUMOTO (1988, p.213) relacionam o efeito da ilha de calor urbana a um termo denominado “nettaya” ou noite tropical, usado como um valor estatístico que indica noites com temperaturas “...altas o suficiente para inibir o repouso”.

2.2 - AS CAMADAS ATMOSFÉRICAS URBANAS

O espaço urbanizado modifica os parâmetros atmosféricos (e, conseqüentemente, o clima) e essas alterações geram camadas atmosféricas diferenciadas: a camada intra - urbana ou camada de cobertura urbana (“Urban Canopy Layer”- UCL), que se estende do solo até o nível médio das coberturas das edificações; e a camada limite urbana ou simplesmente camada limite (“Urban Boundary Layer”- UBL), porção acima da camada intra - urbana, cujas características, diferenciadas pela presença da cidade, são parcialmente determinadas pela malha urbana (OKE, 1992).

Enquanto a camada limite urbana é um fenômeno de escala local a de mesoescala, a camada de cobertura urbana é governada por processos de microescala, presentes nas ruas (“canyons”) entre edificações⁵. A pluma urbana, por sua vez, é resultado do isolamento da camada mais quente urbana, mais acima da camada estável rural (figura 1).

⁵ OKE (1996) sugere as seguintes escalas e seus limites, baseado em esquemas de classificação de distâncias horizontais:

microescala: 10^{-2} a 10^3 m; escala local: 10^2 a 5×10^4 m;

mesoescala: 10^4 a 2×10^5 m; macroescala: 10^5 a 10^8 m.

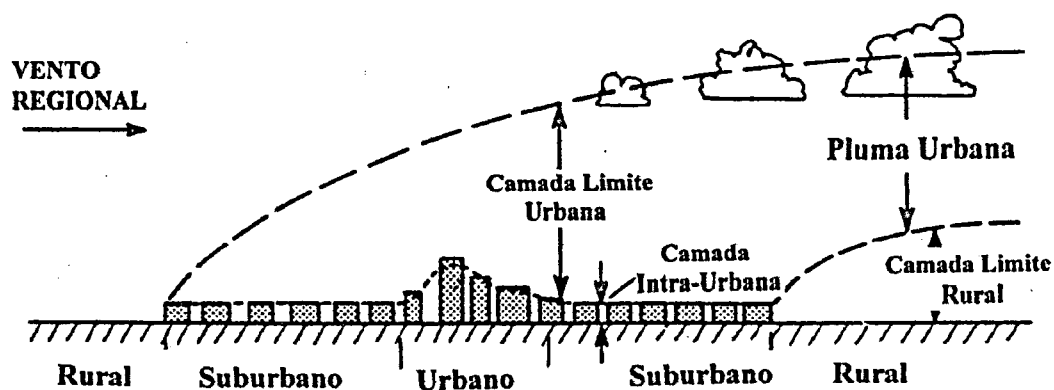


FIGURA 1 - Representação esquemática da atmosfera urbana ilustrando a classificação de duas camadas de modificação urbana.

Fonte: OKE, 1996, p.274)

Essas duas camadas de influência - camada intra-urbana e camada limite urbana - têm extensões variadas no tempo e no espaço e aumentam e diminuem em estilo rítmico, de acordo com o ciclo solar diário.

Assim, em uma “situação ideal”, durante o dia, quando há transferência de calor para cima na direção da atmosfera mais fria, a altura da camada limite pode se estender para 1 a 2 km. À noite, por outro lado, há uma transferência de calor para baixo, já que a superfície da terra esfria mais rapidamente que a atmosfera. A camada limite, conseqüentemente, pode reduzir-se a menos de 100m⁶.

⁶ OKE (1996) resume os limites da camada limite em ~ 1 km (distância vertical) e ~50 km (distância horizontal), para o período de aproximadamente 1 dia.

2.3 – A CLIMATOLOGIA URBANA

Os estudos sobre clima urbano têm progredido desde as primeiras conferências sobre o assunto no final da década de sessenta.

Na década de setenta, a OMM custeou e publicou pesquisas sobre climatologia urbana, reunidas na forma de revisão de literatura por CHANDLER (1970), OKE (1974), CHANDLER (1976) e OKE (1979) que, juntos, mostram o estado da arte até por volta da metade da década.

Ainda na década de setenta, destacou-se o programa Metropolitan Meteorological Experiment - METROMEX, de pesquisas sobre problemas teóricos e de modelagem da atmosfera urbana, reunidas em LANDSBERG (1981).

Nos anos oitenta, foi dada especial atenção às áreas tropicais, devido à grande concentração de população e à conseqüente deterioração do meio ambiente nessas cidades. A partir de então, as questões ligadas ao meio ambiente climático passaram a ser relacionadas, com ênfase, à qualidade de vida humana. Destacam-se LANDSBERG (1981), BITAN (1988), além de OKE (1986) sobre climatologia urbana em áreas tropicais.

A climatologia urbana mais recente enfoca os processos e estados da atmosfera e suas relações através de modelos numéricos da superfície urbana e camadas limite. Especificamente em BORNSTEIN (1986) e DUFNER et al. (1993) tem-se uma descrição detalhada dos modelos climáticos urbanos e em OKE (1996), a compreensão do clima na camada limite urbana (“Urban Boundary Layer” - UBL).

É importante ressaltar ainda que as discussões hoje acerca do planejamento urbano sob o enfoque climático- como em ADOLPHE (1998); COOK (1998); RADOVIC (1998); RAHMA et al. (1998); VILJOEN & TARDIVEAU (1998) e YANNAS (1998), entre outros - trazem o conceito de

sustentabilidade⁷, cujos princípios ecológicos (como estratégias de baixo consumo de energia), segundo RADOVIC (1998), devem exercer um papel crítico no desenvolvimento das cidades, já que estas são, cada vez mais, vistas como responsáveis pelo processo de destruição do meio ambiente.

2.4 – A CLIMATOLOGIA URBANA NOS PAÍSES TROPICAIS

A climatologia urbana tropical é uma área relativamente nova, e isso é evidenciado pelo fato de que um dos estudos pioneiros nesse campo foi realizado em 1966 por NIEUWOLT⁸ apud JAUREGHI (1986a) sobre o clima urbano de Cingapura.

Como o tema central nas latitudes médias refere-se ao efeito da ilha de calor urbana, a maior parte da literatura existente para as latitudes tropicais diz respeito às modificações térmicas e de umidade das cidades, como em JAUREGHI (1986b, 1992) para a cidade do México; OGUTOYIMBO (1986) para Lagos e Ibadan, na África tropical; PADMANABBHAMURTY (1986) para Déli, Bombaim e Calcutá; DJEN (1992) para Xangai; GOLDREICH (1992), para Joanesburgo, entre outros.

De qualquer forma, e apesar das dificuldades existentes, hoje em dia já se dispõe de base conceitual razoavelmente bem formada de climas urbanos em latitudes tropicais derivadas de trabalhos realizados para latitudes médias.

⁷ Significa o crescimento econômico com equilíbrio, levando-se em conta o impacto que causa no ambiente (SOUZA & SILVA, 1998).

⁸NIEUWOLT, S. (1966). The urban microclimate of Singapore. *Journal of Tropical Geography* 22, p.30-37 apud JAUREGUI(1986b). Tropical Urban Climates: review and assessment. In: OKE, T.R., ed.(1986). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. México, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.63-86. (WMO n. 652).

JAUREGUI (1986b, 1992) estudou a variação estacional da ilha de calor urbana na cidade do México, encontrando valores superiores a 5°C na época mais seca, devido a fortes inversões térmicas nessa estação.

Da mesma forma, OGUTOYIMBO (1986) estudou as variações de temperatura entre campo - cidade, para as regiões de Lagos e Ibadan, na África tropical, encontrando valores, na estação seca, de até 7°C em Ibadan, e em Lagos, de 2°C a 4°C, durante a mesma estação.

PADMANABBHAMURTY (1986) encontrou, para diversas cidades da Índia, ilhas frias e quentes, da ordem de 6°C para Déli; 9,5°C para Bombaim e 4°C para Calcutá. Em noites frias e calmas, DJEN (1992) achou diferenças térmicas em Xangai de até 6°C.

GOLDREICH (1992) estudou o clima urbano de Johannesburgo, África do Sul, durante três décadas e encontrou uma diferença média de temperatura urbana de 11°C em relação à área rural adjacente.

Nos últimos anos há, portanto, um número cada vez maior de dados de pelo menos algumas cidades-chave que cobrem uma grande parte dos tipos climáticos tropicais e subtropicais, como Kuala Lumpur, Cidade do México, Xangai, Joanesburgo e Deli. Nesses estudos, tem-se encontrado mais similaridades na compreensão dos fenômenos do que diferenças em relação ao que se sabe sobre as latitudes médias (OKE, 1986).

TSO (1996) mostrou o estado da arte de estudos sobre os efeitos de ilhas de calor urbanas em duas cidades tropicais adjacentes: Cingapura e Kuala Lumpur, e percebeu aumentos consideráveis de temperaturas em ambas as localidades, apesar das diferenças no padrão de urbanização: Kuala Lumpur, situada em vale, tende a sofrer com poluição do ar gerada pelo meio urbano, enquanto que Cingapura pode beneficiar-se do efeito oceânico na remoção do ar poluído, melhorando as condições térmicas locais.

TSO (1996) enfatizou ainda, em trabalhos mais recentes para Cingapura e Kuala Lumpur, a implementação de recursos mais avançados, como a aquisição de dados mais sistemáticos como o uso de tecnologia de sensoriamento remoto e a modelagem numérica do balanço de energia.

No Brasil, MONTEIRO (1986) reuniu as informações disponíveis, até então, sobre o clima urbano nas cidades brasileiras. Enfatizou o embasamento teórico de MONTEIRO (1975), e de pesquisas realizadas para os centros urbanos médios, como em TARIFA ⁹. Alertou, na ocasião, para a necessidade de se estudar outros sistemas climáticos urbanos no Brasil, em especial através de modelos matemáticos que simulem situações observadas.

Em SAMPAIO (1981) tem-se uma investigação do clima urbano de Salvador - BA a partir da correlação entre o uso do solo e a elevação das temperaturas em diversos pontos da cidade, edificados ou não. Constitui um trabalho de referência para o entendimento dos sistemas climáticos urbanos do Nordeste brasileiro.

Ao tomar as variações diárias de temperatura do ar com base em padrões diferenciados de uso do solo, SAMPAIO (1981) não verificou correlação significativa entre a intensidade deste último e as diferenças de temperatura interna do espaço urbano, o que, segundo o autor, não pode significar, porém, a não existência da influência do uso do solo na temperatura do ar urbano.

LOMBARDO (1985) comprovou a existência de ilhas de calor em São Paulo da ordem de 10°C entre o centro e a área rural, especialmente entre as 15:00h e 21:00h, embora essas anomalias encontradas sejam

⁹ TARIFA, J.R. (1977). Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana de e rural de São José dos Campos (SP), Brasil. Rio Claro. *Geografia*, 2(4), p.59-60 apud MONTEIRO(1986). Some aspects of the urban climates of tropical South America: the brazilian contribution, in OKE, T.R., ed.(1986). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. México, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.166-197 (WMO n. 652).

amenizadas com a diminuição das atividades urbanas nos fins de semana da metrópole.

CAMARGO & TAVARES (1985) estudaram a formação da ilha de calor e comportamento da umidade do ar na cidade de Rio Claro/SP, mais evidenciada no período noturno.

FONTES (1991) estudou o comportamento termo-higrométrico de um conjunto habitacional em Natal - RN, através de medições de espaços urbanos e espaços habitados. Na análise, verificou alterações microclimáticas significativas entre os pontos de medição, com temperaturas máximas e mínimas acima dos limites de conforto térmico para a região.

DINES (1991) estudou a importância do clima urbano em ambiente tropical para o planejamento e desenho de cidades, discutindo metodologias para os estudos realizados no Brasil. Discutiu, ainda, algumas hipóteses e linhas de estudos futuros sobre o clima urbano da região metropolitana de São Paulo.

GASTELOIS & ASSIS (1991) utilizaram o recurso de sensoriamento remoto para a detecção de núcleos de calor na cidade de Belo Horizonte/MG, juntamente com dados meteorológicos e de uso do solo.

MENDONÇA (1994) elaborou uma metodologia específica para estudos de clima de cidades de porte médio e pequeno, aplicando-a para a cidade de Londrina-PR. Em seu trabalho, enfatizou que a maioria dos estudos de clima urbano no Brasil são elaborados segundo uma abordagem mais estatística do que analítica, e que têm caráter mais descritivo e qualitativo.

MAITELLI (1994) realizou observações horizontais, móveis e fixas das diferenças de temperatura entre áreas urbanas e suburbanas da cidade de Cuiabá - MT, ao mesmo tempo em que estimou o balanço de energia, utilizando uma torre para suporte de instrumentos, instalada no centro da cidade.

Através de análise estatística, verificou que o crescimento urbano influenciou a temperatura da cidade, elevando em $0,073^{\circ}\text{C}$ por ano, em 20 anos. Constatou, ainda, uma intensidade de ilha de calor de $3,8^{\circ}\text{C}$.

BRANDÃO (1996) estudou o clima urbano da cidade do Rio de Janeiro, relacionado com as características do uso do solo urbano. Na sua investigação em 30 microclimas sob diferentes condições sazonais e situações meteorológicas diferenciadas, identificou ilhas de calor de até $4,2^{\circ}\text{C}$, às 21 horas, no outono.

MARTINS (1996) estabeleceu uma correlação entre a configuração do espaço urbano e as diferenças térmicas da cidade de Juiz de Fora (MG). Para isso, realizou observações diretas em diferentes pontos da cidade, no verão e inverno, e constatou a existência de ilhas de calor tanto no período diurno quanto no período noturno, para as duas estações estudadas.

MASCARÓ (1996) analisou microclimas característicos de diferentes tipos de recintos urbanos – ruas e praças – de uma cidade subtropical (Porto Alegre, RS) quanto à situação ambiental e energética criada e limitada pela legislação técnica vigente. Concluiu que esses sistemas são "ecotermicamente" diferenciados, e que, em ambos os casos, fatores como sombreamento, temperatura, umidade relativa do ar, ventilação e iluminação natural são determinados pelo fator de visão do céu¹⁰ associado ao tipo de perfil urbano e presença ou não de vegetação.

RIBEIRO (1996) relacionou o fenômeno de ilha de calor na cidade de São Paulo à saúde de sua população, motivando, assim, novas hipóteses de estudos sobre o problema, além de fornecer subsídios para ações públicas na área de gerenciamento ambiental.

SOUZA (1996, 1997) verificou a influência da geometria urbana na temperatura do ar, desenvolvendo um modelo matemático para identificar

¹⁰ Corresponde à porção do céu (ou proporção do hemisfério celeste) "vista" de um dado ponto sobre uma superfície em relação à potencialmente disponível (OKE, 1996, p.401)

possíveis correlações entre as características geométricas e as condições térmicas da cidade de São Carlos - SP. Concluiu que essa correlação é fraca para índices de verticalização médios (com padrões geométricos de H/W^{11} entre 20% e 85% e valores do fator de visão do céu entre 58% e 90%). Concluiu, portanto, que pode existir maior adensamento urbano na área, desde que não haja conseqüências térmicas danosas para o meio ambiente.

SOUZA (1996, 1997) verificou, na prática, pouca influência da morfologia urbana na temperatura do ar, já que, para um maior adensamento, não necessariamente ocorreram alterações em grande escala da temperatura do ar.

TAVARES (1997) analisou o clima local de Sorocaba (SP) a partir do registro de 50 postos pluviométricos, no período de 1972-1991, e realizou um estudo detalhado das diferenças climáticas diárias entre campo e cidade, de 1987 a 1990, a partir de dados de duas estações.

FONTES (1997) avaliou o microclima de áreas de fundo de vale em São Carlos - SP, e os resultados confirmaram uma tendência de amenização térmica dessas áreas peculiares, em relação ao centro urbano.

COSTA (1998) estudou a influência das variações meteorológicas e o comportamento da ilha de calor da cidade de Belém - PA, para fins de controle da qualidade ambiental urbana em região equatorial. Obteve resultados que demonstraram a influência da estrutura urbana no comportamento de alguns elementos meteorológicos, em especial a temperatura e a umidade relativa do ar.

As maiores temperaturas foram encontradas por COSTA(1998) em bairros carentes de vegetação e predomínio de construções horizontais, enquanto que as menores se apresentaram em bairros com grande presença de

¹¹ relação entre a altura e largura de uma via urbana, de forma retangular, formada por duas superfícies verticais (H) e por uma superfície horizontal (W), representativas das fachadas das edificações e da via de circulação urbana, respectivamente (SOUZA, 1996, 1997).

vegetação e predomínio de edificações verticais. Constatou, ainda, a importância da vegetação como elemento amenizador das temperaturas máximas do ar, não encontrando, porém, diferenças significativas de temperatura entre locais com atividades antrópicas diferenciadas.

Ao analisar a intensidade da ilha de calor na cidade de Belém, COSTA (1998) observou intensidades diferenciadas para as duas épocas distintas do ano: a menos chuvosa (até 4,5 °C) e mais chuvosa (1,5 °C).

DUARTE (1998) investigou a ocupação urbana inadequada no clima rigoroso de Cuiabá - MT, sugerindo novos padrões de urbanização com a criação de microclimas mais agradáveis termicamente em espaços públicos, com a utilização de sombreamento e uso de vegetação.

SOUZA & SILVA (1998) estudaram o impacto econômico e ambiental causado pelo conceito de planejamento compacto em cidades brasileiras, especificamente em duas cidades do interior de São Paulo: Araraquara e São Carlos. Concluíram que há vantagens econômicas com a otimização da infra - estrutura e redução do transporte público. Quanto ao aspecto térmico, observaram que a densificação pode causar menos impacto em áreas já previamente ocupadas do que em áreas desocupadas periféricas.

Os resultados obtidos por SOUZA & SILVA (1998) mostraram que, para um aumento de 30 a 40% de ocupação urbana, verificou-se um aumento de temperatura do ar em torno de 1°C. Por outro lado, de 40% de ocupação, até o limite de 70%, não foi verificado aumento térmico significativo.

VILLAS BOAS (1998) desenvolveu critérios de planejamento e princípios de projeto para a cidade satélite de Sobradinho, Distrito Federal, definindo e mapeando áreas apropriadas para diversos usos (como residenciais, recreacionais, de proteção, etc.). Esse mapeamento permitiu a elaboração de um Plano Diretor para a área.

CAPÍTULO 3

A MODELAGEM NUMÉRICA DO CLIMA

A partir das primeiras investigações sobre as diferenças entre os ambientes rural e urbano, foram desenvolvidos diversos estudos de processos de fluxos de energia, umidade e massa em ambientes urbanos. Esses estudos permitiram uma melhor caracterização da superfície atmosférica afetada pela urbanização.

No contexto da climatologia urbana, utiliza-se cada vez mais o auxílio da modelagem matemática, já que esse recurso permite o entendimento dos processos atmosféricos, a previsão de fenômenos, além de se constituir, até certo ponto, como uma alternativa aos trabalhos de campo para obtenção de dados.

3.1 – O BALANÇO DE ENERGIA URBANO

Para identificação das características da superfície urbana e das mais importantes destas na determinação do clima urbano, muitos modelos matemáticos existentes na literatura técnica disponível são elaborados com base no entendimento do balanço de energia urbano, visando sua aplicação, entre outras áreas, no planejamento urbano.

O balanço de energia de uma superfície urbana permite um melhor conhecimento do clima urbano e é representado satisfatoriamente por “...fluxos de energia através do volume solo - construções - ar, até uma altura onde as trocas verticais de calor são desprezíveis para o período de interesse.” (KALANDA et al., 1980, p.791).

O balanço de energia da superfície constitui o seccionamento da energia radiante absorvida na superfície da terra em fluxos de calor que controlam o clima da superfície, que dependem de diversos fatores como umidade; propriedades térmicas e perfis da temperatura da superfície, da atmosfera e do solo; velocidade do vento; rugosidade da superfície; estabilidade atmosférica; entre outros.

A maioria dos modelos desenvolvidos, salvo algumas simplificações, consideram os seguintes componentes na equação do balanço de energia ao topo da camada intra-urbana, mostrado esquematicamente na figura 2:

$$Q^* + Q_F = \Delta Q_S + \Delta Q_A + Q_H + Q_E \quad (1)$$

onde:

Q^* = fluxo de radiação líquida, em função do albedo¹², energia solar difusa e direta, radiação infravermelha emitida pelo topo da camada intra-urbana e densidade de fluxo infravermelho da atmosfera;

Q_F = fluxo de calor antropogênico (combustão, condicionamento do ar, etc.);

ΔQ_S = densidade de fluxo de armazenamento de energia na camada intra-urbana e solo;

¹² Significa a razão entre a quantidade de radiação solar refletida por um corpo e a quantidade incidente sobre ele (OKE, 1996, p.400).

ΔQ_A = advecção¹³ líquida;

Q_H = fluxo de calor turbulento sensível;

Q_E = fluxo de calor turbulento latente.

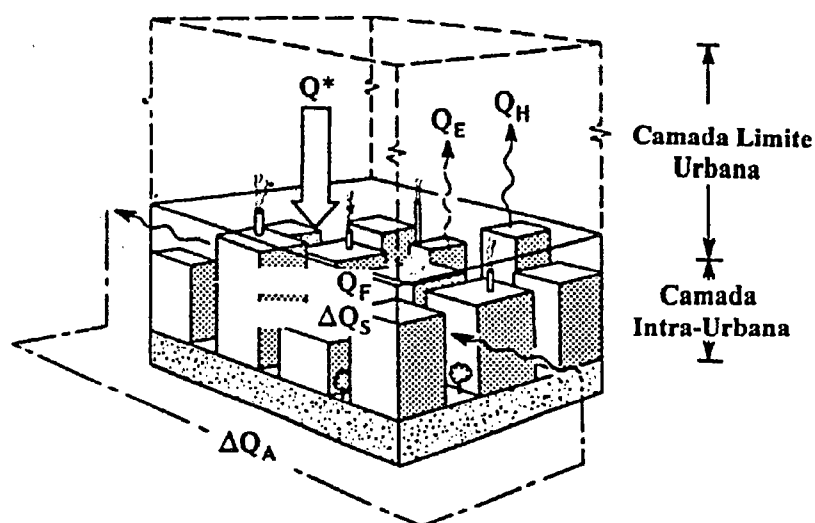


FIGURA 2 - Representação esquemática dos fluxos envolvidos no balanço de energia de um volume urbano construção-ar.

Fonte: OKE, 1996, p.275.

OKE(1996) formulou o balanço de energia completo. Outras formulações simplificativas ignoram a advecção ou a presença de qualquer fonte antropogênica de calor.

O termo fluxo de armazenamento de energia inclui trocas de calor turbulento no ar, edificações, vegetação e solo, desde o nível médio dos telhados até uma profundidade no solo onde as trocas de calor são consideradas desprezíveis para os objetivos de um determinado estudo (OKE & CLEUGH, 1987). Constitui, portanto, um termo importante na formação da ilha de calor urbana.

¹³ A advecção descreve, predominantemente, o movimento horizontal na atmosfera (OKE, 1996, p.400).

As mudanças de armazenamento de energia em sistemas urbanos são maiores que em sistemas naturais, já que os materiais de construção têm propriedades térmicas que os fazem bons condutores e armazenadores (OKE & CLEUGH, 1987).

No ambiente urbano, a obtenção do fluxo de calor do solo torna-se mais difícil, já que a superfície urbana é multifacetada e extremamente complexa. De qualquer forma, se todos os outros termos da equação são independentemente avaliados, o armazenamento pode ser obtido através de parametrizações, em função de Q^* , como nos estudos de KALANDA et al.(1980) e GRIMMOND et al.(1991). Pode, ainda, ser encontrado como resíduo da equação, em função de Q^* , Q_H e Q_E , e desprezando-se os termos relativos ao calor antropogênico e advecção, como em OKE & CLEUGH (1987).

Os efeitos típicos das áreas urbanas em cada um dos termos da equação de balanço de energia (como o aumento do calor sensível devido à geometria urbana e materiais; redução do calor latente pela diminuição da disponibilidade de umidade, etc.), bem como a influência urbana típica nos componentes individuais da radiação líquida (como o aumento da radiação de ondas longas devido ao aumento da temperatura do ar urbano e aumento da emissão de ondas longas pela poluição, etc.) são sintetizados, respectivamente, nas tabelas 2 e 3.

TABELA 2 - Influência típica urbana no balanço de energia

TERMO DO BALANÇO DE ENERGIA	EFEITO URBANO TÍPICO	JUSTIFICATIVA
Radiação líquida	entrada diminuída durante o dia. à noite: acima da camada intra-urbana, aumento de perdas; dentro do "canyon" urbano, diminuição das perdas.	Conforme tabela 3
Calor antropogênico	aumento	alta densidade de aquecimento dos espaços, transporte, processos industriais.
Mudança do armazenamento de energia na superfície e na camada intra-urbana	aumento	efeitos combinados da geometria urbana e materiais de construção
Advecção	variado	depende da variação das propriedades da superfície
Fluxo de calor turbulento sensível	aumento	disponibilidade de umidade reduzida, aumento de turbulência.
Fluxo de calor turbulento latente	redução	redução da disponibilidade de umidade

fonte: DUFNER et al., 1993, p.433

TABELA 3 - Influência típica urbana na radiação líquida

TERMO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO	EFEITO TÍPICO URBANO	RAZÃO
Radiação de ondas curtas, para baixo ↓	redução da radiação global; redução da radiação ultravioleta; aumento da radiação difusa	aumento da dispersão e absorção pela poluição
Radiação de ondas curtas, para cima ↑	redução	redução do albedo
Radiação de ondas longas, para baixo ↓↓	aumento	aumento da temperatura do ar urbano, aumento da emissão de ondas longas devido à poluição
Radiação de ondas longas, para cima ↑↑	acima da camada intra-urbana: provável aumento	aumento da temperatura da superfície; redução da emissividade da superfície
	no "canyon" urbano: diminuição	diminuição do fator de visão do céu(OKE, 1981)
Radiação líquida	diminuição da entrada durante o dia; à noite, acima da camada intra- urbana: aumento de perdas; à noite, dentro do "canyon" urbano: diminuição das perdas.	efeitos combinados dos componentes acima.

Fonte: DUFNER et al., 1993, p.434

3.2 – OS MODELOS DE BALANÇO DE ENERGIA

Os modelos de balanço de energia são comumente classificados como unidimensionais, porque consideram desprezíveis a advecção de calor ou umidade, ou seja, assumem que há homogeneidade na direção horizontal. Utilizam como abordagem o princípio de conservação de energia, e têm como dados de entrada a radiação solar líquida e todas as variáveis da equação do balanço.

BORNSTEIN (1986) classifica duas categorias de modelos climáticos urbanos de balanço de energia: os modelos da camada intra-urbana (“Urban Canopy Layer” - UCL), ou modelos de microescala, que calculam o balanço de energia de um “canyon”¹⁴ urbano ou edifício; e os modelos da camada limite urbana (“Urban Boundary Layer” - UBL), ou modelos de mesoescala, que dizem respeito à resposta da camada limite urbana com a presença da cidade.

Enquanto os modelos de microescala são usados para explicar a heterogeneidade espacial do sistema urbano e a geometria complexa dos canais de ruas, ou seja, às variações internas das condições climáticas dentro da camada intra - urbana, os modelos de mesoescala são usados para a simulação do efeito da ilha de calor urbana, de impactos prováveis com mudanças no uso do solo, bem como previsão da qualidade do ar.

MYRUP (1969) desenvolveu um modelo de balanço de energia para uma cidade hipotética, com características micrometeorológicas de Davis e de Sacramento, na Califórnia. Teve como objetivo mostrar uma ferramenta para fins didáticos, de modo a prever a magnitude do excesso de temperatura no meio urbano, na forma de equações relativamente simples, que representassem essencialmente a natureza física da camada limite urbana, e

¹⁴ “canyon” urbano, ou canal urbano, refere-se a um microclima diferenciado dentro da camada intra - urbana, como canais de ruas ladeadas por edificações.

que, ao mesmo tempo, pudessem ser resolvidas com um computador, em sala de aula ou laboratório.

O trabalho pioneiro de MYRUP (1969) comprovou que a evaporação reduzida no centro da cidade e as propriedades térmicas dos materiais de construção e pavimentação são os parâmetros dominantes no balanço de energia da superfície. Já na época, sugeriu que o modelo poderia ser utilizado em cálculos de engenharia, para "...melhorar o clima de cidades existentes e futuras" (MYRUP, 1969, p.908).

MYRUP (1969) determinou a seguinte equação de balanço de energia para a superfície da terra:

$$R_N = LE + H + S \quad (2)$$

onde R_N = fluxo de radiação líquida; E = taxa de evaporação, L = calor latente da água (LE , portanto, é o fluxo de calor latente); H = fluxo de calor sensível para o ar e S = fluxo de calor para o solo (o calor antropogênico é desprezado). Unidades utilizadas para os componentes da equação: W/m^2 .

A partir dessa equação, MYRUP (1969) procurou relações físicas para cada um dos termos, de modo a obter uma série fechada de equações que tornaram-se base para boa parte das investigações posteriores.

NUNEZ & OKE (1977) investigaram as trocas de energia que ocorrem em um "canyon" urbano através de um modelo de microescala de balanço de energia, com uma metodologia envolvendo medidas de campo em cidade de média latitude (Vancouver, Canadá) no verão. Consideraram, para o sistema de equações do modelo, o balanço de energia de cada superfície (paredes e piso) e o balanço do sistema e do volume de ar nele contido. Constataram no período diurno um balanço de energia relativamente suave, com o excedente de radiação dissipado pelas transferências de calor

turbulentas, restando 20% a 30% armazenado nos materiais do "canyon". À noite, em contrapartida, observaram um déficit de radiação quase inteiramente balanceado pela liberação de calor armazenado nas superfícies.

NUNEZ & OKE (1977) concluíram ainda que:

- para todas as superfícies, o excedente de radiação durante o dia foi resultante das transferências de calor turbulento sensível, mas o armazenamento no solo também foi importante;

- para o sistema completo do canyon, aproximadamente 60% do excedente de radiação ao meio dia foram perdidos como calor sensível para o ar, e aproximadamente 30% armazenados nos materiais. O restante, 10%, foi consumido por evaporação do piso;

- à noite, a atividade turbulenta foi considerada desprezível e o balanço do "canyon" correspondeu ao déficit da radiação líquida, compensado pela liberação de energia armazenada nos materiais;

- o efeito convectivo da advecção foi fator de importante contribuição e dependeu da velocidade e direção dos ventos, bem como da natureza do ambiente térmico ao redor;

- a distribuição e a magnitude do balanço de energia das paredes e piso foram fortemente condicionadas pela influência da geometria e orientação do "canyon" nas trocas de radiação.

CARLSON & BOLAND (1978) desenvolveram um modelo numérico unidimensional de balanço de energia, de simulação da temperatura e fluxo de calor da superfície urbana, e aplicaram para as cidades de O'Neill, Nebraska; Wangara, Austrália e Los Angeles, Califórnia, a partir da equação básica do balanço de energia, considerando a disponibilidade de umidade constante durante o dia e desprezando o calor antropogênico. Os resultados da pesquisa permitiram demonstrar que os dois parâmetros mais importantes na variação de temperatura da superfície são a inércia térmica e a menor

disponibilidade de umidade, sendo que o efeito deste último parâmetro é mais forte durante o dia, enquanto que a inércia térmica é mais forte durante a noite.

Duas características são particulares do modelo de CARLSON & BOLAND (1978), não encontradas na maioria das abordagens unidimensionais. A primeira é o conceito de uma camada de transição próxima à superfície, através da qual o calor é transportado verticalmente. A segunda consiste da inclusão de uma camada mista, diurna, conforme descrito em OKE(1996), modificada à noite de modo a permitir trocas de calor para baixo, para contrabalançar as perdas radiativas na superfície, e importante, portanto, para a estimativa dos fatores de atraso e amortecimento da temperatura após o meio dia.

TERJUNG & O'ROURKE (1980a) propuseram uma simulação espacial do balanço de energia na camada intra-urbana, através de um modelo de balanço de energia urbano. Para tal fim, realizaram comparações entre temperaturas internas e superficiais de faces expostas de edificações. Os resultados indicaram a possibilidade, por parte do modelo, de análise espacial de camadas intra - urbanas de cidades em sua totalidade.

O modelo foi ainda utilizado para uma cidade hipotética, localizada à 34°N, com diversos sistemas de canais de ruas, demonstrando, através de testes de sensibilidade para diversos cenários simulados, a distribuição de fluxo de calor sensível e radiação líquida de ondas longas, causas importantes da ilha de calor urbana.

O modelo de TERJUNG & O'ROURKE (1980a) teve como princípio a absorção potencial de ondas curtas e ondas longas de uma "região de radiação" entre dois edifícios e uma rua ("canyon" urbano), que compreende uma faixa contínua a partir do topo do primeiro edifício, continuando para baixo ao lado deste, cruzando a rua e subindo ao lado do edifício oposto, finalmente terminando no topo deste último. Considerou constantes a variação espacial dos materiais da superfície e o calor

antropogênico. Por outro lado, analisou o efeito das estruturas das construções na absorção à radiação solar.

