

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**INFLUÊNCIA DO USO E COBERTURA DO SOLO NO CLIMA DE PIRACICABA, SÃO
PAULO: ANÁLISE DE SÉRIES HISTÓRICAS, ILHAS DE CALOR E TÉCNICAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO.**

PRISCILA PEREIRA COLTRI

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2006**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Priscila Pereira Coltri
Engenheiro Agrônomo

Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto

Orientador:
Prof. Dr. VALDEMAR ANTONIO DEMÉTRIO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Agronomia. Área de Concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2006

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Coltri, Priscila Pereira

Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: análises de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto / Priscila Pereira Coltri. - - Piracicaba, 2006.
166 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.
Bibliografia.

1. Climatologia – Piracicaba (SP) 2. Cobertura do solo 3. Imageamento de satélite 4. Sensoriamento remoto 5. Uso do Solo I. Título

CDD 551.6981

“Permi tida a cópi a total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais, Maria Inês e Cláudio,
minha irmã Patrícia e meu cunhado Paulo (Miúdo)

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador Prof. Dr. Valdemar Antonio Demétrio, pelo apoio, orientação, amizade, confiança e dedicação.

Aos meus “orientadores” do INPE, que participaram em colaboração nesse trabalho, Prof. Nelson Jesus Ferreira e Prof. Saulo Freitas pela ajuda, apoio, amizade, orientação e dedicação.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelas instalações, laboratórios e pelas imagens de satélite

À comissão de pós-graduação do curso de Fitotecnia da ESALQ/USP, em especial a secretária Luciane Lopes pelo apoio,

Ao Cnpq pela concessão da bolsa de estudo;

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Produção Vegetal, em especial aos funcionários Davi e Éder;

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial à secretária Vanda e ao Jesuíno;

Ao Professor Carlos Alberto Vettorazzi pela ajuda inicial e pelo incentivo ao tema;

Aos Professores da ESALQ Profs. Drs. Sérgio Oliveira Moraes, Nilson Villa Nova do Departamento de Física e Meteorologia Agrícola e Prof. Dr. Demóstenes Silva Filho do Departamento de Ciências Florestais;

Ao funcionário e pós-graduando do Laboratório de Silvicultura Urbana, Jefferson Polizel, pela ajuda e amizade;

A Roberta Valente e ao estagiário Saulo pela ajuda inicial com o IDRISI;

Aos grandes amigos do INPE Daniela França, Pablo Santos, Sâmia Garcia, pela ajuda nos programas, nas imagens, e, principalmente pela amizade;

Aos amigos da fitotecnia Thomas Martin, Roberta Uzzo e Eltiza Rondino

Aos grandes amigos Henrique Barbin e Giulina Del Nero Velasco pelos “artiguinhos”, ajuda e dedicação;

As grandes “irmãs” da República “Dojão”, Mariana (Relpi), Paula (Foker), Giuliana (Tafassiu), Maria Luiza (Di-Luvio), Estela (Porviña) e Maria Tereza (Maetê) pela paciência e amizade;

As moradoras e ex-moradoras da República “Gaiola das Lokas” pelos anos de formação na ESALQ;

Aos amigos Rafael Fonseca, Raphael Moura e Gustavo Nakagima pela ajuda;

Aos companheiros do Ano Leitinho da ESALQ/USP (Formandos 2002);

A minha família, em especial minha mãe (Maria Inês), meu pai (Cláudio) e a duplinha dinâmica - minha irmã (Patrícia “erma”) e meu cunhado Paulo (Miúdo) – pelas revisões, pelo apoio, paciência, dedicação e, acima de tudo, inspiração.

Ao Thales pelo carinho, compreensão, apoio e dedicação;

As amigas Daniela Roncato (Arroto), Carina Mendes (Voazã), Gisele Nunes (Gi), Thais Emídio (Tá) e Lais Marques (Lala) pela amizade, paciência e compreensão;

Aos todos aqueles que de uma forma ou de outra ajudaram para a realização desse trabalho.

“A mente que se abre para uma nova idéia
jamais volta ao seu tamanho original”

(A. Einstein)

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE ABREVIATURAS.....	18
1 INTRODUÇÃO.....	20
Referências.....	24
2 ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS CLIMÁTICOS NA REGIÃO DE PIRACICABA, SP.....	26
2.1 Introdução.....	27
2.2 Desenvolvimento.....	27
2.2.1 Revisão Bibliográfica.....	27
2.2.1.1 Clima.....	27
2.2.1.2 Considerações sobre Mudanças Climáticas.....	29
2.2.1.3 Clima e Ações Antrópicas.....	31
2.2.1.4 Características Gerais do Município de Piracicaba, SP.....	33
2.2.2 Materiais e Métodos.....	35
2.2.2.1 Materiais.....	35
2.2.2.2 Métodos.....	35
2.2.2.2.1 Localização da Área de Estudo.....	35
2.2.2.2.2 Análise das séries históricas.....	36
2.2.3 Resultados e Discussão.....	37
2.2.3.1 Radiação Global.....	37
2.2.3.2 Insolação.....	38
2.2.3.3 Precipitação.....	40
2.2.3.4 Umidade Relativa.....	41
2.2.3.5 Temperatura.....	43
2.2.3.5.1 Temperatura Máxima.....	43
2.2.3.5.2 Temperatura Mínima.....	44
2.2.3.5.3 Temperatura Média.....	46

2.2.3.6 Evaporação.....	47
2.2.3.7 Temperatura Média, Precipitação, Umidade Relativa e evaporação X crescimento urbano de Piracicaba, SP.....	49
2.3 Conclusões e Considerações finais.....	58
Referências.....	59
3 LANDSAT 7 (ETM ⁺) E IDRISI 3.2: VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE TRANSFORMAÇÃO TERMAL.....	64
3.1 Introdução.....	65
3.2 Desenvolvimento.....	66
3.2.1 Revisão Bibliográfica.....	66
3.2.1.1 Conceitos importantes em Sensoriamento Remoto.....	66
3.2.1.2 Imagens de Satélite.....	68
3.2.1.3 Resolução e Poder de Resolução das imagens digitais.....	70
3.2.1.4 Série Landsat.....	72
3.2.1.5 Infravermelho termal.....	75
3.2.2 Materiais e Métodos.....	76
3.2.2.1 Materiais.....	76
3.2.2.2 Métodos.....	78
3.2.2.2.1 Localização da Área de Estudo.....	78
3.2.2.2.2 Processamento das Imagens de Satélite.....	80
3.2.2.2.3 Determinação da Temperatura Aparente de Superfície (LST).....	81
3.2.3 Resultados.....	84
3.2.4 Discussão.....	93
3.3 Conclusões.....	95
Referências.....	96
4 INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA INTENSIDADE DAS ILHAS DE CALOR DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA, SP.....	103
4.1 Introdução.....	104
4.2 Desenvolvimento.....	105
4.2.1 Revisão Bibliográfica.....	105
4.2.1.1 Clima Urbano.....	105

4.2.1.2 Sensoriamento Remoto aplicado a estudos de Ilhas de Calor.....	110
4.2.1.3 Ilhas de Calor (IC).....	111
4.2.1.4 Ilhas de Frescor (IF).....	116
4.2.1.5 Áreas Verdes Urbanas.....	117
4.2.2 Materiais e Métodos.....	117
4.2.2.1 Materiais.....	117
4.2.2.2 Métodos.....	118
4.2.2.2.1 Localização da Área de estudo e clima do Município de Piracicaba, SP.....	118
4.2.2.2.2 Pré-processamento e Processamento das imagens de satélite.....	120
4.2.2.2.3 Análise das Ilhas de Calor (IC) do Município de Piracicaba, SP.....	124
4.2.3 Resultados e Discussão.....	126
4.2.3.1 Análise da Morfologia Urbana: identificação das Ilhas de Calor (IC) da imagem de verão (08/01/2003).....	126
4.2.3.1.1 Análise Morfológica das dez Ilhas de Calor (IC) mais intensas.....	128
4.2.3.1.2 Particularidades do Bairro Centro.....	137
4.2.3.1.3 Análise Morfológica das dez Ilhas de Calor (IC) menos intensas.....	137
4.2.3.2 Sazonalidade das Ilhas de Calor (IC).....	144
4.2.3.3 Diferença da Temperatura Rural e Urbana.....	157
4.3 Conclusões e Considerações Finais.....	157
Referências.....	159

RESUMO

As mudanças climáticas globais, regionais e locais representam, na atualidade, uma das maiores preocupações da humanidade. Essas mudanças podem ocorrer tanto a partir de causas naturais quanto a partir de causas antrópicas. As áreas das cidades se caracterizam por apresentarem temperaturas mais elevadas quando comparadas com as áreas rurais. Essa anomalia térmica causa a formação de ilhas de calor e esse fenômeno é reconhecidamente importante em estudos de clima urbano. O objetivo do presente trabalho foi, através de técnicas do sensoriamento remoto, identificar e analisar as ilhas de calor do Município de Piracicaba, SP verificando sua sazonalidade, intensidade e morfologia. Para tanto foi necessário realizar uma análise climática regional e verificar a possibilidade do uso do algoritmo de transformação termal do software IDRISI 3.2 nas imagens do satélite Landsat 7. Para validar o algoritmo foram aplicados dois métodos de transformação de temperatura aparente de superfície. Para a análise climática regional foram estudados os principais elementos climáticos do Município de Piracicaba, SP utilizando-se de dados da Estação Meteorológica da ESALQ/USP entre os anos de 1950 e 2005 e estes foram correlacionados com variáveis da urbanização. Concluiu-se, com os dados encontrados, que os elementos temperatura, precipitação, umidade relativa e evaporação tiveram tendência de aumento no período estudado e todos eles foram classificados como tendências climáticas. A temperatura apresentou tendência de aumento mais acentuada e se correlacionou positivamente com o aumento da urbanização. O algoritmo de transformação do software IDRISI 3.2 para o satélite Landsat 7 foi validado, sendo uma importante ferramenta para a utilização de imagens de melhor resolução. As ilhas de calor mais intensas do verão são representadas por locais com excesso de material de construção civil e pouca ou nenhuma área verde. A diferença entre a área urbana e a área rural da cidade ultrapassou 16°C no verão. O Parque da Rua do Porto é uma ilha de frescor e exerce um “efeito oásis” no centro e nos bairros vizinhos. O perfil das ilhas de calor do Município de Piracicaba não segue aquele delimitado por OKE (1974). As ilhas de calor variam sazonal e espacialmente e a intensidade destas, ao longo das estações do ano, está intimamente relacionada com a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar. As ilhas de calor da época da entressafra são, em média, 3.5°C mais intensas que as da época da safra. Por fim, pode-se afirmar que o uso e a cobertura do solo rural e urbano é um dos grandes agentes modificadores do clima local e regional.

Palavras-chave: clima local e regional; ilhas de calor; imagens de satélite; infravermelho termal; sensoriamento remoto, uso e cobertura do solo.

ABSTRACT

Global, regional and local climate changes represent one of the greatest concerns of humanity. Climate changes can occur through natural or anthropogenic causes. Urban areas usually present higher temperatures than rural areas. This thermal effect is called “heat-island phenomenon” and has great importance on urban climate studies. In the present work, we identified and analyzed the heat-islands from Piracicaba, São Paulo using remote sensing techniques. The heat-islands were analyzed according to its seasonality, intensity and morphology using images from Landsat 7 satellite. We performed analysis on regional climate changes and investigated the use of the IDRISI thermal algorithm to convert Landsat 7 infrared thermal data on land surface temperature (LST). In order to transform Landsat 7 infrared thermal data we used two mathematical methods. Climate changes were analyzed by monitoring the climate elements for long periods of time, enabling the visualization of directional or periodical regional changes. The main climate elements were studied using data from ESALQ meteorological station for the last 55 years (1950-2005). Temperature, relative humidity, evaporation and precipitation variation were found to be correlated with urban growth parameters. The results indicated that temperature, precipitation, relative humidity and evaporation increased during the studied period and have been classified as “climate trends”. The temperature presented the more accentuated trend of increase and was positively correlated with the growing urbanization. The software IDRISI 3.2 can be used with Landsat 7 high resolution images, being a useful and rapid tool to study urban heat islands. The most intense summer heat-islands were represented by regions with higher amounts of constructed areas and almost any green area. In fact, during the summer the difference between the urban and rural areas was greater than 10°C. The Rua do Porto park was identified as a fresh-island and showed the “oasis effect” to the Center and neighbouring regions. Heat-islands varied according to the season and space and its intensity is intimately related to the sugar-cane seasonality. During the intercrop period the heat-islands were 3.5°C more intense than during the crop period. In conclusion land cover and land use affect local and regional climates.

Key words: heat island; infrared thermal data; land use and cover; local and regional climate; remote sensing, satellite images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Município de Piracicaba com indicação das nove classes de uso e ocupação da terra com destaque do perímetro urbano.....	34
Figura 2.2 – Localização da Área de Estudo.....	36
Figura 2.3 – Análise da Radiação Global a partir das médias anual e geral para os anos de 1978 a 2004.....	37
Figura 2.4 – Comparação entre as médias mensais da Radiação Global dos anos de 1978 a 2004 com as médias do ano de 2005	38
Figura 2.5 – Análise da Insolação a partir das médias anual e geral para os anos de 1950 a 2004.....	39
Figura 2.6 – Comparação entre as médias mensais de Insolação dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	39
Figura 2.7 – Análise da linha de tendência linear com a média anual da Precipitação.....	40
Figura 2.8 – Comparação entre as médias mensais de Precipitação dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	41
Figura 2.9 - Análise da linha de tendência linear com a média anual da Umidade Relativa para os anos de 1950-2004.....	42
Figura 2.10 - Comparação entre as médias mensais de Umidade Relativa dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	42
Figura 2.11 - Análise da linha de tendência linear com a média anual da Temperatura Máxima para os anos de 1950-2004.....	43
Figura 2.12 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Máxima dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	44
Figura 2.13 - Análise da Temperatura Mínima a partir das médias anual e geral para os anos de 1950 a 2004.....	45
Figura 2.14 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Mínima dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	45
Figura 2.15 - Análise da linha de tendência linear com a média anual da Temperatura Média para os anos de 1950-2004.....	46
Figura 2.16 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Média dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	46

Figura 2.17 - Análise da linha de tendência linear com a média anual da Evaporação para os anos de 1950-2004.....	48
Figura 2.18 - Comparação entre as médias mensais de Evaporação dos anos de 1950 a 2004 com as médias do ano de 2005.....	48
Figura 2.19 - Relação entre o número de habitantes nas áreas urbana e rural com a evolução da Temperatura Média nos anos de 1940, 1962,1978, 1995, 2000..	50
Figura 2.20 - Relação entre o número de bairros e a evolução da Temperatura Média nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	50
Figura 2.21 - Relação entre cobertura vegetal por habitante e evolução da temperatura média nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	51
Figura 2.22 - Relação entre o número de habitantes nas áreas urbana e rural com os dados de umidade relativa nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995, 2000.....	53
Figura 2.23 - Relação entre o número de bairros e umidade relativa nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	53
Figura 2.24 - Relação entre cobertura vegetal por habitante e umidade relativa nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	54
Figura 2.25– Relação entre o número de habitantes nas áreas urbana e rural com os dados de precipitação nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	55
Figura 2.26– Relação entre o número de bairros e precipitação nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	55
Figura 2.27– Relação entre cobertura vegetal por habitante e precipitação nos anos de 1940, 1978, 1995 e 2000.....	56
Figura 2.28– Relação entre o número de habitantes nas áreas urbana e rural com os dados de evaporação nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	56
Figura 2.29– Relação entre o número de bairros e evaporação nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	57
Figura 2.30– Relação entre cobertura vegetal por habitante e evaporação nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000.....	57
Figura 3.1 – Espectro Electromagnético.....	67
Figura 3.2- Espectro Óptico.....	68
Figura 3.3 – Sistema de Coordenadas de uma imagem digital.....	69

Figura 3.4 – Representação esquemática da escala de cinza – NC (0 a 255).....	70
Figura 3.5 – Diferentes Resoluções Espaciais.....	71
Figura 3.6 – Cena recortada da banda termal da imagen do satélite Landsat 5. Datum UTM e Projeção SAD 69.....	77
Figura 3.7 – Cena recortada da banda termal de baixo ganho (6L) do satélite Landsat 7. Datum UTM e Projeção SAD 69.....	77
Figura 3.8 – Cena recortada da banda termal de alto ganho (6H) do satélite Landsat 7. Datum UTM e Projeção SAD 69.....	78
Figura 3.9 – Localização da Área de estudo.....	79
Figura 3.10 – Limite do Município de Piracicaba e da área urbana do Município.....	80
Figura 3.11 – Demonstração visual da metodologia do trabalho.....	82
Figura 3.12 – Histograma da banda 6 da imagem Landsat 5.....	84
Figura 3.13 – Histograma da banda termal de baixo ganho (6L) da imagem Landsat 7.....	85
Figura 3.14 – Histograma da banda termal de alto ganho (6H) da imagem Landsat 7.....	85
Figura 3.15 – Relação dos valores encontrados para a banda termal da imagem Land 5.....	92
Figura 3.16 – Relação dos valores encontrados para a banda termal de baixo ganho da imagem Landsat 7.....	92
Figura 3.17 – Relação dos valores encontrados para a banda termal de alto ganho da imagem Landsat 7.....	93
Figura 4.1 – Diagrama do Subsistema Termodinâmico da teoria (SCU) de Monteiro (1976) com a região insumo, região transformação e região produção.....	108
Figura 4.2 – Diagrama do Subsistema Termodinâmico da teoria SCU de Monteiro (1976) com a região percepção e ação.....	109
Figura 4.3 – Representação esquemática das camadas atmosfera urbana (Urban boundary layer e canopy boundary layer) definida por OKE (1979).....	112
Figura 4.4 – Gradiente do espaço florestal urbano	114
Figura 4.5 – Perfil clássico da ilha de calor de grandes centros urbanos.....	115
Figura 4.6 – Representação esquemática de uma secção transversal de uma típica Ilha de calor urbana, mostrando os conceitos de “pick”, “cliff” e “plateau”	115
Figura 4.7 – Localização do Município de Piracicaba, SP.....	119

Figura 4.8 – Representação do limite da malha urbana do Município de Piracicaba, SP com a divisão oficial dos 62 bairros.....	119
Figura 4.9 – Fluxograma das etapas de pré-processamento e processamento das imagens digitais.....	120
Figura 4.10 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “água”.....	122
Figura 4.11 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “solo urbano”.	122
Figura 4.12 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “remanescente florestal”.....	123
Figura 4.13 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “cana de açúcar”.....	123
Figura 4.14 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “pasto”.....	123
Figura 4.15 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “solo exposto”	124
Figura 4.16 – Banda termal de baixo ganho da imagem Landsat 7 do dia 08/01/2003 (verão) transformada em temperatura aparente de superfície. Projeção Latitude/Longitude e datum WGS 84	126
Figura 4.17 – Vetor dos bairros com indicação dos dez bairros mais quentes	129
Figura 4.18 – Morfologia da IC do bairro Unileste.....	130
Figura 4.19 – Morfologia da IC do bairro Jardim Primavera.....	130
Figura 4.20 – Morfologia da IC do bairro Morumbi.....	131
Figura 4.21 – Morfologia da IC do bairro Morato.....	131
Figura 4.22 – Morfologia da IC do bairro Paulicéia.....	132
Figura 4.23 – Morfologia da IC do bairro Centro.....	132
Figura 4.24 – Morfologia da IC do bairro Pompéia.....	133
Figura 4.25 – Morfologia da IC do bairro Monte Alegre.....	133
Figura 4.26 – Morfologia da IC do bairro Vila Rezende.....	134
Figura 4.27 – Morfologia da IC do bairro Santa Terezinha.....	134
Figura 4.28 – Ilha de Frescor (IF) do Centro (Parque da Rua do Porto).....	136
Figura 4.29 – Vetor com a localização dos bairros com as IC menos intensas.....	138
Figura 4.30 – Morfologia da IC do bairro Ondinhas.....	139
Figura 4.31 – Morfologia da IC do bairro Clube de Campo.....	139
Figura 4.32 – Morfologia da IC do bairro Parque da Rua do Porto.....	140

Figura 4.33 – Morfologia da IC do bairro Campestre.....	140
Figura 4.34 – Morfologia da IC do bairro São Jorge.....	141
Figura 4.35 – Morfologia da IC do bairro Jardim Itapuã.....	141
Figura 4.36 – Morfologia da IC do bairro Santa Rita.....	142
Figura 4.37 – Morfologia da IC do bairro Jardim Abaeté.....	142
Figura 4.38 – Morfologia da IC do bairro São Judas.....	143
Figura 4.39 – Morfologia da IC do bairro Gaumium.....	143
Figura 4.40 – Imagem da banda termal do satélite Landsat 7 do dia 08/01/2003 com temperatura aparente de superfície.....	147
Figura 4.41 – Imagem da banda termal do satélite Landsat 7 do dia 29/11/1999 (primavera/ entressafra) com temperatura aparente de superfície. Projeção Latitude e Longitude. Datum: WGS 84.....	147
Figura 4.42 – Imagem da banda termal do satélite Landsat 7 do dia 13/05/2002 (outono/ safra) com temperatura aparente de superfície. Projeção Latitude e Longitude. Datum: WGS 84.....	148
Figura 4.43 – Imagem banda termal do satélite Landsat 7 do dia 17/08/2002 (inverno/ entressafra) com temperatura aparente de superfície. Projeção: Latitude e Longitude. Datum: WGS 84.....	148
Figura 4.44 – Comportamento das IC nas quatro estações.....	149
Figura 4.45 – Imagem Landsat 7 classificada da estação de Verão (08/01/2003). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude.....	150
Figura 4.46 – Imagem Landsat 7 classificada da estação do outono (30/04/2003). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude.....	151
Figura 4.47 – Imagem Landsat 7 classificada da estação de Inverno (17/08/2002). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude.....	151
Figura 4.48 – Imagem Landsat 7 classificada da estação da Primavera (29/11/1999). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude.....	152
Figura 4.49 - Balanço energético em solos expostos e solos vegetados.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Uso e ocupação do solo de Piracicaba, SP.....	34
Tabela 2.2 – Dados históricos do Município de Piracicaba, SP.....	49
Tabela 3.1 – Principais características da série Landsat.....	73
Tabela 3.2 – Resultados das temperaturas na banda termal do Landsat 5.....	86
Tabela 3.3 – Resultados das temperaturas na banda termal de baixo ganho do Landsat 7.....	87
Tabela 3.4 – Resultado das temperaturas na banda termal de alto ganho do Landsat 7.....	89
Tabela 4.1 – Principais componentes da Teoria do SCU de Monteiro (1976).....	106
Tabela 4.2 – Coordenadas e temperatura das IC de cada bairro do Município de Piracicaba, SP.....	127
Tabela 4.3 – Os dez bairros com as IC mais intensas.....	129
Tabela 4.4 – Os dez bairros com as IC menos intensas.....	138
Tabela 4.5 – IC nas quatro estações do ano.....	144
Tabela 4.6 – Condições meteorológicas dos dias das imagens.....	149
Tabela 4.7 – Distribuição das classes de uso do solo nas quatro estações do ano.....	152
Tabela 4.8 – IC nas estações do ano.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS

OMM – Organização Meteorológica Mundial
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
APP – Área de Preservação Permanente
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
USP – Universidade de São Paulo
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
EPA – Environmental Protency Agency
LST – Temperatura aparente de superfície (land surface temperature)
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
REM – Energia Eletromagnética
NC – Nível de cinza
DN – Número digital (digital number)
Pixel – Picture element
PV – Pixel Value
TM – Thematic Mapper
ETM⁺ - Enhanced Thematic Mapper Plus
MSS – Multispectral Scanner System
NASA – National Agency Spacial American
6L – Banda 6 (termal) de baixo ganho do satélite Landsat 7
6H – Banda 6 (termal) de alto ganho do satélite Landsat 7
°C – Graus Celsius
°K – Graus Kelvin
IC – Ilha de Calor
IF – Ilha de Frescor
SCU – Sistema Clima Urbano
GPS – Global Positioning System
RMS – Erro quadrático médio
Pq. – Parque

Jd. – Jardim

V. – Vila

1 INTRODUÇÃO

Variações climáticas podem ocorrer tanto a partir de causas naturais como a partir de causas antrópicas e esses efeitos ainda não são claramente distinguíveis (IPCC, 2001). Recentemente a ação do homem sobre o clima tem sido discutida em escalas local, regional e global (WENG, 2001). Além disso, o crescimento cada vez mais rápido das cidades passa a chamar atenção da comunidade científica (PONGRACZ et al., 2005). A principal dificuldade nos estudos climáticos é que muitos dos mecanismos que atuam sobre os elementos e fatores do clima exercem influências opostas mas de mesma ordem de grandeza. Assim, diante da interação de alguns fatores, a natureza pode reagir de forma diferente, sendo difícil prever qual comportamento será apresentado. As mudanças climáticas afetam de forma significativa a população uma vez que modificam os ecossistemas naturais e alteram a frequência com que eventos extremos, como furacões, ciclones, ondas de calor e derretimento de geleiras, acontecem. Qualquer alteração ocorrida nas fontes, elementos ou processos que envolvem as forças climáticas afeta profundamente os climas da Terra (CONTI, 2000). Além disso, é conhecido o fato de que a expansão de áreas urbanas e o excesso de atividades humanas causam impacto no clima (ICHINOSE et al., 1999). A rápida expansão das cidades tem modificado o espaço geográfico, sobretudo quando se trata de qualidade ambiental. O grande aumento demográfico e a concentração das atividades comercial, financeira, institucional e industrial, têm gerado uma valorização do espaço urbano, que contribui para o crescimento e o adensamento das áreas edificadas (CASTRO, 2000).

As modificações climáticas locais produzidas nas cidades foram estudadas por LANDSBERG (1981) que destaca a redução da radiação solar; a elevação da temperatura devido ao calor liberado nas cidades; o aumento da nebulosidade e dos nevoeiros que se tornam mais espessos e frequentes; o decréscimo da umidade relativa; o aumento da produção de núcleos de condensação; a redução da queda de neve; a diminuição da velocidade dos ventos e o aumento dos períodos de calmaria. Essas alterações climáticas têm se tornado tão evidentes que, na definição do termo “clima urbano”, muitos trabalhos têm dado destaque ao efeito observado nas cidades ao invés de evidenciar a atmosfera (CASTRO, 2000). O clima urbano é um sistema complexo, adaptativo e aberto que, ao receber energia do ambiente maior no qual se insere, a transforma substancialmente a ponto de gerar uma produção exportada ao ambiente (TAVARES e PROCHNOW, 1997; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). O estudo do clima urbano visa

compreender a organização climática peculiar da cidade e pressupõe, inicialmente, um nível de enfoque que compreende o clima local, mas que se estende a níveis regionais (mesoclimas) e globais (macroclimas). Na escala global, o efeito urbano, sobretudo através da queima de combustíveis fósseis, tem incrementado os níveis de poluição do ar (CASTRO, 2000). O dióxido de carbono liberado pelas atividades humanas e o desflorestamento ambiental causam o efeito estufa, aquecendo a atmosfera (CORSON, 1993).

MONTEIRO (1976) destaca que no estudo de clima urbano podem ser consideradas três linhas de pesquisa ligadas às alterações da atmosfera urbana: o conforto térmico, impactos meteorológicos e qualidade do ar. O canal de conforto térmico está relacionado com o balanço de energia, sendo evidenciado pela geração da ilhas de calor (IC). As IC são anomalias térmicas caracterizadas pela elevação da temperatura em determinadas áreas quando comparadas a outras. A IC pode ser observada em várias escalas (PEREZ et al., 2001) e normalmente esse fenômeno é mais evidenciado na diferença de temperatura entre as áreas urbanas e rurais.

Considerando a magnitude do fenômeno da geração da IC, muitos são os mecanismos que contribuem para a sua formação e muitos são os fatores e sistemas que agravam sua intensidade, desde sua localização geográfica até as condições climatológicas do dia. Há também fatores relacionados às características específicas da cidade, como o tamanho, a densidade da população, o dia da semana, a cultura local, além de variações diurnas e sazonais (PRICE, 1979; LANDSBERG, 1981; CARNAHAN e LARSON, 1990; TARIFA, 1994). A IC, assim como os demais problemas causados no clima, têm sua origem na drástica modificação do uso e cobertura do solo. A superfície da cidade construída de área edificada influi de maneira tridimensional na interação que existe entre a estrutura urbana e a atmosfera. As condições climáticas de uma área urbana extensa e de construção densa são totalmente distintas daquelas dos espaços abertos circundantes, podendo haver diferenças de temperatura, de velocidade do vento, de umidade e de pureza do ar. O desenho físico urbano, desde a escala de edifícios até as áreas metropolitanas, pode ter forte repercussão nas condições climáticas locais (LOMBARDO, 1985).

Uma das grandes modificações causadas pelo ambiente urbano é a drástica substituição das áreas verdes. As áreas verdes, tanto da área urbana quanto das áreas circunvizinhas às cidades, exercem enorme influência no clima local, regional e global. Diversas pesquisas pontuam que a vegetação urbana é essencial para se atenuar os efeitos causados pela alteração do clima local (SAMPAIO, 1981; TARIFA, 1981; LOMBARDO, 1985; CAMILLONI e BARROS,

1997; PEREZ et al., 2001; SPRONKEN-SMITH, 2002; WENG, 2001; MONTEIRO E MENDONÇA, 2003). Uma das características marcantes da vegetação é o fato de amenizar a temperatura local e, como consequência, diminuir os efeitos das IC (LOMBARDO, 1985; PEREZ et al., 2001). Os parques urbanos se convertem em pequenas ilhas que são mais frescas e úmidas que seus arredores e produzem, dentro de um ambiente mais quente e seco, um mosaico urbano de microclimas (GOMEZ, 1993).

Uma das ferramentas mais importantes e conhecida nos dias de hoje para estudos de clima urbano e IC é o sensoriamento remoto, pois este, além de oferecer visões de diferentes escalas, permite a transformação de dados do infravermelho termal em temperatura aparente da superfície. A temperatura quantificada pelo satélite é a temperatura radiante da superfície que é um valor superior à temperatura do ar (WENG, 2003). Assim, os dados das imagens de satélite do infravermelho termal são capazes de fornecer temperatura qualitativa da cidade, ou seja, o desenho da temperatura local.

Nesse contexto, o principal objetivo do presente trabalho foi, através de técnicas do sensoriamento remoto, fazer uma análise qualitativa das IC do Município de Piracicaba, SP, verificando sua morfologia e seu comportamento sazonal. No entanto, para realizar esta análise foi necessário estudar o clima regional.

Assim, o primeiro capítulo da dissertação consiste numa análise dos principais elementos climáticos no Município de Piracicaba, SP, a fim de verificar suas variações e tendências climáticas. Essa análise em mesoescala revisa os principais conceitos climáticos e estuda as séries históricas da estação meteorológica da ESALQ/USP dos últimos 55 anos.

Para a análise das IC é necessária a utilização de imagens termais de melhor resolução como as do satélite Landsat 7, que tem 60 metros de resolução na banda termal. No entanto, o programa matemático que converte os dados do infravermelho termal em temperatura aparente da superfície é calibrado para as imagens do Landsat 5, que tem uma resolução inferior, de 120 metros. Assim, no segundo capítulo verificou-se a possibilidade do uso do algoritmo de transformação termal do programa matemático IDRISI 3.2, nas duas bandas termais (banda de baixo e alto ganho) das imagens do satélite Landsat 7.

Feitas essas análises, foi possível, então, o estudo aprofundado do fenômeno das ilhas de calor do Município de Piracicaba, SP, apresentado no terceiro capítulo.

Cada capítulo está dividido em três itens, introdução, desenvolvimento e conclusões. O item desenvolvimento subdivide-se em revisão bibliográfica, materiais e métodos e resultados e discussão.

REFERÊNCIAS

- CAMILLONI, W.H.; BARROS, V. On the urban heat island effect dependence on temperature trends. **Climate Change**, Amsterdam, v.37, n. 4, p.665-681, May. 1997.
- CARNAHAN, W.H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.33, n.1, p.65-71, 1990.
- CASTRO, A.W.S. **Clima urbano e saúde: as patologias do aparelho respiratório associadas aos tipos de tempo no inverno, em Rio Claro – SP**. 2000. 202p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2000.
- CONTI, J.B. Considerações sobre mudanças climáticas globais. In: NETO, J.L.S.; ZAVATINI, J. A. (Org.). **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. pt 1, p.17-28.
- CORSON, W.H. Ar, Atmosfera e Clima. In: _____(Ed.). **Manual Global de Ecologia: o que você pode fazer a respeito da crise do meio ambiente**. Tradução de Alexandre G. Camaru. São Paulo: AUGUSTUS, 1993. cap.12, p.219-242.
- GOMEZ, A.L. **El clima Urbano: teledetección de la Isla de Calor en Madrid**. Madrid. MPOT (Ministério de Obras Públicas y transportes), 1993. 157 p.
- ICHINOSE, T.; SHIMODOZONO, K.; HANAKI, K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.33, n. 24-25, p.3897-3909, 1999.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Genebra, Suíça, 2001. 139p.
- LANDSBERG, H.E. The urban climate. **International Geophysics Series**, v.28. New York: Academic Press, 1981. 275p.
- LOMBARDO, M.A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.
- MONTEIRO, C.A. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: Instituto de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976. 181p (**Série Teses e Monografias**, n.25).
- MONTEIRO, C. A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p.
- PEREZ, J.C.; SÁNCHEZ, M.de los.A.V.; BARRADAS, V.L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **Red Nacional de Investigación Urbana**, Puebla, México, Ciudades 51, jul/set. 2001.

PONGRACZ, R.; BARTHOLY, J.; DEZSO Z. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. **Advances in Space Research**, Oxford, v.15, 13 Jun. 2005. In Press. Disponível em <www.elsevier.com/locate/asr>

PRICE, J.C. Assessment of the urban island effect through the use satellite data. **Monthly Weather Review**, Boston, v.107, n.11, p.1554-1557, 1979.

SAMPAIO, A.H.L. **Correlações entre o uso do solo e ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador**. 1981. 103p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

SPRONKEN-SMITH, R.A. Comparison of summer-and winter-time suburban energy fluxes in Christchurch, New Zeland. **International Journal of Climatology**, Oxford, v.22, n.8, p.979-992, 2002.

TARIFA, J.R. **A análise topo e microclimática e o trabalho de campo: o caso de São José dos Campos**. São Paulo: IGEO/USP, 1981. (Climatologia, 11).

_____. Alterações climáticas resultantes da ocupação agrícola no Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.8, p.15-28, 1994.

TAVARES, A.C.; PROCHNOW, C.A.C. **Atlas climático de Rio Claro – SP 1996**. Rio Claro: (s.n.), 1997. 78p.

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v. 22, n.10, p.1999-2014, 2001.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566, May. 2003.

ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS CLIMÁTICOS NA REGIÃO DE PIRACICABA, SP.

Resumo

A análise das mudanças climáticas pode ser realizada por monitoramento de elementos climáticos por longos períodos de tempo, permitindo visualizar mudanças direcionais ou periódicas no clima de determinadas regiões. O objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise dos principais elementos climáticos, no Município de Piracicaba, SP utilizando dados da Estação Meteorológica da ESALQ/USP entre os anos de 1950 e 2005. Os elementos atmosféricos temperatura, umidade relativa, evaporação e precipitação foram correlacionados com variáveis da urbanização, como população urbana e rural, número de bairros e cobertura vegetal por habitante. Conclui-se que os elementos temperatura, precipitação, umidade relativa e evaporação tiveram tendência de aumento no período estudado e todos eles foram classificados como tendências climáticas, de acordo com as definições propostas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Entretanto, não é possível afirmar que houve mudança climática. A temperatura apresentou tendência de aumento mais acentuada e se correlacionou positivamente com o aumento da urbanização, sugerindo que esse pode ser um dos fatores responsáveis por seu aumento nos últimos 55 anos.

Palavras Chave: clima, elementos atmosféricos, urbanização, variação climática.

Abstract

Climate changes analysis are usually performed by monitoring the climate elements for long periods of time, enabling the visualization of directional or periodical regional changes. In the current study we studied the climate changes in Piracicaba, SP. The main climate elements were studied using data from ESALQ meteorological station for the last 55 years (1950-2005). Temperature, relative humidity, evaporation and precipitation variation were found to be correlated with urban growth parameters such as urban and agricultural population, number of quarters and vegetal covering for inhabitant. The results indicated that temperature, precipitation, relative humidity and evaporation increased during the studied period and have been classified as “climate trends” in accordance with the OMM definitions. However, it is not possible to conclude that there was a climatic change. The temperature presented the greatest increase and it was positively correlated with urban growth. This indicates that urbanization may be the responsible for temperature increase over the past 55 years.

Key words: climate, atmospheric elements, urbanization, climate trends

2.1 Introdução

Desde a formação do planeta e da atmosfera terrestre, o clima tem sofrido alterações, pois assim como outros sistemas naturais, o clima está em constante e permanente transformação (RIBEIRO, 1993). A crescente industrialização e urbanização descontrolada, além dos problemas ambientais de poluição e degradação ambiental, geraram intensas transformações na superfície terrestre, resultando em modificações climáticas (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003).

Considerando que o clima é dinâmico torna-se necessária a observação constante de seus principais elementos, como a temperatura, a umidade, a insolação, a precipitação a evaporação e a radiação global por um longo período de tempo a fim de verificar se existem variações e como estas se comportam (VILLA NOVA et al., 2003). Variações permanentes podem ser fatores de mudanças climáticas e, mudanças ocasionais, são naturais, chamadas de ciclos periódicos que tendem a se repetir (NETO, 2000). Assim, o objetivo do presente trabalho foi analisar os principais elementos meteorológicos no município de Piracicaba, São Paulo dos últimos 55 anos, a fim de verificar se as variações que aconteceram na área de estudo podem ser classificadas como mudanças climáticas ou se são apenas ciclos periódicos de variações. Além disso, o trabalho correlaciona os elementos temperatura média, precipitação, umidade relativa e evaporação ao crescimento urbano da cidade.

O presente trabalho estrutura-se em duas partes: desenvolvimento e conclusões gerais. O item desenvolvimento está dividido em três subitens (revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão). A última parte do trabalho é composta das conclusões gerais e das considerações finais.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Revisão Bibliográfica

2.2.1.1 Clima

Muitas são as definições de clima e dentre elas destaca-se, basicamente, o fato do clima ser um sistema altamente não linear e interativo, que funciona em regime de trocas energéticas recíprocas e interdependentes (VIANELLO e ALVES, 1991). O clima é o resultado de complexas interações entre elementos climáticos (temperatura, umidade, precipitação, evaporação, entre outros) e processos físicos que envolvem a atmosfera, oceano e superfícies

sólidas (vegetadas ou não) (GOLDREICH, 1995; NETO, 2000; CONTI, 2000). Os fenômenos relacionados com o comportamento da atmosfera são orientados no sentido da compreensão de sua extensão (espaço) e de sua duração (tempo) (RIBEIRO, 1993). As interações e fenômenos ainda são pouco conhecidos individualmente (CONTI, 2000), o que faz com que a descrição quantitativa do clima represente um verdadeiro desafio para a ciência (VIANELLO e ALVES, 1991).

A principal dificuldade dos estudos climáticos é justamente a não linearidade do sistema, que faz com que os mecanismos que atuam sobre os elementos e os fatores climáticos exerçam influência de mesma ordem de grandeza, mas em sentido contrário (CONTI, 2000). Diante da interação de alguns fatores, a natureza pode apresentar reações diversas, de forma que é difícil prever qual comportamento será apresentado (CONTI, 2000; VIANELLO e ALVES, 1991).

Qualquer alteração ocorrida nas fontes, elementos ou processos que envolvem as forças climáticas afeta profundamente os climas da Terra (CONTI, 2000). Além disso, o homem, principalmente a partir da Revolução Industrial, tem contribuído para a ocorrência de muitas alterações no ambiente geográfico, interferindo e transformando a superfície terrestre, afetando, portanto, o clima (HACKENBERG, 1991; NETO, 2000; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003).

Não se pode falar em clima sem passar pelos conceitos de “tempo” e “escala”. Tempo é o estado atmosférico de um certo instante ou de um determinado dia, e o clima de um dado lugar é a síntese de seus tempos atmosféricos em um determinado período (AYOADE, 1991; SILVA e RIBEIRO, 2004). Nesse sentido, o clima pode ser entendido como as condições médias e rotineiras do tempo de uma determinada região (LARCHER, 2000). Já as escalas são referências de valor, estabelecidas por critérios, para a compreensão de um fenômeno (NUNES, 2003). A interação do tempo e do espaço entre os fluxos de matéria e energia e os condicionantes de sua definição, pode ter três níveis interativos: o macroclimático, o mesoclimático e o microclimático (SILVA E RIBEIRO, 2004). O macroclima, ou nível zonal, se refere a grandes escalas, ao clima global, por exemplo. Já mesoclima é um termo utilizado para definir o clima de região (MONTEIRO, 1976). NUNES (2003) ainda divide o mesoclima em regional (na ordem de 10^4 milhões de km) e sub-regional (da ordem de 10^2 centenas de km). Por fim, microlima são os climas de pequenas áreas, ou nível local que, segundo a taxonomia de MONTEIRO (1976) compreende unidades de superfície de 10^{-2} centenas de km.

A evolução do comportamento atmosférico, em qualquer escala, nunca é igual de um ano para o outro e nem mesmo de uma década para outra, podendo-se verificar flutuações a médio, curto e longo prazos (JESUS, 1995). Essas variações necessitam de estudos e avaliações periódicas a fim de se verificar se podem ser classificadas como mudanças climáticas (VILLA NOVA et al., 2003).

2.2.1.2 Considerações sobre mudanças climáticas

Já é sabido o fato de que as mudanças climáticas influem na biodiversidade, na agricultura, nas mudanças ambientais, nos regimes hídricos, na frequência de eventos extremos e nas condições de saúde da população (AYOADE, 1991; CONFALONIERE, 2001; NUNES, 2003; SILVA e RIBEIRO, 2004). Em 1968, a OMM criou o “Programa Intergovernamental de Estudos e Mudanças Climáticas” e um dos pontos de destaque foi o reconhecimento das mudanças climáticas como uma preocupação global, dado que o clima é elemento essencial para a vida no planeta.

NETO (2000) destaca a importância de se distinguir as mudanças climáticas, que ocorreram na escala geológica do tempo (em milhares de anos), da variabilidade climática, de curta duração, que ocorre num período de tempo perceptível na escala humana. As alterações no comportamento atmosférico de um ano para outro não significam, necessariamente, mudanças climáticas (CONTI, 2000). Entretanto, é imprescindível que estas alterações aconteçam em uma sequência considerável de anos para definir uma tendência estatística indicadora de alteração (NETO, 2000; CONTI, 2000; MENDONÇA, 2000; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). As indagações apontadas sobre os mecanismos responsáveis pelas alterações climáticas são numerosas e de respostas ainda não inteiramente satisfatórias (NETO, 2000), podendo ocorrer de forma muito variada e em diferentes escalas, que pode oscilar de um volume microscópico ao planetário, em períodos muito breves (segundos) a muito longos (milênios) (CONTI, 2000).

As definições utilizadas na literatura sobre variabilidade climática se diferenciam de acordo com a inclusão, ou não, dos efeitos antrópicos na identificação da variabilidade. O “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) (2001) define modificação climática (“climate change”) como as mudanças de clima no tempo devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas (ações antrópicas). Já TUCCI (2002), MONTEIRO (1976), AYOADE (1991) e pesquisadores do grupo “Framework Convention on Climate Change” definem

modificação climática como as mudanças associadas direta ou indiretamente a atividade humana que alteram a variabilidade climática natural observada num determinado período.

Mudança climática, para SANTOS (2000), pode ser entendida como sendo todas as formas de inconstâncias climáticas, independentemente de sua natureza estatística ou causas físicas, podendo ser analisadas em diversas escalas temporais (longos, médios e curtos prazos), e em escalas espaciais, como global, regional e local. Compreende, portanto, diversas categorias de inconstâncias, cujas ocorrências se enquadram nas definições de tendência, descontinuidade, flutuação, variação, oscilação, vacilação, periodicidade e variabilidades climáticas.

A esse respeito, TARIFA (1994) observa que há mudança climática (em nível regional ou de macro escala) quando se registra variação em um dos atributos principais do clima (como a temperatura ou chuva) em mais de 30 anos consecutivos. A oscilação climática, por sua vez, ocorre quando a variação é observada em um período menor de tempo.

Essas definições refletem a dificuldade de se encontrar as terminologias adequadas para cada acontecimento climático. Nesse sentido, a OMM propôs o seguinte quadro de definições (OMM, 1996):

- ✚ **Mudança climática:** toda e qualquer manifestação de inconsistência climática, independente de sua natureza estatística, escala temporal ou causas físicas;
- ✚ **Tendência climática:** aumento ou diminuição lenta dos valores médios ao longo de uma série de dados de, no mínimo, três décadas, podendo, ou não, ocorrer de forma linear;
- ✚ **Descontinuidade climática:** mudança abrupta e permanente de um valor médio durante o período de registro;
- ✚ **Flutuação climática:** qualquer mudança que se expresse por duas máximas (ou mínimas) e uma mínima (ou máxima) observada no período de registro;
- ✚ **Variação climática:** flutuação sem padrão específico, observado em escalas de décadas;
- ✚ **Oscilação climática:** flutuações onde se registram máximas e mínimas sucessivas;
- ✚ **Vacilação climática:** flutuação na qual a variável tende a permanecer, alternadamente, em torno de dois (ou mais) valores e a movimentação de um valor médio para o outro ocorre a intervalos regulares ou irregulares;
- ✚ **Periodicidade climática:** oscilação em que as máximas e as mínimas ocorrem a intervalos de tempos constantes;

- ✚ **Variabilidade climática:** maneira pela qual os parâmetros climáticos variam no interior de um determinado período de registro, expressos através de desvio-padrão ou coeficiente de variação.

2.2.1.3 Clima e ações antrópicas

Os relatórios do IPCC (2001) ressaltam que as causas das variações e modificações climáticas ainda não são claramente distinguíveis. No entanto, a comunidade científica vem alertando para o fato de que atividades humanas estão interferindo no balanço de radiação da Terra (NUNES, 2003) e, a ação do homem sobre o clima, tem sido discutida em todas as escalas (local, regional e global) (WENG, 2001). As principais atividades humanas são a urbanização, a industrialização, a agricultura, a mineração, o pastoreio, a irrigação e drenagem de pântanos, a construção de lagos artificiais e o represamento de rios (SANTOS, 2000) e, dentre todas essas atividades, o crescimento cada vez mais rápido das cidades passa chamar a atenção de pesquisadores de todas as áreas, com destaque à área climatológica (PONGRACZ et al., 2005).

As alterações climáticas são percebidas com maior intensidade nos grandes centros urbanos onde ocorrem de maneira distinta às áreas vizinhas (ICHINOSE et al., 1999; NUNES, 2003). Isso se dá devido ao grau de urbanização que as cidades têm apresentado (LOMBARDO, 1985). COSTA (2004) destaca que a urbanização pode ser medida através de fatores como tamanho da população (urbana e rural), aumento do número de bairros de uma determinada cidade e cobertura vegetal por habitante.

A partir da Revolução Industrial, quando as cidades começaram a se expandir rapidamente, uma série de eventos vêm comprovando mudanças significativas nas características climáticas em macro, meso e micro escalas (CONTI, 2000). LOMBARDO et al. (1991) explica que o maior aumento da temperatura ocorreu a partir da década de 80 e estas alterações são decorrentes não somente da variabilidade natural, mas também da atividade antropogênica. Os relatórios do IPCC (“Intergovernmental Panel on Climate Change”) destacam que, nesse século, a temperatura se elevou de 0.3°C – 0.6°C.

O clima de uma cidade, ou clima urbano, é derivado da alteração da paisagem natural por um ambiente construído (MENDONÇA, 2000; MENDONÇA, 2003), e um dos mecanismos do sistema cidade-atmosfera mais afetado pela mudança do uso e cobertura do solo é o balanço de energia (PEREZ et al., 2001; AZEVEDO e TARIFA, 2001; KALNAY e CAI, 2003;

MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). A modificação do balanço energético das cidades tem causado uma série de fenômenos que têm se tornado foco de muitos estudos (PEREZ et al., 2001) e, dentre eles, destacam-se pesquisas referentes à temperatura e umidade relativa do ar (por conta de fenômenos como as ilhas de calor, as ilhas de frescor, o conforto/desconforto térmico) (LOMBARDO, 1985; PEREZ et al., 2001; MONTEIRO, 2003; LU e WENG, 2005), aos ventos (diretamente ligados à dispersão da poluição) e, nas cidades tropicais, a precipitação, por conta das grandes inundações (CONTI, 2000).

Mudanças na cobertura da terra incluem modificações na diversidade biótica, produtividade primária potencial e atual de energia, na qualidade do solo, nas chuvas, nas taxas de sedimentação (STEFFEN et al., 1992) e essas alterações não podem ser bem entendidas sem o conhecimento da mudança do uso da superfície (GALLO e OWEN, 1998; WENG, 2001; HAFNER e KIDDER, 1999; PRATS et al., 2005). Além disso, a substituição do uso e cobertura do solo têm implicações ambientais nos níveis locais e regionais e, talvez, possam estar ligadas aos processos de mudança do clima global (WENG, 2001). A esse respeito, KALNAY e CAI (2003) afirmam que as atividades diversas exercidas pelo homem, associadas à mudança do uso e cobertura do solo, têm aumentado a proporção de gases que absorvem a radiação re-emitada pelo planeta, aprisionando-a próxima à superfície terrestre e elevando a temperatura, causando, assim, o efeito estufa antropogênico.

Todas essas variações causadas no clima, por ação antrópica ou não, também tem um efeito direto nas atividades agrícolas (agricultura e pecuária). SANTOS (2000) destaca que as variações diárias, sazonais e anuais nos valores dos elementos climáticos são de vital importância na determinação da eficiência do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade dos vegetais cultivados. Essas variações podem estar fora das normalidades habituais, provocando adversidades agroclimáticas e conseqüentes oscilações nas safras.

Assim, nota-se que mesmo não sabendo ao certo qual a proporção dos impactos causados pela humanidade no clima, as atenções devem ser voltadas para esse assunto. LOMBARDO et al. (1991) destaca que o fato das mudanças climáticas ocorrerem em diferentes países culmina na necessidade de implantar estratégias nacionais apropriadas a situação cultural, política e econômica visando atingir uma visão global do problema.

2.2.1.4 Características gerais do clima e do Município de Piracicaba, SP.

A área de Piracicaba, situada em um ponto crítico de transição das correntes da circulação geral, apresenta características climáticas variadas. Essa variabilidade ocasiona dois períodos distintos: um mais quente e chuvoso e outro menos quente e mais seco (COSTA, 2004) o que dificulta enquadrar a área do Município numa classificação climática estável. No entanto, muitos pesquisadores utilizam a classificação de “Köppen” para descrever o clima da cidade de Piracicaba. Segundo essa classificação, o clima local é do tipo “Cwa”, ou seja, tropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto). A temperatura média do mês mais quente ultrapassa 22°C e a do mês mais frio não é inferior a 16°C, com média anual de 21,1°C. A precipitação média é de 1.253 mm/ano, com ventos que atingem uma velocidade média de 2,2 m/s. A umidade relativa do ar varia em torno de 74% e insolação mensal média é de 201,5 horas (2.418 lux ano⁻¹).

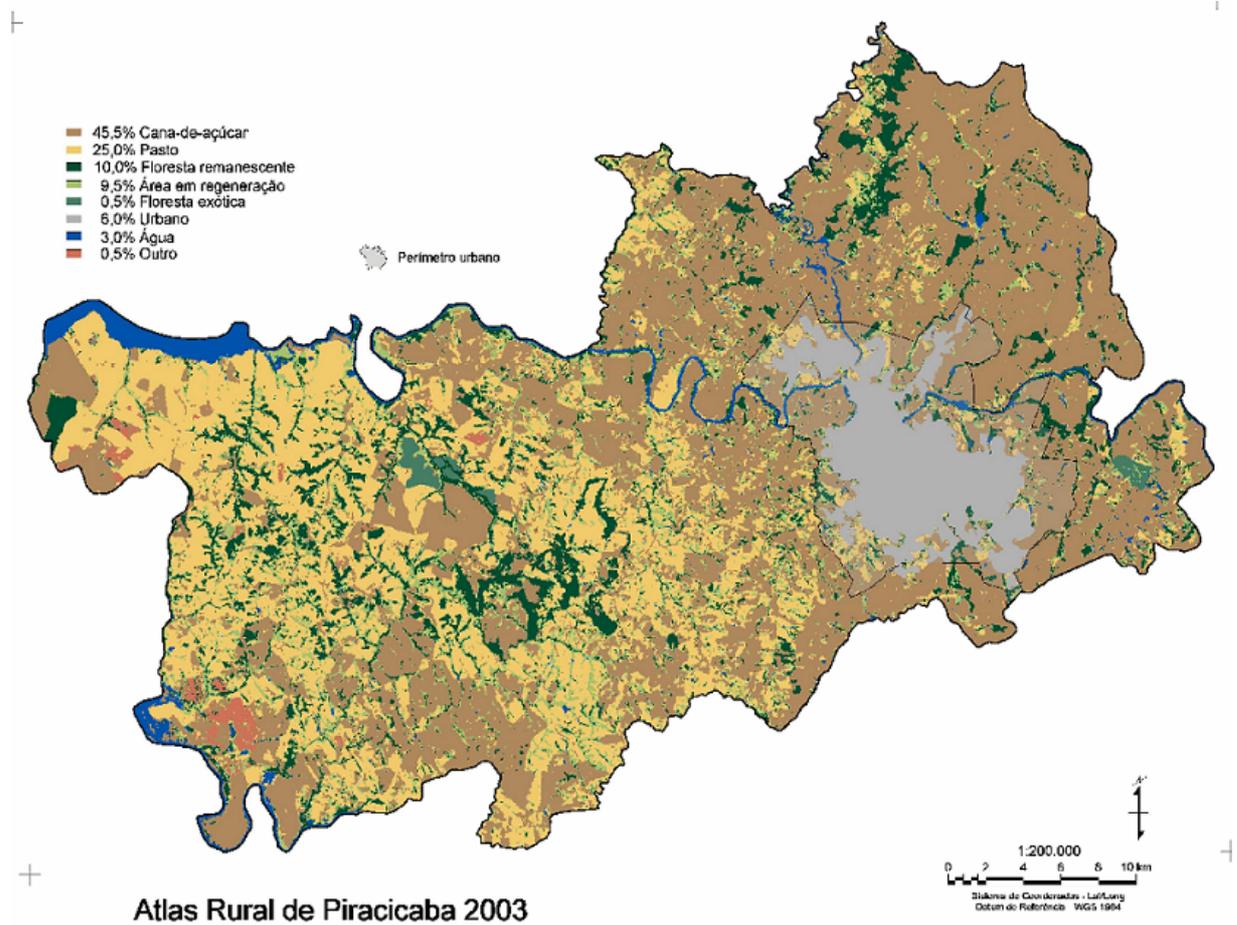
RANZANI (1996) afirma que na região há uma tendência para tropicalidade, ou seja, as temperaturas médias anuais variam em torno de 20°C, atingindo, nos meses mais quentes do ano (de novembro a março), uma temperatura média de 23°C e, nos meses mais frios (de maio a agosto), 17 °C.

Piracicaba é hoje uma cidade-pólo de uma região de quase três milhões de habitantes, dentro de uma bacia que abrange uma área de 12.400 km², 50 municípios paulistas e 8% da população do Estado de São Paulo. Constitui-se, depois de Campinas, a cidade mais populosa dessa bacia. Sua importância regional se deve, principalmente, à extensa produção de cana-de-açúcar (BARRETO et al, 2006).

Segundo BARRETO et al. (2006) o uso e ocupação do solo do município, se divide, basicamente, em 9 classes: cana-de-açúcar, pasto, floresta remanescente, áreas em regeneração natural, floresta exótica, urbano, água, área de preservação permanente (APP) e outros (tabela 2.1). A figura 2.1 representa a área total do município e suas respectivas classes.

Tabela 2.1 – Uso e ocupação do solo de Piracicaba, SP¹

Classe	Total (ha)	Total (%)
Piracicaba	138.538	100
Cana-de-açúcar	62.978	45.46
Pasto	34.965	25.24
Floresta Remanescente	13.725	9.91
Áreas em Regeneração Natural	13.323	9.62
Floresta Exótica	627	0.45
Urbano	7.851	5.67
Água	4.140	2.99
Outros	930	0.67
APP	11.566	8.35

Figura 2.1 – Município de Piracicaba com indicação das nove classes de uso e ocupação do solo com destaque (em cinza) do perímetro urbano²¹ Fonte: Atlas Rural de Piracicaba (2006).² Fonte: Atlas Rural de Piracicaba (2006).

2.2.2 Materiais e Métodos

2.2.2.1 Materiais

O presente estudo foi realizado numa escala mesoclimática, ou, segundo a definição de NUNES (2003) sub-regional, conforme já mencionado na revisão bibliográfica. Foram utilizadas as séries históricas da Estação Convencional do Posto Agrometeorológico³ da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), no período de 1950 a 2005. Os elementos atmosféricos estudados foram: Radiação Global ($\text{cal cm}^{-1} \text{ d}^{-1}$); Insolação (h d^{-1}), Precipitação (mm), Umidade Relativa (%), Temperaturas Máxima, Mínima e Média ($^{\circ}\text{C}$) e Evaporação (mm), a partir de 1950.

Cabe ressaltar que os dados referentes à Radiação Global só estavam disponíveis a partir de 1978.

2.2.2.2 Métodos

2.2.2.2.1 Localização da área de estudo

O município de Piracicaba situa-se entre as coordenadas geográficas de 22°42'30'' de latitude Sul e de 47°38'01'' de longitude oeste, com uma altitude média de 554m. A área total é de 1.370 km^2 e a população é estimada em 355.039 habitantes, sendo que aproximadamente 90% encontram-se na área urbana de Piracicaba (IBGE, 2005). A Figura 2.2 indica a localização do Município e da bacia do Rio Piracicaba.

³ Localizado à 22°42'30'' de latitude sul, 47°38'00" de longitude oeste e a 546 metros de altitude, situado no Município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil.

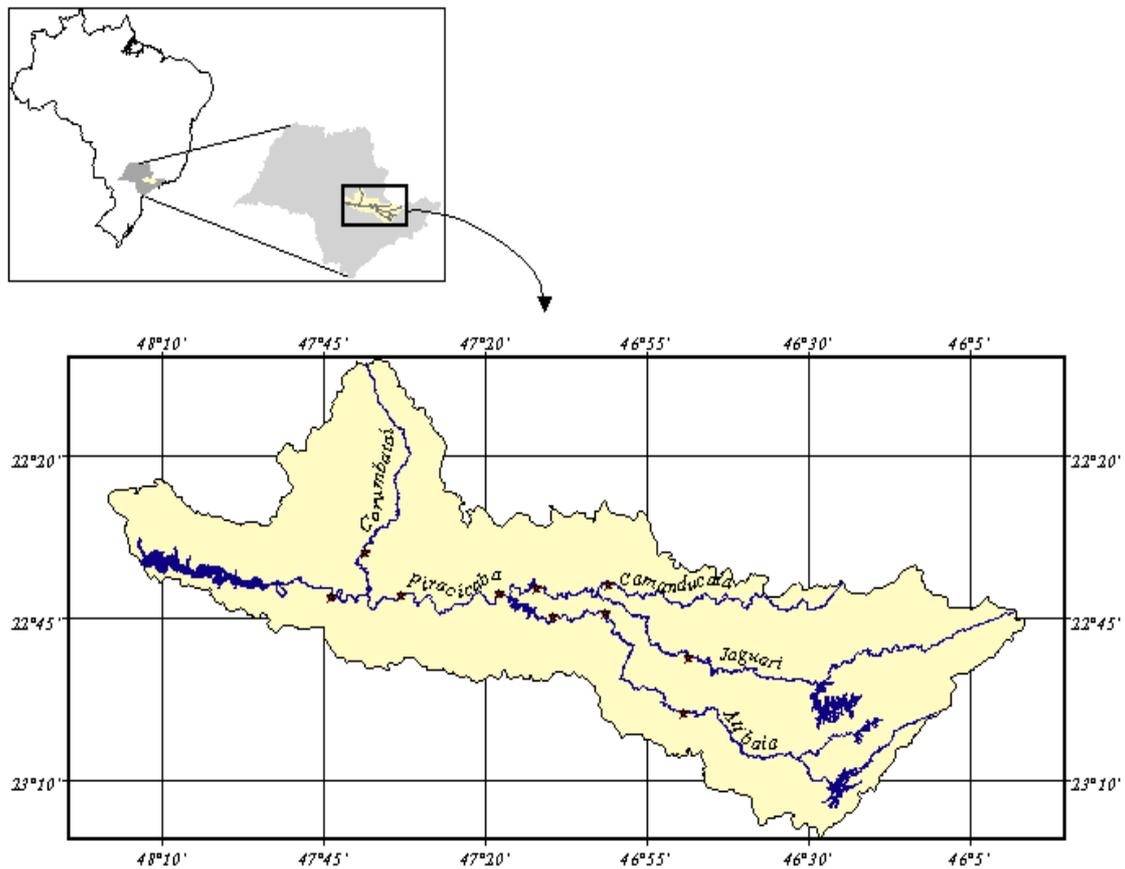


Figura 2.2 – Localização da Área de Estudo. Acima localização do Estado de São Paulo com detalhe para o Município de Piracicaba. Abaixo localização do Município nas coordenadas geográficas com destaque à bacia do Rio Piracicaba⁴

2.2.2.2.2 Análise das séries históricas

As séries históricas do período foram tabuladas e analisadas. Para cada um dos elementos foram calculados a média anual e uma média geral de todos os anos (1950-2004) com o objetivo de verificar se as médias anuais mantinham a média geral ou variavam. Os dados de Radiação Global foram analisados de 1978 a 2004, uma vez que essa variável foi estimada pela Estação Meteorológica somente a partir deste ano. A relação entre elementos atmosféricos e o tempo foi testada através regressões lineares simples, calculando-se P (probabilidade da reta ser traçada se y não dependesse de x) através de N (número de observações). O valor de R^2 (reta que explica a variação dos dados) (ZAR, 1999) também foi calculado.

⁴ Fonte: <http://www.cena.usp.br/piracena/html/localp.htm>

Para verificar se os dados do ano de 2005 eram compatíveis à média dos 54 anos analisados, foi elaborado um gráfico com a média mensal de cada uma das variáveis, desde o ano de 1950 e comparou-se os resultados com as médias dos meses do ano de 2005.

Os elementos que apresentaram alguma tendência climática foram correlacionados aos parâmetros população urbana, população rural, número de bairros e cobertura vegetal por habitante, destacados por COSTA (2004) como importantes para identificar o crescimento da urbanização, a fim de verificar, se as alterações provocadas pelas atividades humanas são perceptíveis no mesoclima da área em estudo.

2.2.3 Resultados e Discussão

2.2.3.1 Radiação global

Na figura 2.3 estão detalhados os valores de Radiação Global analisados entre os anos de 1978 a 2004. Entre os anos de 1979 e 1986 observa-se que a Radiação Global oscilou em aproximadamente $100 \text{ cal cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ da média geral ($365.85 \text{ cal cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Os anos de 1979 e 1980 caracterizam-se por estarem abaixo da média, enquanto os anos de 1981 a 1986 apresentam valores acima da média. Já no período compreendido entre os anos de 1986 a 1998, a Radiação Global esteve abaixo da média, exceção feita ao ano de 1994 que manteve a média. No período de 1999 a 2001 a radiação global permaneceu acima da média geral, voltando a cair somente a partir de 2002.

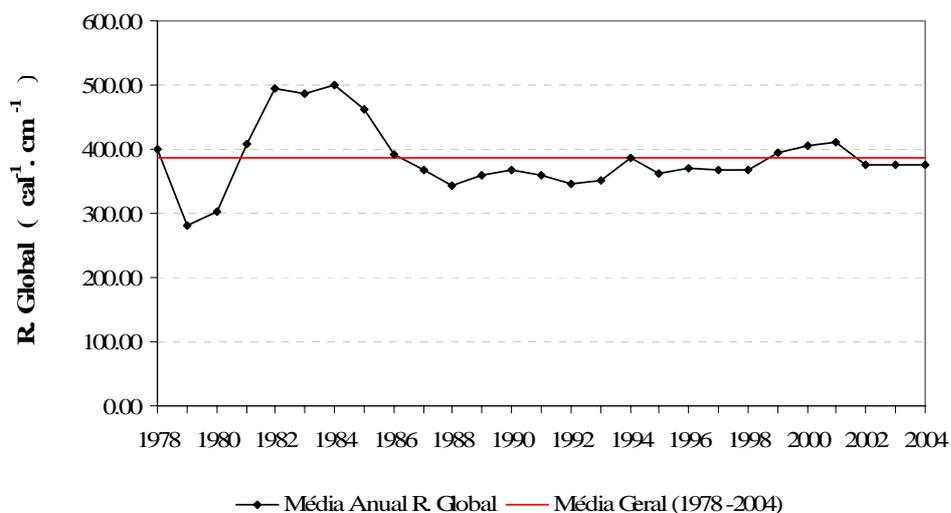


Figura 2.3. Análise da Radiação Global ($\text{cal cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) a partir das médias anual (em preto) e geral (em vermelho) para os anos de 1978 a 2004

Através da análise de regressão linear simples observou-se que não houve tendência de diminuição ou aumento na Radiação Global em função do tempo ($N = 27$; $P = 0.5$; $R^2 = 0.0185$).

No ano de 2005, a radiação global manteve a média observada nos outros anos, confirmando a não tendência de aumento ou diminuição. Os meses de fevereiro, agosto, setembro, outubro e novembro oscilaram em torno da média, conforme pode ser observado na figura 2.4.