TERJUNG & O'ROURKE(1980a) reconheceram as limitações do modelo apresentado, em especial a não retroalimentação entre as temperaturas superficiais e as temperaturas do ar, o que só seria possível, teoricamente, com o uso de modelos numéricos tridimensionais, com incorporação de turbulência. De qualquer forma, enfatizaram a possível incorporação do modelo em abordagens para a camada limite urbana.

TERJUNG & O'ROURKE (1980b) analisaram o balanço de energia através da modelagem de arredores típicos urbanos, desde estruturas altas até edifícios baixos, para várias latitudes (10°, 34° e 50°N). Conseguiram alguns resultados satisfatórios, embora, devido à complexa inter-relação, as simulações produziram, para alguns exemplos, uma variação drástica nas características dos componentes do balanço de energia, não esperada para casos reais.

KALANDA et al. (1980) avaliaram o balanço de energia para uma área suburbana de Vancouver, Canadá, no verão, através de um modelo unidimensional para a camada limite urbana, com uma formulação que considera os fluxos turbulentos Q_H e Q_E em função de β (razão de Bowen) e parametrização do termo de armazenamento de energia ΔQ_S .

Na investigação, foram realizadas medições diretas para a radiação líquida, e, em função dessa, o armazenamento de energia foi parametrizado, através de um método onde são determinadas equações relacionando esses dois fluxos, para uma variedade de materiais e superfícies urbanas do local estudado. Após o ajuste de uma curva, e de acordo com a fração de cada tipo de superfície na paisagem, encontrou-se a seguinte parametrização:

$$\text{Durante o dia: } \Delta Q_S = 0,25 (Q^* - 27), \quad (3)$$

$$\text{Durante a noite: } \Delta Q_S = 0,67 Q^* \quad (4)$$

Os fluxos turbulentos foram medidos por psicrômetros. Os valores de β oscilaram entre 0,5 e 1.0 (clima relativamente frio), por se tratar de área suburbana, com evapotranspiração importante. Foram encontrados erros de 10% a 20% na estimativa dos fluxos turbulentos durante o dia, e acima de 25% durante a noite.

OJIMA & MORIYAMA (1982) utilizaram um modelo de cálculo do balanço de energia da superfície em cinco áreas da cidade de Tóquio, para características de solo distintas, comparando os valores calculados com valores observados.

Com o modelo proposto, OJIMA & MORIYAMA (1982) concluíram que as temperaturas médias das superfícies dos telhados dos edifícios e os solos pavimentados apresentaram temperaturas mais altas (aproximadamente 2°C) do que os solos de florestas e de grama, e que essas diferenças de temperaturas são maiores no verão.

Quanto aos componentes do balanço de energia, perceberam que o fluxo de calor sensível é maior no solo pavimentado de asfalto e telhados de edifícios, e que o fluxo de calor latente é maior em superfícies com água, gramadas e solo nu.

Com os resultados, OJIMA & MORIYAMA (1982) apresentaram quantitativamente as diferenças entre as temperaturas da superfície e os componentes do balanço de energia para regiões desenvolvidas e não desenvolvidas (a região desenvolvida mostrou maiores temperaturas, maior calor sensível e menor calor latente), demonstrando que o fluxo de calor de diversas superfícies varia com o desenvolvimento urbano. Concluíram

ainda que a investigação poderia ser aplicada em problemas de poluição térmica, planejamento do uso do solo e conservação de ecossistema natural em área urbana.

OKE & CLEUGH (1987) adotaram o mesmo esquema de parametrização de KALANDA et al. (1980), para o armazenamento de energia da superfície urbana, para Vancouver, Canadá, comparando-o com a estimativa desse termo através da abordagem residual, ou seja, após a determinação de todos os outros termos da equação do balanço (desprezando o calor antropogênico e a advecção líquida).

OKE & CLEUGH (1987) concluíram que o esquema linear de parametrização traz grandes vantagens sobre a abordagem residual, já que apresenta menor erro e requer, unicamente, dados de radiação líquida e de frações de uso do solo (construções, áreas verdes, etc.).

TSO et al. (1990) propuseram um modelo novo para análises do ambiente térmico urbano, incorporando o efeito da massa de construção no balanço de energia da superfície. O modelo foi aplicado em uma área na cidade de Kuala Lumpur, Malásia, e os resultados foram considerados bastante satisfatórios, em vista da simplicidade do modelo.

TSO et al. (1990) incorporaram, aos termos da equação de balanço de energia urbano, a estimativa do armazenamento de energia das construções (massa construída urbana), na forma da seguinte equação:

$$M = R - H - LE - S \quad (5)$$

onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; L = calor latente da água; E = taxa de evaporação (portanto, LE é o fluxo de calor latente); S = fluxo de calor para o solo. Unidades utilizadas para os componentes da equação: W/m².

Em TSO et al. (1991), são dadas soluções analíticas para o mesmo modelo, demonstrando que a linearização de algumas expressões pode ser um recurso para se obter respostas rápidas e simples dentro do problema.

Em TSO & LAW (1991) tem-se uma tentativa de representação do balanço de energia de uma fração urbana a partir da estimativa da massa construída e da massa de uma camada de ar acima dessas construções, tendo como pressuposto que as massas construídas aumentam a capacidade térmica (a qual tem relação direta com a temperatura da cidade) e reduzem as perdas convectivas (velocidade do vento). Esse modelo de balanço de energia parte do pressuposto que as temperaturas das construções e do ar adjacente a elas são claramente diferentes, ao contrário da maioria dos modelos existentes.

SWAID (1991) propôs um modelo semi-analítico de previsão da variação noturna do gradiente de temperatura da superfície ar - solo, em coberturas de solo típicas urbanas e rurais na cidade de Haifa, Israel, a partir da equação de balanço de energia (desprezando-se o calor antropogênico e a advecção líquida). Encontrou, para o solo de concreto, uma inércia térmica de 10 horas, e para o solo rural, 6,5 horas.

GRIMMOND et al. (1991) desenvolveram um método de determinação do fluxo de armazenamento de energia para a equação do balanço, de modo que permite a aplicação generalizada, para quaisquer outras áreas urbanas, ao contrário dos esquemas de parametrização lineares desenvolvidos até então.

Para o modelo de GRIMMOND et al. (1991), foram necessários, além de dados de radiação líquida, informações sobre dimensões construtivas, distribuição de materiais na superfície e outras necessárias para caracterização da área de estudo, para obtenção de coeficientes de regressão que compõem a seguinte equação:

$$\Delta Q_S = \sum_{i=1}^n \left\{ a_{1i} Q^* + a_{2i} \left(\frac{\partial Q^*}{\partial t} \right) + a_{3i} \right\} \quad (6)$$

onde t é o tempo, e a_1 , a_2 , a_3 coeficientes derivados de análise estatística relacionando o fluxo de armazenamento ΔQ_S à radiação líquida Q^* , para tipos individuais de superfície, ponderados pela fração de área coberta por i tipos de cobertura de solo.

Nessa investigação foram realizados testes em Vancouver, Canadá, e, feitas comparações com resultados para a cidade de Bonn, Alemanha, comprovou-se a eficiência do modelo para áreas suburbanas, tanto para verão quanto para o inverno.

OKE et al. (1992) constitui um estudo pioneiro de indicação da natureza da climatologia física em uma cidade tropical. Nessa investigação, foram realizadas observações diretas do balanço de energia da superfície em uma cidade tropical e os resultados foram comparados aos avaliados em lugares semelhantes, em cidades temperadas. A Cidade do México foi escolhida por ter sido objeto de inúmeras investigações anteriores, e, conseqüentemente, tinha o suporte científico necessário para a pesquisa.

Para investigação do balanço de energia da superfície da Cidade do México, OKE et al. (1992) realizaram medições diretas da radiação líquida e fluxo de calor sensível, de uma torre de 28m de altura, localizada a 4 km do centro da cidade. Além da parametrização do armazenamento de energia (segundo o esquema de GRIMMOND et al., 1991), o fluxo de calor turbulento latente foi obtido como residual da equação do balanço.

As respostas obtidas no sistema climático urbano de OKE et al. (1992) foram essencialmente similares às obtidas em países temperados (como a magnitude da razão de Bowen), apesar de algumas diferenças (densidade das edificações, materiais de construção, composição da atmosfera,

ângulo de incidência solar), já que os processos físicos que direcionam clima são os mesmos, diferindo somente em magnitude e/ou importância relativa. Essa investigação pioneira exemplifica bem a necessidade do entendimento da natureza exata dos sistemas climáticos urbanos tropicais.

ASAEDA et al. (1996) identificaram os efeitos de diversos pavimentos no clima urbano e nos processos de aquecimento da baixa atmosfera, através de medidas de campo em uma área suburbana de Tóquio, Japão, utilizando um modelo numérico. Verificou que no verão a temperatura do ar, o armazenamento térmico e a conseqüente emissão para a atmosfera foram significativamente maiores para o asfalto do que para concreto ou solo nu.

ASAEDA et al. (1996) encontraram valores, para solo em asfalto, de até um máximo de 150W/m^2 adicionais de radiação infravermelha e de 200W/m^2 de transporte sensível, comparados à superfície com solo nu. Da mesma forma, o modelo numérico indicou que a maior parte da radiação infravermelha do solo foi absorvida dentro de 200m da baixa atmosfera, afetando, conseqüentemente, a temperatura do ar próxima ao solo. A diferença entre as temperaturas do ar e do solo ao meio dia foram grandes, especialmente para o asfalto, da ordem de 60W/m^2 a mais que com os outros tipos de cobertura de solo estudados.

3.3 – APLICAÇÃO DOS MODELOS DE BALANÇO DE ENERGIA

Os modelos climáticos de balanço de energia da superfície urbana têm sido bastante aplicados em trabalhos didáticos e de pesquisa. São importantes no teste de soluções sugeridas para problemas climáticos urbanos e na previsão dos possíveis efeitos ambientais de diferentes usos do solo e

emissões na atmosfera, para estudos sobre a qualidade do ar e o consumo de combustível.

BORNSTEIN (1986) enfatiza o potencial dos modelos atmosféricos no planejamento do desenvolvimento urbano na criação de climas adequados aos assentamentos urbanos, ou mesmo no planejamento de novas cidades e no teste de diferentes configurações de edifícios e materiais.

As cidades, entretanto, são uma das poucas superfícies que permanecem sem análise satisfatória de balanço de energia, devido ao grande número de fenômenos envolvidos em cada termo da equação do balanço e à dificuldade de sua precisa quantificação.

Na verdade, os modelos climáticos urbanos existentes, de uma maneira geral, sofrem ainda sérias limitações quanto à sua aplicação para problemas práticos, limitações estas ligadas à falta de validação com medidas de campo e dificuldades em se especificar as propriedades da complexa superfície urbana.

Geralmente os modelos tratam a superfície urbana sem considerar a sua diversidade espacial e rugosidade vertical. Conseqüentemente, os fluxos de energia são tratados aproximadamente acima do nível médio dos telhados das construções (linha de demarcação entre a camada intra-urbana e a camada limite urbana) e não na camada intra-urbana, onde ocorre a maioria das atividades humanas. Do mesmo modo, a forma urbana nesses modelos é simplificada por uma superfície plana, desprezando a sua geometria específica e estrutura tridimensional.

Normalmente os modelos numéricos de escala macroscópica se estruturam a partir de uma equação de balanço de energia muito generalizada e consideram uma única temperatura de equilíbrio da superfície. Conseqüentemente, a influência possível da complexidade geométrica das edificações no balanço de energia é simplificada, o que pode comprometer

seriamente os resultados desses modelos, em especial com relação aos perfis de temperatura do ar e as dinâmicas associadas.

TODHUNTER & TERJUNG (1988) compararam três modelos climáticos urbanos descritos em TERJUNG & O'ROURKE (1980); MYRUP (1969) e CARLSON et al. (1981), e demonstraram uma considerável discordância entre eles para os fluxos individuais de energia. Concluíram que os modelos correntes da camada limite tendem a produzir valores de fluxos de calor sensível mais baixos e de calor latente mais altos do que é evidenciado na literatura (devido a parametrizações pouco realísticas fisicamente). Concluíram também a inadequação do tratamento da superfície urbana nos modelos da camada limite e a necessidade de se incorporar a camada intra-urbana nas modelagens.

ROSS & OKE (1988) testaram os dados de saída de três modelos da camada limite urbana – MYRUP (1969), CARLSON & BOLAND (1978) e Ackerman¹⁵ - com dados de campo de uma área de Vancouver, Canadá. Concluíram que todos prevêem razoavelmente bem a radiação líquida, porém são incapazes de dividir essa energia entre os três fluxos Q_H , Q_E e ΔQ_S , de maneira que corresponda aos dados observados.

Verificaram ainda que os modelos correntes de balanço de energia têm sua aplicação prática duramente limitada, devido, entre outros fatores, à complexidade da superfície urbana, o que torna os valores dos dados de entrada pouco confiáveis (como albedo, rugosidade, etc.). Por outro lado, reconheceram o valor didático e para pesquisa da análise de sensibilidade desses modelos, já que há respostas a mudanças nos parâmetros de entrada. E já que o armazenamento do solo pode ser estimado, para aplicações simples, com o recurso da parametrização.

¹⁵ACKERMAN, T.P. (1977). A model of the effect of aerosols on urban boundary layers with particular applications to the Los Angeles Basin. *Journal of Atmospheric Science* 34, 531-547, apud ROSS, S.L.; OKE, T.R. (1988). Tests of three urban energy balance models. *Boundary - Layer Meteorology* n.44, p.73-96.

Segundo OKE (1988), o ponto mais fraco dos modelos correntes consiste na incerteza de estimativa do fluxo de calor latente, componente importante para o balanço de energia na superfície do solo.

É evidente que a maior parte dos modelos vistos na literatura técnica disponível baseia-se em locais com um banco de dados climáticos considerável, tendo essas pesquisas, ainda, todo o suporte científico (instrumentação e pesquisas prévias) necessário. A modelagem matemática é, portanto, já bastante usada hoje em pesquisas sobre climatologia urbana para cidades de latitudes médias.

Por outro lado, a lacuna existente para regiões de clima tropical é bem exemplificada em OKE et al.(1992), onde apenas dois dos fluxos principais do balanço de energia foram medidos, e a estimativa do termo armazenamento de energia através de parametrização trouxe erros embutidos que certamente influíram nos resultados do fluxo obtido como residual da equação do balanço.

Segundo BORNSTEIN (1986), a aplicação de modelos climáticos urbanos em regiões tropicais ainda requer maiores informações sobre as propriedades térmicas e radiantes das superfícies, bem como um extenso banco de dados de observação meteorológicas desses sistemas.

HENDERSON-SELLERS & PITMAN (1992) enfatizam a incorporação de uma componente vital para as modelagens futuras, que é a associação das trocas hidrológicas entre a superfície e a atmosfera, de modo a proporcionar um nível de realismo nos modelos e simulações climáticas.

3.4 – OS MODELOS CLIMÁTICOS BI E TRIDIMENSIONAIS

Além dos modelos unidimensionais de balanço de energia, são comuns na literatura, para a camada limite urbana, modelos climáticos urbanos bi e tridimensionais, segundo classificação de BORNSTEIN(1986). Estes modelos baseiam-se em soluções numéricas para equações diferenciais básicas de conservação de momento, calor e umidade na camada limite atmosférica, e simulam efeitos bi e tridimensionais da ilha de calor urbano, convergência e divergência de ventos urbanos e crescimento da camada limite urbana.

Na verdade, nenhuma das categorias de modelos é capaz de estimar todos os parâmetros climáticos urbanos. Se, por um lado, os modelos unidimensionais de balanço de energia não simulam os efeitos da heterogeneidade urbana, por outro lado, os modelos dinâmicos requerem um número significativamente maior de recursos (dados meteorológicos, recursos computacionais, recursos humanos com larga experiência na aplicação desses modelos, dados da superfície, etc.), nem sempre disponíveis para investigações práticas.

BORNSTEIN (1975) criou um modelo bidimensional de simulação de fluxos de ar horizontal e vertical sobre uma cidade idealizada rugosa e quente. Os resultados das simulações do comportamento do fluxo de ar diurno e noturno mostraram que o modelo proposto é capaz de reproduzir muitas das características observadas da camada limite urbana, sob condições ou não de ilha de calor, como o aumento e diminuição da velocidade do vento sobre uma cidade, em comparação com a velocidade do ar em áreas não urbanas contíguas.

HJELMFELT (1982), através de um modelo tridimensional de mesoescala, simulou os efeitos urbanos da cidade de St. Louis - EUA e arredores, com a estimativa individual de parâmetros de superfície, em 12 tipos diferentes de uso do solo. Concluiu relações importantes entre os efeitos

urbanos e a direção do vento, bem como a relação direta da ilha de calor urbana e rugosidade das superfícies com as perturbações dinâmicas na camada limite.

KIMURA (1989) apresentou um modelo bidimensional com esquema de parametrização que estimou fluxos de calor sobre um complexo solo urbano, através da estimativa da temperatura da superfície, temperatura da atmosfera e fluxo de calor em cada categoria individual de uma superfície heterogênea. Entretanto, não incluiu os efeitos de canais de ruas e da vegetação.

KIMURA & TAKAHASHI (1991) adotaram uma parametrização no processo de balanço de energia da superfície, para investigar os efeitos climáticos da recuperação da baía de Tóquio. Dessa forma, estimou parâmetros para diversas áreas dispostas em uma malha (rede). O modelo tridimensional previu que a temperatura da superfície urbana, à meia noite, em um dia típico de inverno no centro de Tóquio aumentaria $1,5^{\circ}\text{K}$ depois da recuperação de parte da baía.

YOSHIKADO (1992) desenvolveu um modelo bidimensional, para a camada limite, para examinar os efeitos das características básicas da circulação local durante o dia, induzida pela ilha de calor urbano, bem como a interação desta com os ventos regionais e a brisa marítima. Para isso, examinou as diferenças fundamentais entre a circulação noturna e diurna, bem como estudou trajetórias de ar no sistema de brisas marítimas.

YOSHIKADO (1992) concluiu que a circulação local diminui sob a influência de um gradiente moderado de vento, mas persiste no sistema de brisas marítimas, tendo efeito importante no padrão desta. Obteve, especificamente, as seguintes conclusões:

- sob condições de ar calmo, a intensidade da circulação local depende do excesso de temperatura, combinado ao aumento da temperatura da superfície do solo após o pôr do sol;

- a circulação local noturna depende do excesso de temperatura;
- à medida que o gradiente de vento aumenta, a velocidade da circulação voltada para cima diminui mais abruptamente do que em casos de anomalia na velocidade horária;

- a ilha de calor urbano em regiões costeiras intensifica a velocidade da brisa do mar durante o seu estágio de crescimento, e isso significa mais uma interação do que uma influência entre a circulação local e a brisa;

- não só a velocidade horária, mas também o padrão geral da circulação é largamente influenciado pela ilha de calor urbano.

MILLS (1993) apresentou um modelo numérico bidimensional, baseado no fluxo de ar ambiente que atravessa o eixo longitudinal de um "canyon" urbano simétrico, gerando um redemoinho dentro do espaço de ar entre as edificações, e resultando em trocas de calor, massa e momento no topo. Testes de sensibilidade com o modelo para diferentes orientações, velocidades do vento e albedo, entre outros fatores, indicaram que há estabilidade no topo do "canyon" para muitas mudanças nos parâmetros envolvidos, e que a geometria urbana deste é de grande importância na determinação das trocas de calor do sistema.

A comparação dos resultados do mesmo modelo com dados observados (MILLS & ARNFIELD, 1993) em um "canyon" estreito, de 55m, em área urbana pouco densa, em Ohio, EUA, mostra ainda que, à medida que os "canyons" se tornam mais estreitos, ficam mais isolados da atmosfera envolvente, em termos de trocas de calor.

SAKAKIBARA (1996) desenvolveu um estudo numérico bidimensional do efeito da geometria de um "canyon" urbano sobre o ambiente térmico, e investigou a correspondência entre os resultados do modelo com observações de campo em um "canyon" orientado na direção Leste-Oeste, constituído de edificações em concreto (17m de largura e 16m de altura entre

eles) no Campus da Universidade de Kyoto, no Japão. Os resultados mostraram que o "canyon" urbano, em relação à áreas mais livres, absorve mais calor durante o dia e libera mais à noite.

SAKAKIBARA (1996) comprovou, portanto, que a geometria urbana, ao produzir fatores de visão do céu reduzidos e padrões de sombreamento complexos durante o dia, contribui, conseqüentemente, para a formação de ilha de calor urbana.

POREH (1996) propôs uma modelagem física em pequena escala de ilhas de calor urbanas (a partir de placas quentes e fluxos de gás Hélio) como instrumental para medidas dos fluxos e campos de temperaturas, de modo a analisar as características do que chamou de "ilhas de calor simples".

A análise de POREH (1996) revelou possibilidades interessantes de estudos sobre ilhas de calor, bem como a capacidade de investigação das diferenças de temperaturas em "canyons" de ruas utilizando-se modelos físicos. Concluiu por outro lado que o balanço total de energia da cobertura urbana não pode ser facilmente simulado fisicamente, a não ser com a utilização de modelos numéricos, como o de CARLSON & BOLAND (1978). De qualquer forma, enfatizou a importância da modelagem física nos efeitos de ilha de calor, como base conceitual importante para estudos de campo e numéricos desses efeitos.

Em trabalho mais recente, MILLS (1997) desenvolveu um modelo que simula o aquecimento natural e o esfriamento de grupos de edificações, em função da exposição diária ao sol e do fator de visão do céu. Diversas simulações são realizadas em nove diferentes arranjos de estruturas e quatro razões entre altura e largura de edificações, a diferentes latitudes e horas do ano. Dessa forma, demonstrou que o projeto de grupos de edificações têm impacto significativo no desempenho térmico individual de edificações.

CAPÍTULO 4

O MODELO CLIMÁTICO URBANO ADOTADO

De acordo com os objetivos a cumprir, decidiu-se utilizar, para o presente trabalho, um modelo climático de balanço de energia proposto pela literatura técnica, para verificar a aplicabilidade prática dessa ferramenta em estudos relacionados à climatologia urbana tropical, adaptando-o à região em estudo – Maceió - AL, a partir de dados observados em trabalho de campo (medições).

4.1 – JUSTIFICATIVA DO MODELO

O modelo adotado para o presente trabalho, dentre os descritos no capítulo 3, é o modelo proposto por TSO et al. (1990), e foi selecionado como o mais apropriado para ser adaptado às condições climáticas típicas e para a simulação do comportamento térmico de diversas frações urbanas da região de estudo, pelos motivos seguintes:

- O modelo de TSO et al. (1990) foi aplicado para uma cidade tropical de baixa latitude, clima equatorial quente e úmido (Kuala Lumpur, Malásia, Latitude. 3°9'Norte e Longitude. 101°44'Leste), com pequenas variações nas

médias diárias e anuais de temperaturas do ar, e alta umidade relativa média anual (CHAN et al., 1993). Apresenta perfil climático, portanto, semelhante a inúmeras localidades de sistemas climáticos tropicais, sendo possível sua adaptação e aplicação à região estudada no presente trabalho;

- o modelo adotado não requer medições mais sofisticadas e as variáveis e parâmetros requeridos, além do mais, são compatíveis com os dados disponíveis, instrumental necessário e para os objetivos do trabalho;

- o modelo de TSO et al.(1990) prevê a variação da temperatura do ar devido à variação da massa construída. Trabalha, portanto, com o parâmetro massa de construção, parâmetro fundamental para o profissional de arquitetura e engenharia em estudos de climatologia urbana e planejamento urbano dos espaços;

- na maioria dos outros modelos de balanço de energia, há unicamente o termo armazenamento, por condução, para o solo, que é obtido por parametrizações ou obtido como residual da equação do balanço;

- tal modelo de balanço de energia aborda explicitamente o efeito do armazenamento de energia das construções e do ar com o solo (importante na determinação do microclima urbano), só em parte incorporado, nos outros modelos, com o parâmetro de rugosidade da superfície;

- apesar da simplicidade do modelo, os resultados obtidos em TSO et al.(1990) foram considerados satisfatórios.

4.2 – DESCRIÇÃO DO MODELO: DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

O modelo climático urbano de TSO et al. (1990), de mesoescala, consiste na representação do balanço de energia de uma fração urbana como resultante do balanço de fluxos de radiação, calor latente e sensível e fluxo de calor no solo, e é basicamente representado pela figura 3, onde o balanço de energia é feito sobre um plano da superfície urbana.

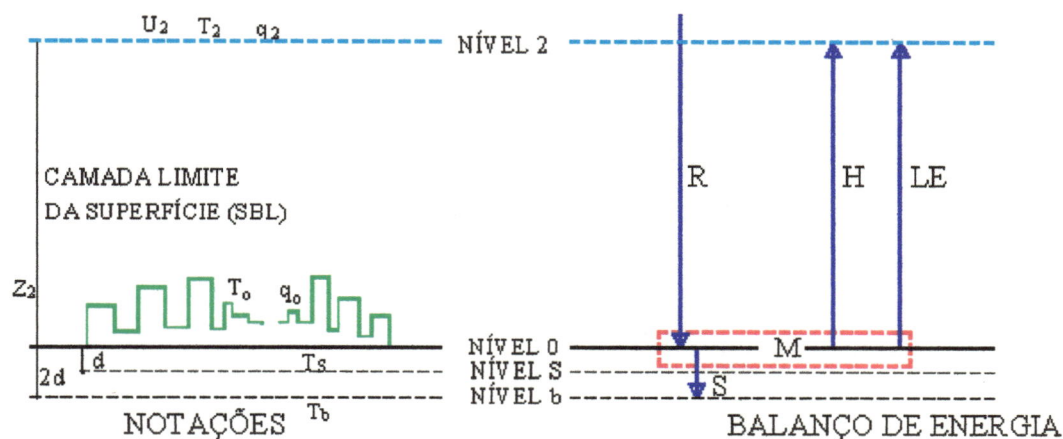


FIGURA 3 - Esquema do Modelo.

Fonte: TSO et al., 1990, p.144.

O princípio do modelo de TSO et al. (1990) é de que a massa construída urbana consiste de um plano homogêneo, avolumétrico, mas que é capaz de armazenar energia térmica à taxa de:

$$M = m_c C_c \frac{dT_o}{dt}, \quad (7)$$

onde:

M = armazenamento de energia térmica (W/m^2)

m_c = massa construída por unidade de área (kg/m^2)

C_e = calor específico¹⁶ da massa construída, à pressão constante (kJ/kgK)

$\frac{dT_o}{dt}$ = taxa de mudança da temperatura do ar, em relação ao tempo.

No plano da superfície (nível 0, conforme figura 3), as temperaturas do solo, das construções e do ar estão sempre em equilíbrio térmico (T_0).

Os autores definem a seguinte equação de balanço de energia:

$$M = R - H - LE - S \quad (8)$$

onde:

M = armazenamento de energia (W / m^2);

R = fluxo de radiação líquida (W / m^2);

H = fluxo de calor sensível para o ar (W / m^2);

L = calor latente da água (J / kg);

E = taxa de evaporação (portanto, LE é o fluxo de calor latente) (kg / m^2s);

S = fluxo de calor no solo (W / m^2).

Para os fluxos turbulentos, são utilizadas as equações clássicas, segundo os modelos encontrados na literatura técnica existente (MYRUP, 1969, 1993; OKE, 1996):

¹⁶ Significa "a quantidade de calor absorvido (ou liberado) por unidade de massa de um sistema para um aumento (ou queda) de temperatura correspondente a 1 grau.". (OKE, 1996, p.404).



$$H = \frac{-\rho_a C_p K^2 U_2}{\left[\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right) \right]} (T_2 - T_0) \quad (9)$$

$$LE = \frac{-\rho_a L K^2 U_2}{\left[\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right) \right]} (q_2 - q_0) \quad (10)$$

(TSO et al., 1990, p.144)

onde:

ρ_a = densidade do ar (kg / m³);

C_p = calor específico do ar à pressão constante (J / kg°C);

q_0, q_2 = umidades específicas aos níveis 0 e 2, respectivamente (g / g);

K = constante de von Kármán ($\cong 0,40$)¹⁷;

U_2 = velocidade do vento ao nível 2 (m / s);

Z_2 = altura da camada limite urbana (m);

Z_0 = rugosidade da superfície (m)¹⁸;

T_0, T_2 = temperaturas aos níveis 0 e 2, respectivamente (°C).

A umidade específica da atmosfera q_0 é dada pela seguinte aproximação quadrática:

$$q_0 = E_f \left(3,74 + 2,64 \left(\frac{T_0}{10} \right)^2 \right) \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

¹⁷ É comum na formulação matemática ou modelagem a utilização de constantes de von Kármán, valor numérico aproximado para a espessura da camada limite (BOEKER & GRONDELLE, 1995).

¹⁸ Parâmetro que expressa a morfologia geométrica da superfície (a ser detalhado no item 7.1).

onde E_f é a fração de evaporação (uma interpretação da umidade relativa), dada como a fração da área total ocupada por superfícies evapotranspirantes livres, ou seja, expostas livremente às condições ambientais.

O fluxo de calor no solo (S) é expresso pela Lei de Fourier:

$$S = -\left(\frac{k_s}{d}\right)(T_s - T_o) \quad (12)$$

onde:

k_s = condutividade térmica do solo ($W / m^{\circ}C$);

T_s = temperaturas do solo no nível S ($^{\circ}C$);

d = profundidade do solo ao nível S (m).

O termo armazenamento de energia é aproximado, por diferenças finitas, resultando na equação:

$$M = m_c C_c \frac{(T_o - T_o')}{\Delta t} \quad (13)$$

Para que o problema fique definitivamente equacionado, além da equação 8, faz-se necessária uma outra, já que T_o e T_s são duas incógnitas do problema (variáveis):

Tem-se, portanto, para a condução de calor, a seguinte equação, ligando as temperaturas nos níveis 0, s e b (temperatura constante ao nível b):

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{k_s}{\rho_s C_s d^2} (T_b - 2T_s + T_o) \quad (14)$$

ou:

$$T_s - T'_s = \frac{k_s}{\rho_s C_s d^2} (T_b - 2T_s + T_o) \Delta t \quad (15)$$

onde:

Δt = passo de tempo (s);

ρ_s = densidade do solo (kg / m³);

C_s = calor específico do solo (J / kg°C);

T'_s = temperatura do solo ao nível S, do passo de tempo anterior (°C).

Para a formulação do modelo, TSO et al. (1990) admitiram, ainda, homogeneidade horizontal em todos os parâmetros meteorológicos e de solo. Consideraram, ainda, os fluxos turbulentos de calor e vapor d'água constantes entre os níveis 0 e 2 e temperatura, velocidade de vento e umidade específica constantes a Z_2 . A cobertura urbana é unicamente caracterizado pela rugosidade Z_0 .

Foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada para a aplicação do modelo (tabela 4):

TABELA 4 - Parâmetros de entrada do modelo de Tso et al.(1990)

ITEM	PARÂMETRO	VALOR	COMENTÁRIO	FONTE
Ar	Calor Específico, C_p	1006J/kg °C	a 27°C	Holman 1983
	Densidade, ρ_a	1,177kg/m ³	a 27°C	Holman 1983
Solo	Calor Específico, C_s	1185 J/kg °C	Valores médios para argila seca e saturada	Oke 1992
	Densidade, ρ_s	1800 kg/m ³		
	Condutividade Térmica, k_s	1,22 W/m °C		
Concreto	Calor Específico, C_c	880 J/kg °C		Holman 1983
Água	Calor Lat.de evap., L	2,437x10 ⁶ J/kg	a 27°C	Oke 1992
Outros	Massa média do concreto, m_c	700 kg/m ²	Valores médios	
	Rugosidade da superfície, Z_o	5m	Adotado	
	Altura da SBL, Z_2	300m	Adotado	
	Vel. do vento a 300m, U_2	5m/s	Val. médios	
	Temp. do ar a 300m, T_2	25°C	Val. médios	
	Umid. específica. a 300m, q_2	0.003	Adotado	
	Fração da evap. na sup., E_f	10%	Adotado	
	Profund. do solo, 2d	0,20m	Adotado	
	Temp. do solo em 2d, T_b	25°C	Adotado	

(adaptado de TSO et al., 1990, p.145)

Para o cálculo da massa de construção típica por unidade de área, TSO et al. (1990) admitiram que essa consiste unicamente de concreto e, para facilitar a estimativa de inúmeras edificações, definiram o Fator Volume

de Concreto ("Concrete Volume Factor", CVF) como sendo a razão entre o volume de concreto em uma construção e o volume total externo de uma construção.

Os valores de CVF foram estimados por TSO et al. (1990), e baseados em cálculos sobre projetos de engenharia, com valores correspondentes a 0,160 para edificações térreas e 0,132 para edificações de múltiplos andares.