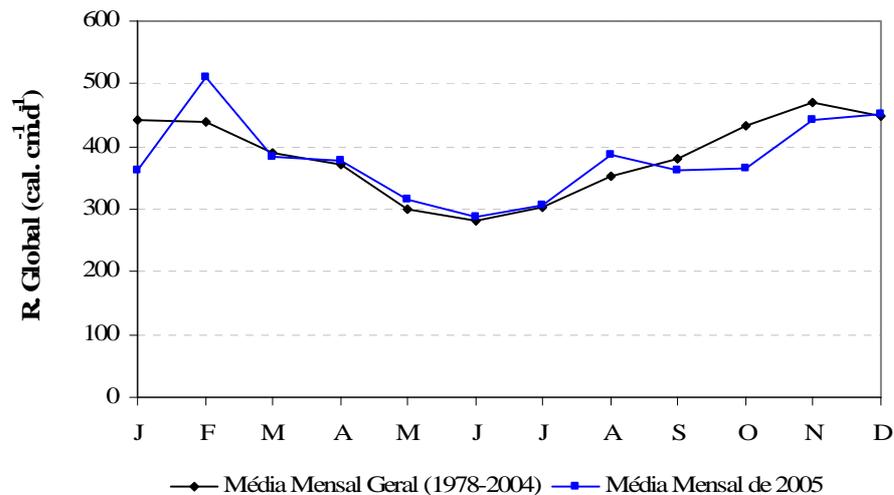


Figura 2.4 - Comparação entre as médias mensais da Radiação Global dos anos de 1978 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

No presente trabalho não foi possível classificar a Radiação Global segundo as definições propostas pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), visto que a série analisada foi referente a um período menor que trinta anos (conforme citado anteriormente, os dados desse elemento climático só estava disponível a partir do ano de 1978).

2.2.3.2 Insolação

De 1950 a 2004 a insolação (h dia^{-1}) oscilou em torno da média (6.58 h dia^{-1}) sem períodos constantes e definidos. Na figura 2.5, há cinco picos marcantes de queda da insolação até o ano 1983: em 1954 ($5,51 \text{ h dia}^{-1}$); em 1965 ($5,95 \text{ h dia}^{-1}$); em 1973 ($5,45 \text{ h dia}^{-1}$); em 1976 ($5,98 \text{ h dia}^{-1}$) e em 1983 ($5,58 \text{ h dia}^{-1}$).

A partir de 1984 a insolação permaneceu com valores acima da média. No entanto, nos anos de 1992 ($6,2 \text{ h dia}^{-1}$), 1993 ($6,43 \text{ h dia}^{-1}$), 1998 ($6,29 \text{ h dia}^{-1}$), 2002 ($6,46 \text{ h dia}^{-1}$), 2003 ($6,43 \text{ h dia}^{-1}$) e 2004 ($5,92 \text{ h dia}^{-1}$), os valores ficaram abaixo da média (Figura 2.5).

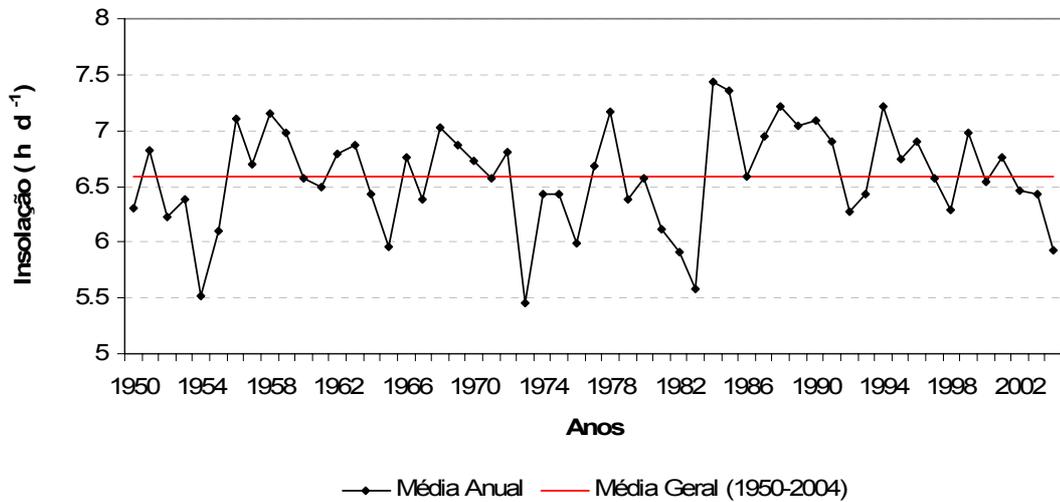


Figura 2.5 - Análise da Insolação (h dia⁻¹) a partir das médias anual (em preto) e geral (em vermelho) para os anos de 1950 a 2004

Na análise de regressão linear simples observou-se que não houve tendência de diminuição ou aumento na Insolação em função do tempo ($N = 55$; $P = 0.42$ e $R^2 = 0.0121$).

Em 2005 somente os meses de maio e junho seguiram as médias mensais obtidas no período de 1950-2004. Os demais meses oscilaram, conforme pode ser observado na figura 2.6, seguindo, portanto, a não tendência de aumento ou diminuição da insolação.

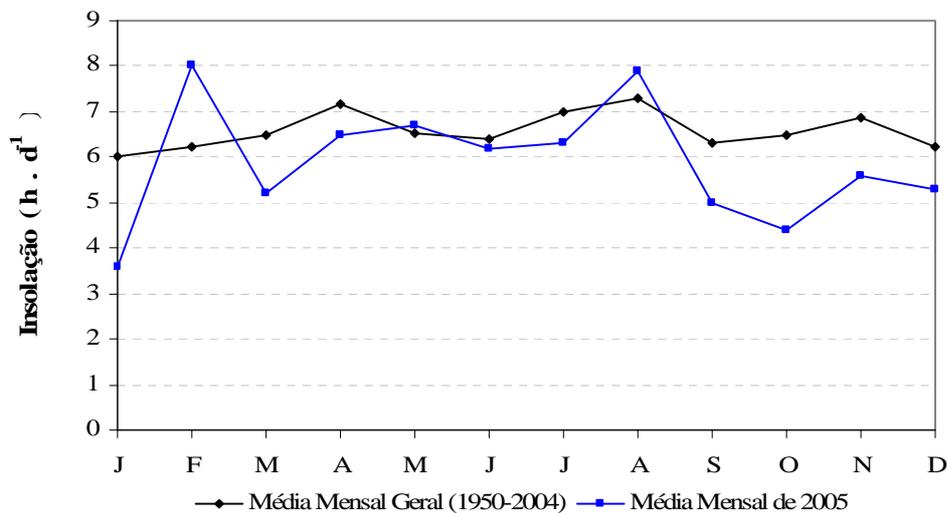


Figura 2.6 - Comparação entre as médias mensais de Insolação dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

Diante do fato da insolação não ter apresentado nenhuma tendência, de acordo com a classificação da OMM, o elemento se classificaria em “variação climática”, uma vez que seus valores flutuam sem padrão específico, conforme observado em escalas de décadas. Dados semelhantes fora encontrados por SILVA e RIBEIRO (2004) analisando as tendências das variações climáticas da cidade de Uberlândia, MG, no período de 1981 a 2000.

2.2.3.3 Precipitação

Os dados pluviométricos coletados pela Estação Meteorológica da ESALQ/USP mostraram oscilação da precipitação em torno da média de 104,86mm. A análise de regressão linear simples demonstrou que a precipitação anual aumentou com o passar dos anos ($N = 55$; $P = 0.003$; $R^2 = 0.1544$) (Figura 2.7).

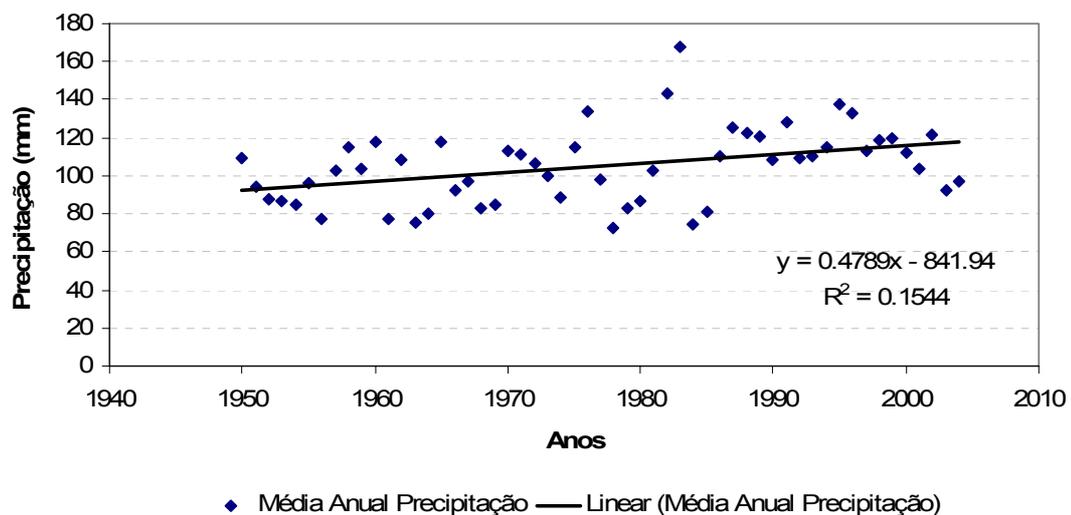


Figura 2.7 - Análise da linha de tendência linear (linha cheia em preto) com a média anual da Precipitação (mm) (valores em azul)

Segundo o quadro de classificações da OMM, a variável precipitação enquadra-se na “tendência climática”. Os resultados apontam uma tendência de aumento aproximadamente linear, mas com muita variação da precipitação. Devido a esta tendência, é de extrema importância que os valores de precipitação continuem sendo monitorados. CONTI (2000) destaca que nas regiões tropicais, a chuva aparece como elemento de maior interesse, uma vez que sua variação tem conseqüências ambientais muito relevantes. LOMBARDO (1985) ressalta que a precipitação média de uma cidade pode ser aumentada na ordem de 10 a 17% pelo fenômeno das Ilhas de Calor.

No ano de 2005 os meses de fevereiro e maio foram anormais. O mês de fevereiro apresentou uma precipitação de 67,8mm, ou seja, abaixo da média encontrada no período de 1950-2004, que foi de 181,14mm. No mês de maio a precipitação foi de 164,3 mm, maior que a média encontrada no mesmo período, de 60,85mm, tornando-se um mês atípico para o clima da região. O período de inverno caracterizou-se por ser mais seco que a média. O mês de outubro igualou-se a média, e os meses de novembro e dezembro voltaram a ter precipitações mais baixas (figura 2.8). Com exceção do mês de maio, o ano de 2005 caracterizou-se por valores de precipitação abaixo da média dos últimos 54 anos.

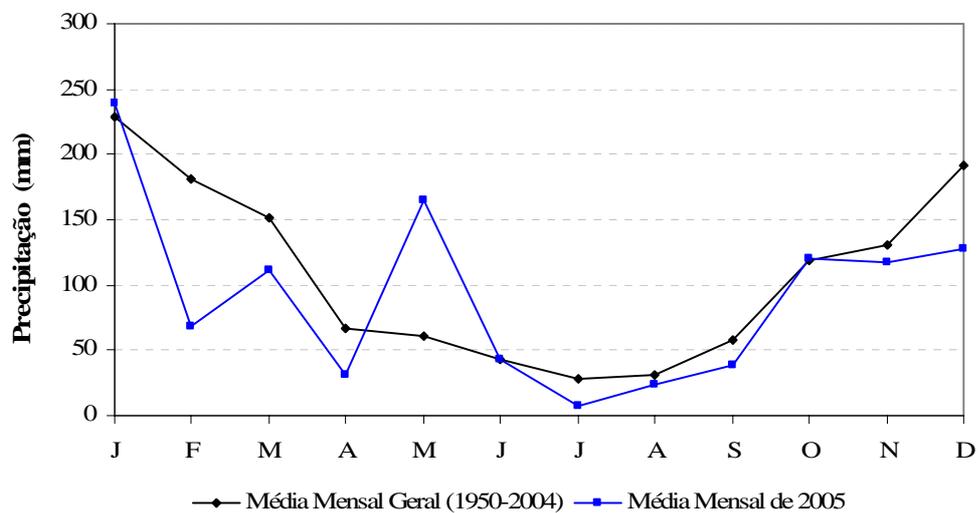


Figura 2.8 - Comparação entre as médias mensais de Precipitação (mm) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005(em azul)

2.2.3.4 Umidade relativa

A análise dos dados de umidade relativa (%) permite identificar um aumento linear dos dados. A análise de regressão linear demonstra a tendência de aumento da precipitação ao longo da série estudada ($N = 55$, $P < 0.0001$ e $R^2 = 0.6234$) (Figura 2.9).

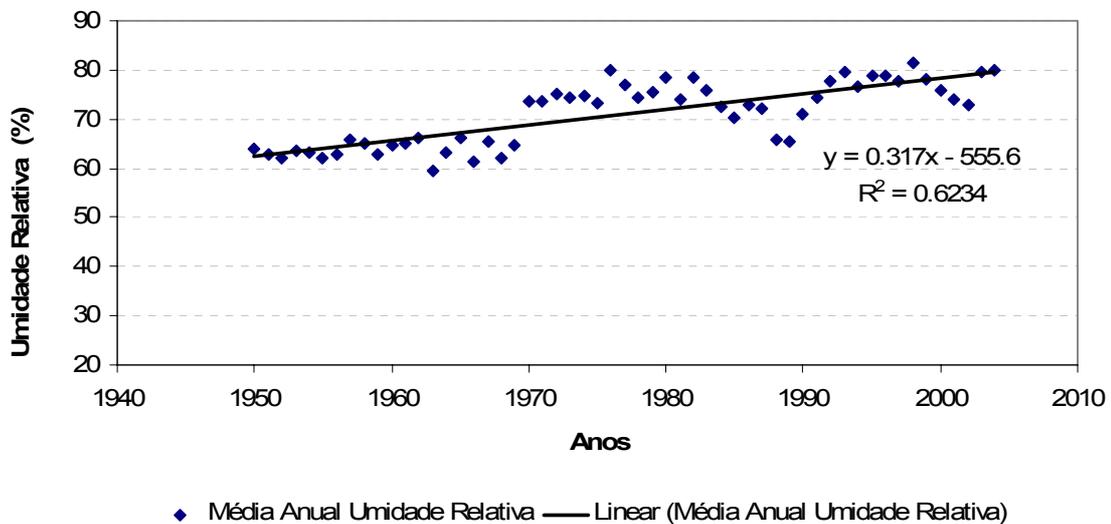


Figura 2.9 - Análise da linha de tendência linear (linha cheia) com a média anual da Umidade Relativa (%) (valores em azul) para os anos de 1950-2004

Segundo o quadro de variabilidade climática da OMM, a umidade relativa enquadra-se em “tendência climática” uma vez que foi observado um aumento dos valores médios ao longo da série estudada. Percebe-se, na figura 2.10, que essa tendência continua nos meses do ano de 2005, pois todos os valores mensais encontram-se acima da média.

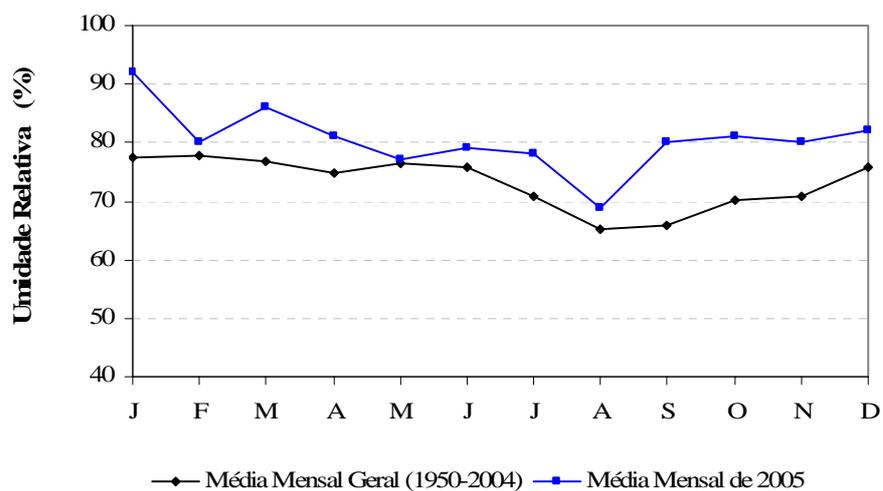


Figura 2.10 - Comparação entre as médias mensais de Umidade Relativa (%) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul).

Assim como a precipitação, o monitoramento dos valores de umidade relativa é de grande importância. A umidade relativa, segundo HIDORI e OLIVER (1993), faz parte da gama dos

elementos climáticos que se relacionam diretamente com o bem estar humano em ambientes construídos. Segundo NUNES (2003), ambientes altamente urbanizados tem a particularidade das ilhas de calor e, entre suas conseqüências, estão o surgimento de uma circulação peculiar, maior disponibilidade de material particulado e alterações na umidade, nebulosidade e precipitação. A presença das ilhas de calor pode explicar as tendências crescentes de precipitação e umidade relativa encontradas no município de Piracicaba.

Com exceção do mês de janeiro (com 92% de umidade relativa) a umidade relativa mensal do ano de 2005 pode ser considerada “agradável” pois, segundo SANTOS (1994) índices acima de 90% dificultam a transpiração humana, e índices inferiores a 40% são agressivos à saúde humana.

2.2.3.5 Temperatura

2.2.3.5.1 Temperatura máxima

Assim como observado para os elementos de umidade relativa e precipitação, a temperatura máxima aumentou com o passar dos anos, fato esse que pode ser confirmado com a regressão linear ($N = 54$, $P < 0.0001$, $R^2 = 0.6635$) (Figura 2.11).

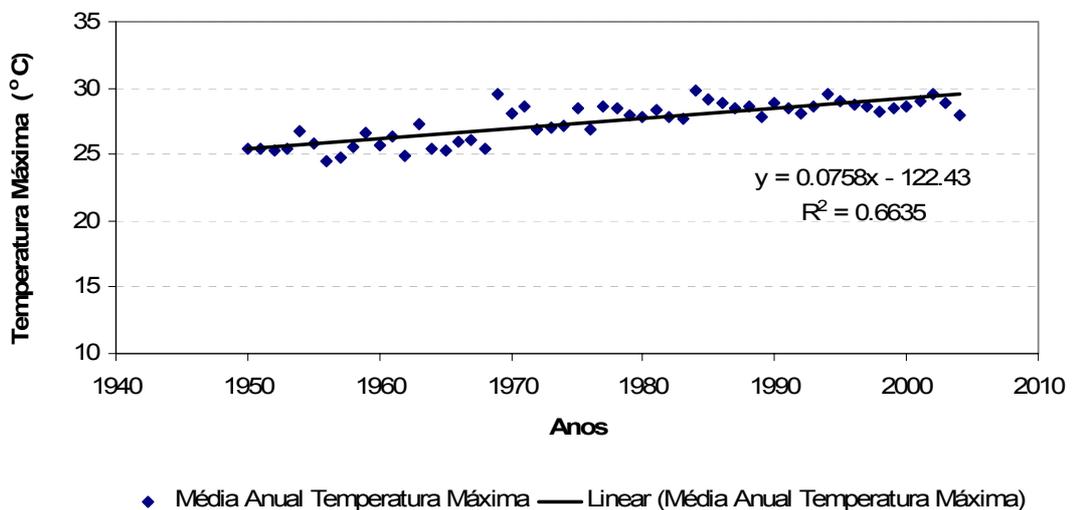


Figura 2.11 - Análise da linha de tendência linear (linha cheia) com a média anual da Temperatura Máxima (°C) (valores em azul) para os anos de 1950-2004

Os dados encontrados confirmam o estudo de VILLA NOVA et al. (2003). Os autores estudando a tendência da temperatura máxima de Piracicaba, SP, com dados de 1917 a 2003

encontraram que nos últimos 15 anos da série estudada, a temperatura máxima sofreu um aumento de $0,77^{\circ}\text{C}$.

O ano de 2005 apresentou temperaturas máximas superiores às médias encontradas no período de 1950-2004. Entretanto, nos meses de janeiro, julho, setembro, novembro e dezembro a média apresentou maior variação (Figura 2.12). Este resultado confirma, portanto, a tendência de aumento da temperatura máxima anual demonstrada na figura 2.11.

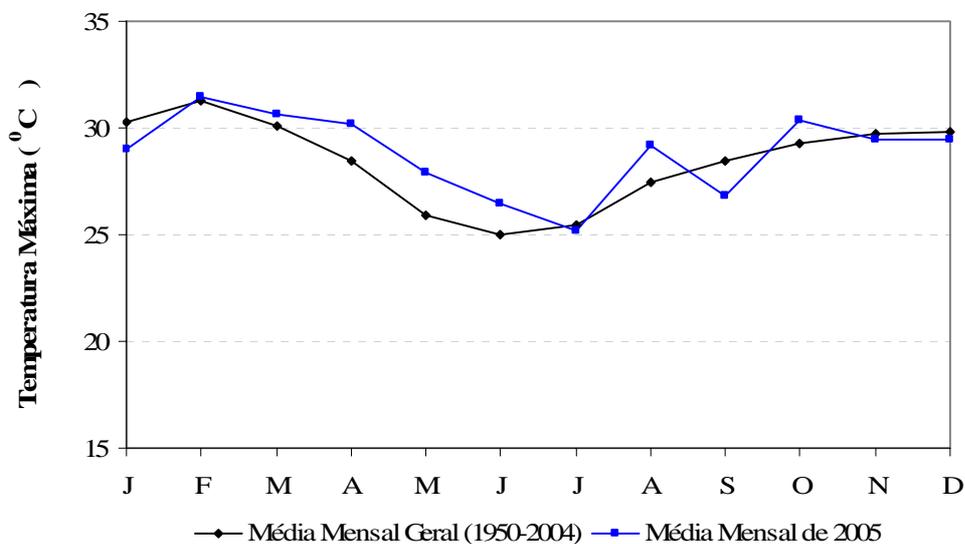


Figura 2.12 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

2.2.3.5.2 Temperatura mínima

A análise dos dados demonstra três períodos bem definidos de temperatura mínima da região. No primeiro, que compreende os anos de 1950 a 1971, a temperatura mínima oscilou em torno da linha média ($15,6^{\circ}\text{C}$).

O segundo período, de 1972 a 1981, caracterizou-se por apresentar valores abaixo da linha média e no terceiro período, de 1982 a 2004, ao contrário do segundo, as temperaturas se apresentam acima da linha média, exceção feita aos anos de 1985 com $15,01^{\circ}\text{C}$ e 1989 com $15,0^{\circ}\text{C}$, conforme pode ser observado na figura 2.13.

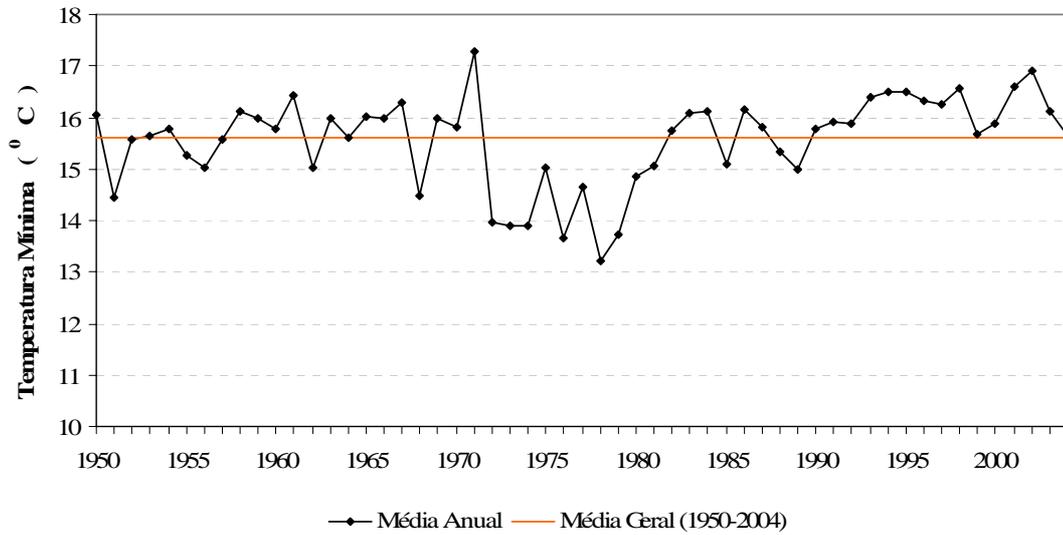


Figura 2.13 - Análise da Temperatura Mínima (°C) a partir das médias anual (em preto) e geral (em vermelho) para os anos de 1950 a 2004

A regressão linear realizada indica que não houve tendência de diminuição ou aumento nas temperaturas mínimas em função do tempo ($N = 54, P = 0.09, R^2 = 0.0551$). No ano de 2005 as temperaturas mínimas estiveram acima da média mensal encontrada no período de 1950-2004, com exceção dos meses de fevereiro e dezembro (Figura 2.14).

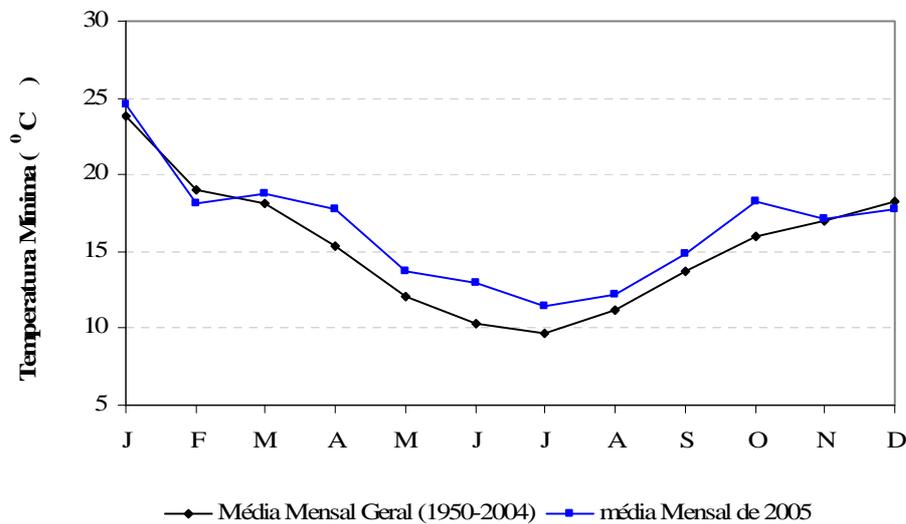


Figura 2.14 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Mínima (°C) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

2.2.3.5.3 Temperatura média

A análise de regressão simples da série histórica da temperatura média demonstra que os valores aumentaram com o passar dos anos ($N = 54$, $P < 0.0001$, $R^2 = 0.764$) (Figura 2.15).

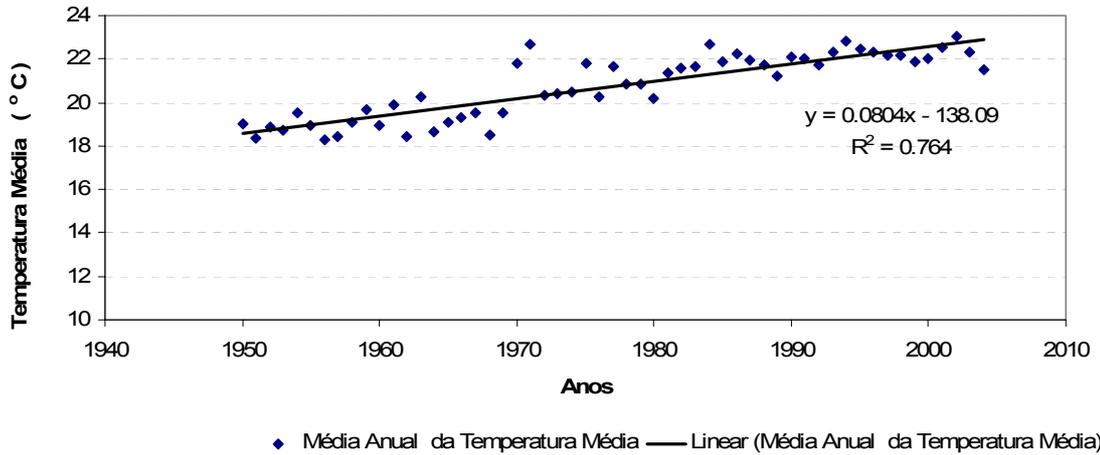


Figura 2.15 - Análise da linha de tendência linear (linha cheia) com a média anual da Temperatura Média (°C) (valores em azul) para os anos de 1950-2004

No ano de 2005, com exceção do mês de dezembro, todas as temperaturas médias mensais estiveram acima da linha média encontrada no período de 1950-2004 (figura 2.16). Desta maneira, a temperatura média segue a mesma tendência de aumento.

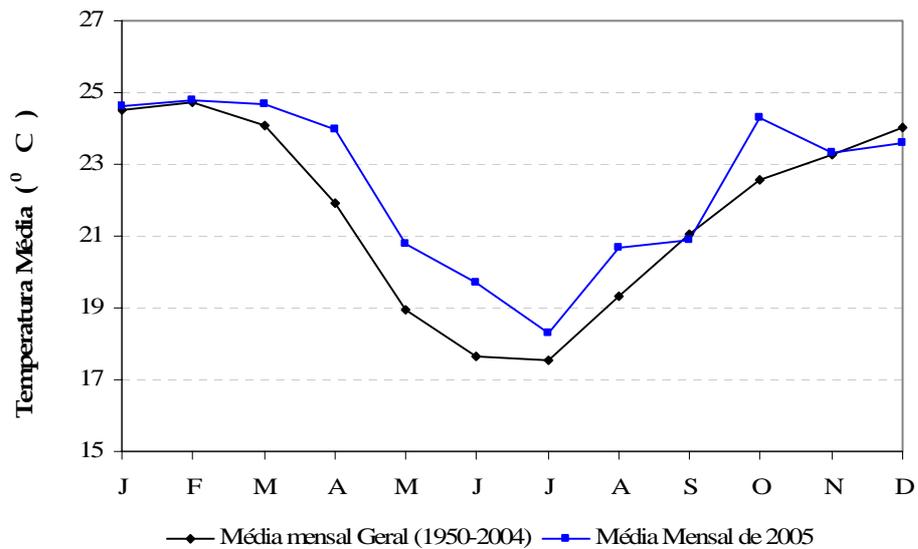


Figura 2.16 - Comparação entre as médias mensais de Temperatura Média (°C) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

A análise do elemento temperatura mostra que há uma forte tendência climática de aumento. Dos elementos estudados, a tendência de aumento de temperatura é o que mais se destacou. SILVA e RIBEIRO (2004); BACK (2001) e KARL et al. (1996) encontraram resultados semelhantes de aumento de temperatura em seus trabalhos. BACK (2001) ao analisar os dados de temperatura média de Urussanga, SC, Brasil, destaca que houve uma mudança climática no que diz respeito ao elemento temperatura no ano de 1965. KARL et al. (1996), estudando os dados climáticos dos Estados Unidos, concluíram que a temperatura apresentou substancial incremento e rejeitaram a hipótese de que as mudanças tenham ocorrido por variações naturais. LOMBARDO et al. (1991), estudando o clima de São Paulo entre 1946 e 1988, encontraram um aumento significativo nas temperaturas médias (1.7°C), máximas (0.5°C) e mínimas (1.6°C), e relacionaram diretamente essa variação ao processo de expansão urbana.

Vale ressaltar que no presente trabalho não se encontrou tendência de aumento da temperatura mínima, diferente da maioria dos trabalhos que estudam tendências climáticas. Uma das possíveis explicações é que Piracicaba é uma cidade de médio porte e, a maioria dos estudos que apontam essa tendência, foram realizados em cidades de grande porte. Nesse sentido, a área circunvizinha à cidade, com cobertura vegetal, pode ter exercido grande influência. Uma segunda explicação é que, talvez, haja a necessidade de uma análise de tempo maior para se perceber algum tipo de tendência na temperatura mínima.

Essa tendência de aumento de temperatura média e máxima pode ser explicada, em parte, pela urbanização. PEREZ et al. (2001) afirmam que, em geral, a urbanização pode ser expressa em termos de concentração de população e, principalmente em troca do uso e cobertura do solo natural por materiais da construção civil. Essa relação da troca dos componentes naturais pelos materiais artificiais altera de forma significativa as propriedades aerodinâmicas, radiativas, térmicas e hídricas da superfície (YAMASHITA et al., 1986) e uma das respostas à esse impacto é o aumento da temperatura local. Além disso, há o fenômeno das ilhas de calor onde a temperatura da cidade é mais elevada que a temperatura das áreas rurais, o que contribuiria, também para esse acréscimo das temperaturas médias urbanas.

2.2.3.6 Evaporação

Os dados analisados correspondentes à evaporação (mm) apresentaram dois períodos bem definidos. O primeiro compreende o período de 1950 a 1971 e caracteriza-se por valores

encontrados abaixo da linha da média (4,43mm), exceção feita aos anos de 1963 com valores de 5,21 mm e 1968, com 4,63mm. Já o segundo período, de 1981 a 2004, ao contrário do primeiro, é caracterizado por todos os valores acima da linha da média geral.

A análise de regressão linear permite afirmar que a evaporação aumentou em função do tempo ($N = 55$, $P < 0.0001$, $R^2 = 0.4139$) (figura 2.17).