A partir da estimativa do volume de concreto em cada construção da área pesquisada em Kuala Lumpur, Malásia, chegou-se, para uma área total de $9,33 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ e um volume de concreto de $2,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, a uma massa final de concreto m_c de 700 kg/m^2 .

Para o fluxo de radiação líquida R , ao invés de usar a relação entre R e a constante solar, albedo, latitude, declinação solar, ângulo da hora e coeficiente de transmissão para a atmosfera (MYRUP, 1969, 1993; OKE, 1996), os autores idealizaram um fluxo empírico simples dado por:

$$R = 750 \text{ sen}(wt), \quad (16)$$

onde 750 é a amplitude (valor máximo da radiação global), t o tempo e w a frequência angular, sendo $w = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (baseado em medidas da intensidade do sol em dia quente típico de Kuala Lumpur). À noite, considerou-se o fluxo constante de $-148,7 \text{ W/m}^2$ (estimado de perdas radiativas entre a temperatura do céu à noite de -5°C e a temperatura da superfície do solo, de 24°C).

Os resultados do modelo, considerados bastante satisfatórios, são apresentados na forma de gráficos comparativos das temperaturas do ar medidas e estimadas, e temperatura do solo (figura 4), bem como da previsão dos componentes do balanço de energia (figura 5).

Note-se que a temperatura máxima simulada (figura 4) é de aproximadamente 34°C às 13:30h, e declina gradualmente para um mínimo 24.9°C às 5:00h.

Da figura 5, infere-se que o armazenamento de energia inicialmente é positivo com máximo às 9:00h, vai à zero às 14:00h, e a partir daí inicia-se a liberação de energia até às 18:30h.

Os autores mostram, também, a sensibilidade do modelo a vários parâmetros, como o efeito da massa construída nas temperaturas do ar (figura 6). É interessante notar aí que, à medida que a massa de construção aumenta, o perfil (contorno) da temperatura do ar tende a ser mais suave, com a temperatura máxima reduzida e ocorrendo mais tarde (atraso e amortecimento). Por outro lado, a temperatura do ar noturna torna-se maior, já que uma massa construída maior requer mais tempo para esfriamento.

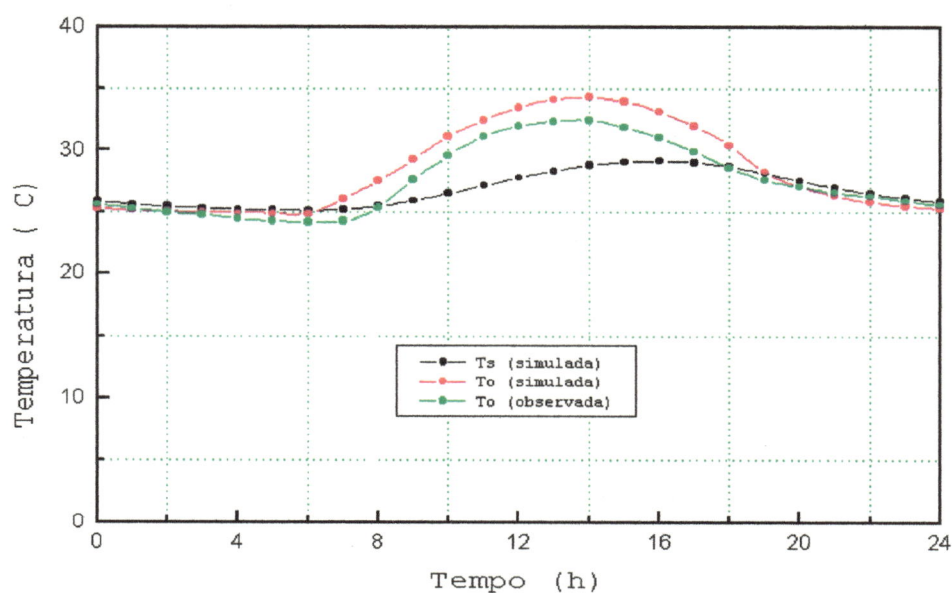


FIGURA 4 - Temperaturas do ar T_0 (simuladas e observadas) e do solo T_s (simuladas).

FONTE: TSO et al. (1990).

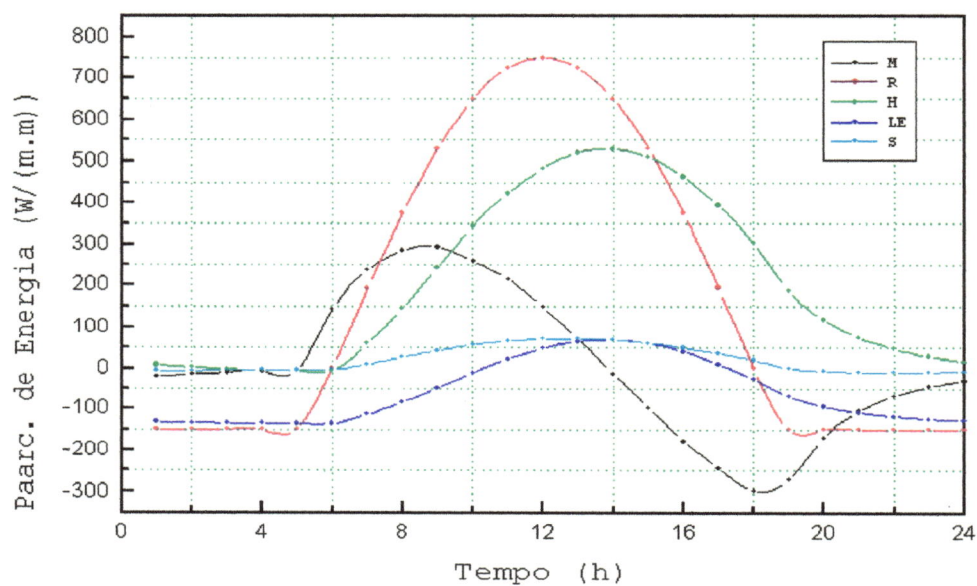


FIGURA 5 - Curvas das parcelas da equação de Balanço de Energia (W/m^2).

FONTE: TSO et al. (1990).

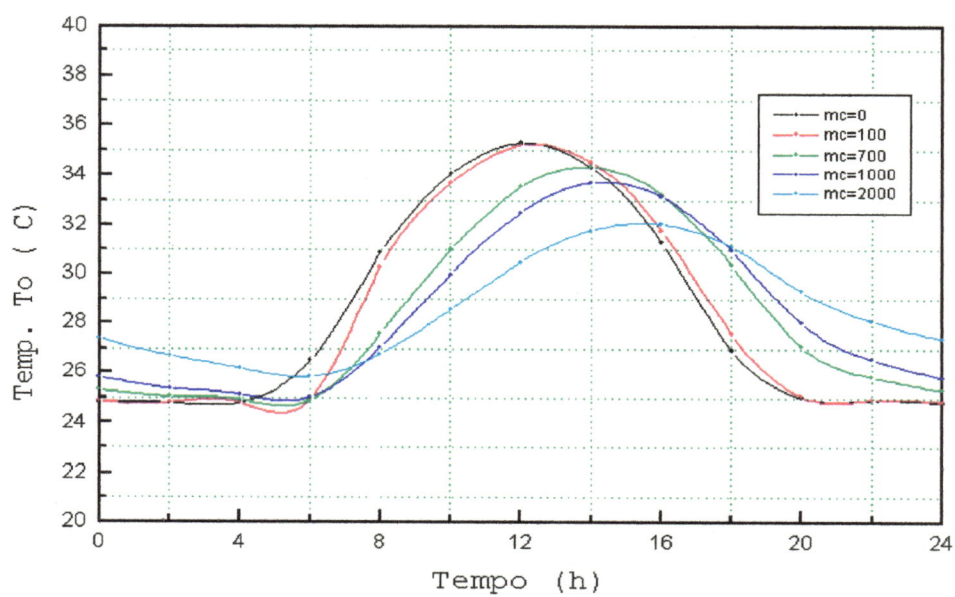


FIGURA 6 - Temperaturas do ar (simuladas) para diversos valores da massa de concreto, m_c (kg/m^2)

FONTE: TSO et al. (1990).

4.3 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

Com as equações descritas nos itens anteriores, foi desenvolvido um código computacional, com o objetivo de automatizar a solução do problema. O programa gerado – o BENERG.CPP – foi testado para o caso apresentado em TSO et al. (1990), obtendo-se perfeita concordância de resultados. Com esse instrumental, foi possível a adaptação (calibração) do modelo à região estudada.

O programa BENERG.CPP, de uso em microcomputadores, possui as seguintes características gerais:

- é escrito em linguagem de programação C++ da Borland, para ambiente Windows;
- calcula os valores das parcelas de energia dadas pelas equações (9), (10), (11), (12), (13), (15) e (16), para cada passo de tempo Δt (de 90s ou 1min30Seg). Para passar para o intervalo seguinte, é necessário que as equações (8) e (15) sejam satisfeitas. Para se chegar a um erro satisfatório, é utilizado o algoritmo iterativo de Newton (conhecido como bissecção);
- simula um período de tempo de 48 horas¹⁹;
- os dados são lidos de arquivos montados em qualquer editor de texto, que informam ainda dados particulares da cidade;

¹⁹ O intervalo de tempo pode ser alterado para 72 horas, porém, em se tratando de método numérico iterativo, ou seja, os valores do instante “t” dependem dos encontrados em “t-1”, é preciso testar se existe na prática a degradação destes valores (erro acumulado). Para 48h não houve degradação dos valores para o Δt adotado.

- gera três arquivos de resultados:
 - a) parâmetros de entrada e os utilizados no programa; valores das temperaturas de ar e do solo bem como os valores das parcelas de energia nas 24 horas (de hora em hora);
 - b) somente as temperaturas de ar e solo;
 - c) somente valores com as parcelas do balanço de energia.

- Para adaptá-lo à cidade em estudo, é necessária alteração de uma subrotina que define a função da parcela R (radiação líquida);

- pode-se introduzir valores da temperatura do ar e do solo, requeridas para o início do processo iterativo, para qualquer hora. O programa, automaticamente, desloca o período de tempo que ele reconhece como de partida;

- Na simulação de uma situação futura (alterações na massa construída, por exemplo) o programa necessita de valores das temperaturas do ar e do solo em um instante qualquer para iniciar o processo iterativo. Pode-se adotar valores de medições presentes (que são dados coerentes) e ao longo dos dois ciclos de tempo o modelo permite a acomodação dos dados calculados.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: MACEIÓ-AL

De acordo com os objetivos da pesquisa, tomou-se como área de estudo a cidade de Maceió - AL.

5.1 – ASPECTOS DO MEIO BIOFÍSICO

A cidade de Maceió, capital de Alagoas (figura 7), está localizada no litoral do Nordeste do Brasil, entre a latitude 9°39'57" Sul e longitude 35°44'07" Oeste, às margens do Oceano Atlântico, desenvolvendo-se sobre uma formação de restinga. Abrange uma área de 512km², possui uma população de 668.000 habitantes, além de densidade demográfica de 1.357,64 hab./km² e taxa de crescimento anual de 4,21%.²⁰

²⁰ estimativas do IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, no ano de 1991.

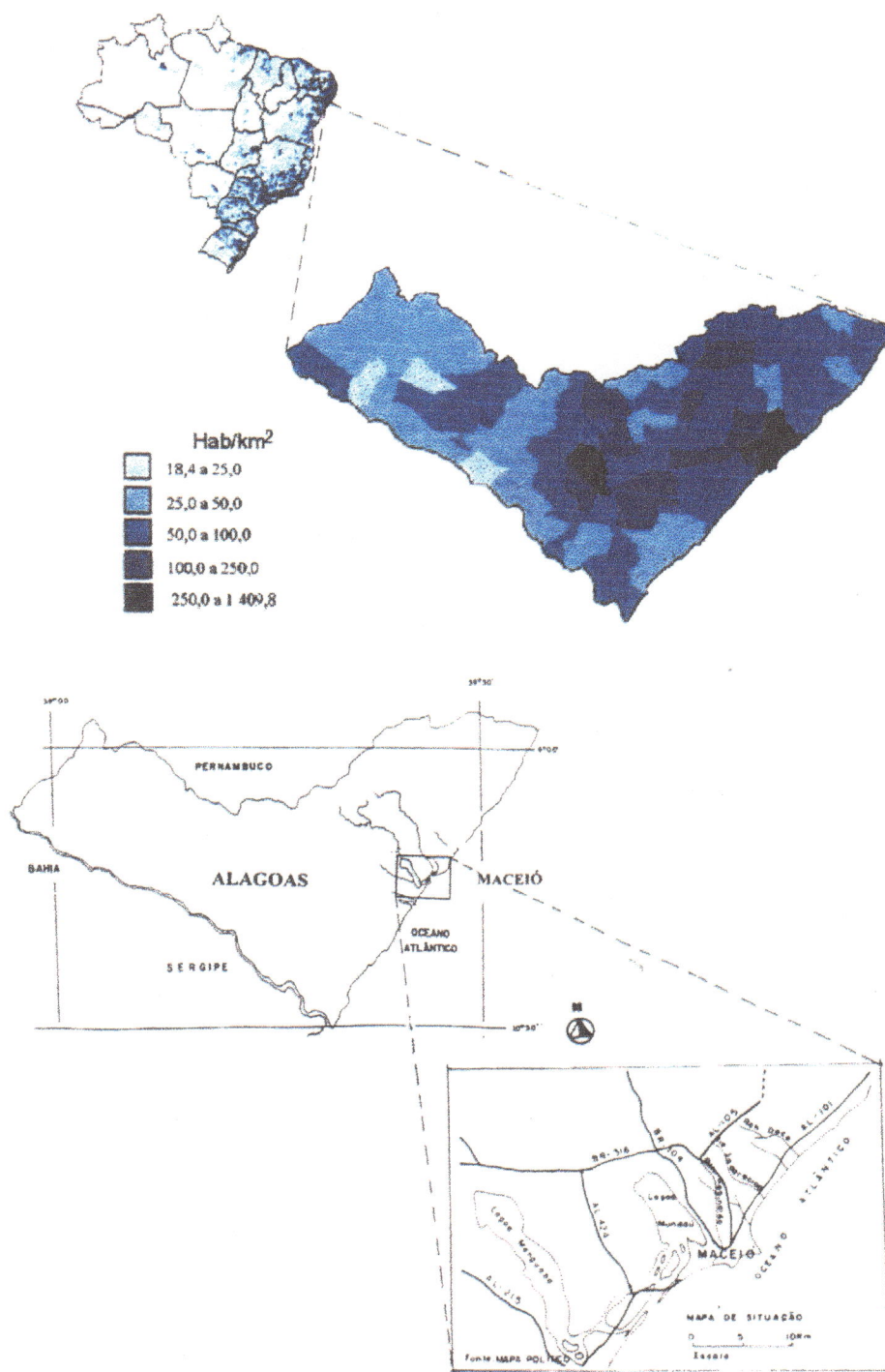


Fig.7 - A área de estudo - Maceió - AL

A palavra "Maceió" significou o processo natural de formação de um acidente geográfico, ocorrido na área e observado pelos seus antigos habitantes. Do indígena "Maçai-ó-g" , "Maçai-o-k", ou "tapagem do alagadiço", referia-se ao antigo estuário do rio Mundaú, fechado com a formação da restinga da cidade. Com o fechamento do estuário do rio, formou-se a lagoa com o mesmo nome do rio que a formou.

De topografia plana com baixas altitudes, as duas formas topológicas principais do sítio de Maceió são a região de planalto sedimentar dos tabuleiros e a região costeira ou planície marinha e lagunar (lagoas, mangues, rios, ilhas, enseadas, baías e mar), formando três planos bastante visíveis entre eles (LIMA, 1990; OLIVEIRA, 1993):

- a planície costeira, a restinga de Maceió e o ambiente lagunar, com altitudes entre 2 e 4 metros acima do nível do mar, que formam a baixada litorânea (primeiro plano);
- o terraço estrutural do centro, com altitudes entre 8 e 10 metros acima do nível do mar (segundo plano);
- O tabuleiro, parte alta da cidade, com altitudes entre 40 e 50 metros acima do nível do mar (terceiro plano).

O planalto sedimentar do tabuleiro é formado de extensas áreas com declives que oscilam entre 0 e 5%, e uma rede hidrográfica regular, e é separado da planície costeira por encostas (falésias e ribanceiras).

A figura 8 mostra o sítio físico de Maceió.

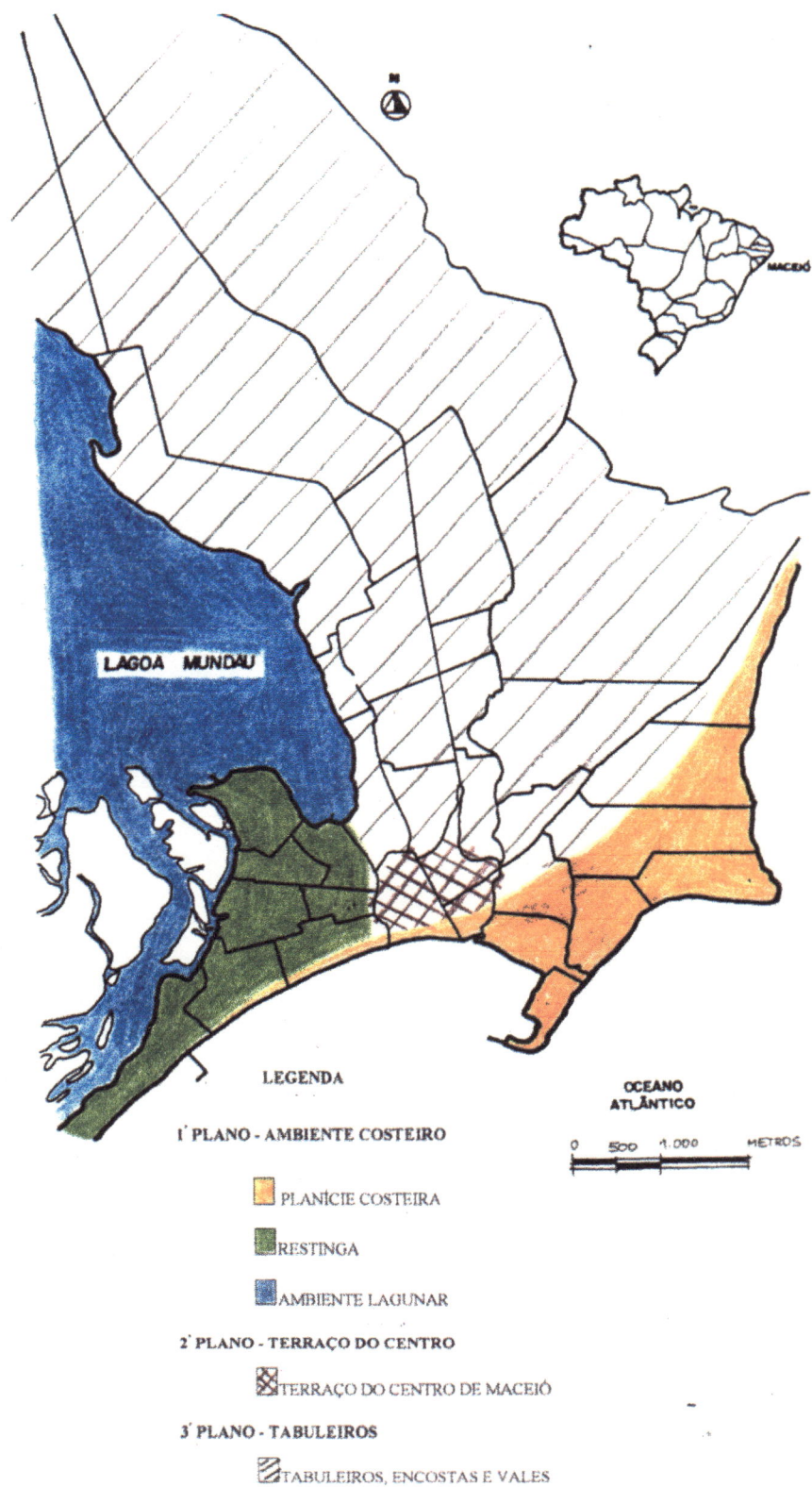


FIGURA 8 - Sítio físico de Maceió

Fonte: OLIVEIRA (1993)

Maceió possui grande potencial hídrico, tanto de superfície (mananciais das bacias dos rios Pratagy, Jacarecica, Reginaldo e Catolé, responsáveis pelo abastecimento de água potável), quanto subterrânea, na forma de estimativas de, em uma área de 1.600km², 700 milhões de metros cúbicos de águas não aproveitadas (OLIVEIRA, 1993).

A vegetação, elemento contribuidor da criação e modificação do clima da cidade, é constituída, em linhas gerais, de:

- pequenas manchas de mata em vales florestados;
- cerrado e vegetação mista com árvores de médio porte, nas encostas dos tabuleiros;
- vegetação herbácea - arbustiva e manguezais, próprios dos ambientes estuarinos, na pequena faixa de praias e restingas de baixa altitude.

O efeito da ação antrópica, como o cultivo da cana-de-açúcar, loteamentos urbanos, sítios e chácaras, cultivo do coco-da-bahia, etc., representam um fator de devastação e descaracterização da cobertura vegetal nativa.

5.2 - USO DO SOLO URBANO

A estrutura espacial da cidade de Maceió foi fortemente marcada pelo seu desenvolvimento histórico. O porto de Jaraguá determinou a expansão urbana, já que era ponto de passagem obrigatório de produtos procedentes do interior da região, como açúcar, algodão e madeira.

O porto e a convergência de estradas fizeram da antiga vila de Maceió a capital da província em 9/12/1839, e o mais importante centro comercial do Estado de Alagoas.

A partir da última década do século XIX, iniciou-se o processo de crescimento urbano acelerado de Maceió, com o incremento da atividade açucareira e das funções administrativas da cidade.

No início do século XX até por volta de 1940, o processo de ocupação urbana de Maceió é intensificado, com a densificação de bairros, não devido ao incremento do setor industrial, estagnado e incipiente, e comércio pouco representativo, mas devido à imigração decorrente do poder de atração da capital e do crescimento vegetativo, processo que ocorreu na maioria das cidades de médio e grande porte do Nordeste brasileiro.

Esse crescimento seguiu-se entre 1940 a 1970 com o crescimento demográfico e espacial do centro urbano e com a formação de novos bairros em toda a extensão do tabuleiro e orla. Entretanto, não foi acompanhado pela devida infra-estrutura urbana de suporte.

A grande concentração de atividades econômicas e sociais na zona central de Maceió, incluindo a área do porto, acentuou-se a partir da década de 70, marcada também pela grande intensificação da população urbana. O crescimento da cidade alterou a estrutura da paisagem e do uso do solo, levando a conseqüentes problemas urbanos, tais como: tráfego intenso, concentração de massa construída alterando as condições térmicas locais, além de outros fatores que, em conjunto, comprometeram a qualidade do meio ambiente local.

Além do fator migratório, vários acontecimentos contribuíram para a expansão urbana da cidade, a partir de 1970, como:

- abertura de várias rodovias federais pavimentadas, como as BRs 104, 316 e 101; além da estadual AL 101;
- chegada de um número significativo de indústrias, inclusive de grande porte, como as do pólo cloroquímico, que absorvem grande mão de obra;
- incremento do turismo como uma nova fonte de geração de renda e emprego.

A figura 9 mostra a evolução urbana de Maceió.

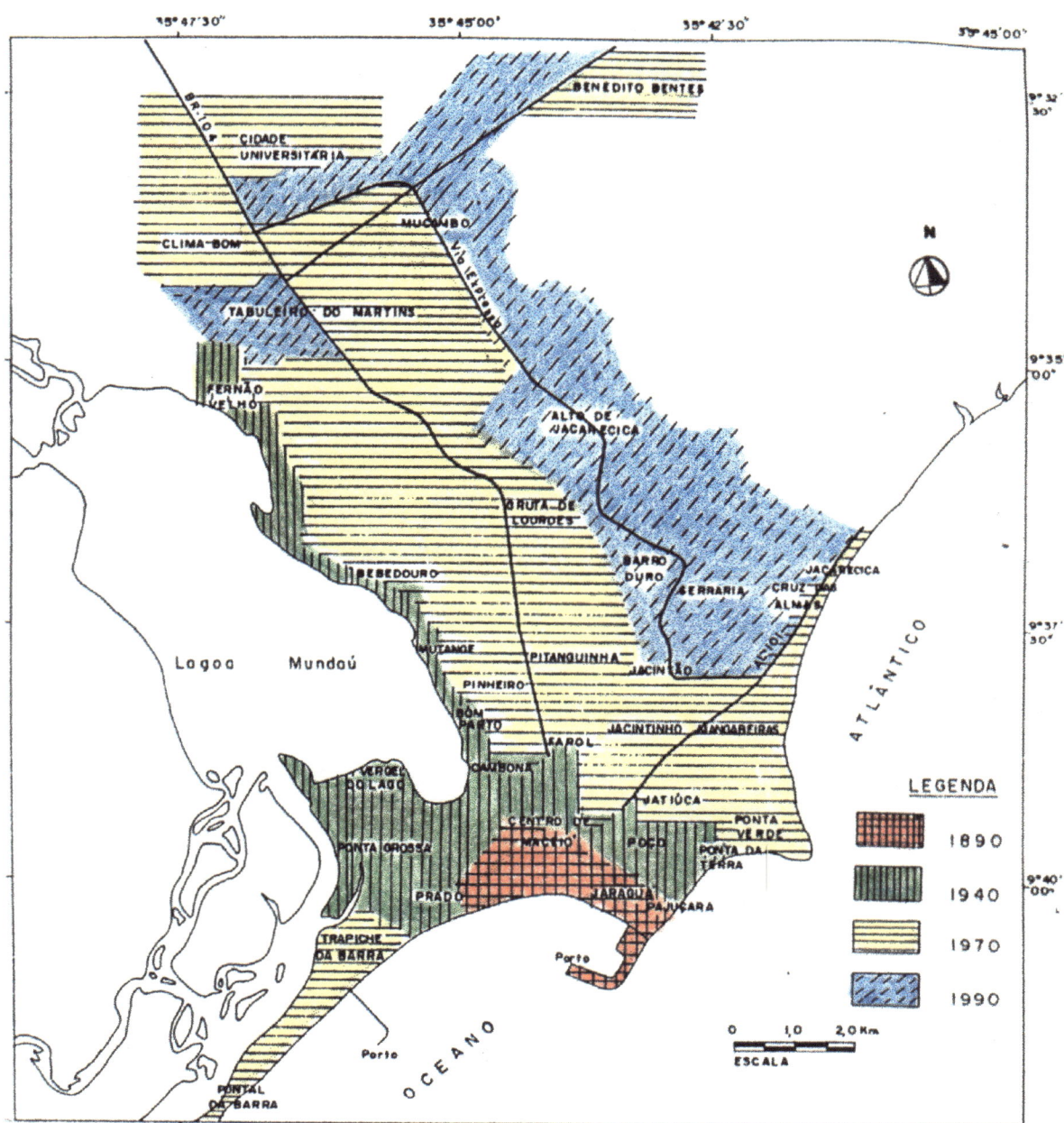


FIGURA 9 - Evolução urbana de Maceió

Fonte: OLIVEIRA (1993)

A cidade de Maceió hoje exerce um poder polarizador no Estado de Alagoas, provocando uma explosão demográfica acelerada pelos intensos fluxos migratórios, gerando uma ocupação desordenada da área urbana, na forma de ilhas de habitação e vazios decorrentes da presença de grandes conjuntos habitacionais e política de urbanização de favelas. Isso torna difícil, à boa parte da população, o acesso a serviços básicos e equipamentos urbanos indispensáveis, já que esse processo de urbanização implica em descontinuidades espaciais e áreas ocupadas sem oferta suficiente de infraestrutura.

O aumento desordenado da população da cidade, grande parte migratória, leva freqüentemente ao surgimento de favelas em áreas de risco, insalubres, criando graves problemas sociais e de administração pública.

O padrão de crescimento urbano de Maceió comprova ainda o modelo característico de cidades onde a zona central, embora com densidade demográfica mais baixa em relação às áreas imediatamente contíguas, congrega elevada concentração de empregos (atividades de serviço e de caráter administrativo).

Por outro lado, nota-se nos últimos anos uma descentralização do comércio tradicional, do centro para os bairros, na forma de pequenos empreendimentos, centros comerciais e "shoppings".

A cidade de Maceió, confinada pelas barreiras naturais do Oceano Atlântico e da Lagoa de Mundaú, tem hoje unicamente condições viáveis de intensificação do seu crescimento na direção Noroeste, a partir da zona central da cidade. É através dessa área que se processa, atualmente, uma intensificação da sua expansão urbana, de acordo com a política atual de uso do solo, embora existam áreas que devem ser preservadas como reserva natural para garantir os mananciais que abastecem a população da cidade e dos municípios vizinhos.

Do mesmo modo, a orla marítima da cidade sofre constante valorização imobiliária, obrigando o poder público, através do Código de

Obras, a estabelecer limites para as construções nessa área da cidade, com o escalonamento das alturas das edificações, a partir das quadras contíguas à orla, bem como recuos progressivos de acordo com o número de pavimentos de uma edificação (BITTENCOURT et al., 1997).

A valorização, e conseqüente verticalização dos espaços da orla marítima de Maceió nas duas últimas décadas, teve como conseqüências maiores investimentos em infra-estrutura e aumento da rede hoteleira à área, incrementados com o fortalecimento da vocação da cidade para o turismo.

5.3 – PERFIL CLIMÁTICO

De uma maneira geral, o clima na costa Nordeste do país é considerado quente e úmido com pequenas variações térmicas diárias, sazonais e anuais de temperatura. A dinâmica do regime de precipitação define a região Nordeste do Brasil como uma área de grande variação anual na distribuição de chuvas.

Existem basicamente duas estações: o verão, caracterizado por altas temperaturas e pouca pluviosidade (estação seca) com ocorrência de chuvas passageiras, geradas pelo aumento da temperatura e umidade; e o "inverno", que consiste em período de alta pluviosidade e temperaturas apenas um pouco mais baixas que o verão.

Nesse contexto, a baixa latitude, a radiação solar intensa e, especialmente, a proximidade de grandes massas líquidas - oceano e lagoas - provocando alta umidade do ar, caracterizam o clima de Maceió como úmido, do tipo Am i²¹, segundo classificação de KOEPPEN (1948), e quente e úmido com três meses de período seco, segundo NIMER (1989).

²¹ Clima úmido, megatérmico (temperatura de todos os meses maior que 18°C), com precipitação anual maior que 10 vezes a precipitação do mês mais seco e precipitação do mês mais seco inferior à 6cm, e isotérmico (variação de temperatura média anual menor que 5°C). (OMETTO, 1981).

Maceió constitui um bom exemplo de constância de nível térmico que caracteriza o litoral do Nordeste brasileiro, com temperatura média anual de 25,4°C e variação anual de 3,4°C entre os valores médios mensais das temperaturas médias (26,7°C em fevereiro e 23,7°C em julho, maior e menor média, respectivamente). São considerados dias “tipicamente quentes” os meses de novembro a fevereiro e “tipicamente frios” de junho a agosto.

A presença do complexo lagunar Mundaú - Manguaba e dos inúmeros riachos que cortam a cidade, conferem à Maceió uma alta umidade relativa média (78%), podendo chegar à saturação (100%) nos meses considerados mais frios.

Maceió está sob influência alternada dos ventos alísios de Sudeste (de velocidade fraca a moderada) e os ventos de retorno do Nordeste, mais freqüentes, com predomínio dos ventos Nordeste nos meses mais quentes (janeiro, fevereiro e março), e Sudeste, mais freqüente, nos restante dos meses.

No que se refere à velocidade do vento, o valor médio mensal é da ordem de 2,8m/s, podendo chegar a valores absolutos mais intensos de 10m/s na direção Nordeste.

A pluviosidade média anual de Maceió é de 1654mm, com meses mais chuvosos de abril a julho. Essa estação é considerada muito importante já que, em função da intensidade das chuvas, chega-se a determinar um saldo positivo ou não no crescimento econômico da região, além da dependência, de determinados setores econômicos, como o turismo - que se programa para opções complementares que compensem a falta de sol no litoral, o comércio e a indústria.

O comportamento médio dos principais parâmetros meteorológicos de Maceió - AL, que permitem uma melhor compreensão do seu clima, é mostrado na tabela 5 e figuras 10, 11, 12, 13 e 14.

Os dados necessários à definição do perfil climático de Maceió foram obtidos através das seguintes fontes: a) INMET - Instituto Nacional de

Meteorologia (1961-1990); b)SIMET - Secretaria do Estado de Alagoas (1984/1994); c) NMRH-AL - Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas, com dados climatológicos diários, a partir de 1992.