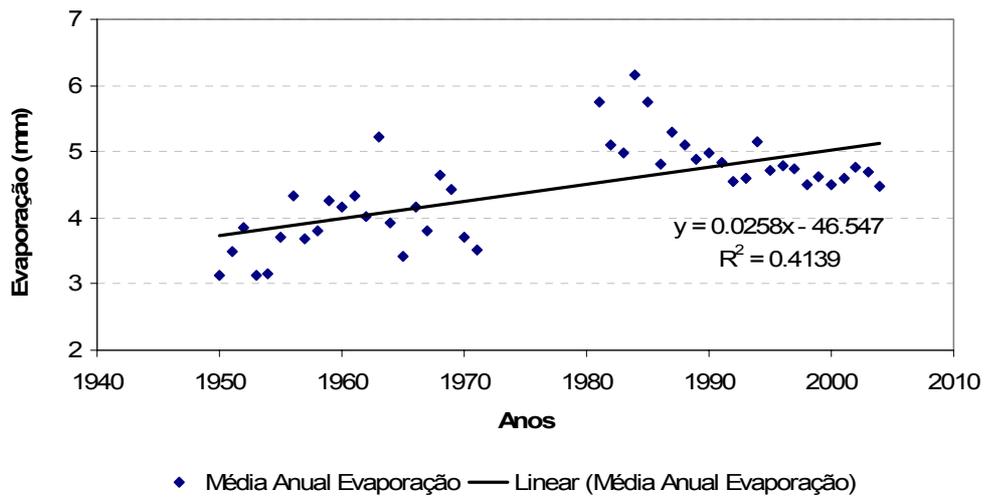


Figura 2.17 - Análise da linha de tendência linear (linha cheia) com a média anual da Evaporação (mm) (valores em azul) para os anos de 1950-2004

O ano de 2005 apresentou os meses de janeiro, junho, julho, setembro, outubro, novembro e dezembro com índices de evaporação abaixo da média mensal. Nos meses de fevereiro e maio os valores estiveram acima da média: 6,15mm e 3,67mm, respectivamente (Figura 2.18).

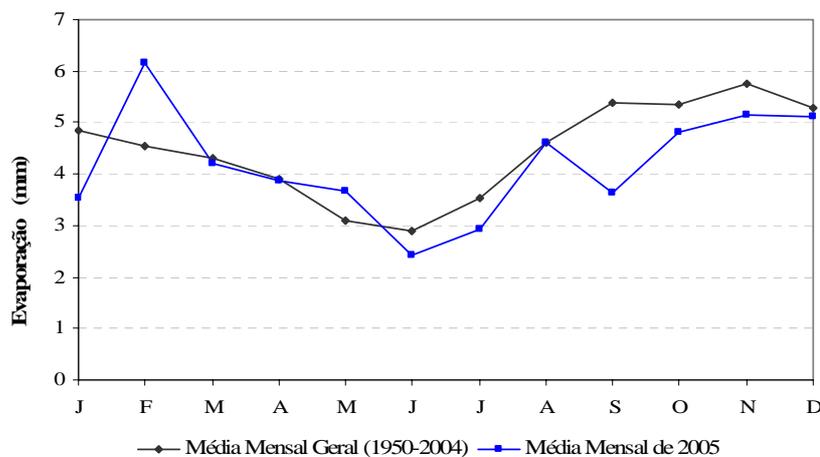


Figura 2.18 - Comparação entre as médias mensais de Evaporação (mm) dos anos de 1950 a 2004 (em preto) com as médias do ano de 2005 (em azul)

A evaporação também seguiu, assim como a temperatura máxima e média, a umidade e a precipitação, uma tendência climática de aumento de seus valores. Assim como discutido para essas outras variáveis, uma possível explicação seria a urbanização. Esta variável também deve ser monitorada a fim de verificar se esta tendência se confirma e quais fatores podem agravar este aumento.

2.2.3.7 TEMPERATURA MÉDIA, PRECIPITAÇÃO, UMIDADE RELATIVA E EVAPORAÇÃO X CRESCIMENTO DA URBANIZAÇÃO DE PIRACICABA.

Conforme já dito, muitos estudos relacionam o crescimento urbano com as variações climáticas, mais especificamente às elevações da temperatura (LOMBARDO et al., 1991; GOLDREICH, 1995; BACK, 2001; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). A análise temporal dos dados de temperatura encontrados no presente trabalho, apontou tendência ao aumento dessa e um dos fatores que pode explicar esse aumento é a urbanização.

Esse fato se dá principalmente porque a urbanização e a troca dos materiais da superfície, associado ao crescimento da população e da economia, foram os maiores tipos de mudança no uso e cobertura do solo da história da humanidade (WENG, 2001); o que causou grande impacto no clima (WENG, 2001; DEOSTHALI, 1999; CONTI, 2000). Cobertos por construções e por materiais impermeáveis, os solos urbanos absorvem maior quantidade de radiação solar, além de ter maior condutividade termal, gerando, desta forma, aumento na temperatura local (WENG, 2001; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003; LU e WENG, 2005). Assim, há a necessidade de se entender como ocorreu a mudança do uso e da cobertura do solo do Município de Piracicaba a fim de associá-la às tendências climáticas encontradas.

COSTA (2004) realizou um estudo da evolução urbana e da cobertura vegetal de Piracicaba –SP no período de 1940 a 2000. Na Tabela 2.2, estão resumidos os principais dados históricos relacionados por COSTA (2004).

Tabela 2.2 - Dados históricos do Município de Piracicaba, SP. (COSTA, 2004)

Anos	Bairros	Cob. Vegetal	População Total	Pop. Urb.	Pop. Rural
1940	8	39.7	76.416	33.771	42.645
1962	25	21.9	115.403	82.303	33.887
1978	46	6.4	214.295	197.904	16.391
1995	60	4.6	283.833	269.961	13.872
2000	60	5.7	329.158	317.374	11.784

Correlacionando estes dados históricos com as temperaturas médias do município de Piracicaba, descritas anteriormente, encontra-se uma relação direta do aumento da urbanização (traduzido em aumento da população urbana, aumento do número de bairros e diminuição da população rural) com o aumento observado nas temperaturas (figuras 2.19 e 2.20).

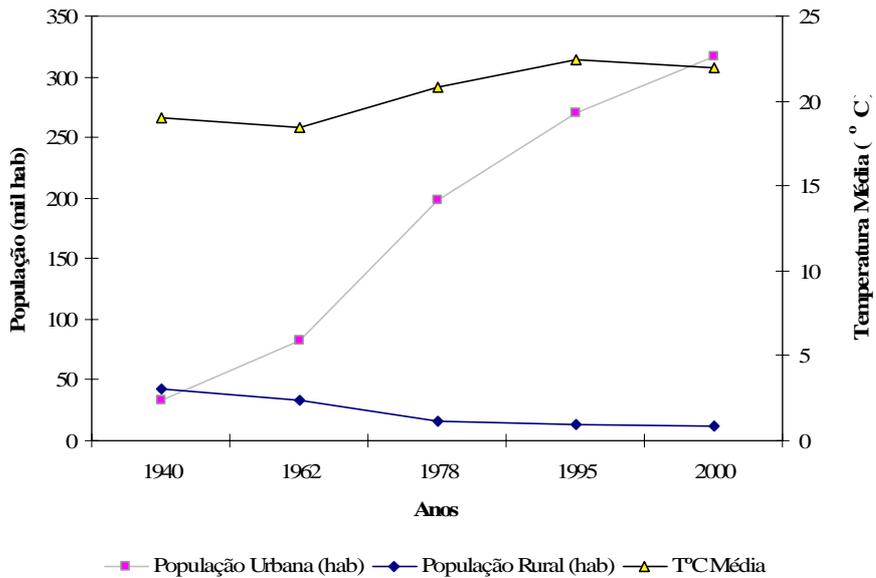


Figura 2.19- Relação entre o número de habitantes (milhares) nas áreas urbana (em cinza e roxo) e rural (em azul) com a evolução da Temperatura Média (°C) (em preto e amarelo) nos anos de 1940, 1962,1978, 1995 e 2000

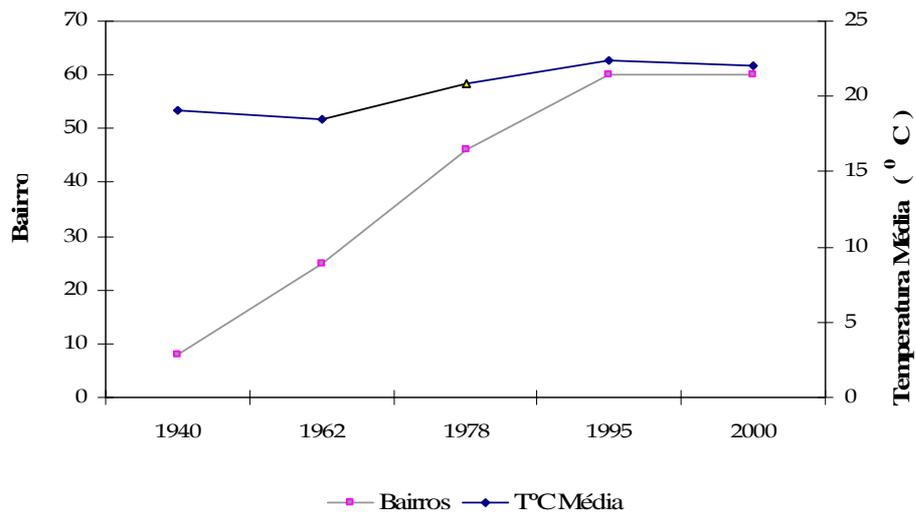


Figura 2.20 – Relação entre o número de bairros (em cinza e roxo) e a evolução da Temperatura Média (°C) (em azul) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

O período crítico de aumento da temperatura média, conforme observado nos gráficos, foi de 1962 a 1995, período esse de intenso crescimento econômico e urbano não só de Piracicaba, mas também de todo o Brasil.

Observando os dados de cobertura vegetal pode-se notar que, com o crescimento da urbanização, refletido no aumento da população urbana e do número de bairros, a cobertura vegetal por habitante foi diminuindo. Assim, há uma relação inversa entre a queda da cobertura vegetal e o aumento da temperatura (figura 2.21).

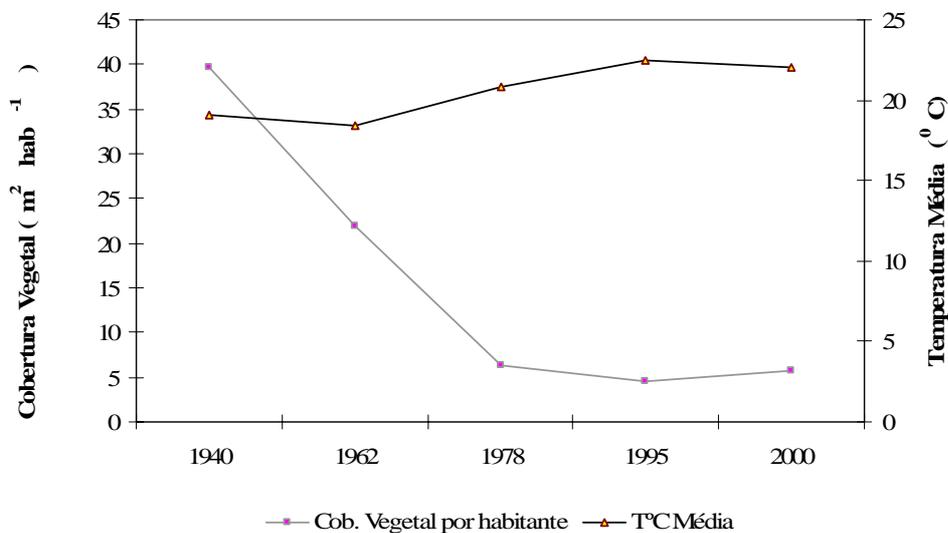


Figura 2.21 – Relação entre cobertura vegetal por habitante ($\text{m}^2\text{hab}^{-1}$) (em cinza e roxo) e evolução da temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) (em preto e amarelo) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

Tal relação torna-se mais clara quando se observa o período de 1995 a 2000. Nesta fase, a urbanização estabiliza-se, já que o número de bairros fica estável e a taxa de crescimento da população urbana não é tão acentuada. Pode-se observar um pequeno aumento na cobertura vegetal por habitante e uma diminuição nos dados da temperatura média.

A correlação encontrada confirma os dados de BARBIN (2003). O autor, estudando o histórico do uso do solo de uma região de Piracicaba, SP, destaca que a urbanização foi realizada sem obedecer nenhum critério técnico nem diretrizes propostas pela prefeitura, além da vasta substituição das áreas verdes por áreas urbanas, expressos em inúmeros loteamentos de forma e padrões variados.

No município de Piracicaba, assim como na maioria das cidades, é notória a problemática entre a urbanização e a vegetação (VELASCO, 2003) e a falta de planejamento e de informação,

contribuiu para a retirada de grandes áreas verdes em detrimento das construções civis (BARBIN, 2003). Os benefícios das áreas verdes nos microclimas urbanos já são bastante conhecidos e, dentre as inúmeras vantagens, pode-se destacar o fato de amenizarem a temperatura local. A vegetação armazena menos energia que os materiais de construção além de utilizar parte desta na evapotranspiração, tendo assim, pouca energia para ser liberada no ambiente, daí o fato das temperaturas mais baixas nas áreas vegetadas (EPA, 2005).

As áreas verdes refrigeram o ar de forma direta e indireta. A forma direta se dá quando a vegetação absorve água através das raízes e evapora através das folhas. Esse processo usa o calor do ar para converter a água contida na vegetação em vapor d'água e, portanto, além de reduzir a temperatura, adiciona umidade ao ambiente. O efeito positivo da refrigeração compensa todos os ganhos indesejáveis de umidade. A forma indireta se dá através da sombra. Paredes protegidas pelas sombras das árvores podem ter temperaturas de 5°C a 20°C menores que superfícies sem sombras como asfalto ou telhados de amianto. Uma superfície mais fresca diminui o efeito da ilha de calor reduzindo a transferência de calor ao ar circunvizinho (EPA, 2005).

Muitos são os fatores que atuam no microclima urbano e mais especificamente no elemento temperatura. Os fenômenos que ocorrem na interface cidade-atmosfera são extremamente complexos (PEREZ et al., 2001), portanto é difícil afirmar que somente o aumento da cobertura vegetal ou sua diminuição tenha provocado tal efeito na temperatura.

O fato é que, no presente trabalho encontrou-se uma relação direta entre crescimento da população urbana, aumento da malha urbana, diminuição da cobertura vegetal e aumento da temperatura média.

A mesma relação foi verificada com a análise da umidade relativa, conforme pode ser observado nas figuras 2.22; 2.23 e 2.24.

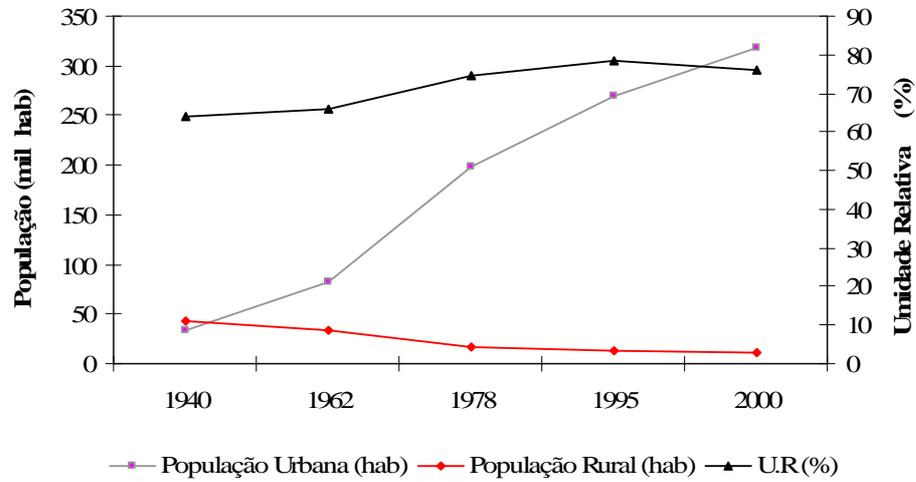


Figura 2.22 – Relação entre o número de habitantes (milhares) nas áreas urbana (em cinza e roxo) e rural (em vermelho) com os dados de umidade relativa (%) (em preto) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

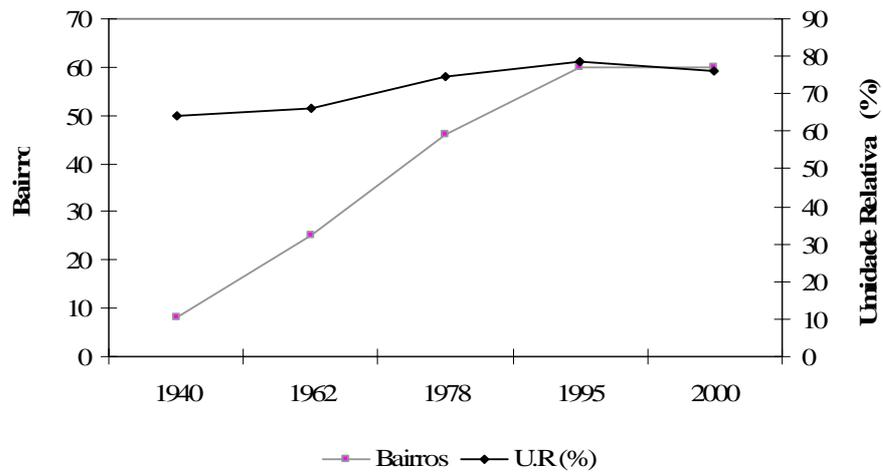


Figura 2.23 – Relação entre o número de bairros (em cinza e roxo) e umidade relativa (%) (em preto) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

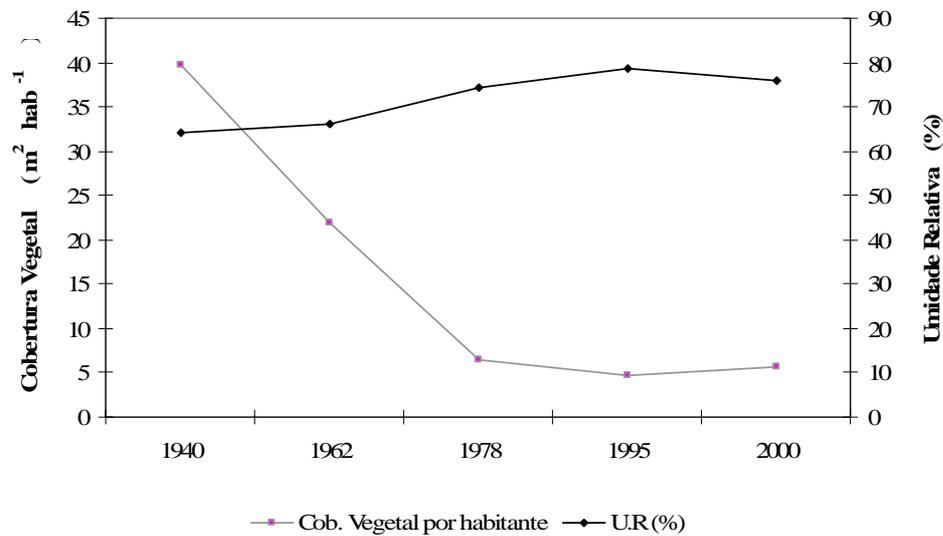


Figura 2.24 – Relação entre cobertura vegetal por habitante ($\text{m}^2\text{hab}^{-1}$) (em cinza e roxo) e umidade relativa (%) (em preto) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

No caso da cobertura vegetal, a diminuição de área verde deveria, em princípio, diminuir a umidade relativa do ar (PEREZ et al., 2001; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003), fato esse que não ocorreu. Ao contrário, observou-se que houve um aumento da porcentagem de umidade relativa com a diminuição na cobertura vegetal da área verde. É nesse sentido que se volta a afirmar que muitos fatores influenciam no microclima não havendo a possibilidade de isolar um deles para responder a variação de um elemento. Os aumentos da precipitação e da temperatura trazem como consequência uma maior quantidade de vapor d'água no ar e, tal fato pode ser uma possível explicação para o aumento da umidade relativa do ar.

Uma segunda explicação seria o fato do Rio Piracicaba passar pelo meio da cidade. O aumento da temperatura local provocaria maior evaporação na água do rio, aumentando, em consequência, a umidade relativa do ar.

No caso da análise com os elementos precipitação (figuras 2.25; 2.26; 2.27) e evaporação (figuras 2.28; 2.29; 2.30) não foram observadas relações diretas com os dados de urbanização selecionados.

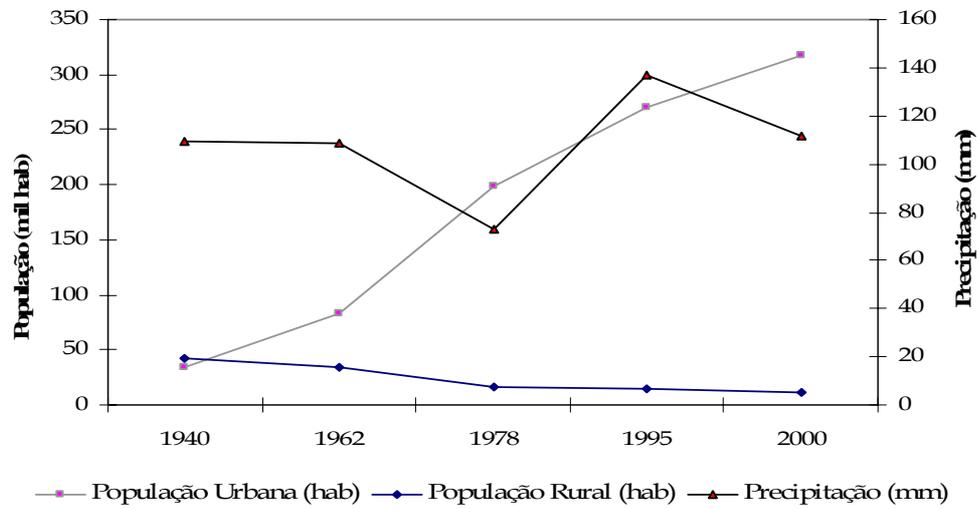


Figura 2.25 – Relação entre o número de habitantes (milhares) nas áreas urbana (em cinza e roxo) e rural (em azul) com os dados de precipitação (mm) (em preto) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

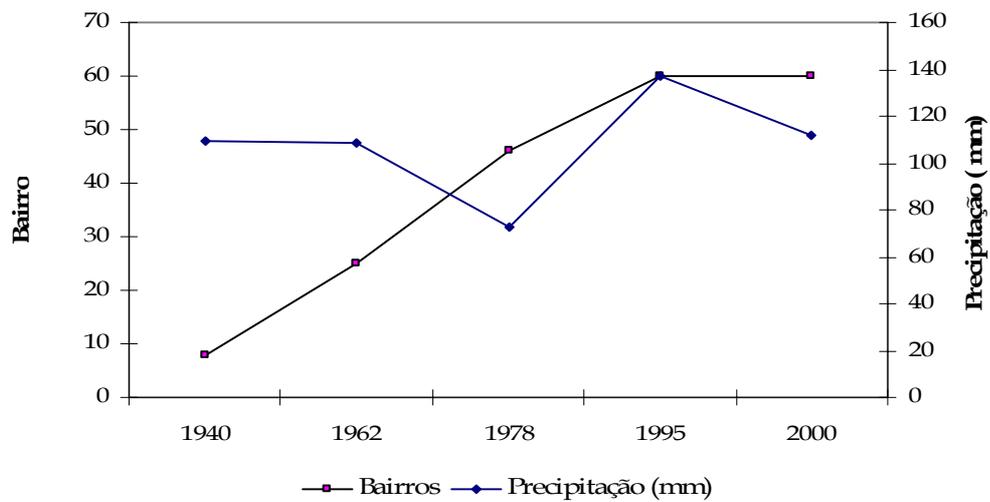


Figura 2.26 – Relação entre o número de bairros (em preto e roxo) e precipitação (mm) (em azul) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

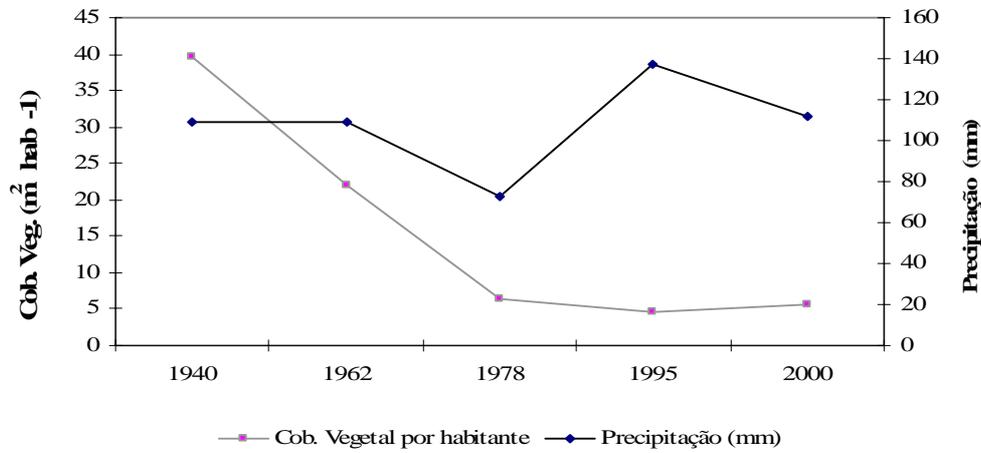


Figura 2.27 – Relação entre cobertura vegetal por habitante ($m^2 hab^{-1}$) (em cinza e roxo) e precipitação (mm) (em azul) nos anos de 1940, 1978, 1995 e 2000

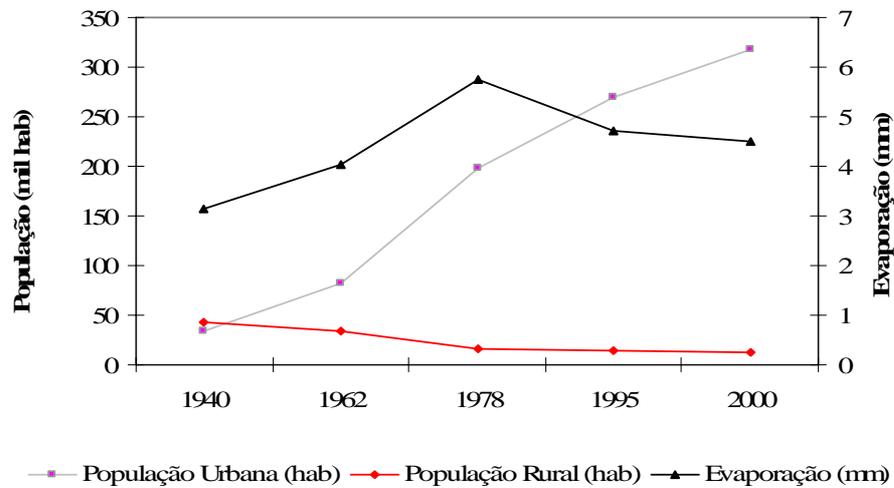


Figura 2.28 – Relação entre o número de habitantes (milhares) nas áreas urbana (em cinza e roxo) e rural (em vermelho) com os dados de evaporação (mm) (em preto) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

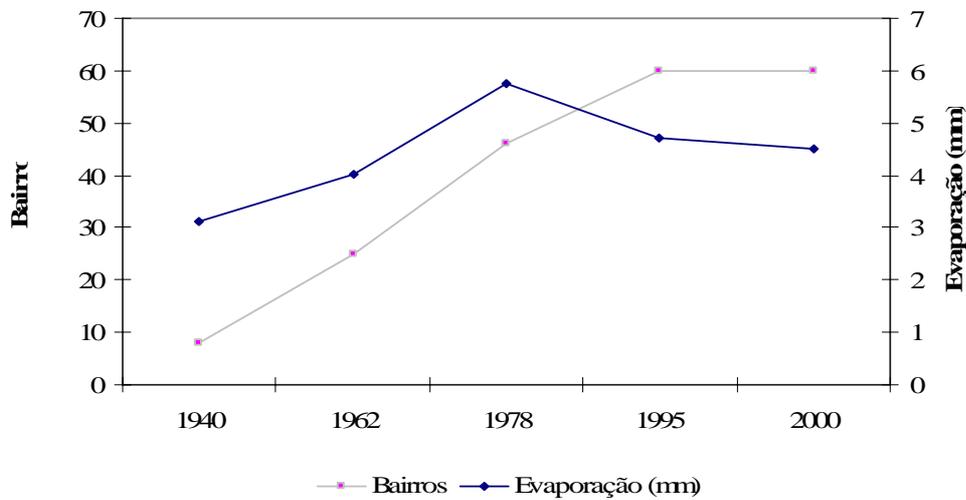


Figura 2.29 – Relação entre o número de bairros (em cinza e roxo) e evaporação (mm) (em azul) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

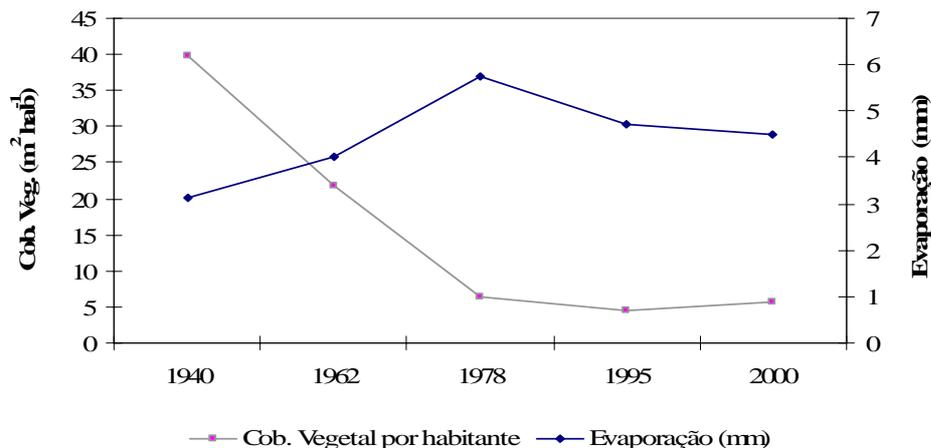


Figura 2.30 – Relação entre cobertura vegetal por habitante ($m^2 hab^{-1}$) (em cinza e roxo) e evaporação (em azul) nos anos de 1940, 1962, 1978, 1995 e 2000

Conforme visualizado nos gráficos acima, não foi possível estabelecer uma relação clara entre as variáveis escolhidas para representar a urbanização com os elementos precipitação e evaporação. Nesses casos, seria necessária a análise de outras variáveis urbanísticas para verificar se há alguma relação com estes elementos. De fato, diversos autores destacam que esses elementos climatológicos têm uma relação direta com a urbanização, mas sua visualização se torna mais clara em cidades de grande porte. Piracicaba, por ser enquadrada em cidades de médio porte, deve ter um estudo diferenciado.

2.3 Conclusões e Considerações Finais

No presente trabalho pode-se concluir que as variáveis temperaturas máximas e médias, precipitação, umidade relativa e evaporação tiveram tendência de aumento nos últimos 54 anos no município de Piracicaba, SP. Todas elas são classificadas como uma tendência climática que vem ocorrendo no município. No entanto, ainda não é possível classificar estas tendências como mudanças climáticas. Também não é possível afirmar, a partir dos dados do trabalho, que essas tendências sejam causadas exclusivamente por ações antrópicas. O elemento analisado que apresentou maior tendência de aumento foi a temperatura média.

A temperatura média foi o único dos elementos analisados que apresentou clara correlação com as variáveis escolhidas para representar a urbanização (crescimento da população urbana, crescimento da população rural, número de bairros na cidade e cobertura de área verde por habitante). Os demais elementos analisados não se correlacionaram de forma clara à urbanização, devido basicamente a dois fatores. O primeiro deles é que Piracicaba é uma cidade de médio porte e essa relação é mais facilmente visualizada em cidades de grande porte. Além disso, o clima da cidade é influenciado por diversos fatores, e a análise isolada de alguns desses fatores pode não responder de forma imediata às alterações. Há a necessidade da continuidade desse tipo de estudo utilizando outras variáveis urbanas, como por exemplo, a poluição, o adensamento populacional e a localização exata das ilhas de calor e de frescor.

Dado que há tendências positivas de aumento de temperatura, umidade, precipitação e evaporação, é de suma importância que se continue monitorando esses elementos ao longo dos anos. Outros estudos também poderão elucidar como outros elementos urbanos de cidades de médio porte interferem no clima.

E, por fim, vale ressaltar que a atitude e a conscientização da população também é importante. Os habitantes da cidade devem ser informados dos problemas climáticos e de suas possíveis causas, para que, junto com o governo, seja implantado um planejamento sustentável. Esse planejamento deve-se incluir, necessariamente, os estudos climáticos. Cabe ressaltar, ainda, que o homem é um ser social e, portanto, vive em sociedades organizadas em núcleos urbanos. As cidades devem oferecer aos seus usuários o mínimo de bem estar e seu desenvolvimento deve acontecer sem o sacrifício do conforto da população.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, T.R.; TARIFA, J.R. **O ritmo semanal das atividades humanas e o clima na região metropolitana de São Paulo**. Laboratório de Climatologia e Biogeografia. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, série TA – Texto 008, 2001.
- AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os tópicos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1991. 332p.
- BACK, A.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.5, p.717-726, Maio 2001.
- BARBIN, H.S. **Histórico da evolução do uso do solo e estudo dos espaços livres públicos de uma região do Município de Piracicaba, SP**. 2003. 196p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- BARRETO, A.G.O.P.; SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. **Atlas Rural de Piracicaba**. Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF). 2006. 75p.
Disponível em: http://www.ipef.br/publicacoes/atlasrural/Atlas_Rural_de_Piracicaba_2006.pdf.
Acesso em: 06 fev.2006.
- CONFALONIERI, U.E.C. Global environmental change and health in Brazil: review of the present situation and proposal for indicators for monitoring these effects. In: HOGAN, H.J.; TOLMASQUIM, M.T. **Human dimension of global environmental change – Brazilian Perspectives**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2001.156p.
- CONTI, J.B. Considerações sobre mudanças climáticas globais. In: NETO, J.L.S.; ZAVATINI, J. A.(Org.). **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. parte 1. p.17-28.
- COSTA, F.P da S. **Evolução urbana da cobertura vegetal de Piracicaba – São Paulo (1940-2000)**. 2004. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- DEOSTHALI, V. Assessment of impact of urbanization on climate: an application of bioclimatic index. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.33, n.24-25, p.4125-4133, 1999.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA 2005.
Disponível em <http://www.epa.gov/heatisland> . Acesso em: 15 nov.2005
- GALLO, K.P.; OWEN, T.W. Satellite-based adjustment for the urban heat island temperature bias. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.38, n.6, p.806-813, Aug.1998.

GOLDREICH, Y. Urban climate studies in Israel – a Review. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.29, n.4, p.467-478, 1995.

HACKENBERG, A. M. A ocupação urbana e as adversidades climáticas de Joinville. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 3., Londrina, 1991. **Anais...** Londrina; UEL, 1991. p.623-637.

HAFNER, J., KIDDER, S.Q. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.38, n.4, p.448-465, June 1999.

HIDORE, J.J.; OLIVER, J.E. **Climatology – an atmospheric science**. New York: Macmillan, 1993. p.41-248.

ICHINOSE, T.; SHIMODOZONO, K.; HANAOKI, K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.33, n.24-25, p.3897-3909, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE . Disponível em <http://www.ibge.hpg.gov.br>. Acesso em: 5 jan. 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Genebra, Suíça, 2001.

JESUS, E.F.R. de. **Espaço, tempo e escala em climatologia**. 1995. 160p. Tese (Doutorado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, Londres, v.423, n.6939, p.528-531, May. 2003.

KARL, T.R.; KNIGHT, R.W.; FASTERLING D. R.; QUAYLE, R.G. Indices of climate change for the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v.77, n.2, p.279-292, feb.1996.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Tradução de Carlos Henrique Brito de Assis Prado. São Carlos: Editora RiMa Artes e Texto, 2000. 531p.

LU, D.; WENG, Q. Urban Classification Using Full Spectral Information of Landsat ETM⁺ Imagery in Marion County, Indiana. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.71, n.11, p.1275-1284, nov. 2005.

LOMBARDO, M.A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.

LOMBARDO, M.A.; GONÇALVES, J.C.; NETO, P.Q. A expansão urbana da cidade de São Paulo e a variação temporal da temperatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 3., Londrina, 1991. **Anais...** Londrina; UEL, 1991. 190p.

MENDONÇA, F O. O clima urbano de cidades de porte médio e pequeno: aspectos teórico-metodológicos e estudo de caso. In: SANT´ANNA NETO, J.L. e ZAVATINI, J. A. (Org.) . **Variabilidade e Mudanças Climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas.** Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. p.167-192.

_____. O estudo do clima urbano no Brasil. In: MONTEIRO, C.A. de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano.** São Paulo: Editora Contexto, 2003. cap. 6, p.175-192.

MONTEIRO, C.A.de F. Teoria e Clima Urbano. IGEO/USP, São Paulo, 1976. 181p.(**Série Teses e Monografias, n.25**).

MONTEIRO, C.A. de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano.** São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p.

MONTEIRO, C.A. de F. Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos. In: MONTEIRO, C. A de F; MENDONÇA, F. (Org.), **Clima Urbano.** São Paulo: Editora Contexto, 2003, 192p. cap.1, p. 9-67.

NETO, J.L.S. As chuvas no estado de São Paulo: a variabilidade pluvial nos últimos 100 anos.In: SANT´ANNA NETO, J.L.e ZAVATINI, J. A. (Org.) . **Variabilidade e Mudanças Climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas.** Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. p.95-119.

NUNES, L.H. **Repercussões globais, regionais e locais do aquecimento global.** Instituto de Geociências da UNICAMP. São Paulo: Editora Terra Livre, v.19, n.20, p.101-110, jan./jul. 2003.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIE - **OMM.**

Disponível em <http://www.wmo.ch/index>. Acesso em: 13 fev.2006.

PEREZ, J.C.; SÁNCHEZ, M.de los.A.V.; BARRADAS, V.L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **Red Nacional de Investigación Urbana**, Puebla, México, Ciudades 51, jul./set. 2001.

PONGRACZ, R.; BARTHOLY, J.; DEZSO, Z. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. **Advances in Space Research**, Oxford, June 2005. In Press. Disponível em: www.elsevier.com/locate/asr.

PRATS, J.M.C.; SERRANO-VICENTE, S.M.; SÁNCHEZ, M.A.S. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): las ilas de claro y sus factores condicionantes. **Boletim de la AGE**, Madri, n.40, p. 311-327, 2005.

RANZANI, G. **Subsídios à Geografia de Piracicaba.** Piracicaba: Institutos Históricos e Geográficos de Piracicaba, 1996. 26 p.

RIBEIRO, E.L. **Aspectos estruturais da forma urbana: suas influências na concentração de poluentes atmosféricos e nos impactos receptivos-alternativos de planejamento urbano para o caso de São Paulo.** 1993. 430 p. (Tese de Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SANT'ANNA NETO, J.L.; ZAVATINI, J. A. (Org.). **Variabilidade e mudanças climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas.** Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. 259p.

SANTOS, W.G. (Coord.). **Diagnóstico da poluição ambiental no interior do Estado de São Paulo.** São Paulo: CETESB, 1994. 52p.

SANTOS, M. **Por uma outra globalização.** Do pensamento único à consciência universal. Rio de Janeiro: Record, 2000. 236p.

SILVA, E.M. da.; RIBEIRO, A.G. As tendências das variações climáticas na cidade de Uberlândia-MG (1981-2000). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.9, n.12, p.174-190, Jun.2004. Revista on-line. Disponível: www.ig.ufu.br/caminhos_de_geografia.html.

STEFFEN, W.L.; WALKER, B.H.; INGRAM, J.S.; KOCH, G.W. Global Change and terrestrial ecosystems: the operational plan. **IGBP Report - International Geosphere-Biosphere Programme**, Stockholm, n.21,1992.

TARIFA, J.R. Alterações climáticas resultantes da ocupação agrícola no Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.8, p.15-28,1994.

TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da Drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.7, n.1, p.181 – 198, Mar. 2002.

VELASCO, G.D.N. **Arborização viária X sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos.** 2003. 94 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VIANELLO, L.R.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: Imprensa Universitária. 1991. 449 p.

VILLA NOVA, N.A.; SANTIAGO, A.V.; REZENDE, F.C **Energia Solar: aspectos físicos e de captura pela biomassa.** Piracicaba: CALQ, Departamento de Ciências Exatas, Física e Meteorologia Agrícola. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2001. 20p. (Apostila)

VILLA NOVA, N.A.; TUON, R.L.; ABREU, E.M. **Análise da tendência dos valores observados (1917-2003) de Temperaturas e Precipitações na região de Piracicaba-SP com busca de indícios de mudanças climáticas.** Piracicaba. Departamento de Ciências Exatas - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2003. 11p. (Apostila)

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal Remote Sensing**, Bethesda, v.22, n.10, p.1999-2014, 2001.

YAMASHITA, S.; SEKINE, K.; SHODA M.; YAMASHITA, K.; HARA, Y. On relationships between heat-island and sky view factor in the cities of Tama River Basin, Japan. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 20, n.5, p.681-686, 1986.

ZAR, J.H. **Biostatistical Analysis**. 4th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999. 300p.

LANDSAT 7 (ETM⁺) E IDRISI 3.2: VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE TRANSFORMAÇÃO TERMAL

Resumo

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto vem se tornando fundamental em estudos de clima urbano enfocando anomalias térmicas como as “ilhas de calor”. Neste contexto, os dados do sensoriamento remoto do infravermelho termal são de extrema importância por permitirem estudos de comportamento térmico e fornecerem temperaturas aparentes de superfícies (LST). Trabalhos anteriores mostraram que para uma melhor descrição desse tipo de estudo há a necessidade do uso de imagens de satélite de melhor resolução e dentre essas imagens destacam-se as do satélite Landsat 7. Foi desenvolvido um modelo de regressão quadrática capaz de transformar os números digitais das imagens em temperatura aparente de superfície e esse modelo aplica-se aos satélites Landsat 5 e Landsat 7. No entanto, programas de computador de geoprocessamento, como o IDRISI 3.2 utilizam um algoritmo para a transformação termal com calibração feita apenas para processar as imagens do Landsat 5. O objetivo principal do presente estudo foi verificar a viabilidade do algoritmo do IDRISI na conversão dos dados das bandas do infravermelho termal do Landsat 7. Após a aplicação dos dois métodos de conversão da temperatura aparente de superfície nas imagens de satélite e a comparação dos resultados, verificou-se que a temperatura fornecida pelo software acompanha a mesma variação da temperatura calculada pelo modelo ($R^2 = 0,99$). Assim, o algoritmo de transformação do software IDRISI 3.2 para o satélite Landsat 7 foi validado, sendo uma ferramenta de fácil acesso e rápida para a utilização de imagens de melhor resolução.

Palavras-chave: IDRISI 3.2; infravermelho termal; imagens de satélite; sensoriamento remoto; temperatura aparente de superfície.

Abstract

Remote sensed techniques contributes as an important tool to derive information on land use/cover and land surface temperature (LST) as well as to access the thermal response pattern of land cover types. Recently, the urban heat island phenomena has been extensively studied and researches showed that it needs higher resolution images. A medium spatial resolution data (such as Landsat 7 with 60 m resolution thermal image) became easily available in recent years and have been used for urban studies. However, a land surface temperature can't be easily obtained because it needs extensive mathematical calculations. The software IDRISI 3.2 has a thermal algorithm to derivate land surface temperature, but it was calibrated to Landsat 5. The objective of this study was to investigate the possibility to use the IDRISI's thermal algorithm convert the Landsat 7 thermal infrared data in land surface temperature. In this work, we used Landsat 5 and Landsat 7 thermal bands. The digital numbers were transformed in degrees using the software and using the Malaret's et al (1985) quadratic model. Comparing the results we could observe that IDRISI and the quadratic model's data have shown a correlation of 0.99. These results suggest that data from the software IDRISI 3.2 can be used with Landsat 7 high resolution images, being a useful and rapid tool to study urban heat islands.

Key words: IDRISI 3.2; infrared thermal data; land surface temperature; remote sensing; satellite images.

3.1 Introdução

Sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG) têm se destacado como uma importante ferramenta para qualificar e quantificar diversos processos na mudança do uso e cobertura do solo e na determinação da temperatura aparente da superfície (NOVO, 1989; NICHOL, 1994; WENG et al., 2004a, LU e WENG, 2005). Essa tecnologia é o único elemento, dentre as ferramentas disponíveis atualmente, que permite visões em diferentes escalas espaciais, fornecendo dados facilmente manipuláveis e intuitivamente compreensíveis (TARIFA e AZEVEDO, 2001). Nesse sentido, o uso do sensoriamento remoto vem assumindo importância cada vez maior principalmente na área ambiental (BARBIN, 2003; FRANÇA e FERREIRA, 2005) destacando o reconhecimento de vegetação natural, levantamento pedológico, uso e cobertura do solo e, recentemente, em estudos de clima urbano (OLIVEIRA, 2001; GURGEL et al., 2001).

Nas últimas décadas, estudos de clima urbano, mais especificamente no que se refere a anomalias térmicas como as “ilhas de calor” vêm se destacando e ganhando muita importância na área do sensoriamento remoto, pois este, além de oferecer visões de diferentes escalas, permite a transformação de dados do infravermelho termal em temperatura aparente de superfície. Os primeiros estudos foram efetuados com o satélite NOAA (“National Oceanic and Atmospheric Administration”), que tem resolução espacial de 1,1km (KIDDER e WU, 1987; BALLING e BRAZELL, 1988; ROTH et al., 1989; GALLO et al., 1993; FRANÇA e CRACKNELL, 1994). No entanto, tal resolução é baixa, limitando a qualidade da descrição (WENG, 2003). Os próximos satélites que foram utilizados, e ainda o são até hoje, são os da série Landsat, que se destaca por sua maior acessibilidade (NICHOL, 1994; WENG e YANG, 2004b). O Landsat 5 se destacou por muitos anos por apresentar uma melhor resolução (120 m) quando comparado ao satélite NOAA. Posteriormente, foi introduzido o Landsat 7 que apresenta imagens com resolução de 60 metros, o que o torna mais adequado para estudos que exigem uma resolução espacial mais refinada (WENG, 2003).

A utilização de imagens de melhor resolução espacial para estimar a temperatura da superfície depende da transformação dos dados do infravermelho termal. Para tanto, é necessária a aplicação de diversos modelos matemáticos, bem como a calibração exata dos sensores termais dos satélites. O programa matemático IDRISI 3.2 possui um algoritmo capaz de fazer a transformação dos dados do infravermelho termal. No entanto, sua calibração foi feita apenas

para processar as imagens do satélite Landsat 5, que apresenta menor resolução espacial e portanto não é adequado para estudos de clima urbano. Esse programa não indica qualquer tipo de calibração para transformar imagens de melhor resolução espacial.

O presente trabalho tem como objetivo principal verificar a viabilidade do uso do algoritmo de transformação termal do programa de computador IDRISI 3.2 na conversão dos dados das bandas do infravermelho termal (de alto e baixo ganho) do Landsat 7, fornecendo, assim, mais uma ferramenta para quantificar as temperaturas aparentes de superfície.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Revisão Bibliográfica

3.2.1.1 Conceitos importantes em sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido como a aquisição de informações sobre um objeto sem a necessidade de contato direto (CREPANI, 1983; NOVO, 1989). As atividades do sensoriamento remoto envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informação) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (FIGUEIREDO, 1995). Conseqüentemente, esta abordagem permite o uso de outras faixas do espectro além das faixas de sensibilidade da visão humana e da fotografia (NOVO, 1989; VETTORAZZI, 1992; KOFFLER, 1992; FIGUEIREDO, 1995).

Assim, a energia eletromagnética (REM) é de fundamental importância para o sensoriamento remoto (NOVO, 1989; KOFFLER, 1992). A principal fonte eletromagnética é o Sol. Entretanto, toda matéria a uma temperatura superior a zero absoluto (0°K ou -273°C) emite radiação eletromagnética como resultado das suas oscilações atômicas e moleculares (NOVO, 1989). Dessa maneira, todo corpo com uma temperatura acima do zero absoluto pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética. Qualquer alteração na qualidade e propriedades da radiação eletromagnética quando esta interage com um meio são, quando detectadas, uma valiosa fonte de dados para a interpretação das propriedades desse meio (KOFFLER, 1992).

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda e sua frequência, sendo esta disposição denominada de **espectro eletromagnético** (FIGUEIREDO, 1995). O espectro eletromagnético apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico

que dá origem à energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética. O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de ondas muito curtos associados aos raios cósmicos até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de ondas, como mostra a Figura 3.1 (FIGUEIREDO, 1995).

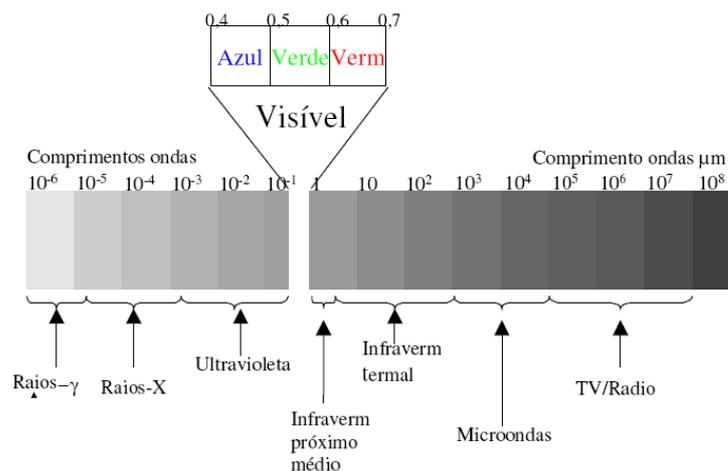


Figura 3.1 - Espectro eletromagnético⁵

Embora não existam limites rígidos entre as diversas formas de REM costuma-se dividir o espectro eletromagnético em regiões possuindo características peculiares (VETTORAZZI, 1992). Destacam-se as seguintes regiões: ondas de rádio, microondas, infravermelho, visível, ultravioleta e, outras faixas do espectro de interesse menor ao sensoriamento, que são as faixas dos Raios-X, Raios Gama e Raios Cósmicos (Figura 3.1).

A faixa mais usada no sensoriamento remoto estende-se de 0,3 μm a 15 μm , embora a faixa de microondas também seja utilizada (FIGUEIREDO, 1995). Essa faixa de maior atuação é conhecida como **espectro óptico**, pois nela estão os componentes ópticos de reflexão e refração, tais como lentes, espelhos e prismas, e podem ser usadas para coletar e reorientar a radiação (VETTORAZZI, 1992). A Figura 3.2 ressalta as regiões do espectro óptico.

⁵ Fonte: FIGUEIREDO, 1995.

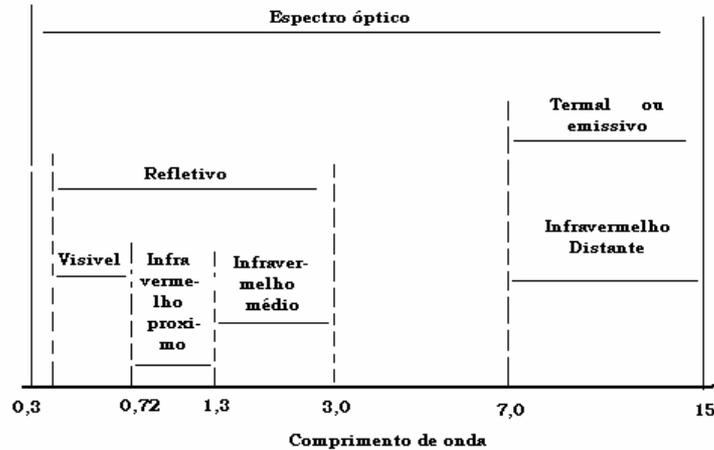


Figura 3.2 – Espectro Óptico⁶, ressaltado os comprimentos de onda mais utilizados no sensoriamento remoto (0.3 a 15 µm com as divisões do espectro óptico

3.2.1.2 Imagens de satélites

Dentre os principais produtos do sensoriamento remoto KOFFLER (1992) destaca as fotografias aéreas (preto e brancas, coloridas, pancromáticas e infravermelhas); as imagens multiespectrais; as imagens de radar e as imagens orbitais. A imagem de satélite é uma das principais fontes para estudos de análise ambiental (GURGEL et al., 2001; DERENNE, 2003).

Uma imagem digital é uma função bidimensional da intensidade de luz refletida ou emitida por uma cena (incluindo-se o efeito atmosférico), representada por $f(x,y)$, onde f correspondente a cada coordenada (x,y) e dá a intensidade da imagem no ponto. Essa intensidade é numericamente representada na imagem por um valor inteiro, não negativo e finito, chamado de “nível de cinza” (NC) (ou, “digital number” –DN; ou número digital) (DUTRA et al.,1981; QUINTANILHA, 1990; VETTORAZZI, 1992).

Em princípio, qualquer informação pode ser digitalizada e transformada em uma imagem e para tanto, basta ajustar uma grade de dimensões constantes sobre a informação (HABERACKER, 1984). Essa grade constitui uma matriz bidimensional que define o conjunto de células ou “pixels” (“picture element”) e para cada pixel é atribuído um valor (NC, ou DN). A

⁶ Adaptado de SWAIN e DAVIS (1978).

Figura 3.3 é a representação esquemática de uma informação digitalizada, com as coordenadas (x,y) e os valores relativos aos “pixel”.

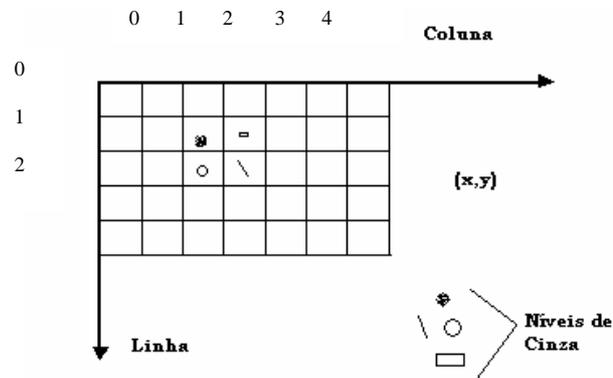


Figura 3.3 – Sistema de Coordenadas de uma imagem digital ⁷

O pixel representa uma área da superfície da Terra e depende da resolução do sensor do satélite (NOVO 1989). Assim, dada uma cena digitalizada, o número de pixels está relacionado à resolução espacial da imagem gerada; quanto maior o número de pixels, melhor será a definição dos detalhes da cena. Conforme descrito, a cada pixel está associado um valor numérico (NC ou DN ou, ainda, “Pixel Value” - PV), e esse valor é representado por tonalidades de cinza que variam do preto (nível mínimo) ao branco (nível máximo) (IBGE, 2001). O número de níveis de cinza está relacionado à resolução radiométrica e quanto maior o número de NC, melhor será a discriminação entre pontos da imagem (IWAI 2003). As imagens do TM – LANDSAT, por exemplo, são digitalizadas em 256 diferentes níveis de cinza. Estes 256 valores de níveis de cinza (variando de 0 a 255) são codificados em 1 byte. Dessa maneira, para cada pixel da imagem ter-se-á um valor de nível de cinza. O pixel S (x, y) pode assumir qualquer valor entre 0 e 255 (NOVO, 1989). No caso da banda termal, os tons de cinza mais claros correspondem às áreas de maior temperatura da superfície registrada pelo sensor, em oposição aos tons mais escuros, que significam áreas de menor temperatura. A Figura 3.4 esquematiza a escala de níveis de cinza relacionando o infravermelho termal ao NC.

⁷ Fonte: NOVO, 1989.

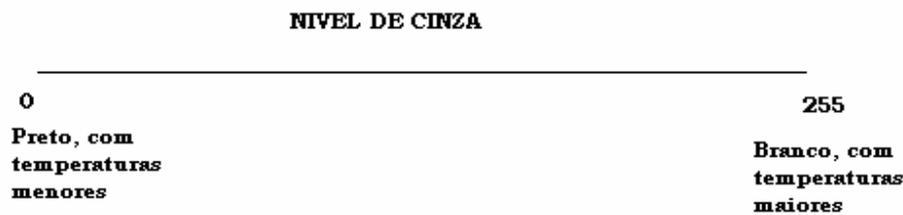


Figura 3.4 – Representação esquemática da escala - NC (0 a 255) - com destaque para o NC preto – valor 0 e o ponto mais frio e para o NC branco – valor 255 e o ponto mais quente de qualquer imagem termal

3.2.1.3 Resolução e poder de resolução das imagens digitais

Resolução é uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximas espacialmente (NOVO, 1989). Quanto menor o valor da resolução espacial, maior é o poder de resolução do sistema (VETTORAZZI, 1992). Assim, a resolução espacial identifica a menor separação angular ou linear entre dois objetos na imagem. Por exemplo, as imagens produzidas pelo sensor “Enhanced Thematic Mapper Plus” (ETM⁺) do sistema Landsat possuem uma resolução de 30 metros, ou seja, objetos imageados pelo sistema que estejam distanciados entre si em menos de 30 metros não serão discriminados na imagem. Diz-se, então, que o poder de resolução do sensor ETM⁺ (exceto para a banda do infravermelho termal e para banda pancromática) é de 30 metros.

Diferentes resoluções espaciais permitem a observação de diferentes estruturas (LU & WENG, 2005), diferentes coberturas de solo (CASELLES et al., 1992a), diferentes tamanhos de objetos e corpos (CAMARA e MEDEIROS, 1996). Conseqüentemente, a resolução espacial utilizada em cada trabalho depende do objetivo do estudo e da escala espacial necessária (WENG et al., 2004a; WENG, 2003; CASELLES et al., 1992b). Em estudos de pequenas escalas, como por exemplo, estudos urbanos, quanto mais refinada a resolução com maior clareza pode se observar quais os elementos que compõe a superfície em estudo (Figura 3.5).

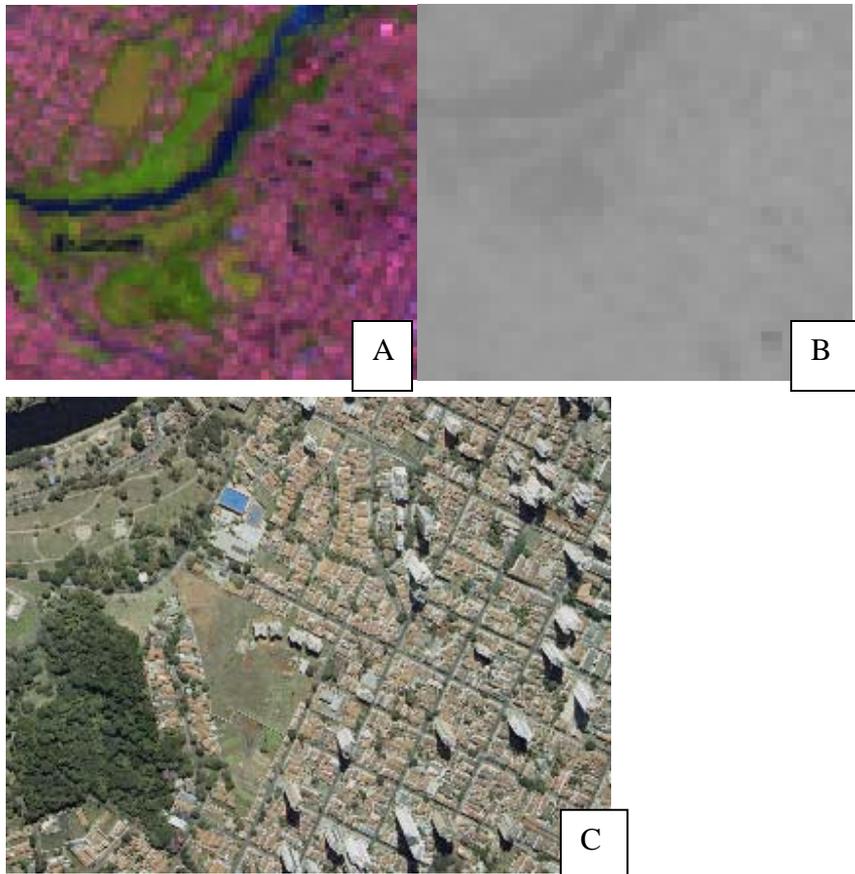


Figura 3.5 - Diferentes resoluções espaciais. A: composição bandas 3,4 e 5 do satélite landsat 7, com 30 metros de resolução. B: Banda termal de alto ganho do satélite Landsat 7, com 60 metros de resolução. C: Fotografia aérea, com 5metros de resolução

WENG (2003) destaca que quanto melhor a resolução, maior a definição dos alvos, e melhor a compreensão e identificação da paisagem. A escolha da resolução a ser utilizada em cada trabalho depende, basicamente, do objetivo a ser alcançado (QUINTANILHA, 1990). Estudos urbanos necessitam de boa resolução (QUINTANILHA, 1990; HARRIS e VENTURA, 1995; SILVA FILHO, 2004; LU e WENG, 2005), em contraposição, estudos da temperatura do oceano, por exemplo, não necessitam de uma resolução tão refinada (CASTAGNÉ et al., 1986; LÊ BORGUE et al., 1988).

Atualmente existem, no mercado, satélites de ótima definição espacial, como as imagens do satélite Ikonos (SUGUMARAN et al., 2002; VAN DER SANDE et al., 2003) e o “ADAR

multispectral scanner imagery” (THOMAS et al., 2003), que fornecem informações mais detalhadas dos alvos (LU & WENG, 2005; PONGRACZ et al., 2005).

A análise de imagens com alta resolução é dificultada pela enorme quantidade de dados armazenados, pelo grande tempo de processamento e por seu custo elevado (LU & WENG, 2005). Além disso, imagens de fina resolução espacial causam desafios para seleção de aproximações e algoritmos exatos no processamento da imagem, principalmente quando se trata de uma área extensa. Uma das alternativas mais utilizadas em estudos urbanos é o uso de imagens de média resolução espacial, especialmente as do TM/ETM⁺ por estarem disponíveis para múltiplas datas, (LU & WENG, 2005; PONGRACZ et al., 2005; WENG et al., 2004a; WENG, 2003; BARTHOLO et al., 2003; NICHOL, 1994; CARNAHAN e LARSON, 1990), por terem custos menores e por serem mais rapidamente processadas (LU & WENG, 2005).

Além da resolução espacial, as imagens de satélite também possuem uma resolução espectral. O termo resolução espectral, segundo NOVO (1989), é uma medida da amplitude das faixas espectrais às quais o sensor é sensível. Assim, um sensor que opera, por exemplo, na faixa de 400 nm a 500 nm, possui um poder de resolução espectral maior que um outro que opera na faixa de 400 nm a 600 nm, pois será capaz de registrar variações no comportamento espectral dos alvos em faixas mais estreitas do espectro eletromagnético.

VETTORAZZI (1992) destaca que há, ainda, o poder de resolução radiométrica, que se refere à sensibilidade do sistema sensor em detectar diferentes níveis de intensidade do sinal de retorno, trazidos, por exemplo, por diferentes níveis de cinza que irão compor uma imagem. No sistema Landsat, o sensor MSS (“multispectral scanner system”) produz imagens com até 128 níveis de cinza, enquanto que para o sensor TM este valor é de 256 níveis (maior poder de resolução radiométrica).

3.2.1.4 Série Landsat

A série LANDSAT foi iniciada no final da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O primeiro satélite da série começou a operar em 1972 e a última atualização ocorreu em 1999 com o lançamento do Landsat 7. (GOWARD et al., 2000; LANDSAT PROJECT SCIENCE OFFICE, 2002). Sete satélites da série Landsat foram construídos, e seis deles tiveram sucesso no lançamento e nas operações em órbita. O lançamento

dos satélites da série Landsat significou um avanço no sensoriamento remoto orbital, com sensores mais sofisticados, capacidade de melhor aquisição e transmissão dos dados e maior rapidez no processamento dos dados recebidos (CHANDER e MARKAHAM, 2003). Dois deles ainda permanecem em operação: Landsat 5 (TM), lançado em 1984; e o Landsat 7 (ETM⁺), lançado em 1999.

Nos três primeiros satélites da série Landsat, o principal sistema sensor era o Multispectral Scanner System (MSS), que operava em quatro canais (dois no visível e dois no infravermelho próximo), com uma resolução espacial de 80 metros. Os Landsat 1, 2 e 3 passavam sobre a mesma área da superfície terrestre a cada 18 dias. A partir do Landsat 4, lançado em 1982, além do MSS, foi colocado em operação um novo sistema sensor, o Thematic Mapper (TM). Este sensor registrava dados em sete canais ou bandas espectrais (três no visível, um no infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal) com resolução espacial de 30 metros (exceto o canal termal, que é de 120 metros). O Landsat 5, com as mesmas características do seu antecessor, foi lançado em 1984. O Landsat 6, que não conseguiu atingir sua órbita, foi declarado perdido após seu lançamento em outubro de 1993. No Landsat 7, lançado em 1999 e atualmente em funcionamento, o sensor TM foi substituído pelo ETM⁺ (Enhanced thematic mapper, plus) que inclui um canal pancromático (da região do visível e infravermelho próximo) com uma resolução espacial de 15 metros e resolução espacial do canal termal de 60 metros. O satélite passa sobre a mesma área da superfície da terrestre a cada 16 dias. Cada imagem obtida desse satélite cobre uma área de 185 por 185 km (FLORENZANO, 2002). A tabela 3.1 apresenta as principais características da série Landsat.

Tabela 3.1 – Principais características dos satélites da série Landsat⁸

(continua)					
SENSOR	BANDA ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPACIAL	RESOLUÇÃO TEMPORAL	FAIXA IMAGEADA
MSS	4	0,5 - 0,6 μm	80 m	18 dias	185 km
	5	0,6 - 0,7 μm			
	6	0,7 - 0,8 μm			
	7	0,8 - 1,1 μm			
	8	10,4 - 12,6 μm	120 m		
TM	1	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km
	2	0,50 - 0,60 μm			

⁸ Adaptado do site do LANDSAT Project SCIENCE, 2002.