TABELA 5 - Comportamento médio dos principais parâmetros meteorológicos em Maceió-AL

MÊS	TEMP MÉD. (°C)	TEMP. MÁX. (°C)	TEMP. MÍN. (°C)	PRESSÃO ATM. (mb)	PRECIP. (mm)	UM.REL. (%)	INSOL. (h)
JAN	26,5	29,9	23,2	1007,0	58,2	76,3	281,3
FEV	26,7	30,2	23,4	1006,8	63,3	76,8	244,3
MAR	26,6	30,0	23,4	1006,6	134,8	79,0	240,0
ABR	26,1	29,3	23,2	1007,4	225,0	80,8	215,8
MAI	25,3	28,2	22,7	1008,6	344,7	82,9	193,9
JUN	24,3	27,3	21,8	1010,6	263,9	81,7	186,3
JUL	23,7	26,7	21,1	1011,7	216,2	80,7	199,1
AGO	23,7	26,7	21,1	1011,8	134,0	78,3	212,9
SET	24,5	27,6	21,6	1010,7	85,8	77,3	229,5
OUT	25,3	28,5	22,3	1009,0	58,8	76,4	268,5
NOV	25,9	29,3	22,5	1007,1	30,6	75,7	281,7
DEZ	26,3	29,7	22,9	1006,9	38,4	76,2	192,3

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET

Período: 1961-1990

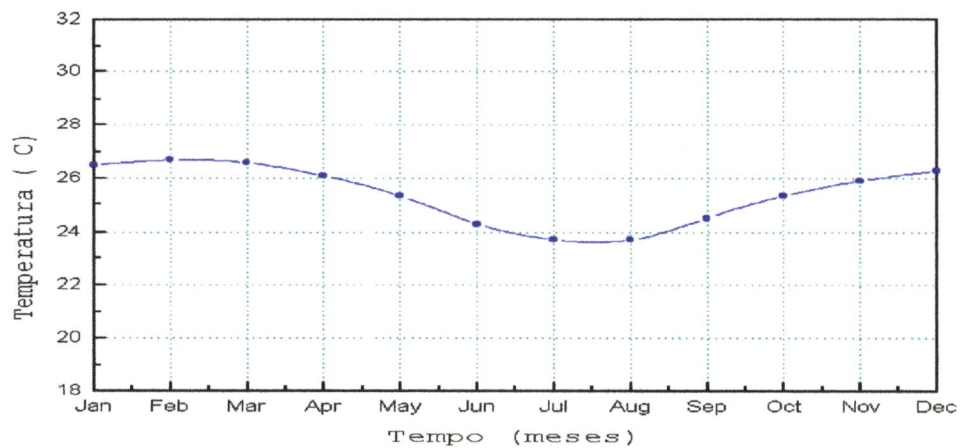


FIGURA 10 - Valores médios mensais das temperaturas médias de Maceió-AL

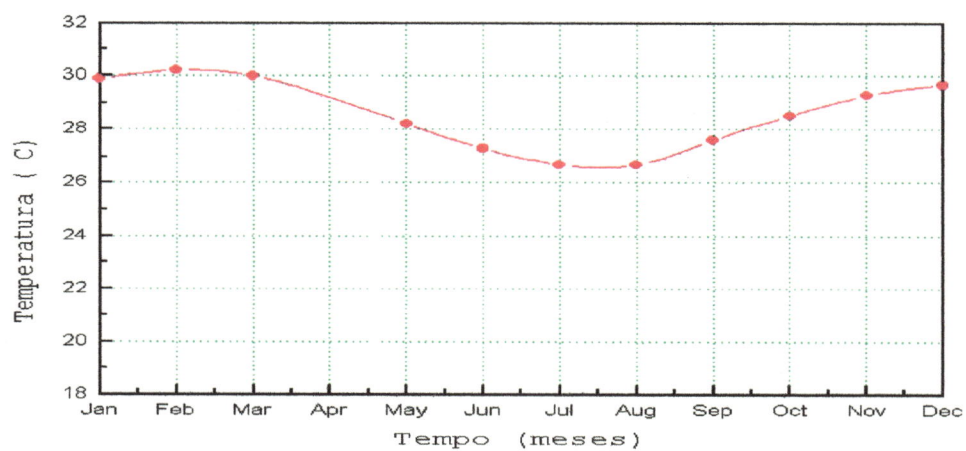


FIGURA 11- Valores médios mensais das temperaturas máximas de Maceió-AL

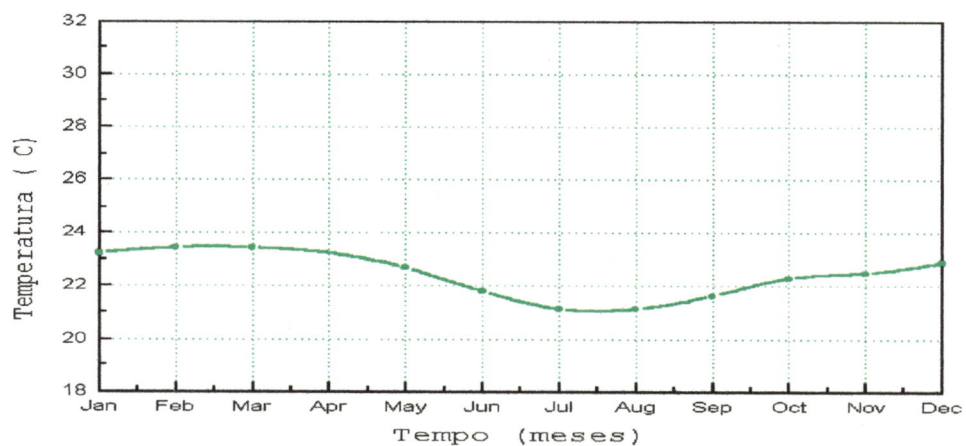


FIGURA 12- Valores médios mensais das temperaturas mínimas de Maceió-AL

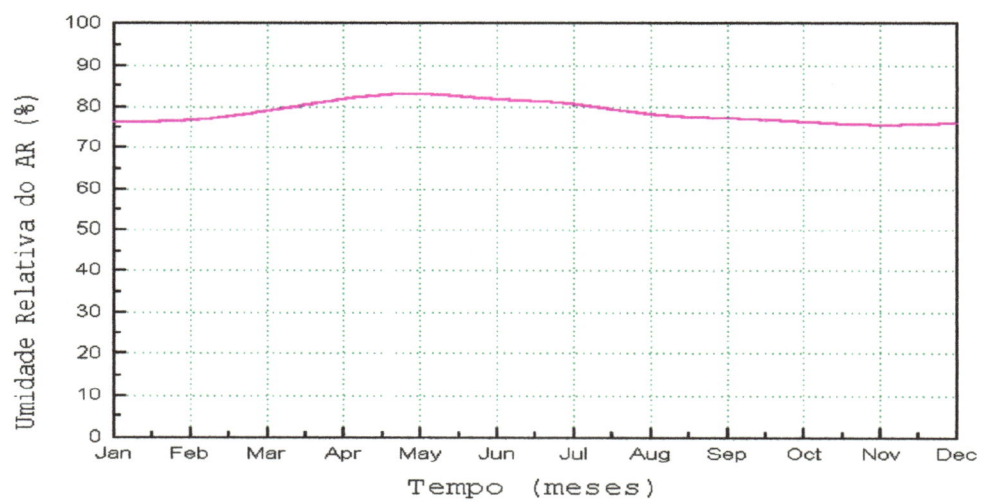


FIGURA 13 - Umidades relativas médias de Maceió - AL

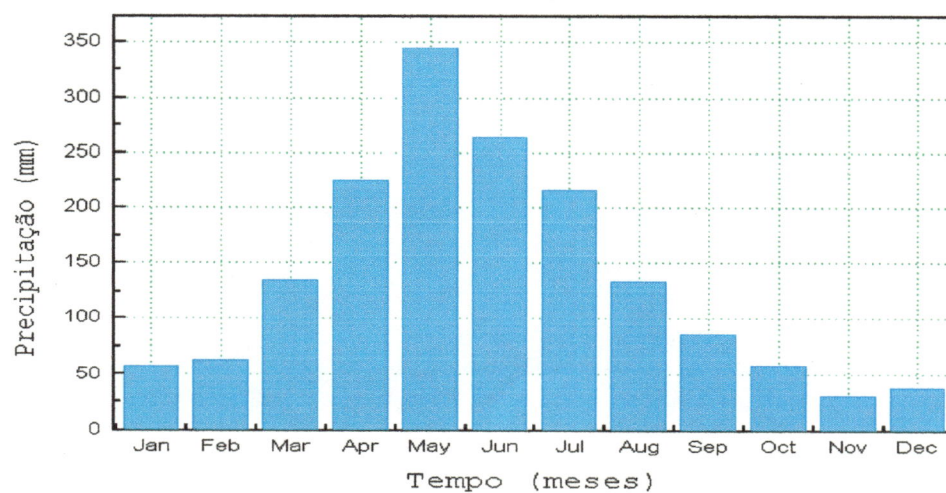


FIGURA 14 - Precipitação média de Maceió - AL

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DO AMBIENTE TÉRMICO URBANO

Com base em estação automática e estação meteorológica do SIMET - Secretaria de Planejamento do Estado de Alagoas, foram tratados e corrigidos dados experimentais através de medições móveis de 3 frações urbanas da cidade de Maceió - AL. Esse trabalho experimental permitiu análise do ambiente térmico urbano das áreas estudadas e o posterior ajuste do modelo climático urbano de balanço de energia descrito no capítulo 4, às condições climáticas típicas da região em estudo.

6.1 - O TRABALHO EXPERIMENTAL

6.1.1 - INSTRUMENTAÇÃO

O trabalho experimental consistiu de medições de temperatura do ar a uma altura aproximada de 1,5m do solo sobre 03 frações urbanas da cidade de Maceió, com padrões de uso e ocupação do solo diferenciados, onde foi adotado o procedimento metodológico descrito por MIZUNO et al. (1991) e SOUZA (1996), de medidas móveis com o auxílio de um termômetro

(sensor), capaz de registrar temperatura e umidade. O instrumento tem as seguintes características:

- transistor sensor de temperatura, com mostrador digital;
- 2 sensores, para temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido;
- erro total máximo do sistema de $0,2^{\circ}\text{C}$ a $0,3^{\circ}\text{C}$, sendo $0,2^{\circ}\text{C}$ causado pela linearidade e $0,1^{\circ}\text{C}$ pela resolução.

A figura 15 mostra o termômetro digital utilizado.

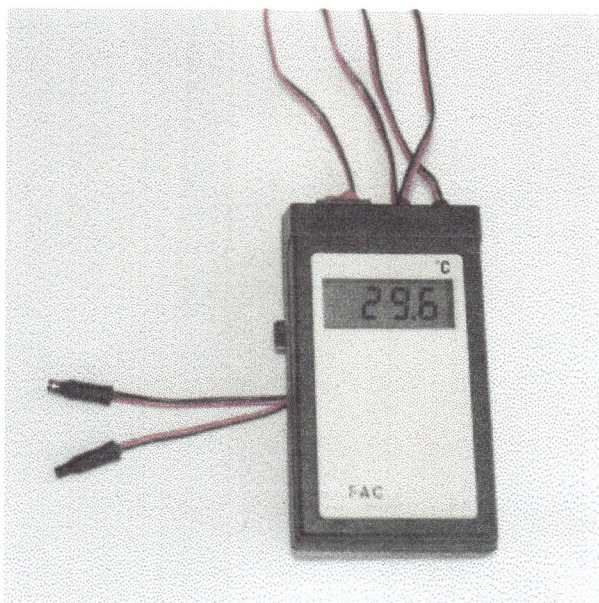
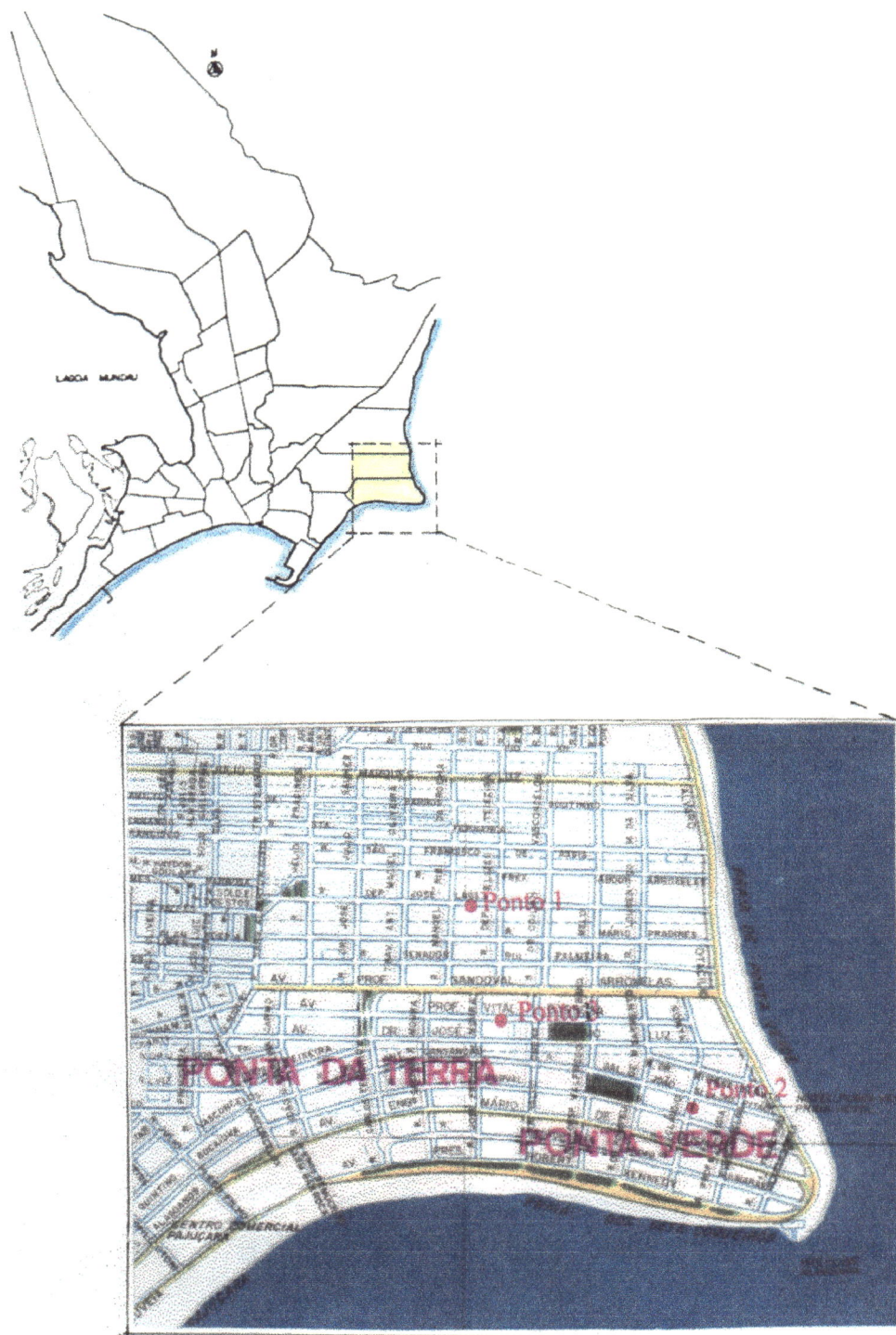


FIGURA 15 – Instrumento utilizado nas medições móveis.

As Estações climatológicas do SIMET - Secretaria de Planejamento do Estado de Alagoas e a Estação Climatológica automática²² serviram de referência e para fins de correlação e interpolação dos resultados realizados pelas medidas móveis.

²² estação meteorológica do "Projeto Microma" - Micrometeorologia da Mata Atlântica, do Prof. Dr. Roberto Lyra, Departamento de Meteorologia da UFAL, localizada no tabuleiro costeiro, próximo à Petrobrás, município de Pilar.

A figura 16 mostra a abrangência da pesquisa de campo. Os pontos de medições móveis são contíguos (o que facilitou o trabalho de campo através de medidas móveis), e situam-se em um mesmo padrão de altitude (a baixada litorânea). Refletem, porém, tipologias distintas de espaços.



Escala: 1:18.000

FIGURA 16- Localização dos pontos de observação.

6.1.2 - LOCAIS DE MEDIÇÕES

Dentro do núcleo urbano de Maceió, optou-se pela análise térmica em três frações de bairros com características homogêneas entre si de uso e ocupação do solo, refletindo situações típicas de ocupação da cidade, conforme a tabela 6:

TABELA 6 - Pontos de medições móveis

PONTO DE MEDIÇÃO	LOCALIZAÇÃO	CARACTERÍSTICAS ²³
1	Bairro de Ponta Verde	fração urbana com alguma verticalização, mas também com edificações térreas e alguns terrenos vazios(área mista); predominantemente residencial , pouca vegetação.
2	Bairro da Ponta Verde	Fração urbana verticalizada, formada quase na sua totalidade de edificações de múltiplos andares, uso predominantemente residencial; pouca vegetação
3	Bairro de Ponta da Terra	Fração urbana formada quase na sua totalidade de construções térreas, uso predominantemente residencial; pouca vegetação.

A seleção dos pontos medidos, portanto, obedeceu aos seguintes critérios (baseado em SOUZA, 1996):

- locais com altitudes aproximadamente iguais (baixada litorânea), de modo que sejam garantidos termos de comparação climática entre eles;

²³ Classificação segundo Lei Municipal n.4138/92 de zoneamento de uso do solo da Prefeitura municipal de Maceió.

- pontos representativos da diversidade da tipologia das edificações existentes na cidade;
- pontos que permitam percurso rápido entre si, para as tomadas das medições móveis em um mesmo horário.

É importante ressaltar que essas áreas escolhidas sofrem permanente processo de transformação e crescimento, dentro do núcleo urbano de Maceió.

A rota percorrida entre os pontos observados obedece a ordem seqüencial dos números a eles referentes. Nas figuras 17, 18 e 19 tem-se uma visão das frações urbanas observadas.



FIGURA 17 – Fração urbana equivalente ao ponto 1 de medição móvel.



FIGURA 18 – Fração urbana equivalente ao ponto 2 de medição móvel



FIGURA 19 – Fração urbana equivalente ao ponto 3 de medição móvel.

6.1.3 - PERÍODO DE MEDIÇÃO

As temperaturas do ar foram medidas a uma altura aproximada de 1,5m do solo sobre as três frações urbanas da cidade de Maceió, com condições de céu claro – dias 30/04; 1/05, 2/05, 03/05 e 04/05/98 -, caracterizando uma série temporal típica para a área de estudo. Considerando-se a constância de nível térmico que caracteriza a região, praticamente durante todo o ano, e os objetivos do trabalho, essa amostragem foi considerada satisfatória.

Apesar de a OMM (Organização Mundial de Meteorologia) estabelecer apenas três horários de medições (9:00h, 15:00h e 21:00h), optou-se por estender esse período para um total de nove horas: 8:00h, 9:00h, 10:00h, 14:00h, 15:00h, 16:00h, 19:00h, 20:00h e 21:00h, totalizando três horas nos períodos da manhã, três horas à tarde e três horas durante a noite, (conforme FONTES, 1991), para melhor definição da curva de temperatura para o período de 8:00h às 21:00h, necessária para análise do ambiente térmico urbano de Maceió, e importante para a calibração do modelo utilizado.

6.2. – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Os dados obtidos pelo trabalho experimental foram tratados e corrigidos (no anexo I tem-se o tratamento estatístico efetuado), de modo a serem obtidas, a partir dos horários observados, curvas de evolução da temperatura do ar para o período de 8:00h às 21:00h.

Os resultados das temperaturas do ar nas frações urbanas observadas são mostrados nas tabelas 7, 8, 9, 10 e 11.

TABELA 7 – Temperaturas do ar (°C) no dia 30/ 04/98

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
	METEOROLÓGICA	1	2	3
HORA				
1:00	23,5			
2:00	23,7			
3:00	23,2			
4:00	23,1			
5:00	22,9			
6:00	24,0			
7:00	27,1			
8:00	28,3	31,9	28,4	30,9
9:00	29,3	33,1	29,9	31,8
10:00	30,1	34,6	31,5	32,8
11:00	30,6	35,9	33,1	34,2
12:00	30,5	36,7	34,4	35,6
13:00	30,4	37,0	35,4	36,7
14:00	30,3	36,6	36,0	37,2
15:00	29,4	35,5	35,8	36,6
16:00	28,0	33,9	34,5	34,9
17:00	26,1	32,5	33,2	33,2
18:00	24,7	31,4	32,1	31,6
19:00	24,3	30,5	31,1	30,3
20:00	23,9	29,6	30,2	29,2
21:00	23,8	28,9	29,2	29,0
22:00	23,5			
23:00	23,7			
24:00	24,0			

TABELA 8 – Temperaturas do ar (°C) no dia 01/ 05 /98

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
HORA	METEOROLÓGICA	1	2	3
1:00	22,2			
2:00	22,1			
3:00	22,4			
4:00	22,4			
5:00	22,1			
6:00	23,8			
7:00	26,1			
8:00	28,2	31,5	28,3	30,3
9:00	29,5	33,5	30,0	32,2
10:00	30,4	34,2	31,7	34,4
11:00	31,3	34,8	32,8	36,0
12:00	32,0	35,4	33,5	36,9
13:00	31,8	35,6	33,9	37,1
14:00	31,4	35,2	34,3	36,4
15:00	30,7	34,2	34,7	35,0
16:00	29,4	33,4	34,5	33,3
17:00	27,6	32,6	33,8	31,9
18:00	26,5	31,7	32,7	30,9
19:00	25,7	30,8	31,4	29,9
20:00	25,0	29,8	30,1	29,0
21:00	24,4	28,7	29,2	28,7
22:00	23,6			
23:00	23,1			
24:00	22,6			

TABELA 9 – Temperaturas do ar (°C) no dia 02/05/98

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
HORA	METEOROLÓGICA			
1:00	22,5			
2:00	22,2			
3:00	21,7			
4:00	21,7			
5:00	22,0			
6:00	24,2			
7:00	26,4			
8:00	28,1	32,2	28,7	31,6
9:00	29,6	33,4	29,3	32,1
10:00	30,8	34,4	30,8	33,3
11:00	31,6	35,5	32,4	34,7
12:00	31,3	36,5	33,9	36,0
13:00	31,1	37,1	35,0	36,8
14:00	30,6	36,7	35,7	37,1
15:00	29,8	35,4	35,7	36,5
16:00	28,6	34,1	34,7	35,1
17:00	27,1	33,0	33,6	33,4
18:00	26,3	31,9	32,4	31,7
19:00	25,6	30,7	31,3	30,3
20:00	24,5	29,5	30,1	29,4
21:00	23,9	28,9	29,2	29,1
22:00	23,9			
23:00	23,4			
24:00	22,9			

TABELA 10 – Temperaturas do ar (°C) no dia 03/05/98

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
HORA	METEOROLÓGICA	1	2	3
1:00	23,3			
2:00	22,9			
3:00	22,4			
4:00	22,3			
5:00	22,3			
6:00	24,0			
7:00	26,7			
8:00	28,2	31,9	28,4	29,9
9:00	29,3	33,4	30,2	32,4
10:00	30,4	34,4	31,9	34,6
11:00	31,2	35,2	33,0	36,2
12:00	30,8	35,7	33,6	37,0
13:00	30,6	35,8	34,0	37,1
14:00	29,8	35,3	34,4	36,4
15:00	29,1	34,3	34,8	35,0
16:00	28,0	33,4	34,5	33,5
17:00	27,1	32,6	33,6	32,1
18:00	26,0	31,7	32,4	30,8
19:00	25,1	30,8	31,2	29,8
20:00	24,5	29,8	30,1	29,1
21:00	24,1	28,8	29,3	29,0
22:00	23,7			
23:00	23,2			
24:00	23,7			

TABELA 11 – Temperaturas do ar (°C) no dia 04/05/98

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
	METEOROLÓGICA	1	2	3
HORA				
1:00	22,6			
2:00	22,4			
3:00	22,8			
4:00	23,0			
5:00	23,2			
6:00	23,3			
7:00	24,0			
8:00	26,8	32,1	28,5	30,5
9:00	28,1	33,2	29,7	32,0
10:00	29,2	34,5	31,7	33,4
11:00	30,0	35,3	33,7	34,7
12:00	29,3	35,7	35,1	35,8
13:00	29,6	35,7	35,7	36,5
14:00	29,2	35,6	35,1	36,6
15:00	29,0	35,1	33,8	36,0
16:00	27,5	33,2	34,3	34,9
17:00	25,7	32,0	34,0	33,3
18:00	24,1	31,4	32,6	31,5
19:00	23,8	30,7	31,1	30,0
20:00	24,0	29,4	30,0	29,2
21:00	22,9	28,7	29,4	28,9
22:00	22,5			
23:00	22,4			
24:00	22,9			

6.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 12 e o seu gráfico correspondente, figura 20, mostram o comportamento médio diário das temperaturas nos diversos pontos medidos, bem como os dados colhidos na estação meteorológica.

A tabela 13 apresenta os desvios padrão entre os diversos dias medidos e os obtidos da estação meteorológica. A tabela 14 mostra o tratamento estatístico efetuado para as médias de temperatura dos pontos de medição.

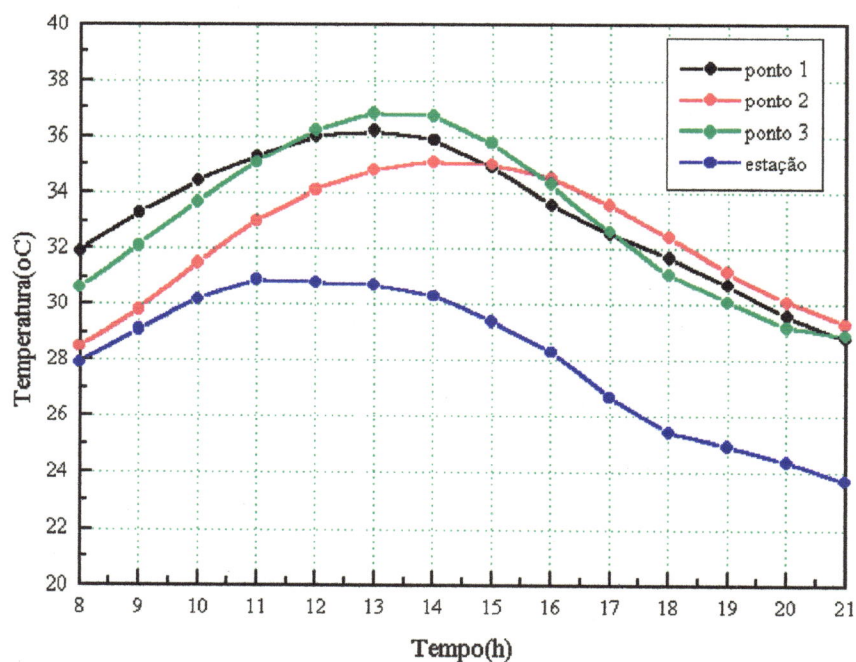


FIGURA 20 – Temperaturas do ar médias para o período observado.

TABELA 12 - Comportamento médio das temperaturas do ar para o período observado

LOCAL	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
	METEOROLÓGICA	1	2	3
HORA				
1:00	22,7			
2:00	22,5			
3:00	22,4			
4:00	22,4			
5:00	22,5			
6:00	23,8			
7:00	25,7			
8:00	27,8	31,9	28,5	30,6
9:00	29,1	33,3	29,8	32,1
10:00	30,2	34,4	31,5	33,7
11:00	30,9	35,3	33,0	35,2
12:00	30,7	36,0	34,1	36,3
13:00	30,6	36,2	34,8	36,8
14:00	30,0	35,9	35,1	36,7
15:00	29,4	34,9	35,0	35,8
16:00	28,2	33,6	34,5	34,3
17:00	26,7	32,5	33,6	32,8
18:00	25,4	31,6	32,5	31,3
19:00	24,9	30,7	31,2	30,1
20:00	24,4	29,6	30,1	29,2
21:00	23,7	28,8	29,3	28,9
22:00	23,2			
23:00	22,9			
24:00	23,1			
MÉDIA	25,97	33,2	32,4	33,1

TABELA 13 - Desvios padrão para o período de análise

DATA	ESTAÇÃO	PONTO	PONTO	PONTO
	METEOROLÓGICA	1	2	3
30/04	2,592	2,628	2,433	2,692
1/05	2,549	2,096	2,036	2,882
2/05	2,537	2,542	2,392	2,647
3/05	2,318	2,153	2,019	2,909
4/05	2,421	2,306	2,310	2,652

TABELA 14 - Análise estatística com os valores médios dos pontos de medição

PONTO	DESVIO PADRÃO (%)	COEFICIENTE. DE CORRELAÇÃO (%)	VARIÂNCIA (%)	CO- VARIÂNCIA (%)
1	2,34	0,96	5,4	5,5
2	2,20	0,55	4,9	3,0
3	2,72	0,89	7,4	5,9
ESTAÇÃO	2,45	-	6,0	-

Em função dos resultados obtidos, observa-se que:

- as massas edificadas produziram, claramente, efeitos de elevação da temperatura interna do ar da cidade.

- os valores obtidos pelas curvas de evolução da temperatura do ar mostraram pequenas variações entre as diversas frações urbanas, devido aos efeitos amenizadores da umidade atmosférica, mas que reforçam a influência, nas

condições microclimáticas, de modificações no ambiente externo pela maior ou menor presença de superfícies como edificações.

- a distribuição da temperatura do ar no período de medição mostra, de uma maneira geral, um comportamento relativamente uniforme para os três pontos, com aumento gradativo de temperatura entre 8:00h e 14:00h, e resfriamento gradativo até o pôr do sol por volta das 18:00h.

Entre 8:00h e 11:30h, o aquecimento progressivo das temperaturas dos pontos medidos mostra, por um lado, o ponto 2, que reúne maior massa construída, com temperaturas menores que os demais pontos - devido ao sombreamento proporcionado pelas edificações altas, que impedem a exposição direta da radiação solar e necessitam de mais tempo para aquecer - e o ponto 1, que apresenta maiores valores de temperatura que os demais pontos. A curva de evolução de temperatura do ponto 3 é mais acentuada, já que este ponto apresenta características de morfologia urbana - edificações térreas - que favorecem maior exposição da radiação solar durante o dia.

Entre 11:30h e 15:00h, o ponto 3 já passa a apresentar maiores valores de temperaturas que os outros pontos de medição. Durante esse período, observa-se também que, enquanto as curvas correspondentes às temperaturas do ar dos pontos 1 e 3 começam a decair, no ponto 2 a curva ainda é ascendente, devido ao fator de atraso térmico resultante do aquecimento da maior massa construída.

Entre 15:00h e 16:00h, o ponto 2 passa a apresentar temperaturas superiores às do ponto 1 de medição, consolidando-se como a fração urbana que apresenta maiores valores de temperaturas a partir das 16:00h, quando a intensidade de radiação solar é menor que o calor cedido pela transferência por convecção, mais rápida e em maior quantidade.

A partir das 15:00h, as diferenças entre os valores de máximas temperaturas foi pequena, em parte devido à redução dos ganhos térmicos solares e ao sombreamento das edificações.

Entre as 17:30h e 21:00h, os pontos de medição apresentaram temperaturas médias muito próximas, caracterizando uma tendência à estabilização das temperaturas após o pôr do sol, havendo, aí, portanto, pouca influência da massa edificada na temperatura do ar das frações urbanas observadas. De qualquer forma, o ponto 2 apresenta temperaturas um pouco maiores e o ponto 3 menores valores de temperatura que os demais pontos nesse período.

- As temperaturas do ar nas frações urbanas observadas são sempre superiores às temperaturas da estação meteorológica (ponto de referência), comprovando a modificação térmica provocada pelo meio urbano no clima da cidade.

- Os resultados das medições mostram que os valores médios máximos de temperatura nos pontos de medições móveis sofrem um certo atraso em relação à estação meteorológica: nas frações urbanas correspondentes aos pontos 1 e 3: os maiores valores de temperatura ocorreram às 13:00h, e no ponto 2 às 14:00h, enquanto que na estação a temperatura máxima ocorre por volta de meio dia.

Essas diferenças de temperatura verificadas devem-se à capacidade de armazenamento de energia das diferentes massas construídas dos distintos entornos.

O maior atraso térmico ocorrido no ponto 2 justifica-se por essa fração urbana conter maior massa construída e, por conseguinte, maior capacidade de armazenamento de energia térmica.

No ponto 3, onde há predominância de edificações térreas, o atraso térmico é um pouco menor, o mesmo ocorrendo com o ponto 1, onde há

peculiaridades locais como um maior espaçamento entre as edificações térreas e de multi-andares, além da presença de terrenos vazios.

Na tabela 15 e figura 21, tem-se a diferença entre as temperaturas médias do ar das frações urbanas estudadas, tendo como base as temperaturas médias da estação meteorológica, durante o período de medição.

TABELA 15 - Diferença entre as temperaturas médias dos pontos observados e as temperaturas médias da estação meteorológica (°C).

HORA (h)	Ponto	Ponto	Ponto
	1	2	3
8	4,0	0,6	2,7
9	4,2	0,7	3,0
10	4,2	1,3	3,5
11	4,4	2,1	4,3
12	5,2	3,3	5,5
13	5,5	4,1	6,1
14	5,6	4,8	6,4
15	5,3	5,4	6,2
16	5,3	6,2	6,0
17	5,8	6,9	6,1
18	6,1	7,0	5,8
19	5,8	6,3	5,2
20	5,2	5,7	4,8
21	5,0	5,5	5,1
MÉDIA	5,1	4,3	5,0

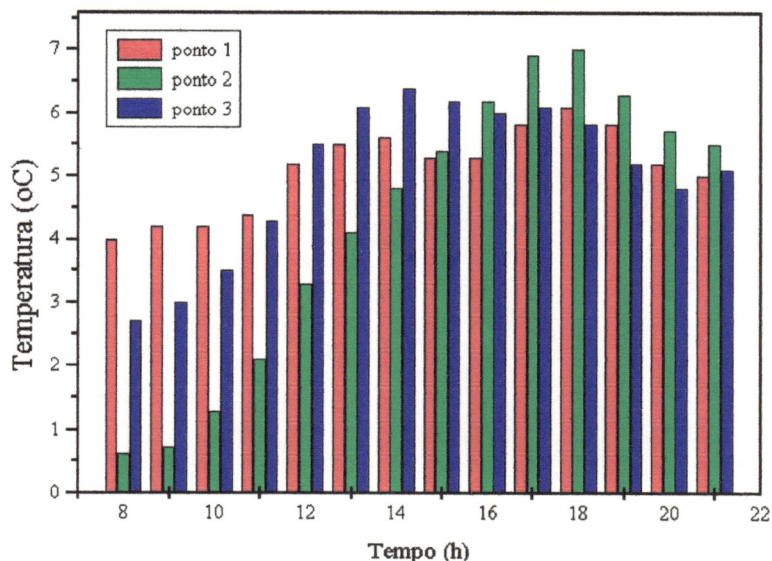


FIGURA 21- Diferença média de temperatura(°C) dos pontos de medição, em relação à estação meteorológica.

Note-se, pelo gráfico e tabela, que:

- a maior variação de temperatura do ar nos pontos medidos, em comparação à da estação meteorológica, ocorreu no ponto de medição móvel 2, com valor máximo médio de 7 °C às 18:00h e valor mínimo de 0,6°C às 8:00h;
- os pontos 1 e 3 apresentaram diferenças de temperatura mais uniformemente distribuídas durante o período de 8:00h às 21:00h;
- as maiores diferenças de temperatura entre os pontos e as temperaturas da estação ocorreram no período da tarde, quando há maior influência do aquecimento dos materiais e superfícies urbanas.

A amplitude térmica diária média (entre 8:00h e 21:00h) dos pontos de medições é de 7,3 °C, com variação média de 7,9 °C entre os valores de temperatura máxima e mínima no ponto 3 e de 5,8°C no ponto 2. O ponto 1 apresentou amplitude térmica média de 7,4 °C.

A menor amplitude apresentada pelo ponto 2 justifica-se pelo fato de que, por caracterizar-se pela presença predominante de edificações altas, recebe pouca insolação durante todo o dia, o que estabelece uma condição microclimática agradável devido ao efeito de convecção e sombreamento das edificações altas, produzindo microclima diferenciado e temperaturas um pouco mais baixas que os outros pontos, ao longo do dia. Entre 17:00h e 21:00h, entretanto, apresenta valores médios de temperatura pouco acima dos demais pontos, caracterizando-se aí o resultado do armazenamento de energia da maior massa edificada.

O ponto 3, portanto, apresentou maiores amplitudes térmicas diárias. Não apresentou, porém, mínimas menores que os outros pontos. Durante a manhã, entre as 8:00h e 12:00h, observou-se nesse ponto, grande variação de temperatura, devendo-se esse comportamento ao fato de que, com edificações predominantemente térreas (horizontais), há maior aquecimento diurno. Tal fração urbana, caracterizada pela presença de edificações térreas, está mais exposta à insolação durante o dia, com poucas condições de sombreamento, o que contribui para apresentar temperaturas mais altas durante o período da manhã. Por outro lado, há esfriamento mais rápido a partir do fim do período da tarde.

6.4 – RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO AR E A MORFOLOGIA URBANA

Se, por um lado, ficou clara a interferência da malha urbana na modificação do clima local, na prática, entre os pontos medidos, as diversas tipologias urbanas mostraram pouca influência na variação da temperatura, em valores absolutos, ou seja, não houve alteração na variável temperatura do ar em grande escala.

Não existem, portanto, diferenças significativas nas temperaturas observadas, nos diversos pontos, comprovando pequenas alterações microclimáticas em espaços urbanos com morfologia diferenciada, o que era de se esperar em contexto de alta umidade do ar característica do clima da região.

Note-se, ainda, as condições favoráveis de vento (brisas marítimas) a que está continuamente submetida a área de estudo, que promovem a amenização das temperaturas do ar e resfriamento das superfícies.

De qualquer forma, uma análise comparativa entre os pontos de medição mostra, na totalidade da curva, valores absolutos de temperatura mais altos para o ponto menos adensado - ponto 3, seguido do ponto 1 (área mista), e do ponto 2 (área verticalizada).

Portanto, na fração urbana equivalente ao ponto 2, onde há maior massa edificada, obteve-se os menores valores de temperatura do ar ao longo de toda a manhã, em relação aos outros pontos, devido à influência dos edifícios altos como amenizadores das temperaturas do ar, ao evitar a exposição direta do sol nessa fração urbana durante a maior parte do dia. Tal fato já foi constatado, entre outras investigações, como em SANTANA (1997) e COSTA (1998).

As figuras 22, 23 e 24 mostram tentativas de correlações realizadas com os dados observados de temperatura e parâmetros como

vegetação, em que não foi possível encontrar nenhuma correlação, bem como os parâmetros massa de concreto e comprimento de rugosidade da superfície²⁴ em que pode-se observar uma correlação quase linear entre as temperaturas máximas observadas e os valores correspondentes destes parâmetros.

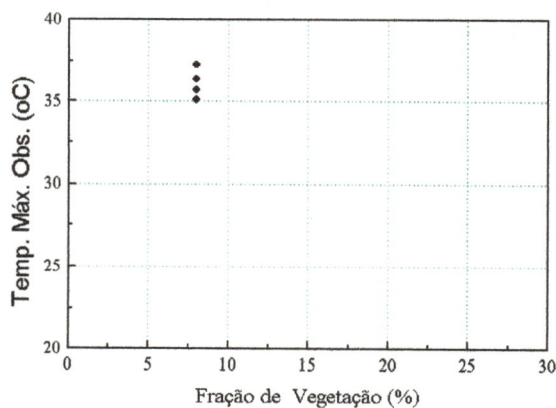


FIGURA 22 - Correlação entre temperatura máxima observada e vegetação (não há caracterização).

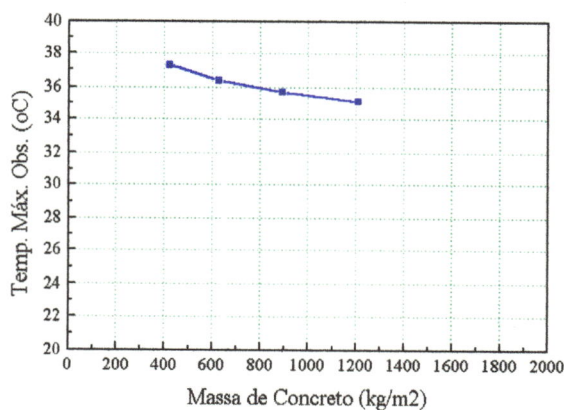


FIGURA 23 - Correlação entre temperatura máxima observada e massa de concreto (praticamente linear).

²⁴ Esses parâmetros, já citados no capítulo 4, serão importantes para a simulação com o modelo, no capítulo 7, quando serão mais detalhadamente definidos.

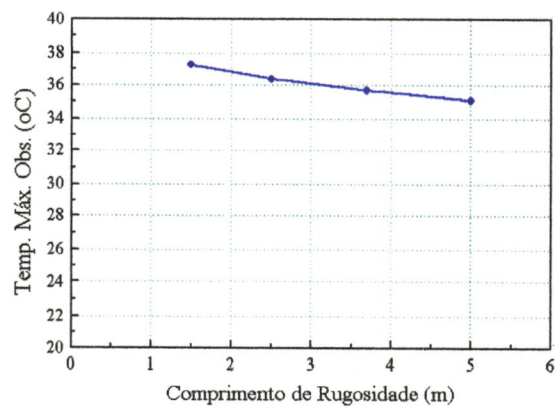


FIGURA 24 - Correlação entre temperatura máxima observada e rugosidade (praticamente linear).

CAPÍTULO 7

APLICAÇÃO DO MODELO DE BALANÇO DE ENERGIA

O trabalho experimental permitiu o ajuste e aplicação do modelo de balanço de energia descrito no capítulo 4, para as condições climáticas e de superfície de Maceió-AL.

A partir da obtenção dos resultados simulados pelo modelo, foi possível avaliar o potencial desse instrumento frente às diversas situações estudadas.

O ajuste do modelo às condições climáticas típicas de Maceió e as simulações realizadas nas frações urbanas da cidade em estudo teve os seguintes objetivos:

- avaliação da resposta do modelo na identificação dos efeitos das diversas tipologias dos espaços urbanos observados nos microclimas locais;
- simulação de situações futuras (previsões).

7.1 – ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE URBANA

Para a simulação teórica do balanço de energia urbano da região de Maceió, foram inicialmente considerados, como dados de entrada, os mesmos valores para as seguintes variáveis e parâmetros utilizados no modelo de TSO et al. (1990):

$$\rho_a, C_a, k, L, k_s, d, \rho_s, C_s, T_b, T_s, C_c, Z_2, T_2, q_2.$$

Em contrapartida, alguns parâmetros e variáveis tiveram seus valores modificados, de acordo com as características da região de estudo, a partir da primeira tentativa de calibração: Z_0 (rugosidade média da superfície); m_c (massa média de concreto), U_2 (velocidade do vento a 300m), e R (radiação líquida), cujos procedimentos de cálculo são mostrados a seguir.

1) Cálculo da rugosidade da superfície (Z_0)

A rugosidade (Z_0) é um parâmetro que expressa a morfologia geométrica da superfície, cujo conceito foi introduzido inicialmente por LETTAU²⁵ apud OKE (1996), e significa a medida da rugosidade aerodinâmica da superfície, e é relacionada, mas não é igual à altura dos elementos, mas também é função da forma e distribuição da densidade destes.

Assim,

$$Z_0 = 0,5h \left(\frac{A^*}{A'} \right), \quad (17)$$

²⁵ LETTAU, H.(1969). Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description. *Journal of Applied Meteorology* 8, p.828-832, apud OKE(1996). *Boundary Layer Climates*. 2 ed. New York: Routledge, 435p.

onde:

h = altura média do elemento de rugosidade (m);

A^* = “área de silhueta”, ou área da face do elemento, na direção perpendicular à do vento (m^2);

A' = área ocupada pelo elemento (m^2).

KATZCHNER (1997) utiliza valores de rugosidade da superfície na classificação de clima urbano (tabela 16):

TABELA 16 - Critérios para um sistema de classificação urbana

CLASSIFICAÇÃO DE CLIMA URBANO	SITUAÇÃO GEOGRÁFICA	CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE	RUGOSIDADE (Z_0)	GRAU DE OBSTRUÇÃO	ESTRUTURA DA CIDADE
máx. de ilha de calor	Principalmente em vales	Concreto	>1,5	60%	Áreas densamente construídas, altos edifícios
Intensidade de ilha de calor mais baixa	indefinida	Concreto, ruas com árvores	1,5	50%	Áreas densamente construídas
Intensidade de ilha de calor moderada	Margens de cidades, indefinida	Casas com jardins	0,5-1,0	40%	Edificações pequenas
Clima industrial	indefinida	Principalmente asfalto	1,0	60%	Corredores, produção
Zonas de ventilação para sistemas de circulação regional	Áreas de ventilação dentro da cidade	Asfalto ou vegetação	<0,5	<10%	Ruas, espaços livres
Zonas de ventilação, zonas de produção de ar frio	arredores	Campos, verdes	<0,5	<10%	Áreas de vegetação ou agricultura, parques
Áreas de sistemas de circulação local	Espaços livres na cidade	Superfícies diversas	1	0-60%	Ocorrem em várias estruturas urbanas
Áreas frias, com clima moderado	indefinida	Vegetação	0,5-1,5	<10%	Parques, florestas, cinturões verdes.

Fonte: KATZSCHNER, 1997, p.52

Em uma área urbana, os elementos de rugosidade são principalmente suas construções (edificações), o que torna a cidade a mais rugosa das superfícies. Em face da dificuldade de sua medição para problemas práticos relacionados ao meio ambiente urbano, OKE (1996) sugere os seguintes valores típicos para rugosidade em terrenos urbanizados, expressos na tabela 17:

TABELA 17 - Valores típicos da rugosidade Z_0 para terrenos urbanizados

TERRENO	Z_0 (m)
Povoados esparsos (fazendas, vilas, árvores, sebes)	0,2 – 0,6
Suburbano, baixa densidade, residências e jardins	0,4 – 1,2
Suburbano, alta densidade	0,8 – 1,8
Urbano, alta densidade, fileira de edificações e blocos com < 5 pavimentos	1,5 – 2,5
Urbano, alta densidade urbana, blocos de multiandares	2,5 – 10

(Fonte: OKE, 1996, p.298)

Para a região em estudo, portanto, e baseado nas tabelas 10 e 11, estimou-se os seguintes valores de rugosidade Z_0 dos pontos de análise:

Ponto 1: $Z_0 = 2,0$ m

Ponto 2: $Z_0 = 5$ m

Ponto 3: $Z_0 = 1,5$ m

2) Cálculo da massa média de concreto (m_c)

A massa média de concreto²⁶ por unidade de área (m_c) dos pontos observados é estimada com base na seguinte equação:

$$m_c = V_c \times \frac{\gamma_c}{A_f} \quad (18)$$

onde:

γ_c = densidade do concreto = 2400kg/m³ (OKE, 1996, p.259)

V_c = volume de concreto (m³)

A_f = área total das frações urbanas (m²)

Inicialmente, calcula-se o volume de concreto das construções por unidade de terreno (V_{ct}), estimado a partir da equação abaixo:

$$V_{ct} = A_t \times b_w \quad (19)$$

onde:

A_t = área total construída por terreno (m²), estimada a partir da soma das áreas laterais (l) da construção (2 x lateral 1 x h + 2 x lateral 2 x h) e das áreas da cobertura, (A_{cob}), onde h = altura média das construções;

b_w = espessura média do concreto nas construções (m).

²⁶ sabe-se que as superfícies das construções não são feitas unicamente de concreto. Por motivo de simplificação, e conforme TSO et al.(1990), considerou-se a utilização desse material para cálculo, e já que as suas características térmicas são similares às de outros materiais de construção comumente utilizados.



Admite-se que as frações urbanas são formadas por terrenos padrões de 15 m x 30 m ($A_{\text{terr}} = 450 \text{ m}^2$) para os pontos 1 e 3; e 30 m x 30 m para o ponto 2 (900 m^2), com a seguinte área de cobertura A_{cob} ²⁷:

Para o ponto 1: $A_{\text{cob1}} = 60\%$ da área do terreno = 270 m^2

Para o ponto 2: $A_{\text{cob2}} = 70\%$ da área do terreno = 630 m^2

Para o ponto 3: $A_{\text{cob3}} = 60\%$ da área do terreno. = 270 m^2

Considera-se, ainda, as laterais das construções com os seguintes valores:

Para o ponto 1: 12 m (lateral 1) e 22,5 m (lateral 2)

Para o ponto 2: 25 m (lateral 1) e 25,2 m (lateral 2)

Para o ponto 3: 12m. (lateral 1) e 22,5 m (lateral 2)

A altura média das construções (h) é estimada com base em metodologia de YAMASHITA & SEKINE(1990):

$$h = 2,60 n' + b' + r \quad (20)$$

onde:

n' = número de andares;

b' = base das construções (m);

r = altura do telhado (m).

²⁷ Baseado nas taxas de ocupação permitidas, para a área, no Código de Obras da Cidade de Maceió(1992).

A partir de análise “in loco”, tem-se os seguintes valores da altura média das construções para os pontos de observação (tabela 18):

TABELA 18 – Estimativa da altura média das construções (h)

FRAÇÃO URBANA	n'	b'	r	h
	(m)	(m)	(m)	(m)
PONTO 1	3	1,5	1,0	10,3
PONTO 2	10	2	1,2	29,2
PONTO 3	1	0,5	1,0	4,1

Calculando-se a área total construída por terreno (A_t) para cada ponto, tem-se:

$$\text{para o ponto 1: } A_{t1} = 710,7 + 270 = 980,7\text{m}^2$$

$$\text{para o ponto 2: } A_{t2} = 2.932 + 630 = 3.562\text{m}^2$$

$$\text{para o ponto 3: } A_{t3} = 282,9 + 270 = 552,9\text{m}^2$$

Com os valores das áreas calculados, basta multiplicá-los pela espessura da parede padrão (valor adotado de 15 cm) para que se determine o volume de concreto por terreno.

Tem-se, portanto, os seguintes valores de volume e massa de concreto por unidade de terreno (V_{ct}) e massa de concreto equivalente (m_{ct}), para cada ponto de medição:

- para o ponto 1:

$$V_{ct1} = 0,15 \times 980,7$$

$$V_{ct1} = 147,105\text{m}^3$$

$$m_{ct1} = \frac{V_{c1} \times \gamma_c}{A_{terr1}}$$

$$m_{ct1} = \frac{147,105 \times 2400}{450}$$

$$m_{ct1} = 784,56 \text{ kg} / \text{m}^2$$

- para o ponto 2:

$$V_{ct2} = 0,15 \times 3.562$$

$$V_{ct2} = 534,3 \text{ m}^3$$

$$m_{ct2} = \frac{V_{c2} \times \gamma_c}{A_{terr2}}$$

$$m_{ct2} = \frac{534,3 \times 2400}{900}$$

$$m_{ct2} = 1424,8 \text{ kg} / \text{m}^2$$

- para o ponto 3:

$$V_{ct3} = 0,15 \times 552,9$$

$$V_{ct3} = 82,935 \text{ m}^3$$

$$m_{ct3} = \frac{V_{c3} \times \gamma_c}{A_{terr3}}$$

$$m_{ct3} = \frac{82,935 \times 2400}{450}$$

$$m_{ct3} = 42,32 \text{ kg} / \text{m}^2$$

A tabela 19 resume os resultados obtidos para cada célula (terreno) padrão dos diversos pontos estudados:

**TABELA 19 – massa média de concreto (m_{ct})
para cada terreno dos locais observados**

FRAÇÃO URBANA	ÁREA TOTAL DO TERRENO	ÁREA TOTAL CONSTRUÍDA NO TERRENO	VOLUME DE CONCRETO	MASSA MÉDIA DE CONCRETO
	A_{terr} (m^2)	A_t (m^2)	V_{ct} (m^3)	m_{ct} (kg/m^2)
Ponto 1	450	980,7	147,105	784,6
Ponto 2	900	3562,0	534,300	1424,8
Ponto 3	450	552,9	82,935	442,3

O próximo passo é encontrar o volume de concreto (V_c) e a massa de concreto (m_c) finais para cada fração urbana que serão dados por:

$$V_c = \frac{A_f}{A_{terr}} \times COA \times V_{ct} \quad (21)$$

onde COA é o coeficiente de ocupação da área urbana:

No ponto 1: $COA_1 = 0,80$

No ponto 2: $COA_2 = 0,85$

No ponto 3: $COA_3 = 0,95$

A área total das frações urbanas (A_f) equivale a:

Para o ponto 1: $A_{f1} = 6 \times 10^5 m^2$

Para o ponto 2: $A_{f2} = 8 \times 10^5 m^2$

Para o ponto 3: $A_{f3} = 2 \times 10^5 m^2$

Os resultados finais de volume e massa de concreto são mostrados a seguir.

- para o ponto 1:

$$V_{c1} = \frac{6 \times 10^5}{450} \times 0,8 \times 147,105$$

$$V_{c1} = 156.912,00m^3$$

$$m_{c1} = \frac{V_{c1} \times \gamma_c}{A_{f1}}$$

$$m_{c1} = \frac{156.912,00 \times 2400}{6 \times 10^5}$$

$$m_{c1} = 627,648kg/m^2$$

- para o ponto 2:

$$V_{c2} = \frac{8 \times 10^5}{900} \times 0,85 \times 534,3$$

$$V_{c2} = 403.693,333m^3$$

$$m_{c2} = \frac{V_{c2} \times \gamma_c}{A_{f2}}$$

$$m_{c2} = \frac{403.693,333 \times 2400}{8 \times 10^5}$$

$$m_{c2} = 1.211,08kg/m^2$$

Para o ponto 3:

$$V_{c3} = \frac{2 \times 10^5}{450} \times 0,95 \times 82,935$$

$$V_{c3} = 35.017m^3$$

$$m_{c3} = \frac{V_{c3} \times \gamma_c}{A_{f3}}$$

$$m_{c3} = \frac{35.017 \times 2400}{2 \times 10^5}$$

$$m_{c3} = 420,204 \text{ kg/m}^2$$

A tabela 20 resume os resultados finais obtidos para cada ponto estudado:

**TABELA 20 – Massa média de concreto por unidade de área
(m_c) dos locais observados**

FRAÇÃO URBANA	ÁREA TOTAL DA FRAÇÃO URBANA A_f (m^2)	VOLUME DE CONCRETO V_c (m^3)	MASSA MÉDIA DE CONCRETO m_c (kg/m^2)
Ponto 1	6×10^5	156.912,00	627,65
Ponto 2	8×10^5	403.693,33	1.211,08
Ponto 3	2×10^5	35.017,00	420,20
Total	16×10^5	595.622,33	média*: 893,43

*média ponderada pelas áreas das frações urbanas

3) Cálculo de U_2 (velocidade do vento no nível 2, a 300m do solo), em m/s:

LIDDAMENT (1986)²⁸ apud BITTENCOURT(1993) sugere a seguinte correção de velocidade do vento local com relação a uma dada altura:

²⁸ LIDDAMENT, M.(1986). Air infiltration calculation techniques: na applications guide. Document AIC - AG - 1 - 86, Air infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, apud BITTENCOURT, L.S. (1993). Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates: an investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low - rise buildings. U.K., 314p. Thesis. Architectural Association Graduate School, Environment and Energy Studies Programme.

$$\frac{V}{V_m} = k.h^a \quad (22)$$

onde:

V = velocidade média do vento a uma dada altura (m/s);

V_m = velocidade média do vento, medida em estação meteorológica;

h = altura dada (m)

k, a = coeficientes de acordo com a rugosidade do terreno, conforme tabela 21:

TABELA 21: Coeficientes de terreno para a equação de perfil de vento

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA	k	a
Região de planície aberta	0,68	0,17
Região com rajadas esparsas de ventos	0,52	0,20
Área urbana	0,35	0,25
Metrópole	0,21	0,33

Fonte: BITTENCOURT(1993, p.128).

Tomando-se como base o valor de 6,17 m/s, correspondente a dados de velocidade de vento para o período de medição²⁹, tem-se a seguinte correção para a velocidade do vento a 300m, em área urbana:

$$V = 6,17 \times 0,35 \times 300^{0,25}$$

$$V = 8,98 \text{ m/s} \approx 9,00 \text{ m/s}$$

²⁹ Vento médio ocorrido no período de 30/04 a 04/05/98, registrado no Sumário Meteorológico Mensal do Aeroporto de Maceió.

4) Cálculo da radiação líquida disponível (R)

A radiação líquida disponível, ao nível do solo (R , em W/m^2), pode ser estimada a partir da seguinte expressão:

$$R = R_g(1 - \alpha) + I_{at} - I_s \quad (23)$$

onde:

R_g = radiação global no solo (W/m^2);

α = poder refletor da superfície ou albedo, sendo para o solo $\approx 0,25$;

I_{at} = fluxo de radiação de ondas longas da atmosfera (W/m^2);

I_s = fluxo de radiação de ondas longas, da superfície do solo (W/m^2).

A radiação global no solo (R_g) é estimada a partir da Equação de Ångström³⁰, dada por:

$$\frac{R_g}{R_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (24)$$

onde:

R_0 = radiação solar no topo da atmosfera (W/m^2);

a, b = coeficientes empíricos, resultantes de análise de regressão para o local;

n/N = razão de insolação, onde n = duração do brilho solar observado (h) e N = duração máxima de brilho solar, ou insolação máxima (em horas).

Para o presente estudo, são feitas as seguintes considerações:

³⁰ Anotações de aula do prof. Dr. Arthur Mattos, em disciplina de Hidrologia Física, EESC, USP.

- durante o período de medição, os dias foram limpos (céu claro) e, portanto, $n = N$;
- R_0 equivale à de radiação solar em superfícies horizontais, para a latitude $8^\circ S$ (GONÇALVES, 1955), tomando-se valores médios entre o equinócio de outono (22/03) e solstício de inverno (21/06);
- foram adotados os valores de $a = 0,29 \times \cos\phi$ (onde $\phi =$ latitude do local = $9,65^\circ$) e $b=0,52$, segundo McCULLOCH³¹. Portanto, tem-se para a região de estudo, $R_g = 0,81 R_0$.

O balanço de radiação de ondas longas é dado por:

$$I_{at} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 (a + b\sqrt{e}) \quad (25)$$

$$I_s = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (26)$$

onde:

ε = emissividade da superfície, muito próxima da unidade (≈ 1) e, portanto, é parcela nula na multiplicação (valor neutro);

σ = constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m².°K⁴);

T = temperatura da superfície (°K), estimada em 27°C ;

a, b = constantes de Brunt , que representam a emissividade da atmosfera (SWAID, 1991), onde $a = 0,66$ e $b = 0,039$ (TERJUNG & O'ROURKE, 1980; MYRUP, 1993);

e = pressão de vapor, em mb (umidade relativa estimada: 75%).

³¹ relação proposta por McCULLOCH. Anotações de aula do prof. Dr. Arthur Mattos, em disciplina de Hidrologia Física, EESC, USP.

A tabela 22 mostra a radiação líquida máxima (às 12:00 h) para a região de estudo.

TABELA 22 – Radiação líquida máxima (R)

	R_0	R_g	$R_g(1-\alpha)$	R
	(W/m ²)	(W/m ²)	(W/m ²)	(W/m ²)
Hora				
12: 00 h	1037,5	839,9	630,0	575,1

R_0 = radiação no topo da atmosfera; R_g = radiação global no solo; α = albedo.

A partir do valor de radiação líquida máximo, foi possível, conforme TSO et al.(1990), a obtenção de uma curva senoidal (figura 25), a partir da seguinte equação:

$$R = 575,1 \times \text{sen}(wt) \quad (24)$$

onde:

w = frequência angular, $\frac{\pi}{12}$, em 1/h;

t = tempo, em horas(h).

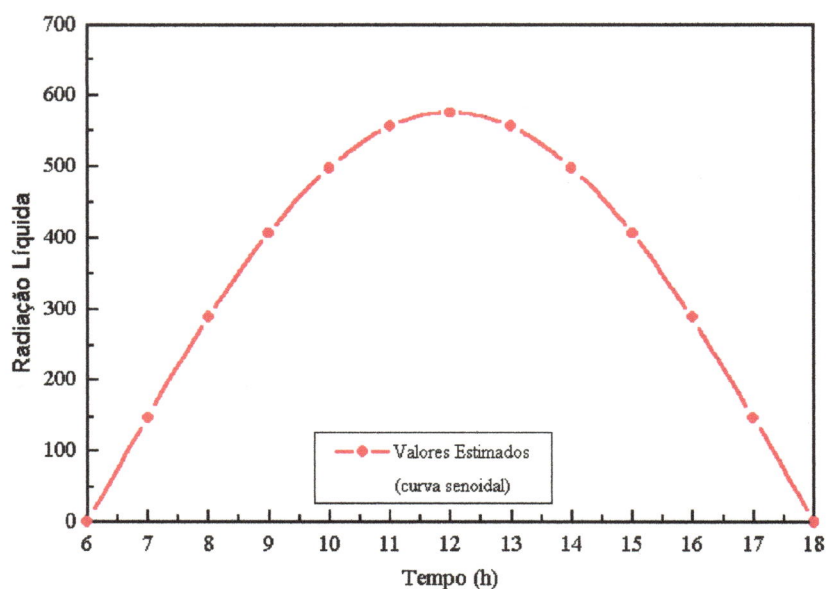


FIGURA 25 - Variação da intensidade solar

À noite, a radiação solar é ausente, e a radiação líquida corresponde ao balanço de ondas longas (I^*). Portanto, para o presente estudo, o fluxo de calor é estimado de perdas radiativas entre uma temperatura do céu à noite de -5°C – similarmente à TSO et al.(1990) –, e uma temperatura noturna da superfície do solo, T_0 , de $27,0^{\circ}\text{C}$ (estimada), a partir da seguinte equação:

$$I^* = \varepsilon \sigma (T_{\text{céu}}^4 - T_0^4) \quad (25)$$

onde:

I^* = radiação líquidas de ondas longas (W/m^2);

ε = emissividade da superfície, muito próxima da unidade (≈ 1) e, portanto, é parcela nula na multiplicação (valor neutro);

σ = constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4 \text{)}$;

T_0 = temperatura absoluta da superfície do solo (K).

$T_{\text{céu}}$ = temperatura atmosférica absoluta (K).

Como as temperaturas $T_{\text{céu}}$ e T_0 são tomadas em Kelvin, tem-se a seguinte conversão:

$$T_0 = 27,0 + 273,15 = 300,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{céu}} = -5 + 273,15 = 268,15 \text{ K}$$

Assim,

$$I^* = 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (268,15^4 - 300,15^4)$$

A estimativa de fluxo de calor total, à noite, para o caso estudado é, portanto,

$$I^* = -167,036 \text{ W/m}^2$$

O resumo final dos dados de entrada necessários para a calibração do modelo estão na tabela 23:

TABELA 23 - Parâmetros de entrada iniciais utilizados para ajuste do modelo

ITEM	PARÂMETRO	VALOR	FONTE
Ar	Calor Específico, C_p	1006 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Holman, 1983
	Densidade, ρ_a	1,177kgm ⁻³	Holman, 1983
Solo	Calor Específico, C_s	1185 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Oke, 1992
	Densidade, ρ_s	1800 kgm ⁻³	Oke, 1992
	Condutividade Térmica, k_s	1,225 Wm ⁻¹ °C ⁻¹	Oke, 1992
Concreto	Calor Específico, C_c	880 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Holman, 1983
Água	Calor Lat. Evapor., L	2,437 x 10 ⁶ Jkg ⁻¹	Oke, 1992
Outros	Massa Média de Concreto, m_c	$m_{c1} = 627,65 \text{ kg/m}^2$	Valores Calculados
		$m_{c2} = 1.211,08 \text{ kg/m}^2$	
		$m_{c3} = 420,20 \text{ kg/m}^2$	
		$m_c \text{ estação} = 10 \text{ kg/m}^2$ (valor estimado)	
	Constante de Von Kármán, K	0,4	Tso et al. 1990
	Rugosidade da Superfície, Z_0	Ponto 1 = 2	Valores adotados
		Ponto 2 = 5	
		Ponto 3 = 1,5	
		Estação = 0,6	
	Radiação Líquida, R	Valores calculados conforme fig. 25	
Altura da SBL, Z_2	300m	Tso et al. 1990	
Vel. Vento a 300m, U_2	9m/s	Valor calculado	
Temp. ar a 300m, T_2	25°C	Tso et al. 1990	
Umid. Espec. a 300m, q_2	0,003	Tso et al. 1990	
Fração da Evap. Na Sup., E_f	10%	Tso et al. 1990	
Profund. do Solo, 2d	0,20m	Tso et al. 1990	
Temp. do Solo em 2d, T_b	25°C	Tso et al. 1990	

7.2 – O AJUSTE (CALIBRAÇÃO) DO MODELO

A calibração do modelo de TSO et al. (1990) foi realizada com o programa BENERG.CPP (v. capítulo 4, item 4.3), através de procedimento de tentativa - erro, a partir do ajuste dos parâmetros de entrada às condições meteorológicas (temperaturas) e informações sobre as características locais da superfície (rugosidade, morfologia urbana, etc.), definidas no item anterior.

Para a adaptação do modelo à região em estudo, definiu-se ainda as condições iniciais de partida dadas pelas temperaturas do ar obtidas com o trabalho experimental.

Na partida do modelo, são usados os seguintes valores de T_s (temperatura do solo), T_0 (temperatura do ar) e h (hora de partida), mostrados na tabela 24:

TABELA 24: Valores de partida das variáveis

	T_0 (°C)	Partida (h)
Ponto 1	31,9	8
Ponto 2	28,5	8
Ponto 3	30,6	8
Estação	27,8	8

Iniciou-se o processo de ajuste do modelo a partir da simulação das temperaturas do ar médias da estação meteorológica, no período de 30/04 a 04/05. Feito esse ajuste, prosseguiu-se com as simulações para os pontos 1, 2 e 3.