Tabela 3.1 – Principais características da série Landsat

(conclusão)					
SENSOR	BANDA ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPACIAL	RESOLUÇÃO TEMPORAL	FAIXA IMAGEADA
TM	3	0,63 - 0,69 μm			
	4	0,76 - 0,90 μm			
	5	1,55 - 1,75 μm			
	6	10,4 - 12,5 μm	120 m		
	7	2,08 - 2,35 μm	30 m		
ETM⁺	1	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km
	2	0,50 - 0,60 μm			
	3	0,63 - 0,69 μm			
	4	0,76 - 0,90 μm			
	5	1,55 - 1,75 μm			
	6	10,4 - 12,5 μm	60 m		
	7	2,08 - 2,35 μm	30 m		
	8	0,50 - 0,90 μm	15 m		

Os instrumentos a bordo do satélite Landsat 5 e Landsat 7 são muito similares; o “thematic mapper plus” (ETM⁺) do Landsat 7 é derivado do “Thematic mapper” (TM) a bordo do Landsat 5 (GOWARD et al., 2000; BARSÍ et al., 2003). Ambos os satélites estão em órbita a 705 km, no sincronismo do Sol, com um cruzamento de hora equatorial de aproximadamente 10:00h da manhã. O ciclo se repete em 16 dias e ambos diferem em 8 dias entre si (LANDSAT PROJECT SCIENCE OFFICE, 2002). Os dois satélites possuem “scanners” de varredura multiespectral, com as mesmas bandas (vermelho, verde, azul, infravermelho próximo, infravermelho termal) (BARSÍ et al., 2003).

BARSÍ et al. (2003) compara algumas características selecionadas dos dois instrumentos em seu artigo e ressalta que o incremento de resolução radiométrica e espacial tem feito a banda termal do ETM⁺ ser mais usada para estudos de fatores de escala humana, principalmente por causa de sua resolução.

BARSÍ et al. (2003) também descreveu alguns pontos importantes do funcionamento dos satélites e, dentre eles, destacou a importância das calibrações. As equações de calibração do Landsat 5 encontram-se descritas no artigo de CHANDER e MARKHAM (2003) e no “site” da NASA (<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html>), e, as do Landsat 7, podem se encontradas no artigo de BARSÍ et al. (2003).

3.2.1.5 Infravermelho Termal

Conforme já explicado um alvo da superfície terrestre recebe radiação eletromagnética proveniente do Sol e, dependendo da sua composição, forma, cor, propriedade, parte dessa energia será refletida e parte absorvida. Assim, é possível afirmar que satélites com sensor infravermelho termal mensuram a radiação do topo da atmosfera, e esses dados podem ser convertidos em temperatura aparente da superfície (“land surface temperature” - LST). Essas temperaturas são estimadas segundo a Lei de Planck que estabelece que quanto maior a temperatura de um dado comprimento de onda, maior a quantidade de energia emitida por um corpo negro (blackbody) (BAPTISTA, 2003; DASH et al., 2002; WENG e YANG, 2004b; PRATA et al., 1995; BIAS et al., 2003). A temperatura quantificada pelo satélite é a temperatura radiante da superfície que é um valor superior à temperatura do ar (WENG, 2003)

A determinação da LST é um interesse que data de muito tempo e atinge diversas áreas de conhecimento como, por exemplo, processos termais que ocorrem no oceano (SCHLUESSEL et al., 1990; BARTON, 1995; OLIVEIRA, 2001), determinação de locais de pesca (ABDON, 1982), estimativa da umidade do solo (EPIPHANIO, 1982; NOVO, 1989), fiscalização de queimadas (AIRES e KIRCHHOFF, 2001), estudos de anomalias térmicas urbanas, fenômeno conhecido como “Ilhas de calor” (GEDZELMAN et al., 2003; ANJOS e LOPES, 2002; LOMBARDO, 1985; BIAS et al., 2003; WENG e YANG, 2004b; COLTRI et al., 2005; CASELLES et al., 1992a).

A interpretação dos dados de temperatura obtidos no sensoriamento remoto de superfícies parcialmente vegetadas é muito complicada porque essas superfícies são consideradas ásperas e heterogêneas, compostas, geralmente, de dois elementos: a terra e a vegetação (CASELLES et al., 1992b). A estimativa dos elementos pelo sensor varia de acordo com o ângulo de observação (SOBRINO e CASELLES, 1990), então, a quantidade de vegetação aumenta, ou diminui, conforme o ângulo da observação se modifica. Essa variação causa, devido à diferença de emissividade da terra e vegetação, uma larga variação espectral na resposta do sensor (KIMES, 1983). Assim, para se fazer a interpretação correta do sensor é necessário introduzir parâmetros efetivos de emissividade e temperatura (BECKER, 1981; SOBRINO e CASELLES, 1990), que podem ser obtidos com o conhecimento da distribuição geométrica da vegetação na terra e das características de observação dos satélites (CASELLES, 1992b; CASELLES e SOBRINO, 1989).

Embora métodos empíricos sejam usados frequentemente para relacionar características do alvo aos dados dos sensores remotos (MILLARD et al., 1980; MEAILLE e WALD, 1990; CASELLES et al., 1992a), uma aproximação mais adequada é empregar modelos físicos para o cálculo da LST (SUTHERLAND e BARTHOLIC, 1977; BECKER, 1981; MALARET et al., 1985; CASELLES et. al., 1988; SOBRINO e CASELLES, 1990).

WENG (2003) sugere que a temperatura só pode ser efetivamente derivada depois que a relação entre os componentes que formam a temperatura forem modelados matematicamente. Muitos esforços têm sido feitos para conseguir extrair dos dados dos satélites as temperaturas aparentes da superfície do solo e muitos modelos termais têm sido desenvolvidos com esse propósito (WATSON, 1971; PRABHAKARA et al., 1974; SNYDER et al., 1998). WENG (2003) utilizou a teoria dos fractais para mensurar a temperatura de áreas urbanas na China e obteve êxito. Já WENG (2004) calculou a temperatura aparente da superfície do solo derivada da imagem termal Landsat 7 ETM⁺ utilizando as equações do Landsat Project Science Office (2002) e a correção de emissividade de ARTIS e CARNAHAM (1982).

Destaca-se, no presente estudo, as equações desenvolvidas por MALARET et al (1985). O autor desenvolveu três modelos: um linear, um quadrático e um cúbico para a conversão dos dados dos satélites Landsat 4 e Landsat 5 em temperatura aparente de superfície, podendo ser, também utilizados no Landsat 7 (ATLAS AMBIENTAL, 2000; TARIFA e ARMANI, 2001).

3.2.2 Materiais e Métodos

3.2.2.1 Materiais

Para a elaboração do trabalho foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As cenas utilizadas foram da órbita 220 ponto 76 do dia 19/01/2004 (Landsat 5) (Figura 3.6) e do dia 08/01/2003 (Landsat 7) (Figuras 3.7 e 3.8). As cenas foram recortadas no limite da malha urbana do município de Piracicaba-SP.

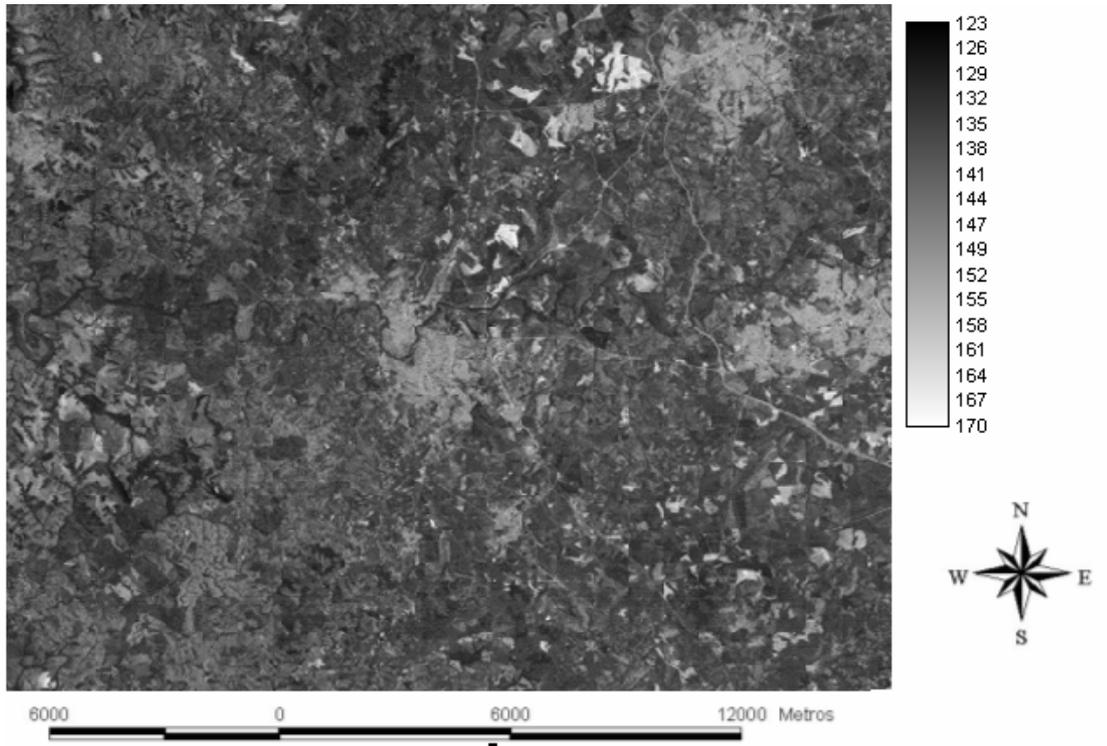


Figura 3.6- Cena recortada da banda termal da imagem de satélite Landsat 5. Datum: UTM e Projeção: SAD 69

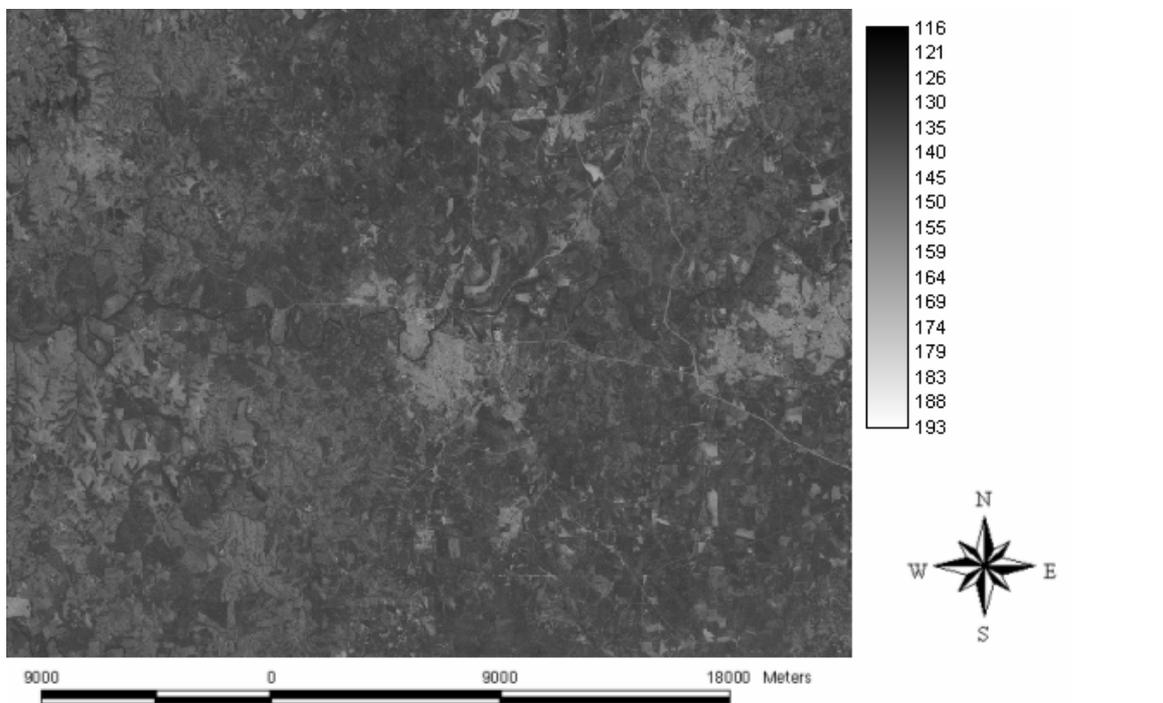


Figura 3.7 – Cena recortada da banda termal de baixo ganho (banda 6L) da imagem Landsat 7. Projeção UTM e Datum: SAD 69

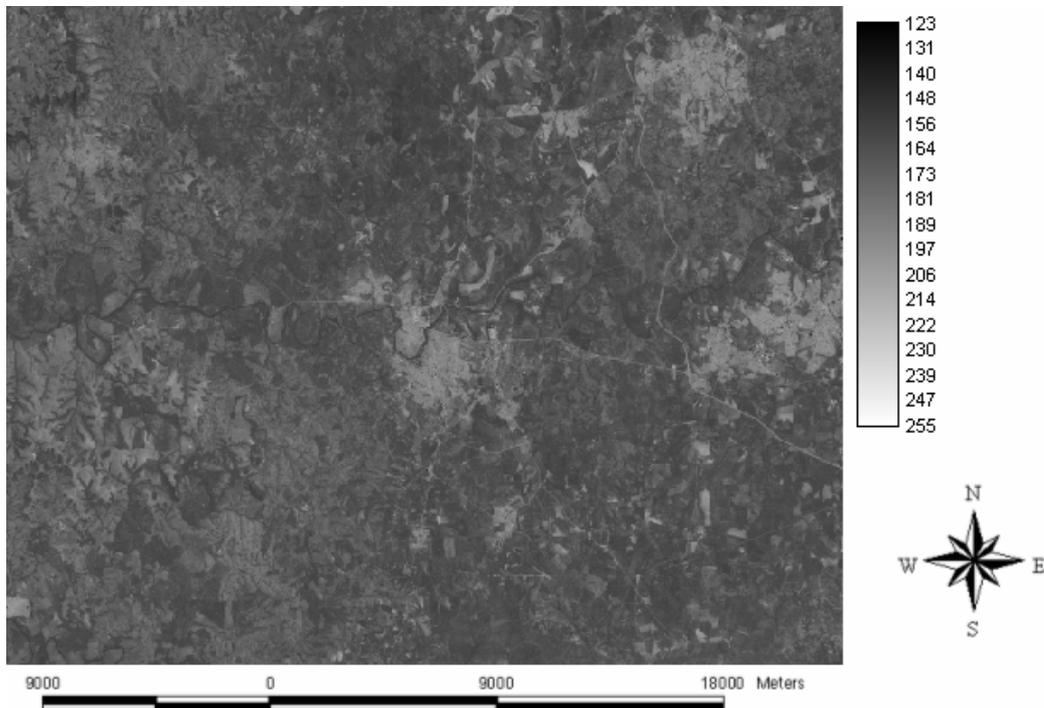


Figura 3.8 – Cena recortada da banda termal de alto ganho (banda 6H) da imagem Landsat 7. Projeção UTM e Datum: SAD 69

Os softwares utilizados foram IDRISI 3.2 (para transformação da banda termal); ERDAS IMAGINE 8.5 (para retificação geométrica) e ARCVIEW GIS 3.3 (para utilização dos dados vetoriais da malha urbana do Município e para os detalhes finais de representação).

Os dados vetoriais na projeção UTM e datum SAD 69 foram cedidos pelo Laboratório de Silvicultura Urbana da ESALQ/USP.

3.2.2.2 Métodos

3.2.2.2.1 Localização da Área de Estudo

O Município de Piracicaba (SP) situa-se entre as coordenadas geográficas 22°42' de latitude sul e 47°38' de longitude oeste de Greenwich. A cidade está a 138 km de distância (em linha reta) da capital do Estado, São Paulo, está a 540 m de altitude (SILVA FILHO, 2004). A Figura 3.9 indica a localização do Município e da bacia do Rio Piracicaba.

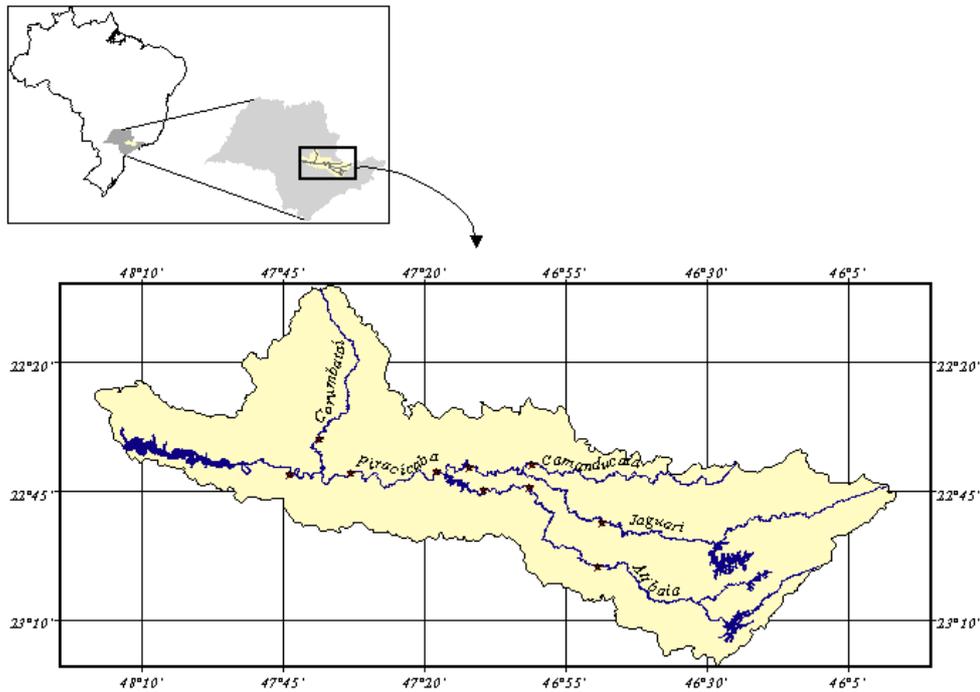


Figura 3.9 – Localização da Área de Estudo. Acima localização do Estado de São Paulo com detalhe para o Município de Piracicaba. Abaixo localização no Município nas coordenadas geográficas com destaque na bacia do Rio Piracicaba⁹

A malha urbana do Município representa 6% da área total (BARRETO et al, 2006). A Figura 3.10 apresenta as delimitação do Município (área maior) e da malha urbana (área menor).

⁹ Fonte: <http://www.cena.usp.br/piracena/html/localp.htm>

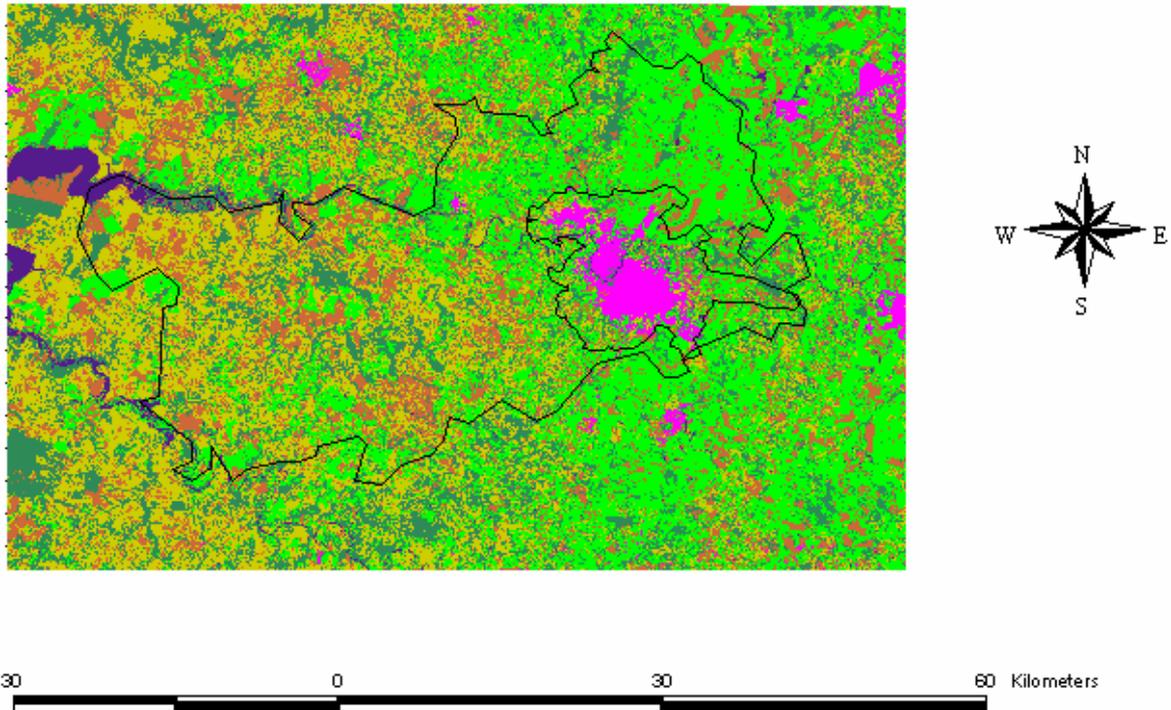


Figura 3.10 – Limite do Município de Piracicaba (linha externa) e limite da área urbana do município (linha interna)

3.2.2.2.2 Processamento das Imagens de Satélite

As imagens foram geometricamente corrigidas. A correção geométrica (georreferenciamento) das bandas termais (banda 6 do Landsat 5 e bandas 6L e 6H do Landsat 7) das imagens foram realizadas no software ERDAS IMAGINE 8.5 e, para tanto, foram coletados 10 pontos de controle a partir de uma imagem já corrigida da Universidade de Maryland. O sistema de projeção e o “datum” utilizados foram UTM e SAD 69 respectivamente, e o interpolador utilizado foi o “nearest neighbor” (vizinho mais próximo) que, segundo CROSTA (1992) e WENG (2002) é melhor por não alterar o valor dos níveis de cinza dos pixels da imagem. Conforme descrito anteriormente, cada banda termal tanto do Landsat 5 quanto do Landsat 7, é representada através de uma imagem composta por uma matriz de pixels em 256 tons de cinza. Cada um dos pixels que compõem a imagem tem um número digital (ou DN) associado, número esse que corresponde à tonalidade de cinza através do qual é representado e à característica da região. Assim, para encontrar a faixa intermediária de níveis de cinza (dos DN's) de cada imagem, foi feito o histograma da imagem. Entre as diferentes representações

matemáticas para os dados presentes nas imagens de sensoriamento remoto o histograma merece um destaque particular. Essa ferramenta é um instrumento bastante útil para entender o comportamento estatístico dos dados e para determinar o melhor procedimento de interpretação (CAMARA e MEDEIROS, 1996).

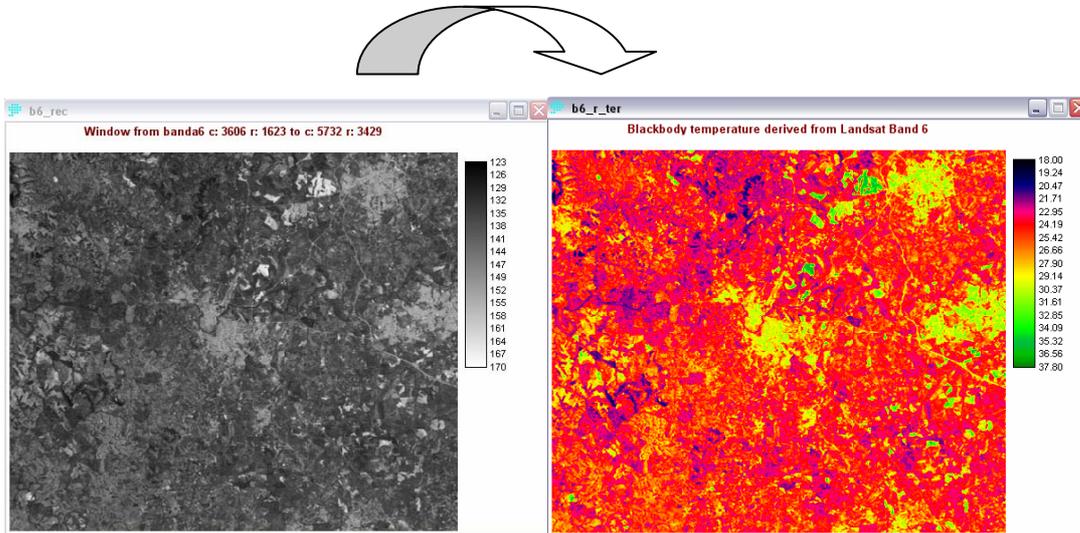
Para conseguir associar o DN ao seu respectivo pixel, as imagens foram transformadas para o formato ASCII.

3.2.2.2.3 Determinação da Temperatura Aparente de Superfície (LST)

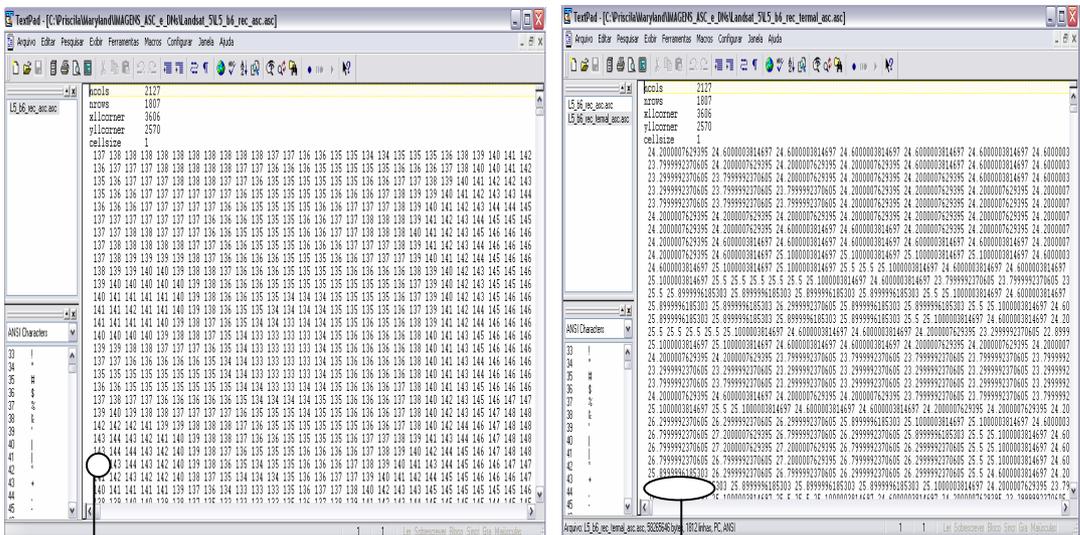
Para associar uma temperatura, em graus Celsius, a cada pixel da banda termal dos dois satélites, foram utilizados dois métodos. O primeiro deles foi a utilização do algoritmo de transformação dos níveis de cinza para graus Celsius do software IDRISI 3.2. As três bandas termais (uma do Landsat 5 e duas do Landsat 7) foram transformadas em graus Celsius pelo IDRISI (indicação 1 do esquema da Figura 3.11).

As seis imagens (três transformadas em graus Celsius e três com o valor original dos pixels, em nível de cinza) foram exportadas no formato ASCII (passagem 2 do esquema da Figura 3.11). Assim, houve a possibilidade de relacionar, pela posição do pixel (coluna e linha), cada valor de nível de cinza à cada grau Celsius que o software atribuiu à cada pixel. Fez-se, então, a primeira tabela de relação DN - X °C (tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 no item resultados).

IDRISI 3.2 (1)



(2)



DN ou NC

T°C

Figura 3.11 – Demonstração visual da metodologia do trabalho. Imagem da banda termal (em níveis de cinza) transformada em graus Celsius pelo IDRISI (colorida acima) (passagem 1) e as imagens transformadas em ASCII (abaixo) (passagem 2)

O segundo método para extração da LST seguiu os procedimentos adotados no modelo desenvolvido por MALARET et al (1985). Segundo Atlas Ambiental (2000) e TARIFA e ARMANI (2001) embora o modelo de MALARET et al (1985) tenha sido desenvolvido para uso da banda termal do satélite Landsat 5, sua aplicação com as bandas termais gerada pelo Landsat 7 mostrou-se viável, tendo em vista que as características básicas de registro de ambas não apresentaram mudanças significativas, mas sim a evolução dos sensores a bordo. Assim, pode-se aplicar a metodologia de MALARET et al (1985) para as imagens Landsat 7.

De acordo com MALARET et al. (1985) a obtenção da temperatura da superfície é feita através da conversão do DN de cada pixel da imagem da banda termal em temperatura aparente, com o uso do seguinte modelo de regressão quadrática:

$$T = 209.831 + 0.834 \text{ DN} - 0.00133 \text{ DN}^2$$

Onde:

T = temperatura aparente em Kelvin;

DN = digital number ou número digital do pixel

As temperaturas resultantes foram convertidas para °C (graus Celsius). Cabe ressaltar que no presente artigo não houve correção de emissividade. Em seguida, associou-se cada DN das imagens termais Landsat 5 e Landsat 7 a uma temperatura em graus Celsius que o IDRISI forneceu e, a uma segunda temperatura mensurada pelo modelo de MALARET et al (1985). Caso os resultados se correlacionassem de forma positiva, seria possível, então, validar o algoritmo para as imagens Landsat 7.

Para a análise estatística, consideraram-se as temperaturas aparentes de superfície calculadas pelo modelo matemático de MALARET et al (1985) como o controle. Foram feitos gráficos de regressões lineares simples a fim de verificar como a temperatura controle (do modelo de MALARET et al, 1985) se correlacionava com a temperatura em observação (as temperaturas fornecidas pelo IDRISI 3.2).

Na análise de regressão observou-se a reta do método controle (se cortava o plano cartesiano a 45°) e a reta de tendência da variável Y – temperatura aparente da superfície fornecida pelo IDRISI 3.2 - (aproximando-se, ou não, dos 45° da reta do controle). Foi observado

o coeficiente R^2 que determinou a variação dos dados analisados em relação aos dados de controle.

3.2.3 Resultados

Através do “histogram display” do IDRISI pode-se verificar qual intervalo de nível de cinza em que cada uma das imagens se situa. Para as imagens utilizadas, os DN`s (números digitais) dos pixels da área que corresponde ao município de Piracicaba – São Paulo situam-se no intervalo compreendido pelos números 123 a 170 (do Landsat 5) (Figura 3.12); 116 a 193 (da banda de baixo ganho do Landsat 7) (Figura 3.13) e, 123 a 255 (da banda de alto ganho do Landsat 7) (Figura 3.14). Tais números integram a escala cromática de 256 tons de cinza (para as imagens de 8 bits, como as geradas pelo Landsat), sendo 0 associado a cor preta e o 255 a cor branca.