Durante a calibração do modelo, algumas modificações nos parâmetros foram necessárias, para que se obtivesse a real correspondência entre os valores de temperatura do ar simulados e os observados:

- a fração de evaporação (E_f) para os pontos 1, 2 e 3 teve seu valor alterado, de 10% , para 7%; e, para a estação meteorológica, estimou-se em 23%;
- a velocidade do vento foi ajustada para 6,5 m/s;
- a temperatura do ar a 300m (T_2) foi ajustada, de 25°C para 27 °C;
- os valores de Z_0 para os pontos 1, 2, 3 e estação meteorológica foram ajustados para: 2,4; 4; 1,7 e 1,0, respectivamente;
- a temperatura do solo foi ajustada, de 25°C para 26°C.

7.3 - ANÁLISE DO MODELO

Após o ajuste dos parâmetros do modelo, de modo que correspondesse às condições climáticas e de superfície típicas da região em estudo, foi realizada a verificação do seu potencial frente as condições climáticas típicas da cidade de Maceió - AL, a partir da análise entre os dados observados pelo trabalho experimental - item 6.1 - e os resultados calculados (simulados).

As temperaturas do ar foram calculadas (simuladas) pelo programa BENERG.CPP para os diversos pontos medidos, caracterizados como morfologias urbanas distintas da região estudada, para o período de observação de 30/04/98 a 04/05/98 (temperaturas médias), de 8:00h às 21:00h.

7.3.1 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBSERVADOS E CALCULADOS

Em geral, a comparação entre dados observados e calculados mostrou boa correspondência entre o modelo e as medições, demonstrando o efeito diferenciado da temperatura do ar para as diversas tipologias de uso do solo estudadas.

As figuras 26 a 29 e as tabelas 25 a 28 mostram as comparações entre as temperaturas médias do ar observadas e simuladas, para os diversos pontos estudados, e para a estação meteorológica. Note-se que a concordância é muito boa, considerando-se os valores aproximados (ou considerados do modelo original), além da estimativa de cálculo de diversos parâmetros de entrada.

De acordo com os gráficos e tabelas apresentados, pode-se observar que as simulações realizadas com o ponto de observação 2 e com a estação meteorológica obtiveram menor e maior erro, respectivamente. Isso, provavelmente, mostra a tendência do modelo de responder bem para frações urbanas com maior presença de massa edificada.

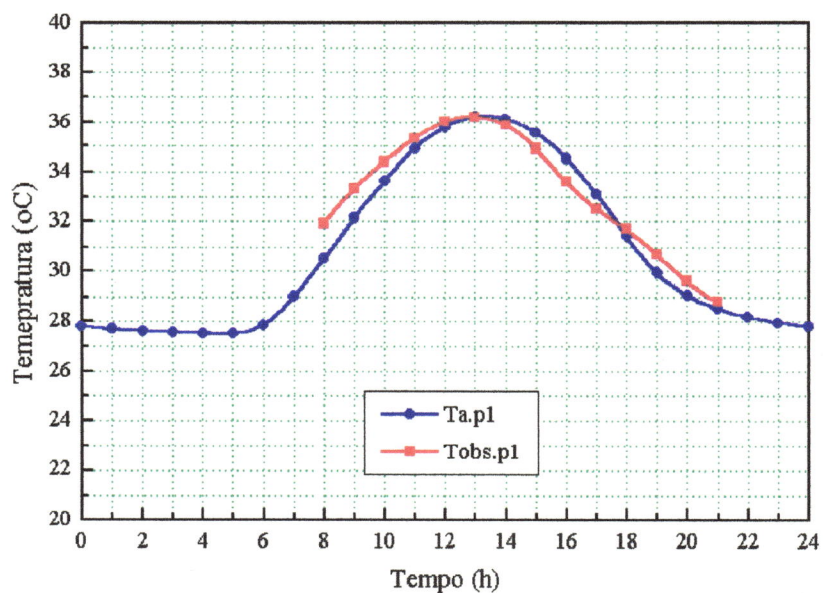


FIGURA 26 - comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação

1. T_{ap1} = temperatura do ar calculada (simulada); $T_{obs.p1}$ = temperatura do ar observada (medida).

**TABELA 25 - Temperaturas médias calculadas e observadas
ponto 1 de observação**

HORA (h)	TEMP. CALC. (°C)	TEMP. OBS. (°C)	DIF. $T_{CALC} - T_{OBS}(°C)$	ERRO (%)
8:00	30,5	31,9	-1,4	-4,39
9:00	32,1	33,3	-1,2	-3,57
10:00	33,6	34,4	-0,7	-1,95
11:00	34,9	35,3	-0,4	-1,13
12:00	35,8	36,0	-0,2	-0,61
13:00	36,2	36,2	0,0	0,03
14:00	36,1	35,9	0,2	0,67
15:00	35,6	34,9	0,7	1,89
16:00	34,5	33,6	0,9	2,77
17:00	33,1	32,5	0,6	1,91
18:00	31,4	31,7	-0,3	-0,82
19:00	29,9	30,7	-0,8	-2,48
20:00	29,1	29,6	-0,5	-1,76
21:00	28,5	28,8	-0,3	-0,90
MÉDIA	33,0	33,2	-0,2	-0,74

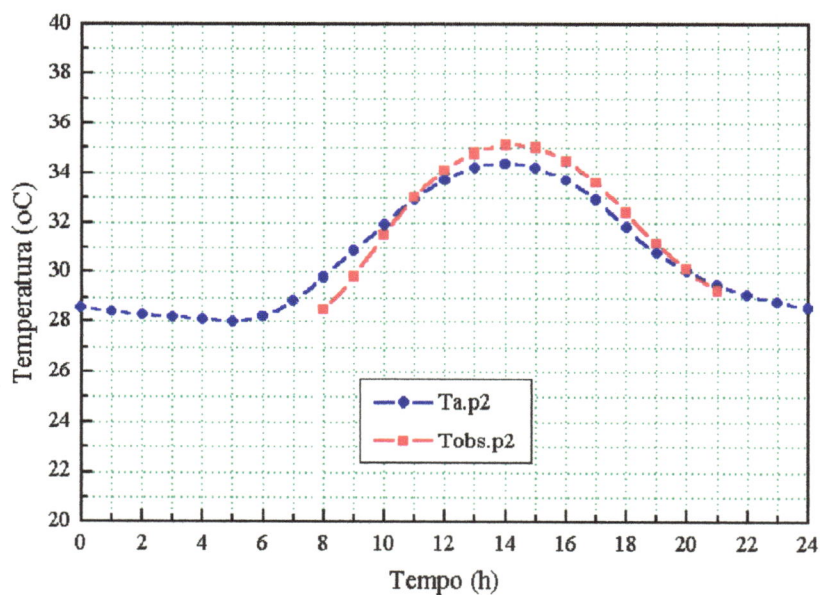


FIGURA 27 - comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação 2, T_{ap2} = temperatura do ar calculada (simulada) e $T_{obs.p2}$ = temperatura do ar observada (medida).

**TABELA 26 - Temperaturas médias calculadas e observadas
ponto 2 de observação**

HORA (h)	TEMP. CALC. (°C)	TEMP. OBS. (°C)	DIF. $T_{CALC} - T_{OBS}(°C)$	ERRO(d) (%)
8:00	29,8	28,5	1,3	4,56
9:00	30,8	29,8	1,0	3,36
10:00	31,9	31,5	0,4	1,27
11:00	32,9	33,0	-0,1	-0,30
12:00	33,7	34,1	-0,4	-1,17
13:00	34,2	34,8	-0,6	-1,72
14:00	34,4	35,1	-0,7	-1,99
15:00	34,2	35,0	-0,8	-2,29
16:00	33,7	34,5	-0,8	-2,32
17:00	32,9	33,6	-0,7	-2,08
18:00	31,8	32,4	-0,6	-1,85
19:00	30,8	31,2	-0,4	-1,28
20:00	30,1	30,1	0,0	0,00
21:00	29,5	29,3	0,2	-0,68
MÉDIA	32,2	32,4	-0,16	-0,37

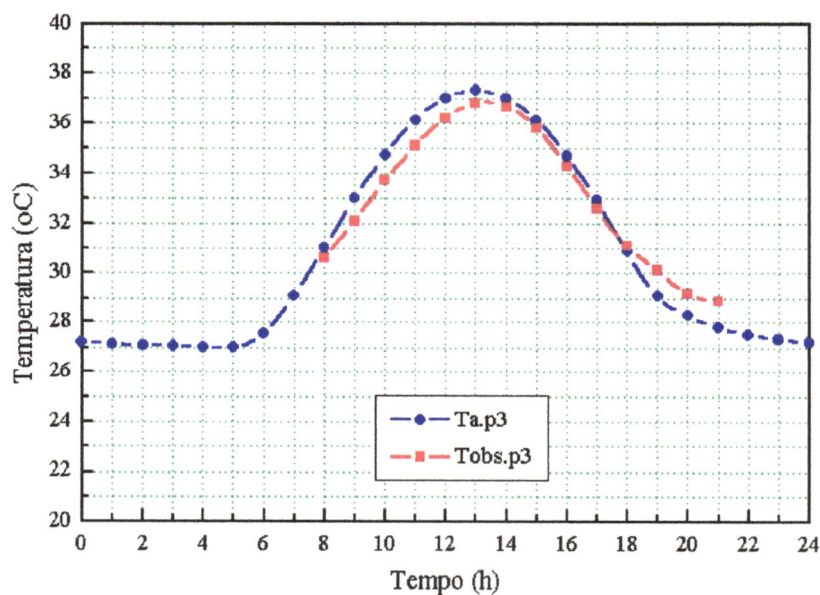


FIGURA 28 - comparação entre as temperaturas do ar observadas e simuladas do ponto de observação 3. T_{ap3} = temperatura do ar calculada (simulada) e T_{obs.p3} = temperatura do ar observada (medida).

**TABELA 27 - Temperaturas médias calculadas e observadas
ponto 3 de observação**

HORA (h)	TEMP. CALC. (°C)	TEMP. OBS. (°C)	DIF. T _{CALC} - T _{OBS} (°C)	ERRO (%)
8:00	31,0	30,6	0,4	-1,31
9:00	33,0	32,1	0,9	2,80
10:00	34,7	33,7	1,0	2,97
11:00	36,1	35,1	1,0	2,85
12:00	37,0	36,2	0,8	2,21
13:00	37,3	36,8	0,5	1,36
14:00	37,0	36,7	0,3	0,82
15:00	36,1	35,8	0,3	0,84
16:00	34,7	34,3	0,4	1,17
17:00	32,9	32,6	0,3	0,92
18:00	30,8	31,1	-0,3	-0,97
19:00	29,1	30,1	-1,0	-3,32
20:00	28,3	29,2	-0,9	-3,08
21:00	27,8	28,9	-1,1	-3,81
MÉDIA	33,3	33,1	0,19	-0,43

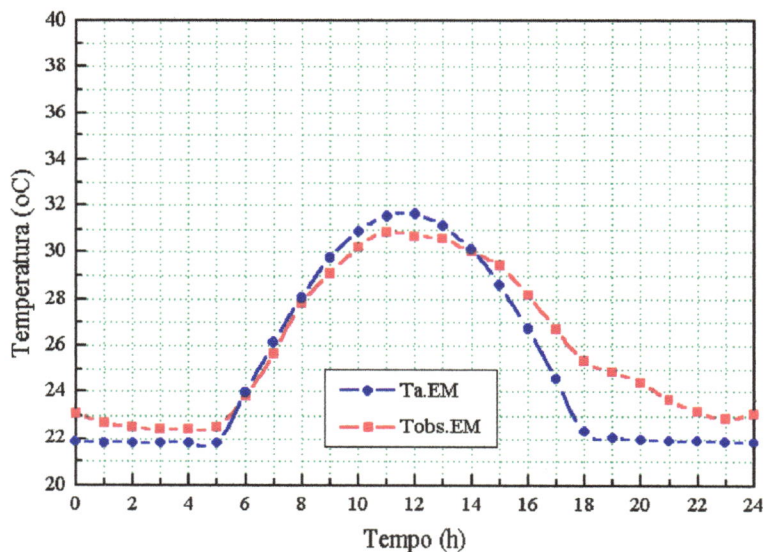


FIGURA 29 - comparação entre as temperaturas observadas e simuladas da estação meteorológica, onde: $T_{a.EM}$ = temperatura do ar calculada (simulada) e $T_{obs.EM}$ = temperatura do ar observada (medida).

**TABELA 28 - Temperaturas médias calculadas e observadas
estação meteorológica**

HORA (h)	TEMP. CALC. (°C)	TEMP. OBS. (°C)	DIF. $T_{CALC} - T_{OBS}(°C)$	ERRO(d) (%)
8:00	28,1	27,8	0,3	1,08
9:00	29,7	29,1	0,6	2,06
10:00	30,9	30,2	0,7	2,32
11:00	31,6	30,9	0,7	2,27
12:00	31,7	30,7	1,0	3,26
13:00	31,2	30,6	0,6	1,96
14:00	30,1	30,0	0,1	0,33
15:00	28,6	29,4	-0,8	-2,72
16:00	26,7	28,2	-1,5	-5,32
17:00	24,6	26,7	-2,1	-7,87
18:00	22,3	25,4	-3,1	-12,21
19:00	22,1	24,9	-2,8	-11,25
20:00	22,0	24,4	-2,4	-9,84
21:00	21,9	23,7	-1,8	-7,60
MÉDIA	27,3	28,0	-0,75	-3,11

A figura 30 mostra a comparação entre os resultados simulados de temperatura do ar, para os três pontos em estudo, e para a estação meteorológica. Apresenta também a curva de temperatura (média ponderada) imaginando-se que as frações urbanas formam uma só região.

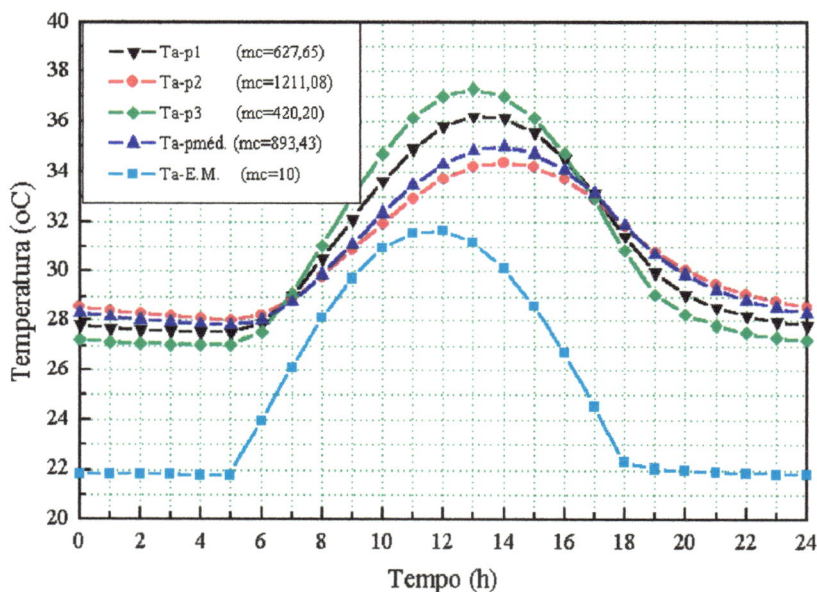


FIGURA 30 - comparação entre as temperaturas do ar simuladas para os diversos pontos de observação e estação meteorológica e suas respectivas massas de concreto (m_c em kg/m^2), onde: T_{a-p1} = temperatura simulada do ponto1; T_{a-p2} = temperatura simulada do ponto2; T_{a-p3} = temperatura simulada do ponto3; $T_{a-pméd}$ = temperatura média simulada dos pontos; T_{a-EM} = temperatura simulada da estação meteorológica.

Portanto, já que não foram observadas grandes alterações de temperatura do ar entre os diversos pontos durante as medições, considerou-se ainda, para novas simulações, uma única região formada pelas três frações urbanas, e para nova partida no modelo, calculou-se a média ponderada (através das áreas das frações urbanas) das temperaturas do ar às 8 horas (hora de partida), massas de concreto e rugosidades dos 3 pontos de medição. Tais valores são mostrados na tabela 29:

TABELA 29: Valores de partida das variáveis

PONTO	Z_0 (m)	T_0 (°C)	Partida (h)	m_C
1	2,4	31,2	8	627,65
2	4	29,1	8	1.211,08
3	1,7	29,5	8	420,20
MÉDIA PONDERADA	3,14	29,9	-	893,43

Os resultados da nova simulação com a média ponderada dos pontos são mostrados na figura 31 e tabela 30. Observe-se a boa concordância entre os dados observados e calculados.

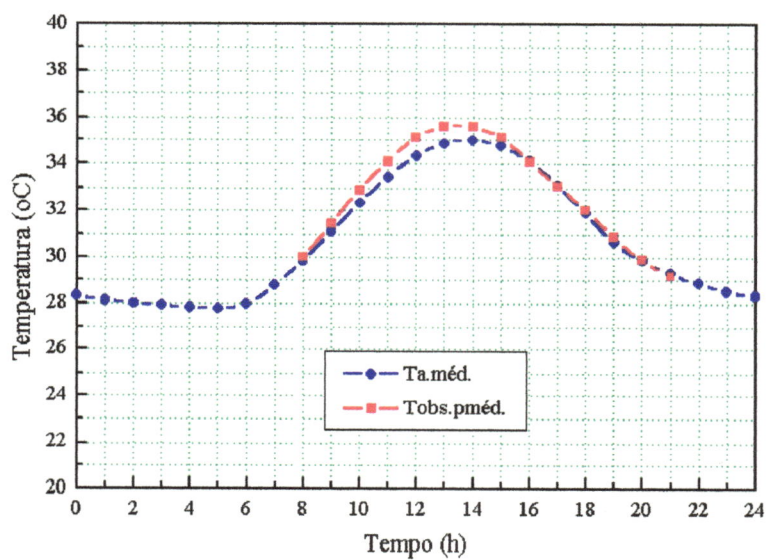


FIGURA 31 - comparação entre as médias ponderadas de temperaturas do ar observadas e simuladas dos pontos de observação, onde: $T_{a.méd.}$ = temperatura média calculada (simulada) e $T_{obs.pméd.}$ = temperatura média observada (medida).

**TABELA 30 - Temperaturas calculadas e observadas
médias ponderadas dos pontos**

HORA	TEMP. CALC.	TEMP. OBS.	DIF.	ERRO(d)
(h)	(°C)	(°C)	$T_{\text{CALC}} - T_{\text{OBS}}(^{\circ}\text{C})$	(%)
8:00	29,9	30,0	-0,1	-0,33
9:00	31,1	31,4	-0,3	-0,96
10:00	32,3	32,9	-0,6	-1,82
11:00	33,5	34,1	-0,6	-1,76
12:00	34,3	35,1	-0,8	-2,28
13:00	34,9	35,6	-0,7	-1,97
14:00	35,0	35,6	-0,6	-1,69
15:00	34,8	35,1	-0,3	-0,86
16:00	34,1	34,1	0	0
17:00	33,1	33,1	0,61	1,84
18:00	31,9	32,0	-0,1	-0,31
19:00	30,7	30,9	-0,2	-0,65
20:00	29,9	29,9	0	0
21:00	28,3	29,2	0,1	0,34
MÉDIA	32,5	32,8	-0,26	-0,75

A tabela 31 traz uma comparação estatística para a variável temperatura do ar média medida e calculada, tomando-se toda a área como uma única região, que inclui média (X); desvio padrão (s), variância e Coeficiente de Correlação.

TABELA 31 - Comparação estatística entre temperaturas calculadas e observadas

	TEMP. OBS.	TEMP. CALC.
	(°C)	(°C)
média	32,79	32,53
desvio padrão	2,16	1,98
Variância	4,65	3,92
Coeficiente de. Correlação	0,988	

O modelo gerou, ainda, respostas para os componentes do balanço de energia para cada situação estudada (pontos 1, 2 e 3; estação meteorológica e média ponderada dos pontos), mostradas nas figuras 32, 33, 34, 35 e 36. Note-se que há variação significativa, entre as diferentes situações simuladas, para a parcela M de armazenamento de energia (positivo durante a manhã e, por volta de 13:00h até 18:00h, há liberação de energia), que está diretamente relacionada com as diferentes massas de construção. Esse resultado já era de se esperar, já que os pontos de medição são contíguos, havendo diferença significativa entre eles quanto à tipologia diferenciada de construção.

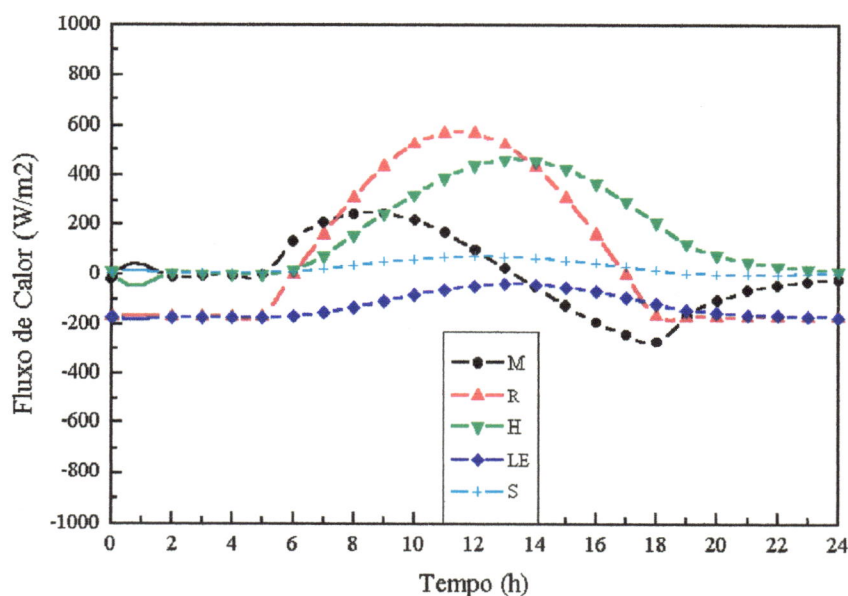


FIGURA 32 - Componentes Calculadas do Balanço de Energia - ponto 1, onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; LE = fluxo de calor latente e S = fluxo de calor no solo. (unidades utilizadas: W / m^2).

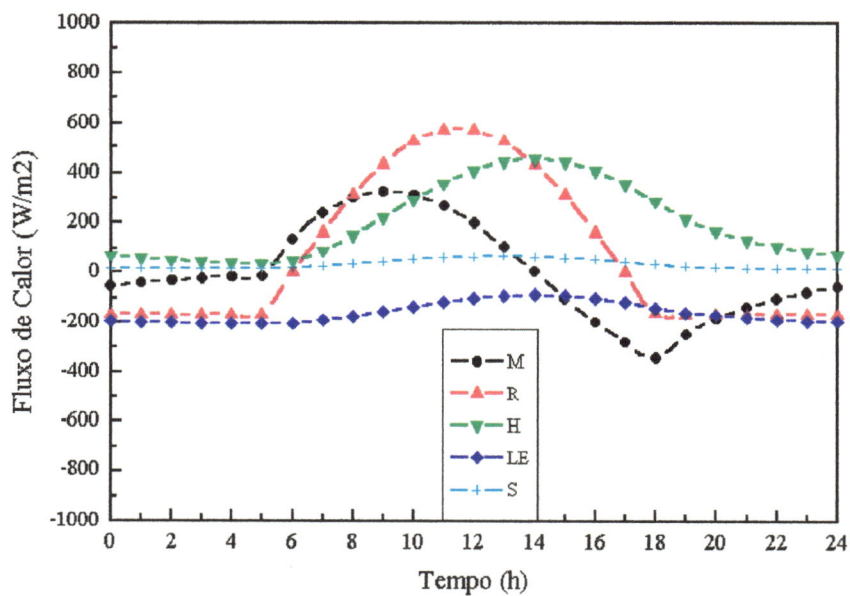


FIGURA 33 - Componentes Calculadas do Balanço de Energia - ponto 2, onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; LE = fluxo de calor latente e S = fluxo de calor no solo. (unidades utilizadas: W / m^2).

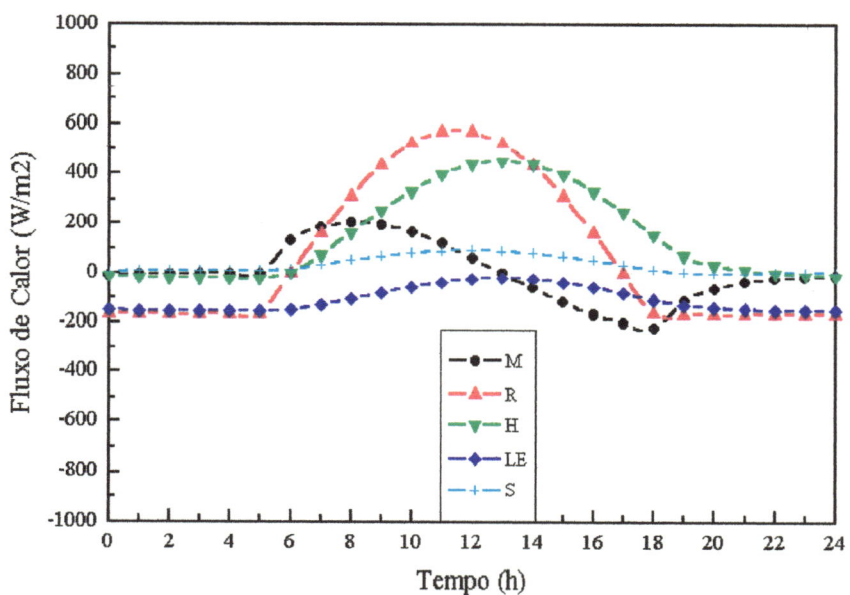


FIGURA 34 - Componentes Calculadas do Balanço de Energia - ponto 3, onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; LE = fluxo de calor latente e S = fluxo de calor no solo. (unidades utilizadas: W / m^2).

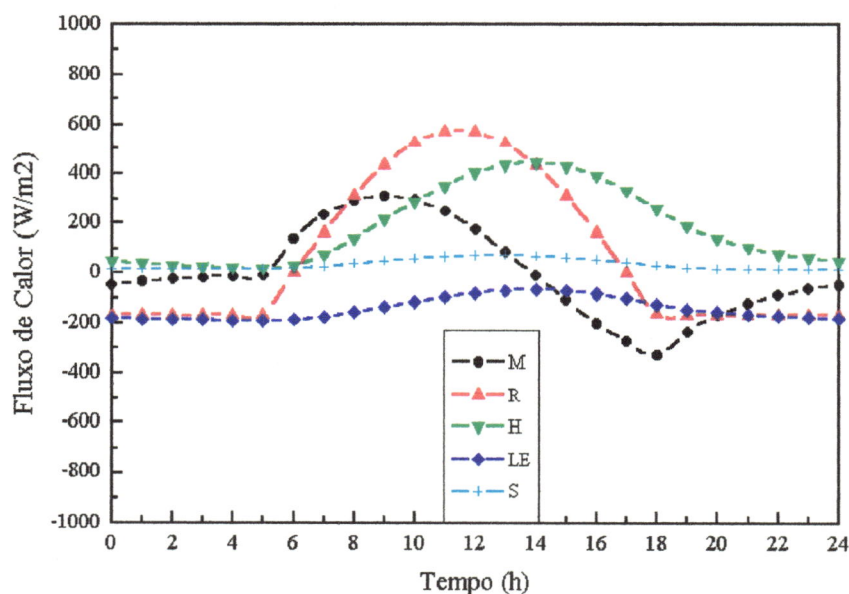


FIGURA 35 - Componentes Calculadas do Balanço de Energia - média ponderada dos pontos, onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; LE = fluxo de calor latente e S = fluxo de calor no solo. (unidades utilizadas: W / m^2).

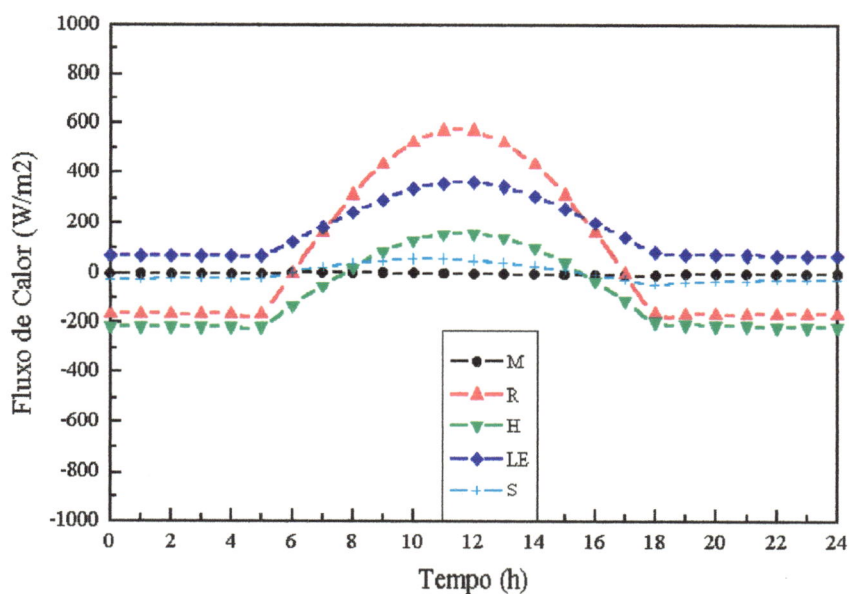


FIGURA 36 - Componentes Calculadas do Balanço de Energia - estação meteorológica, onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; LE = fluxo de calor latente e S = fluxo de calor no solo. (unidades utilizadas: W / m^2).

7.3.2 - SIMULAÇÃO DE SITUAÇÕES FUTURAS

Alguns testes simulando possíveis situações futuras de configuração urbana para os pontos 1 e 3, como o aumento da massa construída (resultante de possível verticalização dessas áreas) e conseqüente aumento do comprimento de rugosidade, mostram comportamento diferenciado da curva de temperatura diária do ar, resultando em diminuição e deslocamento do valor da temperatura máxima, como mostram as tabelas 32 e 33, e figuras 37 e 38, além de menor resfriamento das superfícies após o pôr do sol.

TABELA 32: Valores de partida

ponto 3 - situação futura

	Situação atual	Situação futura
Z_0 (m)	1,7	4
m_C (kg/m^2)	420, 20	1300
Partida (h)	8	8

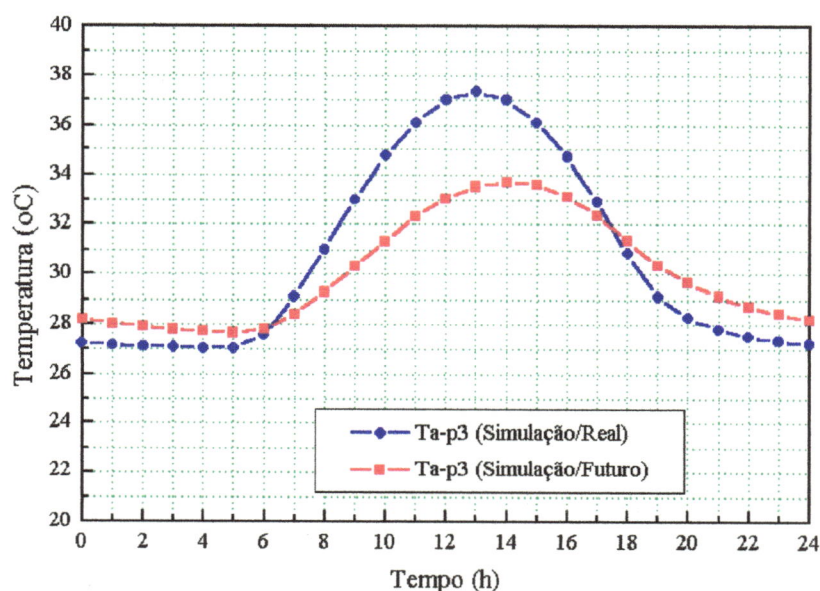


FIGURA 37 - simulação de situação futura - ponto 3, onde: Ta-p3 (Sim./Real) = temperatura do ar simulada média do ponto 3; Ta-p3 (Sim./Futuro) = temperatura do ar simulada - situação futura.

TABELA 33: Valores de partida
ponto 1 - situação futura

	Situação atual	Situação futura
Z_0 (m)	2,4	4
m_C (kg/m ²)	627,65	1300
Partida (h)	8	8

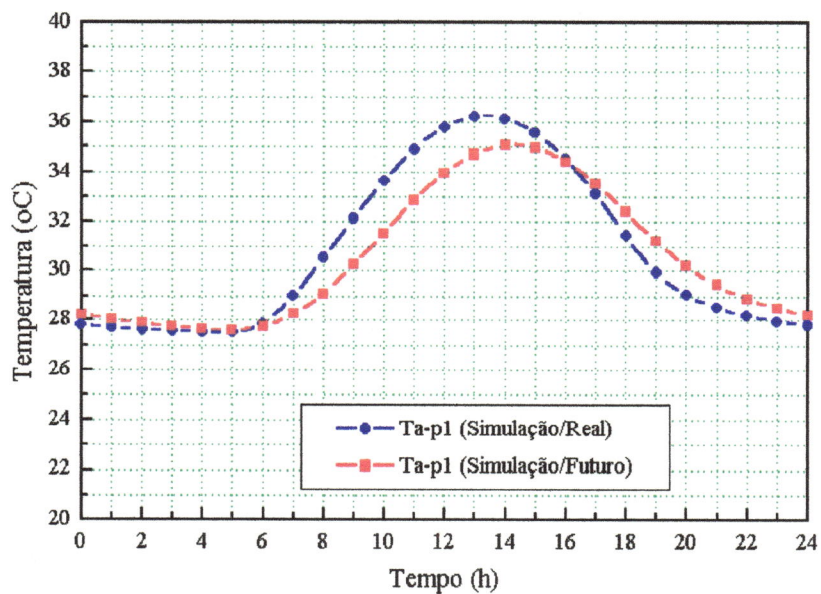


FIGURA 38 - simulação de situação futura - ponto 1, onde: Ta-p1 (Sim./Real) = temperatura do ar simulada média do ponto 1; Ta-p1 (Sim./Futuro) = temperatura do ar simulada - situação futura.

A simulação de situação futura para o ponto 2, aumentando a porcentagem de E_f , mostra a diminuição dos valores de temperatura do ar, ao longo de toda a curva, conforme tabela 34 e figura 39.

TABELA 34: Valores de partida
ponto 2 - situação futura

	Situação atual	Situação futura
Z_0 (m)	4	4
m_C (kg/m ²)	1.211,08	1.211,08
E_f (%)	7%	15%

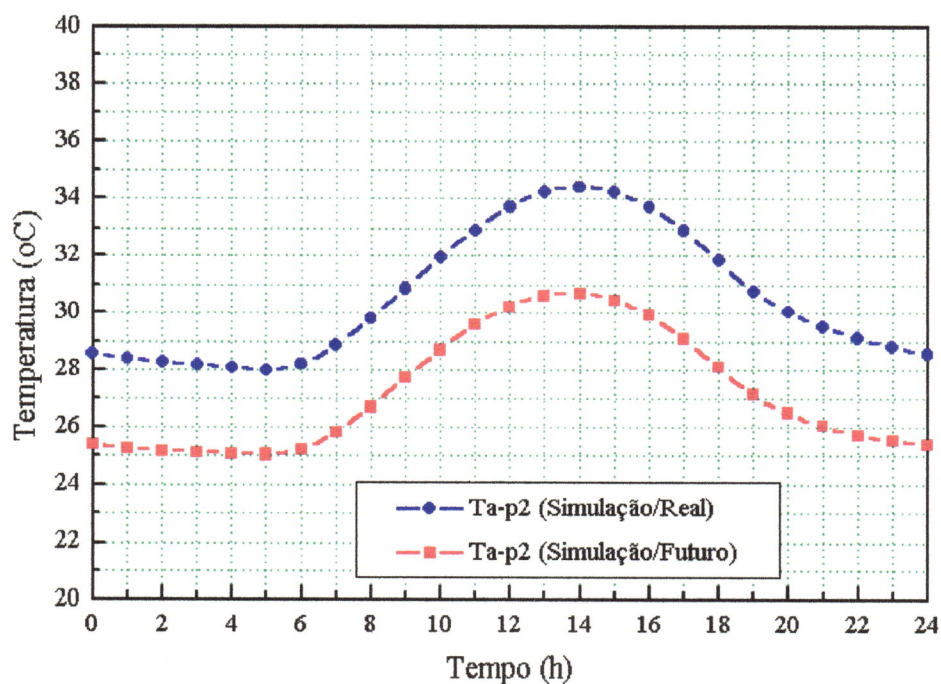


FIGURA 39 - simulação de situação futura - ponto 2, onde: Ta-p2 (Sim./Real)= temperatura do ar simulada média do ponto 2; Ta-p2 (Sim./Futuro) = temperatura do ar simulada - situação futura.

7.3.3 - TESTES DE SENSIBILIDADE

Sabe-se que um modelo pode ser avaliado em termos da realidade física dos seus resultados. Isso, porém, não é fácil, devido à complexidade das relações entre as variáveis e parâmetros, que freqüentemente torna difícil uma avaliação exata do que afeta determinada mudança, em um dado parâmetro.

Segundo ROSS & OKE(1988), a análise de sensibilidade é importante, desde que haja incerteza sobre valores a serem considerados a alguns dos parâmetros de entrada. Portanto, é útil que se conheça o quanto uma variação particular afeta a resposta de um modelo.

Assim, após a comprovação da capacidade do programa BENERG.CPP de prever, com resultados satisfatórios, as temperaturas do ar dos ambientes urbanos estudados, procedeu-se o exame da dependência da variável temperatura do ar a alguns parâmetros de entrada do modelo, na forma de testes de sensibilidade.

Esses testes tiveram a finalidade de explorar a resposta do modelo a mudanças nos diversos parâmetros de entrada, a partir dos valores - base do ponto que representa a média ponderada das três frações urbanas, conforme a tabela 35 a seguir.

**TABELA 35 - Parâmetros de entrada incluindo valores médios
utilizados para testes de sensibilidade com o modelo**

ITEM	PARÂMETRO	VALOR	FONTE
Ar	Calor Específico, C_p	1006 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Holman, 1983
	Densidade, ρ_a	1,177kgm ⁻³	Holman, 1983
Solo	Calor Específico, C_s	1185 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Oke, 1992
	Densidade, ρ_s	1800 kgm ⁻³	Oke, 1992
	Condutividade Térmica, K_s	1,225 Wm ⁻¹ °C ⁻¹	Oke, 1992
Concreto	Calor Específico, C_c	880 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹	Holman, 1983
Água	Calor Lat. Evapor., L	2,437 x 10 ⁶ Jkg ⁻¹	Oke, 1992
Outros	Massa Média de Concreto, m_c	$m_{c1} = 893,43\text{kg/m}^2$	Valor Calculado
	Constante de Von Kármán, K	0,4	Tso et al.1990
	Rugosidade da Superfície, Z_0	Ponto Médio = 3,14	Valor Calculado
	Radiação Líquida, R	Valores calculados conforme tab.22	
	Altura da SBL, Z_2	300m	Tso et al.1990
	Vel. Vento a 300m, U_2	6,5ms ⁻¹	Valor Estimado
	Temp. ar a 300m, T_2	27,5°C	Tso et al.1990
	Umid. Espec. a 300m, q_2	0,003	Tso et al.1990
	Fração da Evap. Na Sup., E_f	7%	Tso et al.1990
	Profund. do Solo, 2d	0,20m	Tso et al.1990
Temp. do Solo em 2d, T_b	26°C	Tso et al.1990	

São mostrados a seguir, nas figuras 40 a 45 e tabelas 36 a 41, testes onde uma variação em um determinado parâmetro de entrada do modelo causou desvios consideráveis (ou não) às temperaturas do ar (máximas e mínimas) calculadas (ou fluxos de calor), em relação ao seu valor inicial.

Na figura 40 e tabela 36, tem-se o resultado da simulação de temperatura do ar para diferentes valores de velocidade do vento a 300m do solo (U_2). Note-se que, à medida que os valores desse parâmetro aumentam, diminuem os valores de temperatura máxima, sendo que estas sofrem maior variação até a faixa de 9m/s. As temperaturas mínimas, por outro lado, têm seus valores diminuídos até $U_2=4,5$ m/s, voltando a aumentar a partir daí.

É interessante notar ainda que, à medida que os valores de U_2 aumentam, diminui a hora em que ocorre a temperatura máxima (retardo térmico), comprovando a sensibilidade do modelo para o efeito de maior resfriamento com uma maior velocidade do vento.

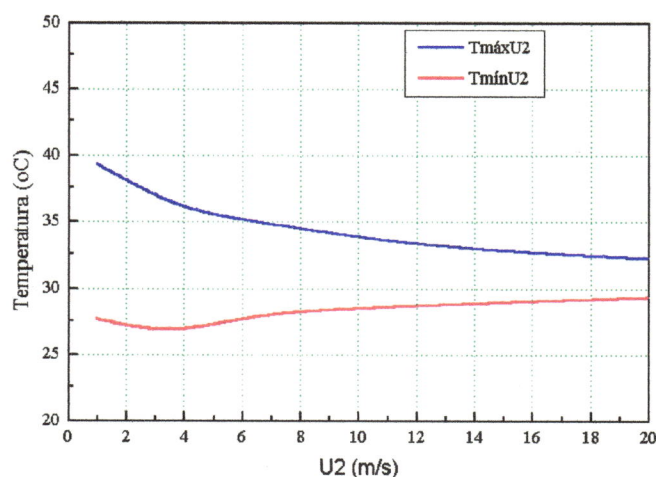


FIGURA 40 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de U_2 (m/s)

TABELA 36 - Testes de sensibilidade com o parâmetro U_2 (m/s)

Valores de U_2 (m/s)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	Retardo térmico (h)
1	39,3	27,6	16
3,25	36,7	26,9	15
6,5	35,0	27,8	14
9,75	33,9	28,4	13
20	32,2	29,3	13

Os resultados de temperatura do ar simuladas para diferentes valores de comprimento de rugosidade Z_0 (m) são mostrados na fig. 41 e tabela 37, onde percebe-se a diminuição dos valores de temperatura máxima, à medida que os valores de Z_0 aumentam. A temperatura mínima aumenta à medida que a rugosidade aumenta. O retardo térmico diminui, à medida que aumentam os valores de Z_0 para a faixa considerada.

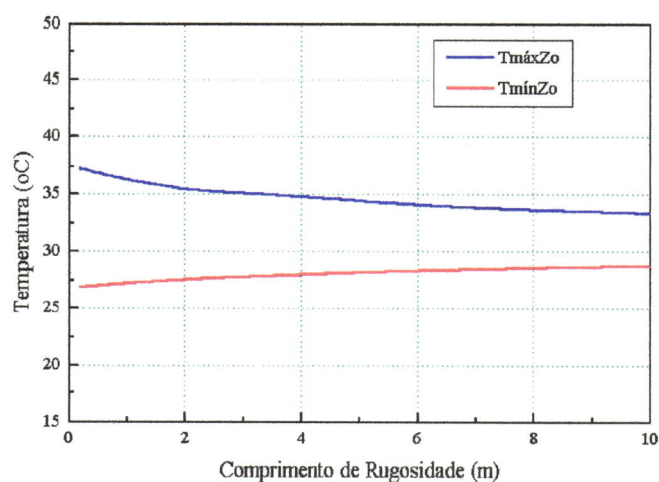


FIGURA 41 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de Z_0 (m)

TABELA 37 - Testes de sensibilidade com o parâmetro Z_0 (m)

Valores de Z_0 (m)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Retardo térmico (h)
0,2	37,3	26,9	15
1,57	35,8	27,4	14
3,14	35,0	27,8	14
4,71	34,5	28,1	14
10,0	33,4	28,7	13

Os testes de sensibilidade realizados com o parâmetro massa de concreto (m_c em kg/m^2) mostram pequena variação da temperatura do ar, especialmente a temperatura mínima (ver figura 42 e tabela 38). De qualquer forma, a variável temperatura do ar diminui seus valores máximos, à medida que aumenta a massa de concreto, retardando ainda, para mais tarde, o horário do valor da temperatura máxima registrada. A temperatura mínima, por outro lado, tem seus valores aumentados, para a mesma faixa de variação do parâmetro.

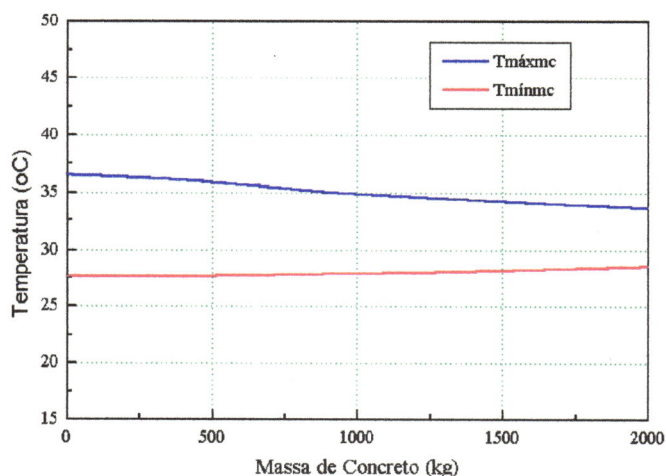


FIGURA 42 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de m_c (kg/m^2)

TABELA 38 - Testes de sensibilidade com o parâmetro

m_c (kg/m^2)			
Valores de m_c (kg/m^2)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Retardo térmico (h)
0	36,5	27,6	12
446.7	36,0	27,6	13
893.4	35,0	27,8	14
1340.15	34,4	28,0	14
2000.0	33,6	28,5	15

Os testes de sensibilidade com a temperatura do ar a 300m (T_2 em °C) e umidade específica a 300m (q_2), de acordo com as figuras 43 e 44 e tabelas 39 e 40, mostram um aumento de temperaturas máximas e mínimas simuladas, à medida que aumentam os valores desses parâmetros. Nenhuma influência há, entretanto, no retardo térmico da temperatura máxima diária, nessa mesma faixa de variação.

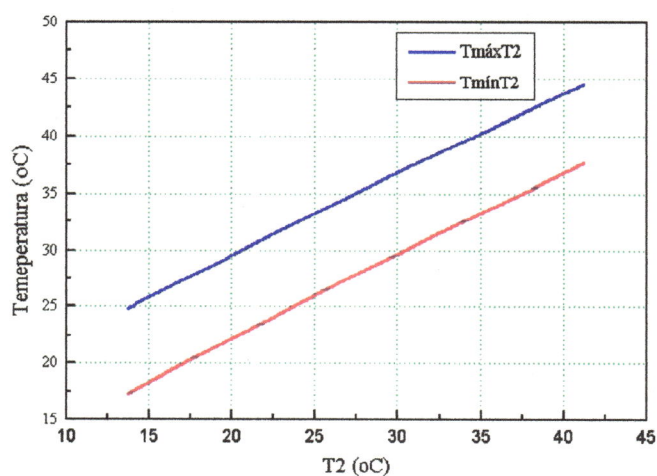


FIGURA 43 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de T_2 (°C).

TABELA 39 - Testes de sensibilidade com o parâmetro T_2 (°C).

Valores de T_2 (°C).	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	Retardo térmico (h)
13,75	24,8	17,3	14
27,5	35,0	27,8	14
41,25	44,5	37,6	14

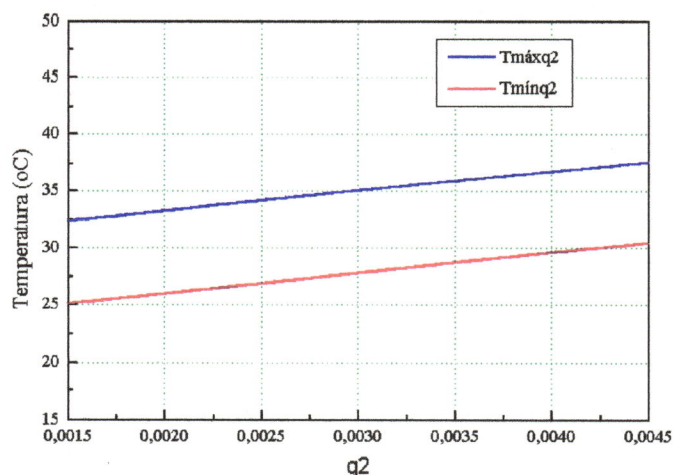


FIGURA 44 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de q_2

TABELA 40 - Testes de sensibilidade com o parâmetro q_2

Valores de q_2	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Retardo térmico (h)
0,0015	32,4	25,1	14
0,003	35,0	27,8	14
0,0045	37,6	30,4	14

Para fração de evaporação (E_f em %), a figura 45 e tabela 41 mostram uma diminuição das temperaturas máximas e mínimas do ar, para um aumento nos valores desse parâmetro, não havendo, do mesmo modo que para a temperatura do ar a 300m (T_2 em °C) e umidade específica (q_2) para a mesma altitude, alterações no retardo térmico da máxima temperatura diária.

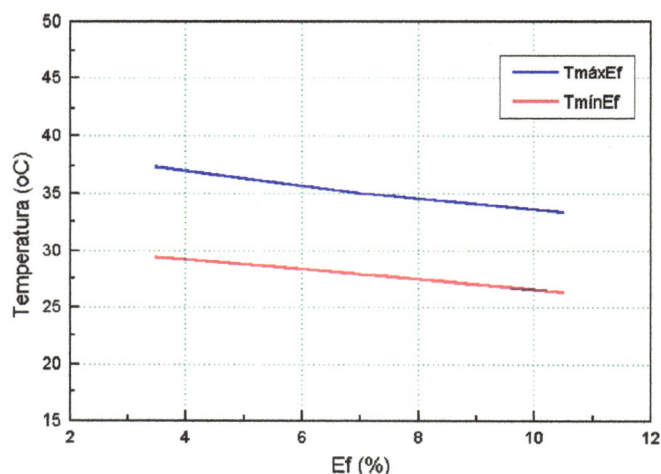


FIGURA 45 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para diferentes valores de E_f (%).

TABELA 41 - Testes de sensibilidade com o parâmetro

E_f (%)			
Valores de E_f (%)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	Retardo térmico (h)
3,5	37,4	29,4	14
7	35,0	27,8	14
10,5	33,3	26,3	14

A tabela 42 mostra o resumo das mudanças na resposta do modelo, mais precisamente o efeito na temperatura máxima - tomada como valor de referência -, face à variação de $\pm 50\%$ dos parâmetros estudados.

Observou-se que a massa de construção (m_c em kg/m^2) é o parâmetro menos sensível a essa faixa de variação (aproximadamente 2% de mudança na temperatura máxima do ar), seguida, em ordem crescente, pela rugosidade Z_0 (m); fração de evaporação E_f (%); velocidade do vento a 300m (U_2 em m/s), umidade específica a 300m (q_2) e temperatura a 300m (T_2 em °C) - este último parâmetro apresentando uma mudança de aproximadamente $\pm 25\%$ na temperatura máxima do ar.

TABELA 42 - Análise de sensibilidade para a temperatura máxima

PARÂMETRO	QUANTIDADE DE REFERÊNCIA	VARIAÇÃO DE 50%	EFEITO NA TEMPERATURA MÁXIMA
Velocidade do vento, U_2 (m/s)	6,5m/s	3,25 - 9,75 m/s	36,7°C - 33,9°C (+4,86% a -3,14%)
Comprimento de rugosidade, Z_0 (m)	3,14 m	1,57 - 4,71m	35,8°C - 34,5°C (+2,28% a -1,42%)
Massa de concreto m_c , kg/m^2	893,43 kg/m^2	446,72 - 1340,15 kg/m^2	36,0°C - 34,4°C (+2,86% a -1,71%)
Temperatura T_2 , °C	27,5°C	13,75 - 41,25°C	24,8°C - 44,5°C (-29,14% a +27,14%)
Umidade específica, q_2	0,003	0,0015 - 0,0045	32,4°C - 37,6°C (-7,43% a +7,43%)
Fração de Evaporação, E_f (%)	7%	3,5 - 10,5%	37,4°C - 33,3°C (+6,86% a -4,86%)

7.4 - AVALIAÇÃO DO MODELO

Dentro dos objetivos a que se propôs o trabalho, e após a devida calibração, o modelo apresentou boa correspondência com os dados observados em campo. Por outro lado, cabe uma discussão sobre a aplicabilidade prática dessa ferramenta como auxiliar nos trabalhos de planejamento urbano, mais especificamente quanto às variáveis e parâmetros requeridos para a aplicação do modelo.

De um modo geral, o modelo é de fácil aplicação, embora solicite grande quantidade de parâmetros de entrada. Fixando-se uma parte desses parâmetros relativos a características térmicas do ar, solo, concreto e água, além de constantes termodinâmicas (ver tabela 23), resta o cálculo da quantidade específica de massa de concreto da área a ser estudada, rugosidade

da superfície, velocidade do vento, radiação líquida e estimativas das demais variáveis e parâmetros. Para partida do modelo, necessita-se unicamente do valor de temperatura do ar, em um dado instante, do local que se deseja trabalhar.

É importante observar, porém, que o modelo foi testado e calibrado para a cidade de Maceió, e não para outras localidades, com características climáticas diferenciadas, especialmente quanto à umidade do ar e amplitude térmica anual e sazonal.

Quanto às suas limitações, é importante salientar que o modelo não considera, entre outros fatores, a contribuição do calor antropogênico no ambiente térmico da cidade e possíveis efeitos de nebulosidade. Admite, ainda, uma única temperatura de equilíbrio da superfície, e não considera a complexidade geométrica de uma estrutura urbana.

Por outro lado, o modelo inclui o cálculo da massa de construção urbana, importante parâmetro na determinação da influência da morfologia urbana nas condições térmicas de um determinado local, além de considerar, de alguma forma, o efeito climático de áreas verdes (através do parâmetro E_f).

Estudos recentes mostram que a massa construída pode ser incorporada a trabalhos relacionados com simulação do ambiente térmico urbano (TSO, 1997), restando, ainda, melhoramentos na detecção e previsão de efeitos de diversas naturezas de intervenção urbana no meio ambiente.

A falta de instrumental adequado para a medição dos componentes de balanço de energia, como o fluxo de calor por radiação e fluxo de calor sensível não permitiram a total avaliação do potencial do modelo. Do mesmo modo, e por ser um modelo de macroescala, os resultados encontrados, para uma mesma região estudada - a baixada litorânea de Maceió -, não permitiram avaliar totalmente o alcance dessa ferramenta para outras condições microclimáticas mais diferenciadas dentro da cidade, já que não foi claramente observada variabilidade excessiva horária nos pontos estudados.

De qualquer forma, o modelo mostrou-se sensível, mesmo às pequenas variações observadas, e aos objetivos a que se propôs a pesquisa, podendo, portanto, ser útil no teste de soluções e previsões dentro de trabalhos relativos ao planejamento e controle térmico de ambientes urbanos.

Do mesmo modo, as simulações de situações futuras realizadas nas frações estudadas mostram claramente o potencial do modelo na previsão de possíveis mudanças térmicas em consequência das mudanças de urbanização a que estão sujeitas as cidades.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com o trabalho apresentado, pôde-se constatar a influência das áreas urbanas estudadas sobre a temperatura do ar na cidade de Maceió-AL, comprovada de modo quantitativo através da análise térmica obtida pelo trabalho experimental e da simulação do modelo de balanço de energia adaptado para as condições climáticas da cidade.

Os resultados apresentados pela análise térmica demonstraram diferenças significativas de temperatura das frações urbanas estudadas, para o período de 8:00h às 21:00h, em relação à estação meteorológica, comprovando o aumento da temperatura do ar na cidade, devido à urbanização.

Por outro lado, foram observadas pequenas alterações de temperatura do ar, em valores absolutos, entre as frações urbanas de morfologia diferenciada em uma mesma região da cidade, comportamento próprio de localidades com umidades relativas altas sazonais e anuais, onde há pouca influência da estrutura vertical urbana.

A análise térmica obtida através do trabalho experimental procurou enfatizar a importância de algumas considerações que devem ser levadas em conta em planejamento de espaços urbanos, como a influência de um maior

adensamento no aumento da temperatura do ar e a importância do sombreamento dos espaços na amenização de condições microclimáticas urbanas locais.

Entre as três frações estudadas na área urbana de Maceió, a mais verticalizada apresentou menor amplitude térmica diária para o período observado. Após o pôr do sol, entretanto, apresentou temperaturas apenas um pouco maiores que os demais pontos. De qualquer forma, ficou caracterizada a influência das massas construídas distintas na temperatura do ar resultante.

Da mesma forma, o modelo numérico climático urbano adaptado e testado para o caso específico de Maceió – AL mostrou-se capaz de prever os microclimas diferenciados dentro de frações distintas do ambiente urbano nos testes das diversas alternativas de morfologia urbana estudadas e os impactos térmicos conseqüentes, bem como a simulação de situações possíveis de maior adensamento futuro nesses espaços.

Algumas aplicações possíveis do modelo foram demonstradas, e seu potencial de adaptação foi comprovado, como uma ferramenta de previsão do ambiente térmico de frações urbanas, já que apresentou boa correspondência entre os dados observados em campo e os dados calculados, após o ajuste de alguns parâmetros.

O modelo, apesar de solicitar razoável quantidade de dados de entrada, é relativamente simples, e de fácil aplicação por parte do usuário - planejador, desde que sejam corretamente calculados e estimados os valores dos parâmetros necessários para a partida do modelo.

Sabe-se que uma das dificuldades encontradas em trabalhos de simulação e, particularmente encontrada no presente trabalho, consiste na escassez de parâmetros de entrada físicos e meteorológicos, o que leva a estimativas ou suposições baseadas em informações da literatura técnica disponível que, muitas vezes, não são apropriadas para a realidade local.

Essa dificuldade deve ser reparada, para que se possa avançar no campo da simulação climatológica urbana, e isso só se verificará com a realização de maior número de investigações que digam respeito a dados climáticos para as regiões tropicais.

O conhecimento climático urbano deve ser integrado no processo de planejamento, e isso pode e deve ser feito transferindo-se dados climatológicos nos instrumentos disponíveis de planejamento urbano.

Por outro lado, o uso de simulações no planejamento urbano mostra que, para diagnósticos e prognósticos, não é necessário que se obtenha resultados absolutamente exatos, e sim que se constituam em ferramenta prática e suficiente para a detecção e previsão de efeitos ambientais - no caso específico, térmicos -, possibilitando a formulação de critérios e recomendações relativos às condições existentes, subsidiando projetos ligados ao meio ambiente urbano.

É inegável a importância, hoje, na climatologia urbana, de uma abordagem mais quantitativa dos fenômenos, para que as decisões tomadas no âmbito do planejamento urbano sejam baseadas em informações mensuráveis e, especificamente, mostrem informações mais imediatas com o uso de simulações.

O trabalho pretendeu mostrar a necessidade de se ter sempre a abordagem climática como critério de planejamento urbano, e ao mesmo tempo mostrar a possibilidade de aplicação, para o planejador, de simulação de situações térmicas distintas com o auxílio de uma ferramenta como os modelos climáticos urbanos. De uma forma geral, portanto, os objetivos iniciais foram alcançados.

É importante observar porém que, em regiões tropicais quentes e úmidas, a influência térmica na morfologia urbana têm significado diferente em relação às regiões temperadas, de onde se têm a maior parte dos estudos na área.

A diversidade dos sistemas climáticos tropicais em relação aos estudos nas latitudes médias e altas, e, particularmente no Brasil, o baixo

progresso de trabalhos na área só reafirmam a necessidade da intensificação de pesquisas para que se tenha um melhor entendimento e, sobretudo, investigações sobre a climatologia urbana tropical.

Sabe-se que uma das grandes discussões hoje sobre a otimização dos espaços urbanos está no adensamento, ou não, dos centros das cidades, e os impactos ambientais conseqüentes. Do mesmo modo, áreas de crescente valorização imobiliária nas grandes, médias e pequenas cidades são desordenadamente ocupadas.

Nesse contexto, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem o planejador urbano quanto à possibilidade de trabalhar com simulações urbanas que mostrem diversas alternativas de organização dos espaços urbanos, fundamentadas não apenas em critérios técnicos e de desenho, mas também com ênfase em critérios ambientais, entre os quais, o de conforto térmico dos ambientes urbanos.

A presente pesquisa abre um leque de novos trabalhos que podem ser executados. Portanto, as seguintes extensões são sugeridas:

- com o emprego de estações meteorológicas automáticas, avaliar termicamente outras sub-regiões da cidade de Maceió;
- criar projetos de regulamentação e de organização do espaço urbano, a partir da avaliação térmica dos diversos espaços urbanos de Maceió, sob critérios que levem em conta, especialmente, o conforto humano;
- utilizar o modelo de balanço de energia mostrado nesse trabalho, na simulação do comportamento térmico de outras regiões da cidade, comparando seus valores aos obtidos através de medições;

- empregar a mesma metodologia utilizada nesta investigação para outras cidades, inicialmente do Nordeste brasileiro, podendo se estender, depois, para outras regiões do Brasil;
- investigar outros modelos numéricos mais complexos (até tridimensionais), para aprimorar a qualidade dos dados obtidos;
- relacionar a inércia térmica de espaços urbanos verticalizados com o excesso de consumo de energia elétrica em condicionamento do ar.

A presente investigação diz respeito unicamente a um dos muitos aspectos ambientais que devem ser considerados no planejamento de espaços urbanos: o aspecto térmico. Sabe-se que muito há, ainda, a ser estudado e acrescentado sobre ao assunto, para que se possa levar o conhecimento ambiental às esferas de decisão e gestão dos espaços urbanos.

Acredita-se que o aumento do reconhecimento da importância da questão ambiental urbana nos problemas de planejamento urbano poderá trazer maior divulgação e, conseqüentemente, maior atenção à essa área.

ANEXO

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Descreve-se aqui o processo de tratamento dos dados coletados de temperatura do ar, utilizando-se o pacote matemático “Mathcad” (da Mathsoft Inc.) para automatizar os procedimentos de cálculo.

- Apresentam-se os valores medidos de temperatura para os cinco dias de observação. Em seguida, processa-se a interpolação de cada vetor (cada dia, para cada ponto de medição) a fim de determinar valores para as horas intermediárias, sem medição.
- Utiliza-se a função interpoladora “spline”, resultando em vetores completos para o intervalo de 800 h às 21:00 h.
- São calculados os vetores de temperatura média para cada ponto de observação.
- Tomando-se as áreas das frações urbanas como ponderadores, obtém-se um vetor com temperaturas para um ponto fictício “médio” para a região.
- Através de uma função de correlação, pode-se determinar os diversos coeficientes entre os vetores representativos dos diversos pontos com a estação meteorológica.

Temperaturas medidas nos 3 pontos ao longo dos 5 dias de medições, além das medidas da estação.