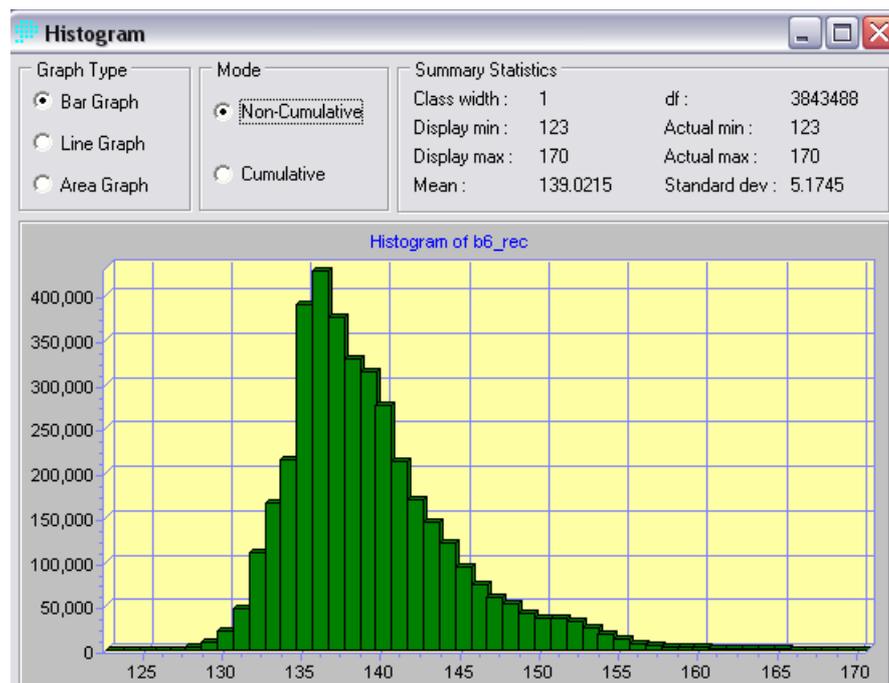


Figura 3.12 – Histograma da banda 6 da imagem Landsat 5. Eixo x = valor de nível de cinza (ou DN) e eixo y = quantidade de “pixels”

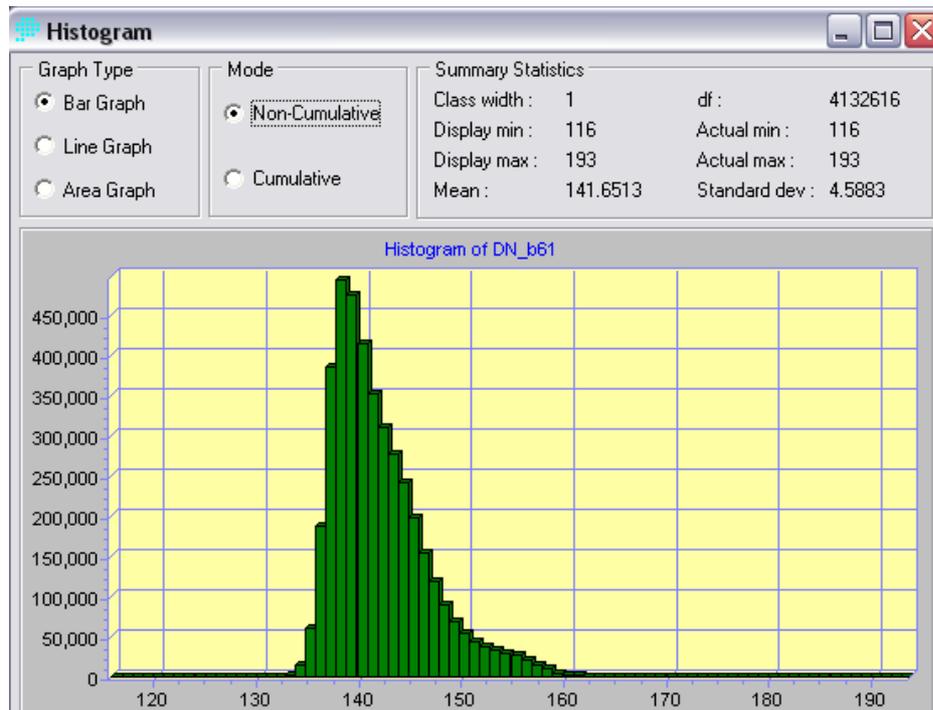


Figura 3.13 – Histograma da banda termal de baixo ganho da imagem Landsat 7. Eixo x = valor de nível de cinza (ou DN) e eixo y = quantidade de “pixels”

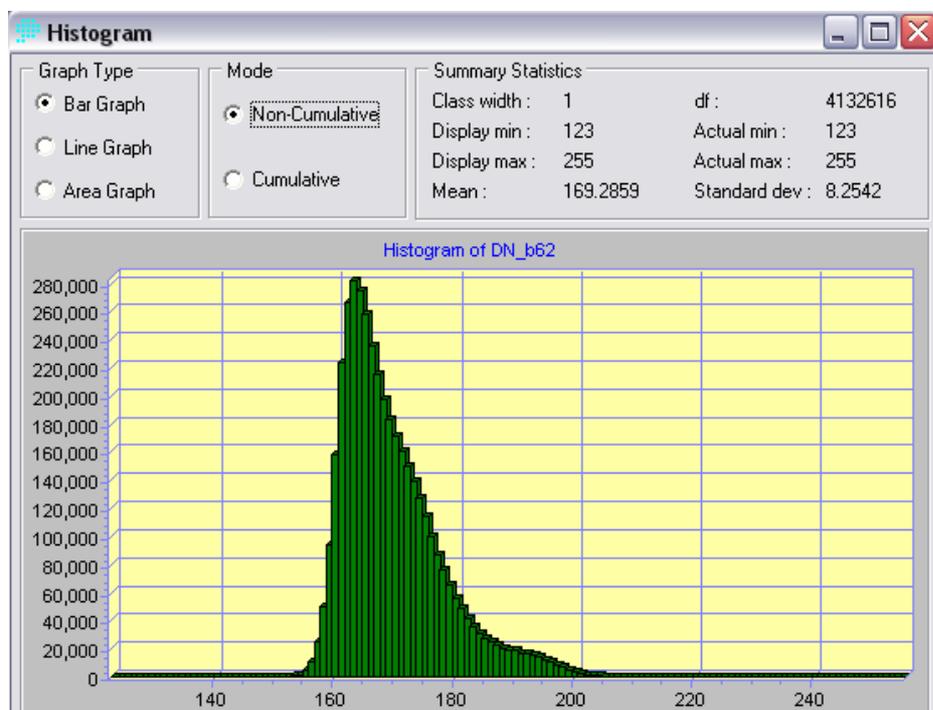


Figura 3.14 – Histograma da banda termal de alto ganho da imagem Landsat 7. Eixo x = valor de nível de cinza (ou DN) e eixo y = quantidade de “pixels”

O resultado das temperaturas, tanto das encontradas pelo IDRISI quanto das calculadas pelo modelo de MALARET et al (1985) foram associadas a um número digital. A tabela 3.2 apresenta os resultados encontrados na banda termal do Landsat 5, a tabela 3.3 os resultados encontrados na banda termal de baixo ganho do Landsat 7 e, por fim, a tabela 3.4 apresenta os resultados da banda termal de alto ganho do Landsat 7.

Tabela 3.2 – Resultados das temperaturas na banda termal do Landsat 5

(continua)		
DN	T°C- Modelo de Malaret et al (1985)	T°C-IDRISI
123	19.16143	18
124	19.66692	18.39999962
125	20.16975	18.89999962
126	20.66992	19.29999924
127	21.16743	19.79999924
128	21.66228	20.20000076
129	22.15447	20.70000076
130	22.644	21.10000038
131	23.13087	21.60000038
132	23.61508	22
133	24.09663	22.39999962
134	24.57552	22.89999962
135	25.05175	23.29999924
136	25.52532	23.79999924
137	25.99623	24.20000076
138	26.46448	24.60000038
139	26.93007	25.10000038
140	27.393	25.5
141	27.85327	25.89999962
142	28.31088	26.29999924
143	28.76583	26.79999924
144	29.21812	27.20000076
145	29.66775	27.60000038
146	30.11472	28
147	30.55903	28.5
148	31.00068	28.89999962
149	31.43967	29.29999924
150	31.876	29.70000076
151	32.30967	30.10000038
152	32.74068	30.5
153	33.16903	30.89999962

Tabela 3.2 – Resultados na banda termal do Landsat 5

(conclusão)		
DN	T°C- Modelo de Malaret et al (1985)	T°C-IDRISI
154	33.59472	31.39999962
155	34.01775	31.79999924
157	34.85583	32.59999847
158	35.27088	33
159	35.68327	33.40000153
160	36.093	33.79999924
161	36.50007	34.20000076
162	36.90448	34.59999847
163	37.30623	35
164	37.70532	35.40000153
165	38.10175	35.79999924
166	38.49552	36.20000076
167	38.88663	36.59999847
168	39.27508	37
169	39.66087	37.40000153
170	40.044	37.79999924

Tabela 3.3- Resultados das temperaturas da banda termal de baixo ganho do satélite Landsat 7.

(continua)		
DN	T°C – Modelo de MALARET et al. (1985)	T°C IDRISI
116	15.54852	14.9
122	18.65328	17.5
123	19.16143	18
125	20.16975	18.89999962
126	20.66992	19.29999924
127	21.16743	19.79999924
128	21.66228	20.20000076
129	22.15447	20.70000076
130	22.644	21.10000038
131	23.13087	21.60000038
132	23.61508	22
133	24.09663	22.39999962
134	24.57552	22.89999962
135	25.05175	23.29999924
136	25.52532	23.79999924
137	25.99623	24.20000076
138	26.46448	24.60000038
139	26.93007	25.10000038
140	27.393	25.5

Tabela 3.3- Resultados das temperaturas da banda termal de baixo ganho do satélite Landsat 7.
(conclusão)

DN	T°C – Modelo de MALARET et al. (1985)	T°C IDRISI
141	27.85327	25.89999962
142	28.31088	26.29999924
143	28.76583	26.79999924
144	29.21812	27.20000076
145	29.66775	27.60000038
146	30.11472	28
147	30.55903	28.5
148	31.00068	28.89999962
149	31.43967	29.29999924
150	31.876	29.70000076
151	32.30967	30.10000038
152	32.74068	30.5
153	33.16903	30.89999962
154	33.59472	31.39999962
155	34.01775	31.79999924
156	34.43812	32.20000076
157	34.85583	32.59999847
158	35.27088	33
159	35.68327	33.40000153
160	36.093	33.79999924
161	36.50007	34.20000076
162	36.90448	34.59999847
163	37.30623	35
164	37.70532	35.40000153
165	38.10175	35.79999924
166	38.49552	36.20000076
167	38.88663	36.59999847
168	39.27508	37
169	39.66087	37.40000153
170	40.044	37.79999924
171	40.42447	38.20000076
172	40.80228	38.5
173	41.17743	38.90000153
175	41.91975	39.70000076
176	42.28692	40.09999847
177	42.65143	40.5
182	44.43408	42.40000153
186	45.81232	43.90000153
193	48.12183	46.5

Tabela 3.4 – Resultados das temperaturas da banda termal de alto ganho do satélite Landsat 7.

(continua)

DN	T°C – Modelo de MALARET et al (1985)	T°C IDRISI
123	19.16143	18
134	24.57552	22.89999962
135	25.05175	23.29999924
138	26.46448	24.60000038
139	26.93007	25.10000038
141	27.85327	25.89999962
143	28.76583	26.79999924
144	29.21812	27.20000076
145	29.66775	27.60000038
146	30.11472	28
147	30.55903	28.5
148	31.00068	28.89999962
149	31.43967	29.29999924
150	31.876	29.70000076
151	32.30967	30.10000038
152	32.74068	30.5
153	33.16903	30.89999962
154	33.59472	31.39999962
155	34.01775	31.79999924
156	34.43812	32.20000076
157	34.85583	32.59999847
158	35.27088	33
159	35.68327	33.40000153
160	36.093	33.79999922
161	36.50007	34.20000076
162	36.90448	34.59999847
163	37.30623	35
164	37.70532	35.40000153
165	38.10175	35.79999922
166	38.49552	36.20000076
167	38.88663	36.59999847
168	39.27508	37
169	39.66087	37.40000153
170	40.044	37.79999924
171	40.42447	38.20000076
172	40.80228	38.5
173	41.17743	38.90000153
174	41.54992	39.29999922
175	41.91975	39.70000076

Tabela 3.4 – Resultados das temperaturas da a banda termal de alto ganho do satélite Landsat 7.

(continuação)		
DN	T°C – Modelo de MALARET et al (1985)	T°C IDRISI
176	42.28692	40.09999847
177	42.65143	40.5
178	43.01328	40.90000153
179	43.37247	41.20000076
180	43.729	41.59999847
181	44.08287	42
182	44.43408	42.40000153
183	44.78263	42.79999924
184	45.12852	43.09999847
185	45.47175	43.5
186	45.81232	43.90000153
187	46.15023	44.29999924
188	46.48548	44.59999847
189	46.81807	45
190	47.148	45.40000153
191	47.47527	45.79999924
192	47.79988	46.09999847
193	48.12183	46.5
194	48.44112	46.90000153
195	48.75775	47.20000076
196	49.07172	47.59999847
197	49.38303	48
198	49.69168	48.29999924
199	49.99767	48.70000076
200	50.301	49.09999847
201	50.60167	49.40000153
202	50.89968	49.79999924
203	51.19503	50.09999847
204	51.48772	50.5
205	51.77775	50.90000153
206	52.06512	51.20000076
207	52.34983	51.59999847
208	52.63188	51.90000153
209	52.91127	52.29999924
210	53.188	52.59999847
211	53.46207	53
212	53.73348	53.40000153
213	54.00223	53.70000076
214	54.26832	54.09999847

Tabela 3.4 – Resultados das temperaturas da a banda termal de alto ganho do satélite Landsat 7.

(conclusão)		
DN	T°C – Modelo de MALARET et al (1985)	T°C IDRISI
215	54.53175	54.40000153
216	54.79252	54.79999924
217	55.05063	55.09999847
218	55.30608	55.5
219	55.55887	55.79999924
220	55.809	56.20000076
221	56.05647	56.5
222	56.30128	56.79999924
223	56.54343	57.20000076
226	57.25392	58.20000076
228	57.71428	58.90000153
229	57.94047	59.20000076
232	58.60308	60.29999924
241	60.44727	63.29999924
242	60.63888	63.59999847
250	62.076	66.19999692
255	62.88775	68

Ao relacionar as temperaturas extraídas do modelo de MALARET et al. (1985) com as temperaturas encontradas no software IDRISI, tanto da imagem do Landsat 5 quanto das imagens Landsat 7, foi possível fazer as regressões lineares simples e as correlações estatísticas.

Verificou-se que as retas da temperatura controle (do modelo de MALARET et al. 1985) se aproximam de 45°, indicando a validade do método. O coeficiente de determinação (R^2), tanto do Landsat 5 quanto das duas bandas termais do Landsat 7 foi muito próximo de 1 (100%) (R^2 encontrado nos gráficos foi de 0.99 ou 99%), significando que as variações dos dados analisados acompanham as variações dos dados de controle. A figura 3.15, apresenta a relação dos valores para a imagem da banda termal do Landsat 5, figura 3.16 para a banda termal de baixo ganho do Landsat 7 e a figura 3.17 para a banda termal de alto ganho do Landsat 7.

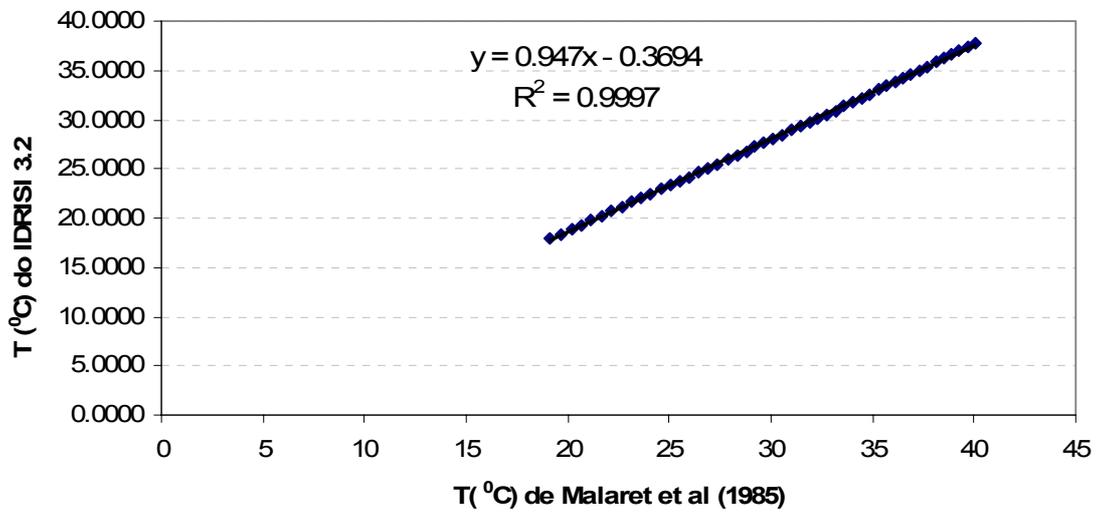


Figura 3.15 – Relação dos valores encontrados para a banda termal da imagem Landsat 5

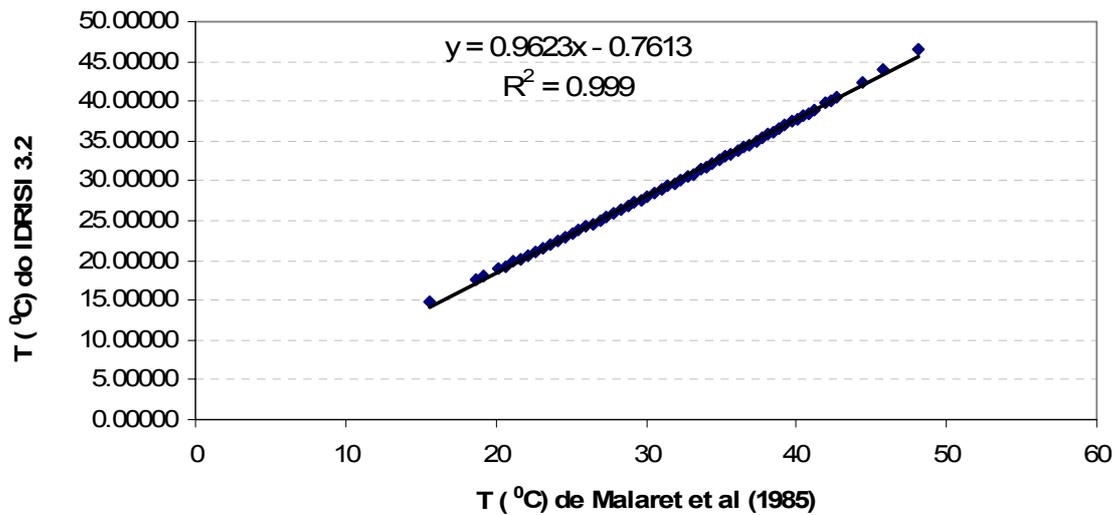


Figura 3.16 – Relação dos valores encontrados para a banda termal de baixo ganho da imagem Landsat 7

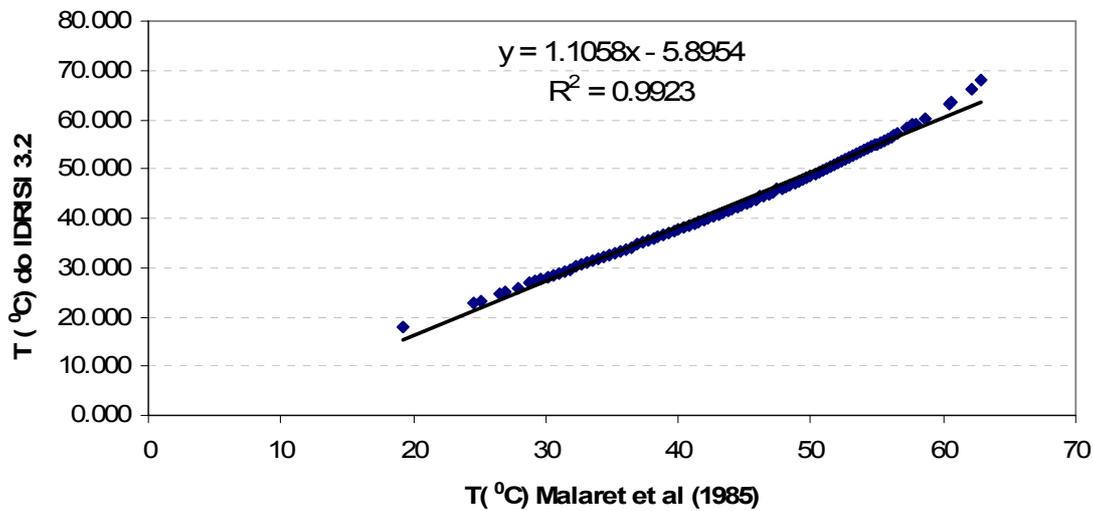


Figura 3.17 – Relação dos valores encontrados para a banda termal de alto ganho da imagem Landsat 7

3.2.4 Discussão

IWAI (2003) também destaca que a operação dos histogramas é importante na medida em que se consegue localizar em qual intervalo os pixels estão situados. No caso das imagens termais do presente trabalho pode-se perceber que os pixels da imagem Landsat 5 e da imagem de baixo ganho Landsat 7 estão bem próximos. A imagem de alto ganho Landsat 7 tem os pixels deslocados para direita e isso significa dizer que estão mais próximos do valor 255, logo, as temperaturas encontradas nessa imagem serão mais elevadas que nas outras. Através dos histogramas, segundo WENG et al. (2004a) pode-se ter uma noção da variação de temperatura que a imagem, ou que alguma área em específico, tem.

O Landsat 5 variou de 123 a 150, o que significa dizer que a temperatura aparente da superfície nos alvos da imagem variaram de 18°C a 38°C. O Landsat 7, na banda de baixo ganho variou de 116 a 193 ou seja, a temperatura aparente da superfície dos alvos variou de 14.9°C a 46.5°C. Já a banda de alto ganho variou de 123 a 255 significando, em temperatura aparente da superfície dos alvos, uma variação da ordem de 18°C a 68°C.

Assim, imagens do Landsat 7 tiveram variações maiores de temperatura do que as do Landsat 5 e isso deve, principalmente à resolução do satélite. Por ter uma resolução melhor, capta mais informações e, portanto, maior a variação dos valores (WENG, 2003). Vale ressaltar que os dados encontrados nas duas bandas do satélite Landsat 7 (banda de alto e de baixo ganho) são diferentes. Existem autores que sugerem a junção e a média das duas bandas, mas há a

necessidade de mais estudos para verificar se tal metodologia é viável. Quando se utiliza imagens do satélite Landsat 7 (ETM⁺), a escolha de qual banda usar tem sido feita dependendo da distribuição espacial dos pixels e das respostas oferecidas pelos histogramas. Caso uma das bandas varie com valores de DN pouco reais, a escolha é feita pela outra banda, e, caso nenhuma das duas apresente valores pouco reais, não há diferença na utilização dessa. (ATLAS AMBIENTAL, 2000).

Relacionar histogramas de diferentes épocas pode ser uma alternativa para a verificação da evolução dos dados termais, no entanto, deve-se tomar cuidado, pois mudam-se características da paisagem e dos sensores (QUATTROCHI e GOEL, 1995). Neste caso, deve-se verificar, com cuidado, todas as calibrações dos satélites e as variações de uso e cobertura do solo.

As temperaturas encontradas pela regressão quadrática do modelo de MALARET et al (1985) foram muito próximas às estimativas do software IDRISI 3.2. Esse comportamento foi reafirmado após a análise gráfica, onde foi criada uma linha de tendência nos gráficos do método analisado. Verificou-se então que, como a reta aproxima-se a 45°, para cada valor de X, Y varia na mesma direção e proporção.

A relação linear entre as duas estimativas explicou em quase sua totalidade a variação nos dados ($R^2=0,99$) e a inclinação da reta próxima ao valor 1 indica que aumentos no valor de uma estimativa levam a um aumento proporcional na outra estimativa. Já que a variação dos dados encontrados (IDRISI 3.2) acompanham a variação dos dados de controle (MALARET et al, 1985) é possível, então, validar o algoritmo de transformação termal do IDRISI para as imagens Landsat 7.

De acordo com os resultados encontrados no presente artigo, não há diferença estatística em usar a banda de alto ou de baixo ganho para a conversão dos dados das imagens do infravermelho termal em graus Celsius (pelo modelo de MALARET et al (1985) ou pelo software IDRISI 3.2). Entretanto, quando se pontua a temperatura de um único local, haverá diferença em alguns graus Celsius, conforme observado nos histogramas.

Aplicando a metodologia discutida nesse artigo, alguns fatores devem ser levados em conta, como por exemplo, o fato do Landsat 7 ter duas bandas termais de ganhos diferentes, com temperaturas resultantes diferentes. Há, portanto, a necessidade de se escolher a banda mais adequada. Finalmente, vale lembrar que os valores fornecidos pelos satélites e pelas conversões em temperaturas aparente de superfície não são valores exatos de temperatura do ar e, em

hipótese alguma devem ser usados como tal ou, substituídos por valores de estações meteorológicas. Os valores fornecidos pelo infravermelho termal são qualitativos pois oferecem o desenho termal dos alvos da superfície da área em estudo.

3.3 Conclusões

O sensoriamento remoto termal é uma ferramenta valiosa nos estudos de comportamentos térmicos. A integração dessa técnica com modelos matemáticos e softwares que podem converter os dados obtidos através de imagens do infravermelho termal em temperaturas é de extrema importância, pois assim, há a possibilidade de se fazer o desenho termal das superfícies.

A partir do presente trabalho foi possível validar o algoritmo de transformação termal para o uso nas duas bandas termais Landsat 7 do software IDRISI 3.2 elaborado, a princípio, para imagens Landsat 5, e, esse fator, pode vir a facilitar estudos que necessitam de imagens termais de resolução um pouco mais refinada. Cabe ressaltar que o que se buscou no presente trabalho foi uma metodologia rápida e simples de transformar os “Digital Numbers” (DN) em temperatura (°C).

REFERÊNCIAS

- ABDON, M.M. de. **Um modelo de cartas de pesca para tunídeos no sudeste e sul do Brasil utilizando dados oceanográficos do sensoriamento remoto.** 1982. 125 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 1982.
- AIRES, C.B.; KIRCHHOFF, V.W.J.H. Transport of carbon monoxide from biomass burning source to non-source regions. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.19, n.1, p.61-74, jan./apr. 2001.
- ANJOS, A.M.G.; LOPES, P. Identificação das ilhas de calor em Manaus através do canal termal do sensor Thematic Mapper - Landsat 5. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002. Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002. p.327-333.
- ARTIS, D.A.; CARNAHAN, W.H. Survey of emissivity variability in thermograph of urban areas. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.12, n.2, p.313-329,1982.
- BALLING, R.C.; BRAZELL, S.W. High resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.54, s.n, p.1289-1293, 1988.
- BAPTISTA, G. Ilhas urbanas de calor. **Revista Scientific American (Brasil)**, Rio de Janeiro, ano 1, n.8, p.54-59, 2003.
- BARBIN, H.S. **Histórico da evolução do uso do solo e estudo dos espaços livres públicos de uma região do Município de Piracicaba, SP.** 2003. 196p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- BARSI, J.A; SCHOTT, J.R.; PALLUCONI, F.D.; HELDER, D.L.; HOOK, S.J.; MARKHAM, B.L.; CHANDER, G. ; O'DONNELL, E.M. Landsat TM and ETM⁺ Thermal Band Calibration. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.29, n.2, p.141-153, 2003.
- BARRETO, A.G.O.P.; SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. **Atlas Rural de Piracicaba.** Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF). 2006. 75p.
Disponível em: http://www.ipef.br/publicacoes/atlasrural/Atlas_Rural_de_Piracicaba_2006.pdf:
Acesso em: 06 fev.2006.
- BARTHOLO, J.; PONGRACZ, R.; DEZSO, Z.S. In: Application of satellite information to urban climatology. **American Meteorological Society**, Boston, M.A.. 2003. 1 CD- ROM.
- BARTON, I. J. Satellite-derived sea surface temperatures:current status. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.15, s.n, p.8777-8790, May1995.

BECKER, F. Angular reflectivity and emissivity of natural media in the thermal infrared bands. In: **Colloq on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing**, 1981. Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon, p 57-72, 1981.

BIAS, E. S.; BAPTISTA, G.M.M.; LOMBARDO, M.A. Análise do fenômeno de Ilhas de Calor urbana por meio de combinação de dados Landsat e Ikonos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003. Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte, 2003. p.1741-1748.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos. Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, INPE: março, 1996. 117p.

CARNAHAN, W.H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.33, n.1, p.65-71, 1990.

CASELLES, V.; SOBRINO, J.A. The determination of infrared emissivities of terrestrial surface. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.70, s.n, p.1329-1337, 1989.

CASELLES, V.; SOBRINO, J.A.; BECKER, F. Determination of effective emissivity and temperature under vertical observation of a citrus orchard. Application to frost nowcasting. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.9, s.n, p.715-727, 1988.

CASELLES, V.; SOBRINO, J.A.; COLL, C. On the use of satellite thermal data for determining evapotranspiration in partially vegetated areas. **International Journal of Remote Sensing** , Bethesda, v.13, s.n, p.2669-2682, 1992a.

_____. A physical model for interpreting the land surface temperature obtained by remote sensors over incomplete canopies. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.39, n.3, p.203-211, 1992b.

CASTAGNÉ, N.; LE BORGNE, P.; LE VOURCH, J.; ORLY, J.P. Operational measurement of sea surface temperatures at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.7, s.n, p.953-984, 1986.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, New Jersey, v.41, n.11, p.2674-2677, nov., 2003.

COLTRI, P.P.; VELASCO, G.D.N.; BARBIN, H.S.; POLIZEL, J.L. Arborização viária do centro de Piracicaba-SP e temperatura local: levantamento de dados e análises de imagens de satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 9, 2005. Belo Horizonte. **Resumos...** Belo Horizonte; CEMIG/SBAU, 2005. p.9.

CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 1983. 45p.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DASH, P.; GOTTSCHKE, F.M.; OLESEN, F.S.; FISCHER, H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.23, n.13, p.2563-2594, 2002.

DERENNE, M. **Caracterização de um sistema imageador infravermelho termal através de suas resoluções espacial e radiométrica**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2003. 35p.

DUTRA, L. V.; SOUZA, R.C.M.de; MITSUO II, F.A.; MOREIRA, J.C. **Análise automática de Imagens Multiespectrais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 1981.33p.

EPHIPANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto termal para avaliação de produtividade e deficiência hídrica do milho (*Zea mays L.*) na região dos cerrados**. 1982. 93p. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 1982.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. set.1995.

Disponível

http://www.conab.gov.br/download/SIGA/Brasil/Textos%20e%20Manuais/Conceitos_SM.pdf.

Acesso em: 25 jan.2006.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de textos. 2002.90p.

FRANÇA, D.A.; FERREIRA, N.J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, 16-21 abril, Goiânia. **Anais...** Goiânia; INPE, 2005. p.3017-3023.

FRANÇA, G.B.; CRACKNELL, A. P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA - 11 AVHRR data in north-eastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.15, s.n, 1695-1712, 1994.

GALLO, K.P.; McNAB, A.L.; KARL, T.R.; BROWN, J.F.; HOOD, J.J.; TARPLEY, J.D. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.32, n.5, p.899-908, 1993.

GEDZELMAN, S.D.; AUSTIN, S.; CERMAK, R.; STEFANO, N.; PARTRIDGE, S.; QUESENBERRY, S.; ROBISON, D.A. Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.75, n.1-2, p.29-42, 2003.

GOWARD, S.N.; MASEK, J.G.; WILLIAMS, D.L.; IRONS, J.R. **The Landsat 7 Mission: Terrestrial Research for the 21st Century**, 11 July, 2000.

Disponível em http://Idcm.gsfc.nasa.gov/library/Landsat7_TerrResearch_21Century.final.pdf. Acesso: 11 mar. 2006.

GURGEL, H.C. da.; FERREIRA, N.J.; LUIZ, A.J.B. Análise da variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, 21-26 abril, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu; INPE, 2001. p.1617-1624.

HABERACKER, P. **Digital image processing**. Fachhochschule, Munchen, 1984. 1984.138p.

HARRIS, P.M.; VENTURA, S.J. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.61, n.8, p.993-998, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Introdução ao processamento digital de imagens. **Manual Técnico em Geociências**. Rio de Janeiro, n.9, 2001. 92p.

IWAI, O. K. **Mapeamento do uso do solo urbano do município de São Bernardo do Campo, através de imagens de satélite**. 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

KIDDER, S.Q.; WU, H.T. A multispectral study of the St. Louis area under snow-covered conditions using NOAA-7 AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.22, n.2, p.159-172, 1987.

KIMES, D.J. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.13, n.1, p.33-55, 1983.

KOFFLER, N. F. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Piracicaba. CALQ, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1992. 102p.(Apostila)

LE BORGUE, P., LE VOURCH, J.; MARSOUIN, A. Sea surface parameters inferred from meteorological satellite data at CMS. Lannion. New products and projects. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.9, s.n, p.1819-1834, 1988.

LANDSAT TM 5. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. Imagem de satélite. Canal 6. Escala (cm/m) 1: 35.000.

LANDSAT ETM⁺ 7. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. Imagem de satélite. Canais 6L e 6H. Escala (cm/m) 1: 25.000.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.

LU, D.; WENG, Q. Urban Classification Using Full Spectral Information of Landsat ETM⁺ Imagery in Marion County, Indiana. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.71, n.11, p.1275-1284, nov. 2005.

MALARET, E.; BARTOLUCCI, L.A.; LOZANO, D.F.; ANUTA, P.E.; MCGILLEM, C.D. Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data quality analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.51, n.9, p.1407-1416, sept.1985.

MEAILLE, R.; WALD, L. Using geographic information systems and satellite imagery within a numerical simulation of regional urban growth. **International Journal of Geographic Information Systems**, Londres, v.4, s.n, p.445-456, 1990.

MILLARD, J.P.; REGINATO, R.J.; GOETTELMAN, R.C.; IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; LEROY, M.J. Experimental relations between airborne and ground measured wheat canopy temperatures. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 46, s.n, p.221-224, 1980.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION(NASA). Science writer's guide to Terra. Disponível em:http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html Acesso: 11 mar.2006.

NICHOL, J.E. A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapore's high-rise housing estates. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 60, n.10, p.1225-1232, 1994.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1989. 308p.

OLIVEIRA, E. N. **Estimativas de correntes oceânicas superficiais pelo método da máxima correlação cruzada**. 2001. 102p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2001.

PONGRACZ, R.; BARTHOLY,J.; DEZSO Z. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. **Advances in Space Research**, Oxford, June 2005. In press. Disponível em <www.elsevier.com/locate/asr>

PRABHAKARA, C.; DALU, G.; KUNDE, V.G. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13µm window region. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 79, s.n, p.5039-5044, 1974.

PRATA, A.J.; CASELLES, V.; COLL, C.; SOBRINO, J. A; OTTLE, C. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. **Remote Sensing Reviews**, Londres, v.12, n.8, p.175-224, 1995.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente e Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. **Atlas Ambiental do Município de São Paulo**. 2000.

Disponível em: <http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/> . Acesso em: 20 jan.2005

QUATTROCHI, D.A.; GOEL, N.S. Spatial and temporal scaling of thermal remote sensing data. **Remote Sensing Reviews**, Londres, v.12, n.8, p.255-286, 1995.

QUINTANILHA, J. A. Processamento de Imagens digitais. In: **Anais do Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento**. São Paulo: EDUSP, 1990. p.37-52.

ROTH, M.; OKE, T.R.; EMERY, W.J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilisation of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.10, s.n, p.1699-1720, 1989.

SCHLUESSEL, P.; EMERY, W.J.; GRASSL, H.; MAMMENT, T. On the bulk skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.95, n.8, p.13341-13356, 1990.

SILVA FILHO, D.F. da. **Aplicação de videografia aérea multiespectral na avaliação de floresta urbana**. 2004. 88p. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2004.

SNYDER, W.C.; WAN, Z.; ZHANG, Y.; FENG, Y.Z . Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.19, n.14, p.2753-2774, 1998.

SOBRINO, J.A.; CASELLES, V. Thermal infrared radiance model for interpreting the directional radiometric temperature of a vegetative surface. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.33, n.3, p.193-199, 1990.