$i := 0..8$

Dia 30/04/98

P130_i := P230_i := P330_i :=

31.9	28.4	30.9
33.1	29.9	31.8
34.6	31.5	32.8
36.6	36	37.2
35.5	35.8	36.6
33.9	34.5	34.9
30.5	31.1	30.3
29.6	30.2	29.2
28.9	29.2	29.0

Dia 01/05/98

P101_i := P201_i := P301_i :=

31.5	28.3	30.3
33.5	30.0	32.2
34.2	31.7	34.4
35.2	34.3	36.4
34.2	34.7	35.0
33.4	34.5	33.3
30.8	31.4	29.9
29.8	30.1	29.0
28.7	29.2	28.7

Dia 02/05/98

P102_i := P202_i := P302_i :=

32.2	28.7	31.6
33.4	29.3	32.1
34.4	30.8	33.3
36.7	35.7	37.1
35.4	35.7	36.5
34.1	34.7	35.1
30.7	31.3	30.3
29.5	30.1	29.4
28.9	29.2	29.1

Dia 03/05/98

P103_i := P203_i := P303_i :=

31.9	28.4	29.9
33.4	30.2	32.4
34.4	31.9	34.6
35.3	34.4	36.4
34.3	34.8	35.0
33.4	34.5	33.5
30.8	31.2	29.8
29.8	30.1	29.1
28.8	29.3	29.0

Dia 04/05/98

P104_i := P204_i := P304_i :=

32.1	28.5	30.5
33.2	29.7	32.0
34.5	31.7	33.4
35.6	35.1	36.6
35.1	33.8	36.0
33.2	34.3	34.9
30.7	31.1	30.0
29.4	30	29.2
28.7	29.4	28.9

Horas das medições:

t_i :=

8
9
10
14
15
16
19
20
21

Interpolação para completar as séries diárias:

$t2 := 8..21$

Para o ponto P1:

$vs := cspline(t, P130)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P130, t2)$	$P130_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P101)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P101, t2)$	$P101_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P102)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P102, t2)$	$P102_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P103)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P103, t2)$	$P103_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P104)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P104, t2)$	$P104_{i_2} := f(t2)$

Para o ponto P2:

$vs := cspline(t, P230)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P230, t2)$	$P230_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P201)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P201, t2)$	$P201_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P202)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P202, t2)$	$P202_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P203)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P203, t2)$	$P203_{i_2} := f(t2)$
$vs := cspline(t, P204)$	
$f(t2) := interp(vs, t, P204, t2)$	$P204_{i_2} := f(t2)$

Para o ponto P3:

$$vs := \text{cspline}(t, P330)$$

$$f(t2) := \text{interp}(vs, t, P330, t2) \quad P330j_{t2} := f(t2)$$

$$vs := \text{cspline}(t, P301)$$

$$f(t2) := \text{interp}(vs, t, P301, t2) \quad P301j_{t2} := f(t2)$$

$$vs := \text{cspline}(t, P302)$$

$$f(t2) := \text{interp}(vs, t, P302, t2) \quad P302j_{t2} := f(t2)$$

$$vs := \text{cspline}(t, P303)$$

$$f(t2) := \text{interp}(vs, t, P303, t2) \quad P303j_{t2} := f(t2)$$

$$vs := \text{cspline}(t, P304)$$

$$f(t2) := \text{interp}(vs, t, P304, t2) \quad P304j_{t2} := f(t2)$$

Dia 30/04/98

P130j _{t2}	P230j _{t2}	P330j _{t2}
31.9	28.4	30.9
33.1	29.9	31.8
34.6	31.5	32.8
35.86	33.05	34.15
36.69	34.42	35.59
36.97	35.45	36.73
36.6	36	37.2
35.5	35.8	36.6
33.9	34.5	34.9
32.53	33.17	33.17
31.45	32.06	31.65
30.5	31.1	30.3
29.6	30.2	29.2
28.9	29.2	29

Dia 01/05/98

P101j _{t2}	P201j _{t2}	P301j _{t2}
31.5	28.3	30.3
33.5	30	32.2
34.2	31.7	34.4
34.82	32.84	36.04
35.37	33.5	36.94
35.59	33.91	37.06
35.2	34.3	36.4
34.2	34.7	35
33.4	34.5	33.3
32.61	33.77	31.93
31.74	32.69	30.86
30.8	31.4	29.9
29.8	30.1	29
28.7	29.2	28.7

Dia 02/05/98

P102j _{t2}	P202j _{t2}	P302j _{t2}
32.2	28.7	31.6
33.4	29.3	32.1
34.4	30.8	33.3
35.53	32.41	34.69
36.54	33.86	35.96
37.06	35	36.85
36.7	35.7	37.1
35.4	35.7	36.5
34.1	34.7	35.1
32.96	33.56	33.39
31.87	32.45	31.71
30.7	31.3	30.3
29.5	30.1	29.4
28.9	29.2	29.1

Dia 03/05/98

P103 _i _{t2}	P203 _i _{t2}	P303 _i _{t2}
31.9	28.4	29.9
33.4	30.2	32.4
34.4	31.9	34.6
35.18	33.01	36.17
35.69	33.63	37.02
35.78	34.01	37.11
35.3	34.4	36.4
34.3	34.8	35
33.4	34.5	33.5
32.57	33.63	32.09
31.72	32.45	30.83
30.8	31.2	29.8
29.8	30.1	29.1
28.8	29.3	29

Dia 04/05/98

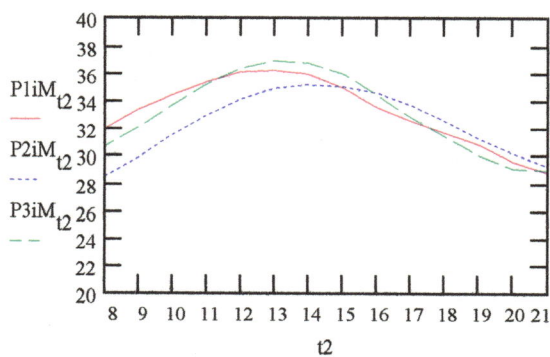
P104 _i _{t2}	P204 _i _{t2}	P304 _i _{t2}
32.1	28.5	30.5
33.2	29.7	32
34.5	31.7	33.4
35.32	33.66	34.72
35.66	35.13	35.82
35.69	35.73	36.51
35.6	35.1	36.6
35.1	33.8	36
33.2	34.3	34.9
31.98	33.99	33.27
31.42	32.65	31.48
30.7	31.1	30
29.4	30	29.2
28.7	29.4	28.9

Médias dos cinco dias para os pontos (para as séries completadas)

$$P1iM_{t2} := \frac{P130_{i,t2} + P101_{i,t2} + P102_{i,t2} + P103_{i,t2} + P104_{i,t2}}{5}$$

$$P2iM_{t2} := \frac{P230_{i,t2} + P201_{i,t2} + P202_{i,t2} + P203_{i,t2} + P204_{i,t2}}{5}$$

$$P3iM_{t2} := \frac{P330_{i,t2} + P301_{i,t2} + P302_{i,t2} + P303_{i,t2} + P304_{i,t2}}{5}$$



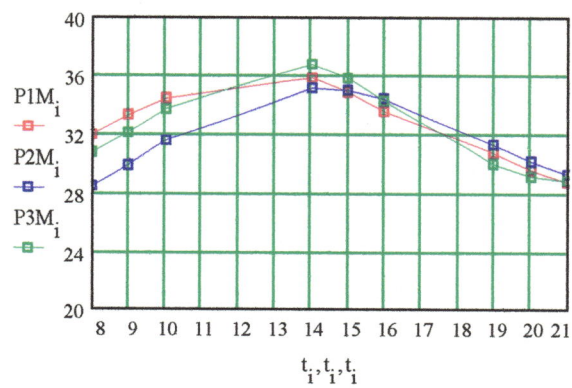
Médias dos cinco dias para os pontos (séries incompletas):

$$P1M_1 := \frac{P130_1 + P101_1 + P102_1 + P103_1 + P104_1}{5}$$

$$P2M_1 := \frac{P230_1 + P201_1 + P202_1 + P203_1 + P204_1}{5}$$

$$P3M_1 := \frac{P330_1 + P301_1 + P302_1 + P303_1 + P304_1}{5}$$

P1M ₁	P2M ₁	P3M ₁
31.92	28.46	30.64
33.32	29.82	32.1
34.42	31.52	33.7
35.88	35.1	36.74
34.9	34.96	35.82
33.6	34.5	34.34
30.7	31.22	30.06
29.62	30.1	29.18
28.8	29.26	28.94



Interpolação para completar a curva de 8 as 21 (para as médias).

t2 := 8..21

vs := cspline(t, P1M)

f(t2) := interp(vs, t, P1M, t2) P1i_{t2} := f(t2)

vs := cspline(t, P2M)

f(t2) := interp(vs, t, P2M, t2) P2i_{t2} := f(t2)

vs := cspline(t, P3M)

f(t2) := interp(vs, t, P3M, t2) P3i_{t2} := f(t2)

P1i _{t2}	P1iM _{t2}	P2i _{t2}	P2iM _{t2}	P3i _{t2}	P3iM _{t2}
31.92	31.92	28.46	28.46	30.64	30.64
33.32	33.32	29.82	29.82	32.1	32.1
34.42	34.42	31.52	31.52	33.7	33.7
35.34	35.34	33	33	35.16	35.16
35.99	35.99	34.11	34.11	36.27	36.27
36.22	36.22	34.82	34.82	36.85	36.85
35.88	35.88	35.1	35.1	36.74	36.74
34.9	34.9	34.96	34.96	35.82	35.82
33.6	33.6	34.5	34.5	34.34	34.34
32.53	32.53	33.62	33.62	32.77	32.77
31.64	31.64	32.46	32.46	31.31	31.31
30.7	30.7	31.22	31.22	30.06	30.06
29.62	29.62	30.1	30.1	29.18	29.18
28.8	28.8	29.26	29.26	28.94	28.94

Média Ponderada das Temperaturas (as áreas são os pesos)

$j := 0..13$

$P1_j =$	$P2_j =$	$P3_j =$	Média das Temp. na Estação Meteorológica
31.9	28.5	30.6	$PE_j :=$
33.3	29.8	32.1	27.8
34.4	31.5	33.7	29.1
35.3	33	35.2	30.2
36	34.1	36.3	30.9
36.2	34.8	36.9	30.7
35.9	35.1	36.7	30.6
34.9	35	35.8	30.0
33.6	34.5	34.3	29.4
32.5	33.6	32.8	28.2
31.6	32.5	31.3	26.7
30.7	31.2	30.1	25.4
29.6	30.1	29.2	24.9
28.8	29.3	28.9	24.4
			23.7

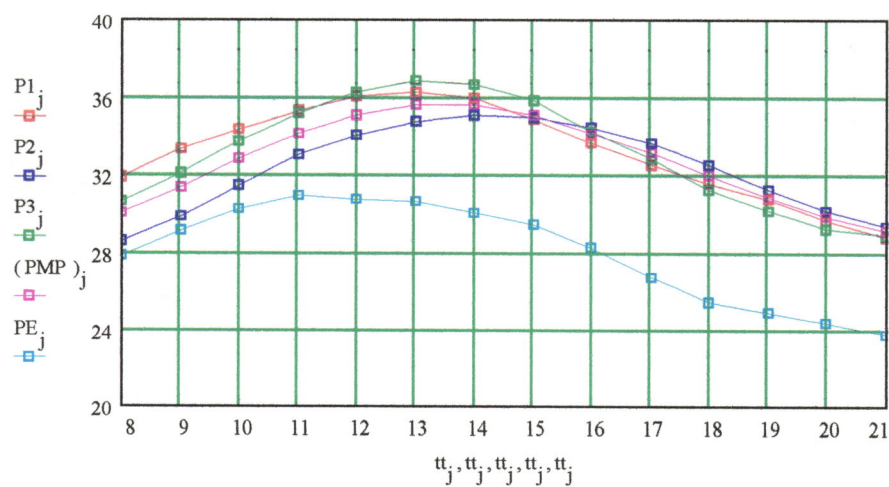
$Ag1 := 6 \cdot 10^5$ $mc1 := 627.65$
 $Ag2 := 8 \cdot 10^5$ $mc2 := 1210.97$
 $Ag3 := 2 \cdot 10^5$ $mc3 := 420.20$

$$PMP_j := \frac{Ag1 \cdot P1_j + Ag2 \cdot P2_j + Ag3 \cdot P3_j}{Ag1 + Ag2 + Ag3}$$

$$mcMP := \frac{Ag1 \cdot mc1 + Ag2 \cdot mc2 + Ag3 \cdot mc3}{Ag1 + Ag2 + Ag3}$$

$mcMP = 893.38$

$P1_j :=$	$P2_j :=$	$P3_j :=$	PMP_j	$tt_j :=$
31.9	28.5	30.6	30.04	8
33.3	29.8	32.1	31.4	9
34.4	31.5	33.7	32.86	10
35.3	33	35.2	34.14	11
36	34.1	36.3	35.09	12
36.2	34.8	36.9	35.59	13
35.9	35.1	36.7	35.6	14
34.9	35	35.8	35.06	15
33.6	34.5	34.3	34.14	16
32.5	33.6	32.8	33.09	17
31.6	32.5	31.3	32.01	18
30.7	31.2	30.1	30.88	19
29.6	30.1	29.2	29.8	20
28.8	29.3	28.9	29.06	21



Coefficiente de Correlação (fórmula de Pearson):

$$\text{corr}(PE, P1) = 0.96$$

$$\text{corr}(PE, P2) = 0.55$$

$$\text{corr}(PE, P3) = 0.89$$

$$\text{corr}(PE, PMP) = 0.8$$

Desvio Padrão (com o valor médio do vetor):

$$\text{stdev}(PE) = 2.45$$

$$\text{stdev}(P1) = 2.34$$

$$\text{stdev}(P2) = 2.2$$

$$\text{stdev}(P3) = 2.72$$

Variância (com o valor médio do vetor):

$$\text{var}(PE) = 6$$

$$\text{var}(P1) = 5.45$$

$$\text{var}(P2) = 4.86$$

$$\text{var}(P3) = 7.4$$

Co-Variância (entre dois vetores - com o valor médio de cada vetor):

$$\text{cvar}(PE, PE) = 6$$

$$\text{cvar}(PE, P1) = 5.5$$

$$\text{cvar}(PE, P2) = 2.96$$

$$\text{cvar}(PE, P3) = 5.93$$

BIBLIOGRAFIA

- ADEBAYO, R.Y.(1991). Considerations for climate - sensitive design in tropical Africa. *Energy and Buildings* v.15-16, n.1-2, p.15-21.
- ADEY, R.A. & BREBBIA, C.A. (1983). *Basic computational techniques for engineers*. London, Pentech Press, 208p.
- ADOLPHE, L. (1998). A design tool for global evaluation of urban sustainability. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.125-127.
- ASAEDA, T.; CA, V.T.; WAKE, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment* v.30, n.3, p.413-427.
- AYOADE, J.O.(1991). *Introdução à climatologia para os trópicos*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil.
- BECKRÖGE, W.(1988) Climate as a factor of a planning project - demonstrated by a example of Dortmund Bornstrasse. *Energy and Buildings* v.11, n.1-3, p.129-135.

BITAN, A.(1988). The methodology of applied climatology in planning and building. *Energy and Buildings* v.11, n.1, p.1-10.

_____.(1992). The high climate city of the future. *Atmospheric environment*, v. 26B, n.3, p. 313-329.

BITTENCOURT, L.S. (1993). *Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates: an investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low - rise buildings*. U.K., 314p. PhD Thesis. Architectural Association Graduate School, Environment and Energy Studies Programme.

BITTENCOURT, L. S. ; CRUZ, J. M.; LÔBO, D. G. F. (1997). A influência da relação entre taxa de ocupação x número de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes internos e externos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 102-106.

BOEKER, Egbert; VAN GRONDELLE, Rienk. (1995). *Environmental Physics*. John Wiley & Sons Ltd, England, 448 p.

BORNSTEIN, R.D. (1975). The two - dimensional URBMET urban boundary layer model. *Journal of applied meteorology* n.14, p.1459-1477.

_____. (1986). Urban climate models: nature, limitations and applications, in T.R. Oke (ed.), *Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas*. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, Geneva, p.199-236 (WMO n.652).

BRANDÃO, A.M.P.M.(1996). *Clima urbano da cidade do Rio de Janeiro*. São Paulo, 362p. Tese (Doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

- BROWN, L.R.; JACOBSON, J.L.(1987). *The future of urbanization: facing the ecological and economic constraints*. Washington D.C., Worldwatch Institute (Worldwatch paper, n.77).
- BRÜNDL, W.(1988). Climate function maps on urban planning. *Energy and Buildings* n.11, p.123-127.
- BYUN, D.W.; ARYA, S.P.S.(1990) A two-dimensional mesoscale numerical model for an urban mixed layer - I. model formulation, surface energy budget and mixed layer dynamics. *Atmospheric environment* 24A, p.829-844.
- CAMARGO, J. C. G. & TAVARES, A. C. (1985) A influência da cidade de Rio Claro na temperatura e na umidade do ar. Rio Claro, *Geografia*, v.10, n.20, p.149-168.
- CARLSON, T.N.; BOLAND, F.E. (1978). Analysis of urban - rural canopy using a surface heat flux / temperature model. *Journal of applied meteorology* n.17, p.998-1013.
- CARLSON, T.N.; DODD, J.K.; BENJAMIN, S.G.; COOPER, J.N. (1981). Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. V20, p.67-87.
- CHAN, E. B.A.; TSO, C.P. & HASHIM, M.A. (1993). Urban Thermal environmental studies in Kuala Lumpur. in: *Report of the Technical Conference on Tropical Urban Climates*, WMO n.647.
- CHANDLER, T.J. (1970). *Selected bibliography on urban climate*. Geneva, World Meteorological Organization, Geneva, 383p (WMO n.276).

_____ (1974). Urban climatology - inventory and prospect (an introductory lecture).
in: SYMPOSIUM ON URBAN CLIMATES AND BUILDING CLIMATOLOGY.
Brussels, 1968. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.1-
14. (WMO n.254 - TP 141).

_____ (ed.).(1976) *Urban climatology and its relevance to urban design* World
Meteorological Organization, Geneva, 61p. (WMO n.438, Tech. Note 149).

CHING, J.K.S.; CLARKE, J.F.; GODOWITCH, J.M. (1983). Modulation of heat flux
by different scales of advection in an urban environment. *Boundary Layer
Meteorology* v.25, p.171-191.

CÓDIGO DE OBRAS DA CIDADE DE MACEIÓ (1992). Prefeitura Municipal de
Maceió, GETCAD, Maceió, AL.

COOK, J. (1998). Sustainable suburbs for the american desert - goals and models..
In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY
CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon,
Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd,
p.83-86.

COSTA, Antonio Carlos Lola da. (1998). *Estudo das variações termo-higrométricas
de cidade equatorial devido ao processo de urbanização: o caso de Belém-PA*.
São Carlos, SP, 236p. Tese (Doutorado). Departamento de Hidráulica e
Saneamento, EESC, Universidade de São Paulo.

COSTA, J. de A.(1980). *A Geomorfologia da área de Maceió*. Bahia, 133p.
Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia.

- DINES, M. (1991). *Climatologia urbana e desenho de cidades: insumos para o planejamento da metrópole paulistana*. São Paulo, SP, 168p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- DJEN, C.S (1992) The urban climate of Shanghai. *Atmospheric Environment* v.26B n.1, p.9-15.
- DUARTE, D. H. S.(1998). The urban occupation in rigorous climate cities - a case study in Cuiabá, MT, Brazil. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.133-136.
- DUFNER, K.L.; BAILEY, D.T.; WOLFE, D.E.; ARYA, S.P. (1993) Determination of climate variation within metropolitan areas, phase I summary. *ASHRAE Transaction* v.99, p.430-449.
- ELLEFSEN, R.(1991). Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S.cities. *Energy and Buildings* n.15-16, p.1025-1049.
- ELIASSON, I. (1991). Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy and Buildings* v.15, n. 1-2, p.133-137.
- FERRAR, T. A. ed.(1976). *The urban costs of climate modification*. New York, John Wiley & Sons.
- FONTES, M.S.G. de. (1991). *Influência do clima no planejamento urbano e análise do comportamento termohigrométrico do conjunto habitacional Ponta Negra – Natal-RN*. São Carlos, SP, 170p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Arquitetura, EESC, Universidade de São Paulo.

- _____(1997). Investigação climática em áreas de fundo de vale na cidade de São Carlos - SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 81-86.
- FUGGLE, R.F.; OKE, T.R. (1974). Infrared flux divergence and the urban heat island. In: *Proceedings of the symposium on urban climates and building climatology*, WMO n. 254, World Meteorological Organization, Geneva, p.366-386.
- GASTELOIS, B.C.R.J. & ASSIS, E.S. (1991) Urban heat island in tropical area investigated by remote sensing. Belo Horizonte City. International Symposium on Remote Sensing of Environment. *Proceedings*. v.2, p.565-578.
- GIVONI, B. (1989) *Urban design in different climates*. Los Angeles, World Meteorological Organization (WMO/TD-n.346, WCAP-10).
- GOLDREICH, Y.(1992) Urban climate studies in Johannesburg, a sub-tropical city located on a ridge- a review. *Atmospheric Environment*, v.26B, n.3, p.407-420.
- GONÇALVES, H. (1955). *O sol nos edificios*. Rio de Janeiro, Ed. Lemos.
- GREENLAND, D. (1987). Energy budget climatology. in: Oliver, J.E. (ed) & Fairbridge, R.W. *The encyclopedia of climatology*. New York, VanNostrand Reinhold, p.414-421.
- GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A.(1994). A simple method to determine Obukhov lengths for suburban areas. *Journal of applied meteorology* v.33 n.3, p.435-440.

- GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A.; OKE, T.R.(1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric environment*, vol.25B n.3, p.311-326.
- HENDERSON-SELLERS, A. (1979). A simple numerical simulation of urban mixing depths. *American Meteorological Society*, v.19, p.215-218.
- HENDERSON-SELLERS, A.; PITMAN, A. J. (1992). Land-surface schemes for future climate models: specification, aggregation and heterogeneity. *Journal of Geophysical Res.* v.97, p. 2687-2696.
- HJELMFELT, M.R. (1982). Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary - Layer airflow and vertical air motion: simulation of urban vs non - urban effects. *Journal of applied meteorology* 21, p.1239 - 1257.
- HOLMAN, J.P.(1983). *Transferência de calor*. Trad.Luiz F. Milanez. São Paulo, McGraw Hill do Brasil, 639p.
- JAUREGUI, E. (1986a) Tropical urban climates: review and assessment. in OKE, T.R.(ed.). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.26-45 (WMO n.652).
- _____ (1986b) The urban climate of Mexico city. in OKE, T.R.(ed.). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.63-86. (WMO n.652).

_____ (1992) Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. In. *Atmospheric Environmental*, v.26 B n.3, p.391-396.

JOHNSON, G.T.; OKE, T.R.; LYONS, T.J.; STEYN, D.G.; WATSON, I.D.; YOOGT, J.A. (1991). Simulating of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night. Part I: theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorology* 56, p.275-294.

KALANDA, B.D.; OKE, T.R.; SPITTLEHOUSE, D.L. (1980). Suburban energy balance estimates for Vancouver, B.C., using the Bowen ratio - energy balance approach. *American Meteorological Society*, v.19, p.791-802.

KATZSCHNER, Lutz. (1988). The urban climate as a parameter for urban development. *Energy and Buildings*, v.11, n.1-3, p.137-147.

_____. (1997). Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 49-58.

KERSCHGENS, M; KRAUS, H. (1990). On the energetics of the urban canopy layer. *Atmospheric environment*, v.28B, n.2, p.321-328.

KIMURA, F. (1989). Heat flux on mixtures of different land - use surface: test of a new parameterization scheme. *Meteorological Society of Japan*, n.67. p.401-409.

KIMURA, F; TAKAHASHI, S. (1991). Climate effects of land reclamation in Tokio Bay - numerical experiment. *Energy and Buildings* n.15-16, p.147-156.

- KIMURA, F.; SHIMIZU, Y. (1994). Estimation of sensible and latent heat fluxes from soil surface temperatures using a linear air-land heat transfer model. *Journal of applied meteorology* v.33, n.4, p.477-489.
- KOEPPEL, (1948). *Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra*. Mexico, Fondo de Cultura Economica.
- KOSTER, R.D.; SUARES, M.J. (1992) Modeling the land surface boundary in climate models as a composite of independent vegetation stands. *Journal of Geophysical Research*. n.97, p.2697 – 2715.
- LAMAS, J.M.R.G. (1992). *Morfologia urbana e desenho da cidade*. Lisboa, Calouste Gulbekian.
- LANDSBERG, H.E.(1974a).Climates and urban planning. in: SYMPOSIUM ON URBAN CLIMATES AND BUILDING CLIMATOLOGY. Brussels, 1968. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.366-386 (WMO n.254-TP 141).
- _____(1974b). Micrometeorological temperature differentiation through urbanization.. in: SYMPOSIUM ON URBAN CLIMATES AND BUILDING CLIMATOLOGY. Brussels, 1968. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.129-140 (WMO n.254-TP 141).
- _____(1981). *The urban climate*. New York, Academic Press, 276p.
- LHOMME, J.P.; CHEHBOUNLA; MONTENY, B. (1994). Effective parameters of surface energy balance in heterogeneous landscape. *Boundary-Layer meteorology* v.71, n.3, p.297-309.

- LIMA, Ivan Fernandes. (1990). *Maceió - a cidade restinga. Contribuição ao estudo geomorfológico do litoral alagoano*. Maceió, EDUFAL, 255p.
- LOMBARDO, M.A.(1985). *Ilha de calor nas metrópolis - o exemplo de São Paulo*. São Paulo, Hucitec, 244p.
- _____.(1997). O clima e a cidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 59-62.
- McDONNELL, M.J.; PICKETT, S.T.A.(1990). Ecosystem structure and function along urban – rural gradients: an urban unexploited opportunity for ecology. *Ecology*, v.71 n.4, p. 1232-1237.
- MAITELLI, G.T. (1994). *Abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá - MT*. São Paulo, 220p. Tese (Doutorado), FFLCH, Universidade de São Paulo.
- MANN, K.J. (1993). Computer simulation of an urban heat island using finite elements. *Mathematics and computers in simulation* v.35 n.3, p.203-209.
- MASCARÓ, L. (1996). *Ambiência urbana = urban environment*. Porto Alegre, Sagra / DC Luzatto, 199p.
- MATTOS, A.;VILLELA, S.M. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw Hill do Brasil, 245p.
- MENDONÇA, F de A. (1994). *O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno - proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina-PR*. São Paulo, 287p. Tese (Doutorado), Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo.

- MILLS, G. M. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – I – model structure and sensitivity test. *Atmospheric Environment*, v.27B, n.2, p.157-170.
- _____. (1997). The radiative effects of building groups on single structures. *Energy and Buildings* v.25, p.51-61.
- MILLS, G. M.; ARNFIELD, J. A. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon. – II – comparison of model results with measurements. *Atmospheric Environment*, v.27B, n.2, p.171-181.
- MIZUNO, M.; NAKAMURA, Y.; MURAKAMI, H; YAMAMOTO, S. (1991). Effects of land use on urban horizontal atmospheric temperature distributions. *Energy and Buildings* n.15-16, p.165-176.
- MONTEIRO, C.A.F. (1975). *Teoria e clima urbano*. São Paulo, 244p. Tese (Livre Docência). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- _____. (1986) Some aspects of the urban climates of tropical South America: the Brazilian contribution, in: OKE, T.R.(ed.). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization, p.166-197 (WMO n.652).
- MORIYAMA, M.; MATSUMOTO, M. (1988). Control of urban night temperature in semi-tropical regions during summer. *Energy and Buildings*, 11, p.213-219.
- MUNRO, D.S.(1987). Boundary Layer Climatology. in: Oliver, J.E. (ed) & Fairbridge, R.W. *The encyclopedia of climatology*. New York: VanNostrand Reinhold, p.172-183.

- MYERS, N. (1993). Population, environment and development. *Environment Conservation*, v.20, n.3, p.205-216.
- MYRUP, L.O.(1969) A numerical model of the urban heat island., *Journal of applied meteorology* n.8, p.908-918. corrigendum, *Journal of applied Meteorology* n.9, p.54, 1970.
- _____ (1993) An analysis of micoclimatic variation in suburban environment. *Atmospheric environment*, v.27B, n.2 , p.129-156.
- NIMER, E.(1989). *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro, IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 421p.
- NUNEZ, M.; OKE, T.R. (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology* v.16, p.11-19.
- OGUNTOYINBO, J.S.(1984) *Some aspects of the urban climates of tropical Africa*. In WMO(1986), p.110-135.
- OJIMA, T.; MORIYAMA, M. (1982). Earth surface heat balance changes caused by urbanization. *Energy and Buildings* n.4, p.99-114.
- OLIVEIRA, Maria do Rosário de. (1993). *A política de habitação popular em Maceió e seus aspectos ambientais*. Recife, PE, 177p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco.
- OMETTO, J.C. (1981). *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 440p.
- OKE, T. R. (1973). *City size and urban heat island*. *Atmospheric Environment* v.7, p.769-779.

_____ (1974) *Review of urban climatology 1968-73*. Technical note n. 134, WMO n.383, Geneva, 132p.

_____ (1979) *Review of urban climatology 1974-78*. Technical note 169, WMO n.539, Geneva, 100p.

_____ (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observation. *Journal of climatology* v.1, n.1-4, p 237-254.

_____ (1984) Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings* v.7, n.1, p.1-10.

_____ (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings* v.11, n.1-3, p.103-113.

_____ (1990) *Bibliography on urban climate 1981-1988*. WMO-WCAP series, World Meteorological Organization, Geneva.

_____ (1996). *Boundary layer climates*. 2.ed. New York: Routledge, 435p.

OKE, T.R., ed.(1986). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization (WMO n.652).

OKE, T.R.; CLEUGH, H.A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary - Layer Meteorology* n.39, p.223-245.

OKE, T.R.; TAESLER, R.; OLSSON, L. (1991). The tropical urban climate experiment (TRUCE). *Energy and Buildings* v.15-16, n. 1-2, p.67-73.

- OKE, T.R.; ZEUNER, G.; JAUREGHI, E.(1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, vol.26B, n.4, p.433-444.
- OUTCALT, S.I.(1972a). The development and application of a simple digital surface-climate simulator. *Journal of applied meteorology* n.11, p.629-636.
- _____ (1972b). A reconnaissance experiment in mapping and modeling the effect of land use on urban thermal regimes. *Journal of applied meteorology* n.11, p.1369-1373.
- PADMANABHAMURTY, B. (1986) Urban climates of India. In: *Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas*. Geneva: WMO n.652, p.136-165.
- _____ (1991) Microclimates in tropical urban complexes. *Energy and Buildings* v.15-16, n.1-2, p.83-92.
- POREH, M. (1996). Investigation of heat islands using small scale models. *Atmospheric environment*, vol.30, n.3, p.467-474.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ (1995). Maceió- 180 anos de história. PMM/ Instituto Téo Brandão, 1995, 653p.
- RADOVIC, D. (1998). The ideal of sustainability, social and urban reconstruction. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.53-54.

- RAHMA, M. A.; TIMRAZ, F.; MURILLO, F. (1998). Planning urban densities for sustainable development. A comparative study of urban strategies in Gaza City. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.125-127.
- RIBEIRO, H.(1996). *Ilha de calor na cidade de São Paulo: sua dinâmica e efeitos na saúde da população*. São Paulo. 144p. Tese (Livre Docência), FSP, Universidade de São Paulo.
- ROSS, S.L.; OKE, T.R. (1988). Tests of three urban energy balance models. *Boundary - Layer Meteorology* n.44, p.73-96.
- SAMPAIO, A.H.L. (1981) *Correlações entre uso do solo e ilha de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador*. São Paulo, 103p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- SANTANA, A. M. S. de. (1997). O desenho urbano e a climatologia de Fortaleza. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 140 - 143.
- SAKAKIBARA, Y. (1996). Numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget. *Atmospheric Environment*, v.30, n.3, p.487-496.
- SCHMID, H.P.; CLEUGH, H.A.; GRIMMOND, C.S.B.; OKE, T.R. (1991). Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteorology* v.54, p.249-276.

- SHARLIN, N.; HOFFMAN, M.E. (1984). The urban complex as a factor in the air-temperature pattern in a Mediterranean coastal region. *Energy and Buildings* v.7, p.149-158.
- SOUZA, L. C. L. de (1996). Influência da geometria urbana na temperatura do ar ao nível do pedestre. São Carlos, SP, 125p. Tese (Doutorado). Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, Universidade de São Paulo.
- _____. (1997). Ilha de calor e geometria urbana na cidade de São Carlos - SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., Salvador, Bahia, 1977. *Anais*. Salvador, Bahia, FAUFBA/LACAM-ANTAC, p. 97-101.
- SOUZA, L. C. S. de.; SILVA, A. N. R. da. (1998). Compact city: could this be an option for medium sized Brazilian cities? In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.103-106.
- SWAID, H. (1991a) Nocturnal variation of air-surface temperature gradients for typical urban and rural surfaces. *Atmospheric Environment*, v. 25B, n.3, p.333-341.
- _____. (1991b) Thermal effects of artificial heat sources and shaded ground areas in the urban canopy layer. *Energy and Buildings*, v.15-16, p.253-261.
- SWAID, H.; HOFFMAN, M.E. (1990a). Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model. *Energy and Buildings*, v.14, n.4, p.313-324.

- _____ (1990b). Climate impacts of urban design features for high and mid latitude cities. *Energy and Buildings* v.14, n.4, p.325-336.
- TAESLER, R. (1986). Urban climatological methods and data. in: OKE, T.R., ed.(1986). THE TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Mexico, 1984. *Proceedings*. Geneva, World Meteorological Organization (WMO n.652), p.199-236.
- TAVARES, R.(1997). *Clima local de Sorocaba (SP): tendências e análise comparativa cidade-campo*. São Paulo. 205p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- TERJUNG, W.H.; O'ROURKE, P. A.(1980a) Simulating the causal elements of urban heat islands. *Boundary-Layer Meteorology*, n.19, p.93-118.
- _____ (1980b) Influences of physical structures on urban energy budgets. *Boundary- Layer Meteorology*, n.19, p 421-439.
- TODHUNTER, P.E.; TERJUNG, W.H. (1987). Intercomparison of three urban climate models. *Boundary - Layer Meteorology* n.42, p.181-205.
- _____ . (1990). The response of urban canyon energy budgets to variable synoptic weather types – a simulation approach. *Atmospheric Environment* v.24-B, n.1, p.35-42.
- TSO, C.P. (1996). A survey of urban heat island studies in two tropical cities. *Atmospheric Environment* v.30, n.3, p. 507-519.

- TSO, C.P.; CHAN, B.K.; HASHIM, M.A.; (1990). An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. *Energy and Buildings* n.14, p.143-152.
- TSO, C.P.; LAW, K.Y. (1991). Evaluation of thermal environment in the buildings areas of Kuala Lumpur City by a new twin energy balance method. *Energy and buildings*, n.15-16, p.271-277.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1993). *Diretrizes para apresentação de dissertação e teses na EESC-USP*. São Carlos, 58p.
- VILLAS BOAS, M. (1998). Environmental criteria and design principles for a new community in Brasília. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.137-140.
- VILJOEN, A; TARDIVEAU, A. (1998). Sustainable cities and landscape patterns. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds.). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.49-52.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION(1993). *Report of the Technical Conference on Tropical Urban Climates*, Geneva, World Meteorological Organization, 588p (WMO n.647).

YANNAS, S. (1998). Living with the city. Urban design and environmental sustainability. In: MALDONADO, E.; YANNAS, S.(eds). ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES - PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA 98, Lisbon, Portugal, 1998. *Proceedings*. Lisbon, James & James Science Publishers Ltd, p.41-48.

YOSHINO, M. (1991). Development of urban climatology and problems today. *Energy and Buildings* v.15-16, n.1-2, p.1-10.

YOSHIKADO, H. (1992). Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology* v.3^o, n.10, p.1146-1164.