SUGUMARAN, R.; ZERR, D.; PRATO, T. Improved urban land cover mapping using multitemporal IKONOS images for local government planning. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.28, n.2, p.90-95, 2002.

SUTHERLAND, R.A.; BARTHOLIC, J.F. Significance of interpreting thermal radiation from a terrestrial surface. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.16, n.8, p.759-763, 1977.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S.M. **Remote Sensing: the quantitative approach**. New York: Mc Graw-Hill, 1978.129p.

TARIFA, J.R.; AZEVEDO, T.T. Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. In: **Revista GEO/USP -Coleção Novos Caminhos**. São Paulo: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão. Universidade de São Paulo. Laboratório de Climatologia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, v.4, 2001. 199p.

TARIFA, J.R.; ARMANI, G. Unidades climáticas da Cidade de São Paulo (primeira aproximação). In: **Atlas Ambiental do Município de São Paulo - FASE I**. Secretaria do Verde e Meio Ambiente e Secretaria do Planejamento, Prefeitura do Município de São Paulo, 2001. 190p.

THOMAS, W.; HENDRIX, C.; CONGALTON R.G. A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.69, n.10, p.963-972, 2003.

VAN DER SANDE, C.J.; JONG, S.M.; ROO, A. P.J. A segmentation and classification approach of IKONOS 2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Oxford, v.4, n.3, p.217-229, 2003.

VETTORAZZI, C. A. Sensoriamento Remoto Orbital. Piracicaba: CALQ, Departamento de Engenharia Rural. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1992. 134 p.(**Série didática n.002**).

WATSON, K. Application of thermal modeling in the geological interpretation of IR images. In: Remote Sensing of Environment, 7, 1971. **Proceedings ...** An Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1971, p.2017-2041, 1971.

WENG, Q. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v.64, n.3, p.273-284, 2002.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566, May. 2003.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.89, n.4, p.467-483, 2004a.

WENG, Q.; YANG, S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v.70, n.2, p.145-156, 2004b.

INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA INTENSIDADE DAS ILHAS DE CALOR NO MUNICÍPIO DE PIRACICABA, SP.

Resumo

As áreas das cidades se caracterizam por terem temperaturas mais elevadas quando comparadas com as áreas rurais. Essa anomalia térmica é chamada de ilhas de calor (IC) e esse fenômeno é reconhecidamente importante em estudos de clima urbano. O objetivo do presente trabalho foi, através de técnicas do sensoriamento remoto, identificar e analisar as ilhas de calor do Município de Piracicaba, verificando sua sazonalidade, sua intensidade, e sua morfologia. Para tanto foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 das quatro estações do ano (verão, outono, inverno e primavera). Após o processamento das imagens digitais verificou-se que as ilhas de calor mais intensas do verão são representadas por locais com excesso de material de construção civil e pouca ou nenhuma área verde. A diferença entre a área urbana e a área rural da cidade ultrapassou 16°C no verão. O Parque da Rua do Porto é uma Ilha de Frescor e exerce um “efeito oásis” no centro e nos bairros vizinhos. O perfil das ilhas de calor do Município de Piracicaba não segue aquele delimitado por OKE (1974). Além disso, verificou-se que as ilhas de calor variam sazonal e espacialmente. A intensidade das ilhas de calor, ao longo das estações do ano, está intimamente relacionada com a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar. As ilhas de calor da época da entressafra são, em média, 3,5°C mais intensas que as da época da safra. Por fim, pode-se afirmar que o uso e a cobertura do solo rural e urbano é um dos grandes agentes modificadores do clima local.

Palavras chave: clima urbano; ilhas de calor, sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar; sensoriamento remoto; uso e cobertura do solo.

Abstract

Urban areas present higher temperatures than rural areas. This thermal effect is called “heat-island phenomenon” and has great importance on urban climate studies. In the present work, we identified and analyzed the heat-islands from Piracicaba, São Paulo using remote sensing techniques. The heat-islands were analyzed according to its seasonality, intensity and morphology using images from Landsat 7 satellite taken during the four seasons: summer, fall, winter and spring. After the processing step, we could observe that the most intense summer heat-islands were represented by regions with higher amounts of constructed areas and almost any green area. In fact, during the summer the difference between the urban and rural areas was greater than 10°C. The Rua do Porto park was identified as a fresh-island and showed the “oasis effect” to the Center and neighbouring regions. Heat-island varied according to the season and space and its intensity is intimately related to the sugar-cane seasonality. During the intercrop period the heat-islands were 3.5°C more intense than during the crop period. In conclusion land cover and land use affect the local climate.

Key words: agricultural seasonality; heat island; land use and land cover; remote sensing; urban climate.

4.1 Introdução

A rápida expansão das cidades tem modificado o espaço geográfico, sobretudo quando se trata de qualidade ambiental. Uma dessas modificações é a alteração do clima local. A atividade humana, o grande número de veículos, as indústrias, os prédios, o asfalto das ruas e a diminuição das áreas verdes criam mudanças profundas na atmosfera e clima locais. Nesse sentido o estudo do clima urbano é extremamente complexo, principalmente pela heterogeneidade dos materiais e da geometria que compõem o sítio urbano. O clima urbano, na atualidade, é considerado um componente importante de qualidade de vida.

Uma das mais importantes modificações causadas pela urbanização é a alteração das características térmicas da superfície pelo excesso de edificações e materiais de construção quando comparado às áreas verdes. Tais materiais aumentam a absorção de energia bem como impermeabilizam a superfície. Além disso, o aumento da rugosidade urbana altera padrões de circulação do ar, e as atividades antrópicas, por sua vez, alteram a atmosfera urbana pela adição de calor e material particulado.

Todas essas modificações culminam em um fenômeno peculiar: ilhas de calor. O termo ilha de calor (IC) se refere a uma anomalia térmica onde a temperatura de superfície do ar urbano se caracteriza por ser superior a da vizinhança rural. Algumas cidades têm a temperatura do ar urbano de até 10°C maior que das áreas rurais. Cabe ressaltar que, como a cidade é bastante heterogênea, existem alguns locais dentro da própria área urbana que apresentam temperaturas mais elevada ainda, formando, portanto, pequenas ilhas de calor dentro de uma ilha maior correspondente à cidade inteira.

Muitas são as variáveis que afetam as ilhas de calor e diversos trabalhos tentam explicar a relação entre elas, mas, já é sabido que as áreas verdes (no presente trabalho entende-se áreas verdes como todo e qualquer vegetal que esteja na cidade ou a seu redor: grama, pasto, árvores, arbustos, cana-de-açúcar, remanescente florestal, vegetação rasteira, dentre outros; independente de sua forma, tamanho ou função) exercem enorme importância na temperatura local, podendo amenizar a intensidade das ilhas de calor.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi, através de técnicas do sensoriamento remoto, identificar e analisar as ilhas de calor do Município de Piracicaba, verificando sua sazonalidade, sua intensidade e sua morfologia. O trabalho está dividido em dois itens, desenvolvimento e

conclusões finais. O item desenvolvimento subdivide-se em revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Revisão Bibliográfica

4.2.1.1 Clima urbano

No final do século XX, a população mundial tornou-se predominantemente urbana (LOMBARDO, 1985; CASTRO, 2000; MENDONÇA, 2003). No caso brasileiro a passagem das áreas rurais para urbanas aconteceu em meados da década de 60 e o processo de urbanização apresentou considerável aceleração nas décadas seguintes (COSTA, 2004). Caracterizado como urbanização corporativa (MENDONÇA, 2003), o processo brasileiro gerou cidades com expressiva degradação das condições de vida e do ambiente urbano (BRANDÃO, 1999). A queda da qualidade da atmosfera urbana e os problemas humanos a ela relacionados apresentaram intensificação nas últimas décadas (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Nesse contexto, os problemas relacionados à climatologia das cidades vêm ganhando muita importância (NETO, 2000). O clima constitui-se numa das dimensões do ambiente urbano e seu estudo tem oferecido importantes contribuições ao equacionamento da questão ambiental das cidades (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). O clima urbano é derivado das alterações da paisagem natural e da sua substituição por um ambiente construído, palco de intensas atividades humanas (TAVARES, 1977).

O clima de uma cidade é formado pela interação de seu clima local com a sua urbanização (MONTEIRO, 1976; TARIFA e AZEVEDO, 2001). No âmbito climático, o Sistema Clima Urbano (SCU) está inserido em um sistema maior, o sistema dos climas da Terra e do clima global, e é composto por diversos microclimas formados pela diversidade do uso e ocupação do solo das cidades (BRANDÃO, 1999; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). É nesse sentido que MONTEIRO (2003) afirma que o clima urbano é um mesoclima inserido num contexto macroclimático e composto por diversos microclimas. Além disso, o clima urbano abrange aspectos de urbanização como crescimento e cultura da população, economia e expansão das cidades, materiais das construções, verticalização do solo, conforto e bem estar do cidadão, dentre outros (LOMBARDO, 1985; PEREZ et al., 2001; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003; SHIMODA, 2003).

Nesse sentido, muitas variáveis afetam o clima de uma cidade (LOMBARDO, 1985; PEREZ et al., 2001). Diversos trabalhos tentam explicar as relações entre estas variáveis com os aspectos da meteorologia local e regional. Uma das teorias aceitas atualmente é a Teoria do Sistema Clima Urbano (SCU), proposta por MONTEIRO (1976). Assim como toda a organização complexa, o clima de uma cidade admite uma visão sistêmica, com vários graus de hierarquia funcional e diferentes níveis de resolução (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Embora esse sistema possa ser decomposto em diversos elementos, as íntimas associações entre tais níveis permitem vincular os elementos em conjuntos de maior afinidade e interação, apesar de não poder dissociá-los completamente uns dos outros (MONTEIRO, 1976; BRANDÃO, 1999; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). O sistema clima urbano (SCU) de MONTEIRO (1976) pode ser, basicamente, dividido em três subsistemas: o termodinâmico, o físico-químico e o hidrometeorológico.

O primeiro sistema, o termodinâmico, enfatiza estudos de ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas, conforto e desconforto térmico da população, inversão térmica. Já o segundo, o subsistema físico-químico, é voltado à análise dinâmica do ar e suas interações com a cidade, destacando a poluição do ar, as chuvas ácidas, a relação entre as estruturas urbanas e os ventos. Por fim, o sistema hidrometeorológico é relacionado ao estudo das precipitações urbanas e seus impactos, tais como os processos de inundação nas cidades. A tabela 4.1 apresenta as características básicas de cada subsistema apontados na teoria de MONTEIRO (1976). Vale ressaltar que MONTEIRO nomeia o homem (habitante da cidade) como “operador” e a cidade como “operando”.

Tabela 4.1 – Principais componentes da Teoria do SCU de Monteiro (1976)¹⁰

(continua)			
SUBSISTEMAS			
CARACTERIZAÇÃO	I Termodinâmico	II Físico-químico	III Hidrometeorológico
Canais Fonte	Conforto térmico Atmosfera radiação, Circulação horizontal	Qualidade do ar Atividade urbana, veículos auto motores, indústrias	Impacto meteorológico Atmosfera: estados especiais (desvios rítmicos)

¹⁰ Adaptado de MONTEIRO e MENDONÇA (2003)

Tabela 4.1 – Principais componentes da Teoria do SCU de Monteiro (1976)¹¹

CARACTERIZAÇÃO	Subsistemas		
	I Termodinâmico	II Físico-químico	III Hidrometeorológico
Trânsito no sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operador ao operando	Do operador ao operando
Mecanismos de ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação núcleo – ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Continuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódio (eventual)
Observação	Meteorológica-espacial	Sanitária, meteorológica-espacial	Meteorológica, hidrológica
Correlações disciplinares e tecnológicas	Bioclimatologia, arquitetura, urbanismo	Engenharia sanitária	Engenharia sanitária e infraestrutura urbana
Produtos	“ilhas de calor”, ventilação, aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos Diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários, doenças humanas.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle do uso do solo, tecnologia de conforto habitacional.	Vigilância e controle dos agentes da poluição	Aperfeiçoamento da infra-estrutura urbana, regularização fluvial, uso do solo.
Responsabilidade	Natureza e homem	Homem	Natureza

Os dois primeiros subsistemas são os mais documentados, pois se manifestam com muita frequência nas grandes cidades de todo o mundo (TARIFA, 1994; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Já o terceiro é o menos explorado, provavelmente por ser fortemente ligado a países tropicais (MENDONÇA, 1995). No presente trabalho o enfoque será no subsistema termodinâmico. O diagrama do subsistema termodinâmico, apresentado por MONTEIRO (1976), é dividido, basicamente, em 5 regiões, insumo, transformação, produção, percepção e ação (Figuras 4.1 e 4.2). O autor chama de “insumo” as forças responsáveis pela criação do subsistema e elas se dividem e interagem.

¹¹ Adaptado de MONTEIRO e MENDONÇA (2003)

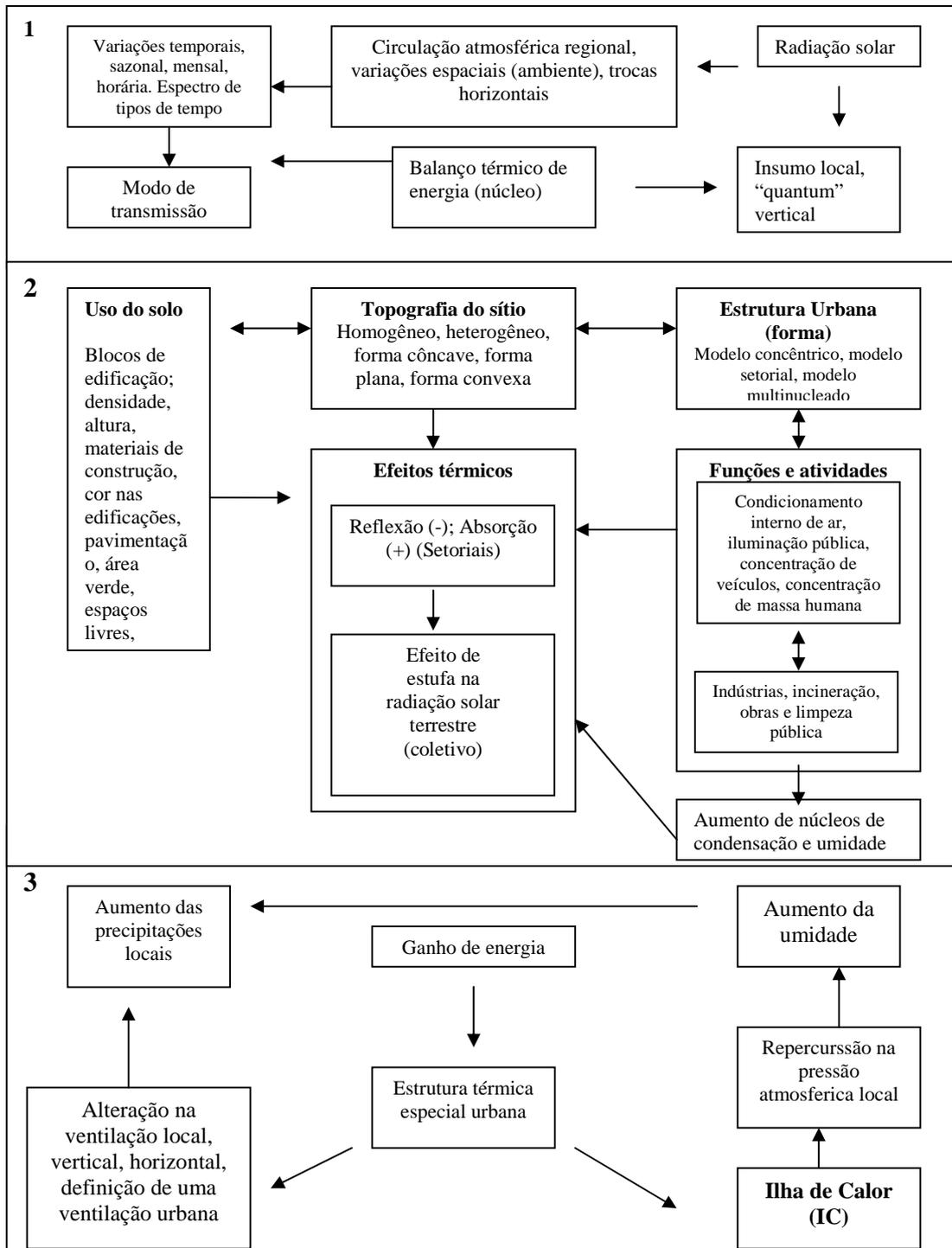


Figura 4.1- Diagrama do subsistema Termodinâmico da teoria SCU de MONTEIRO (1976). 1 = região insumo; 2 = região transformação, 3 = região produção¹²

¹² Adaptado de MONTEIRO (1976).

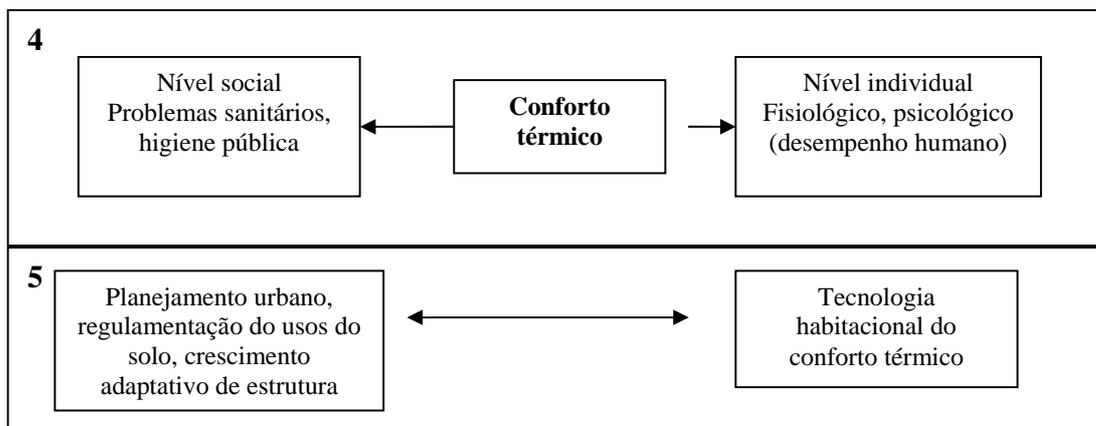


Figura 4.2 – Diagrama do subsistema Termodinâmico da teoria SCU de MONTEIRO (1976). 4 = região percepção e em 5 = região ação¹³

Assim, nota-se que as variações meteorológicas estão intimamente ligadas com os insumos humanos e todos esses elementos interligados são responsáveis pela variação e pela estabilidade do subsistema (TARIFA, 1994; MENDONÇA e MONTEIRO, 2003). O item “transformação” se dá de acordo com a região 2 da figura 4.1. O autor pontua quais são as principais fontes transformadoras do subsistema e como elas se interligam. Nesse caso é preciso ressaltar a importância do uso e da ocupação do solo.

A terceira divisão consiste na “produção” do subsistema, ou seja, a partir de todas essas interações e modificações, o subsistema produzirá respostas, como uma forma de se organizar e de se auto-regular (MONTEIRO, 1976). Dentre as respostas do subsistema, destaca-se a Ilha de Calor (IC) (LOMBARDO, 1985; TARIFA, 1994; CASTRO, 2000). A percepção desses produtos do subsistema se dá principalmente através do conforto térmico, tanto no nível individual como no social (LOMBARDO et al., 1991). A região 4 da figura 4.2 apresenta o diagrama percepção, que aponta como se dá a percepção do subsistema termodinâmico.

E por fim, a teoria de MONTEIRO (1976) aborda as ações que podem ser tomadas em relação às respostas desse subsistema. Dentre as ações destaca-se o planejamento urbano e a tecnologia habitacional do conforto térmico (BRANDÃO, 1999). A região 5 da figura 4.2 apresenta o diagrama ação.

O aumento de precipitações, aumento da umidade e da temperatura local são respostas do subsistema termodinâmico (TARIFA, 1994). O aumento de temperatura de um determinado local causa o fenômeno chamado ilhas de calor (LOMBARDO, 1995; PEREZ et al., 2001; WENG,

¹³ Adaptado de MONTEIRO e MENDONÇA (2003).

2003; LU e WENG, 2005). Para reduzir os efeitos deste fenômeno, alguns autores sugerem a construção de telhados verdes, planejamento de áreas verdes nas cidades, planejamento da arborização urbana, permeabilização do solo com calçadas verdes, reconstrução de espaços públicos como praças, dentre outras (CARNAHAN e LARSON, 1990).

4.2.1.2 Sensoriamento Remoto aplicado a estudos de Ilhas de Calor

Nas últimas décadas, estudos de clima urbano e de IC vêm se destacando e ganhando muita importância na área do sensoriamento remoto, pois oferece visões de diferentes escalas e permite a transformação de dados do infravermelho termal em temperatura aparente de superfície. Os primeiros estudos foram efetuados com o satélite NOAA (“National Oceanic and Atmospheric Administration”), que tem resolução espacial de 1,1km (KIDDER e WU, 1987; BALLING e BRAZELL, 1988; ROTH et al,1989; GALLO et al., 1993). No entanto, tal resolução é baixa, limitando a qualidade da descrição (WENG, 2003). Os próximos satélites que foram utilizados, e ainda o são até hoje, são os da série Landsat, que se destaca por sua maior acessibilidade (NICHOL, 1994). O Landsat 5 se destacou por muitos anos por apresentar uma melhor resolução (120 m) quando comparado ao satélite NOAA. Posteriormente, foi introduzido o Landsat 7 que apresenta imagens com resolução de 60 metros, o que o torna mais adequado para estudos que exigem uma resolução espacial mais refinada (WENG, 2003).

Satélites com sensores de infravermelho termal são capazes de mensurar a temperatura aparente da superfície (“land surface temperature”) (LST). A temperatura fornecida pelos satélites é um valor superior à temperatura do ar (WENG, 2003), assim, os dados das imagens de satélite do infravermelho termal são capazes de fornecer temperatura qualitativa da cidade, ou seja, o desenho da temperatura local.

O processo de mensurar a temperatura aparente da superfície exige uma série de cálculos matemáticos (SOBRINO e CASELLES, 1990) e/ou aplicação de algoritmos de softwares. Dentre os softwares destaca-se o IDRISI 3.2. que possui um algoritmo de transformação termal capaz de fazer a conversão dos níveis de cinza das imagens Landsat 5 e 7 (conforme comprovado no capítulo 2 : Landsat 7 e Idrisi 3.2: validação do algoritmo de transformação termal) em temperatura aparente da superfície.

4.2.1.3 Ilhas de Calor (IC)

As áreas das cidades se caracterizam por apresentarem temperaturas mais elevadas quando comparadas com as áreas rurais (LOMBARDO, 1985; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Essa anomalia térmica é chamada de ilhas de calor (IC) e tem sido observada desde início do século XX, sendo um dos fenômenos climatológicos urbanos mais estudados (CARNAHAM e LARSON, 1990; PEREZ et al., 2001; ORGAZ e PINHO, 2000).

A ilha de calor pode ser observada em várias escalas (PEREZ et al., 2001), desde pequenas áreas (nos arredores de um edifício, no meio de uma avenida), áreas maiores (em um bairro, por exemplo), ou regiões (muitos bairros ou uma zona) e até mesmo na cidade inteira (HARRIS, 2004).

As IC têm sua origem na transformação do espaço natural em urbano (TARIFA, 1994). O espaço urbano é, constituído principalmente por diversos materiais que possuem diferentes propriedades físicas e térmicas, pelo calor e resíduos produzidos pelas atividades antropogênicas, e pela modificação da rugosidade superficial (LOMBARDO, 1985; PEREZ et al. 2001; KIM e BAIK, 2004). PEREZ et al. (2001) explicam que as propriedades térmicas dos materiais que compõem a superfície do solo são capazes de modificar e moldar as variáveis microclimáticas de tal maneira que há a formação de regiões mais quentes, com fronteiras bem definidas, que as separam de seus arredores. Portanto, a IC configura-se como fenômeno que associa os condicionantes derivados das ações antrópicas sobre o meio ambiente urbano, em termos de uso de solo e os condicionantes do meio físico e seus atributos geo-ecológicos (CARNAHAN e LARSON, 1990; WENG, 2003). Além disso, LOMBARDO (1985) ressalta que a urbanização, considerada em termos de espaço físico construído, altera significativamente o clima urbano, considerando-se o aumento das superfícies de absorção térmica, impermeabilização dos solos, alteração na cobertura vegetal, concentração de edifícios que interferem nos efeitos dos ventos e contaminação da atmosfera por meio da emissão de gases.

Assim esse fenômeno é resultante da interação entre diversos fatores humanos, ambientais, econômicos e sociais (ALCOFORADO, 1993; BRISTOW e MULLENS, 1995). Nesse contexto, o uso e ocupação dos solos urbanos é um dos principais fatores que causam e intensificam a IC (CARNAHAN e LARSON, 1990; BRISTOW e MULLENS, 1995; WENG, 2003; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003).

Um dos mecanismos do sistema cidade-atmosfera mais afetados pela urbanização é o balanço de energia (PEREZ et al., 2001, TARIFA e AZEVEDO, 2001; KALNAY e CAI, 2003; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). O fluxo de calor latente é o que apresenta a mudança mais abrupta uma vez que as áreas úmidas e produtoras de umidade são reduzidas em locais altamente urbanizados (PEREZ et al., 2001). Assim, ao se diminuir o fluxo de calor latente se incrementa o fluxo de calor sensível, que gera um maior aquecimento do ar superficial (VILLA NOVA et al., 2001) e, com ele, a temperatura do sistema se eleva, aparecendo, assim, as ilhas de calor (GRIMMOND e SOUCH, 1994; GEDZELMAN et al., 2003). Nesse balanço energético, o índice de reflexão da radiação solar dos materiais que compõem a superfície (albedo) tem um papel importante (SERRATO et al., 2002).

OKE (1979) resumizou os fatores que causam o fenômeno das IC urbanas e os subdividiu em mecanismos da camada limite superior (“boundary layer”) e mecanismos da camada dossel (“cannopy layer”) (Figura 4.3).

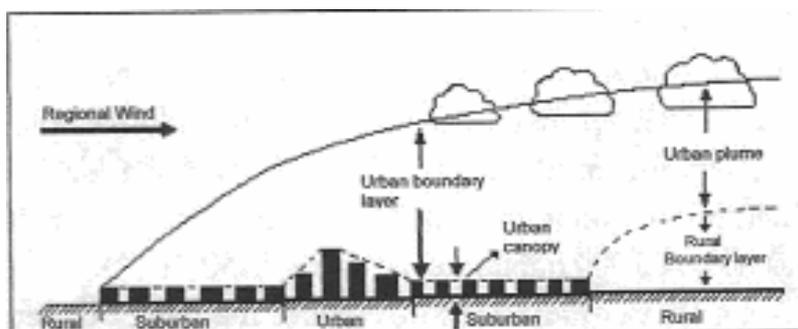


Figura 4.3 – Representação esquemática das camadas atmosfera urbana (Urban boundary layer e canopy boundary layer) definidas por OKE (1979)¹⁴

Segundo o autor, os principais mecanismos que afetam a camada limite superior (“boundary layer”) são:

- ✚ Calor antropogênico provenientes dos telhados, aglomeração de telhas e chaminés;
- ✚ Calor percorrido da camada dossel;
- ✚ Calor excedente do ar pelo processo de convecção;
- ✚ Fluxo de radiação de onda curta que converge com a poluição do ar.

Os mecanismos que mais afetam a camada do dossel urbano (“cannopy boundary layer”) incluem:

¹⁴ Fonte: MONTEIRO e MENDONÇA (2003) citando HENDERSON-SELLERS e ROBINSON (1989).

- ✚ O calor antropogênico das construções;
- ✚ Alta absorção de ondas curtas pelas construções;
- ✚ Decréscimo do fluxo de ondas longas perdidas;
- ✚ Alto armazenamento de calor pelos materiais de construção civil (armazenam calor durante o dia e o liberam no período noturno);
- ✚ Excesso de calor sensível pela diminuição do fluxo de calor latente;
- ✚ Convergência do calor sensível pela redução da velocidade do vento.

Considerando a magnitude das IC, muitos são os mecanismos que contribuem para a sua formação e muitos são os fatores e sistemas que agravam sua intensidade (CARNAHAM e LARSON, 1990; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003; KIM e BAIK, 2004), desde sua localização geográfica até as condições climatológicas do dia (CARNAHAN e LARSON, 1990; PEREZ et al., 2001; WENG, 2001). Há também fatores relacionados às características específicas da cidade como o tamanho da cidade, a densidade da população, o dia da semana, a cultura local, além de variações diurnas e sazonais (PRICE, 1979; LANDSBERG, 1981; CARNAHAN e LARSON, 1990; TARIFA, 1994).

OKE (1974) traçou o perfil das IC dos grandes centros urbanos, descrevendo que o local da cidade com maior atividade antrópica, normalmente o centro, se caracteriza por ser mais quente do que os bairros residenciais e periféricos. Esse perfil foi chamado de “perfil clássico das IC”. TEZA e BAPTISTA (2005) encontraram os centros das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais como sendo os locais com IC mais intensas. BRADLEY (1995) e SILVA FILHO (2004) explicam que, uma das prováveis explicações para esse fenômeno é o fato de que o centro da cidade tem abundância de população urbana e falta de vegetação, diferente do que acontece nas extremidades das cidades, onde esses índices praticamente se invertem (Figura 4. 4).

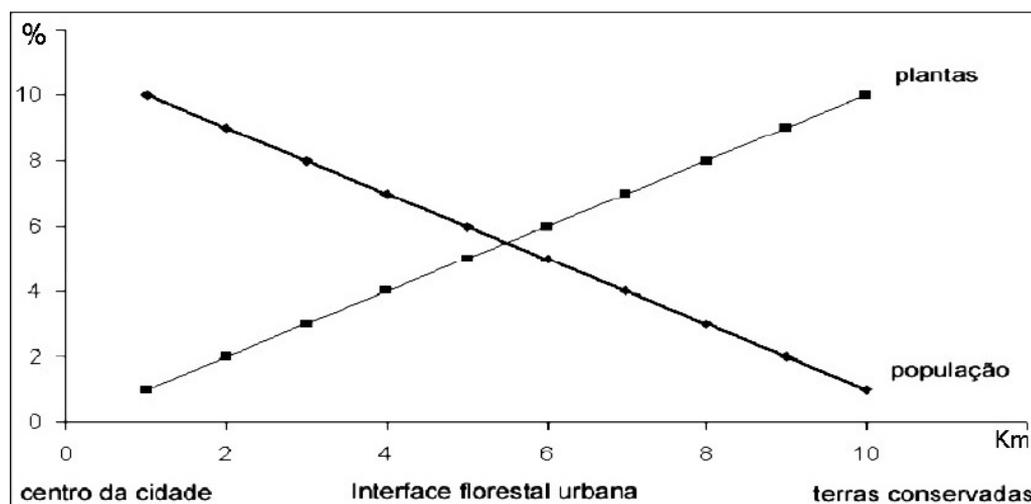


Figura 4. 4 – Gradiente de espaço florestal urbano¹⁵

Os mesmos autores colocam que é no centro da cidade que está a maior concentração de atividades humanas como serviços, meios de transporte (carros, ônibus), prédios, pavimentação, rede de água e esgoto, fiação elétrica, dentre outros. Todas essas atividades entram em conflito direto com a vegetação, o que faz a relação população / vegetação se tornar inversamente proporcional, conforme visualizado na figura 4.4 de SILVA FILHO (2004).

Toda essa substituição causa grande impacto no ecossistema urbano (AZEVEDO e TARIFA, 2001). BRADLEY (1995) e CASTRO (2000) destacam a importância dos índices de monóxido de carbono, dióxido de enxofre e ozônio na poluição atmosférica e coloca que esses gases afetam a vegetação urbana. LOMBARDO (1985) pontua a importância de características como solos compactados que não permitem a infiltração de água e aumento do calor pela claridade das construções, fatores esses que atuam de forma significativa no clima e na vegetação da cidade. Além disso, SILVA FILHO (2004) discute o fato do preço por metro quadrado dos terrenos do centro da cidade serem mais elevados do que na periferia. Isso afeta, portanto, a capacidade do poder público em prover espaços nos centros para vegetação, como praças, parques e cinturões verdes, essenciais para a qualidade de vida nas cidades.

OKE (1974) destaca o centro da cidade como o “pico” (“pick”) da IC. A temperatura vai diminuindo gradativamente conforme aumenta a distância do centro chegando ao que o autor caracteriza por “plateau”. O limite entre área urbana e área rural é representado pela queda brusca da temperatura, que o autor conceitua como “penhasco” (“cliff”). Estudos mostram que a

¹⁵ Fonte: SILVA FILHO (2004).

diferença entre a área urbana e rural pode apresentar valores altos de temperatura, como o encontrado em São Paulo, que a diferença chegou a 10°C (LOMBARDO, 1985). PEREZ et al. (2001) ressalta que nem sempre o aquecimento provocado pelas IC é maléfico. Em cidades de clima muito frio e de inverno muito rigoroso, as intensidades das IC podem melhorar o conforto térmico dos habitantes da cidade.

É interessante notar que no perfil clássico da IC traçado por OKE (1974) o autor também destaca o efeito das áreas verdes na temperatura. As figuras 4.5 e 4.6 mostram o perfil da IC de OKE e o corte transversal desta com as denominações “pick”, “plateau” e “cliff”.

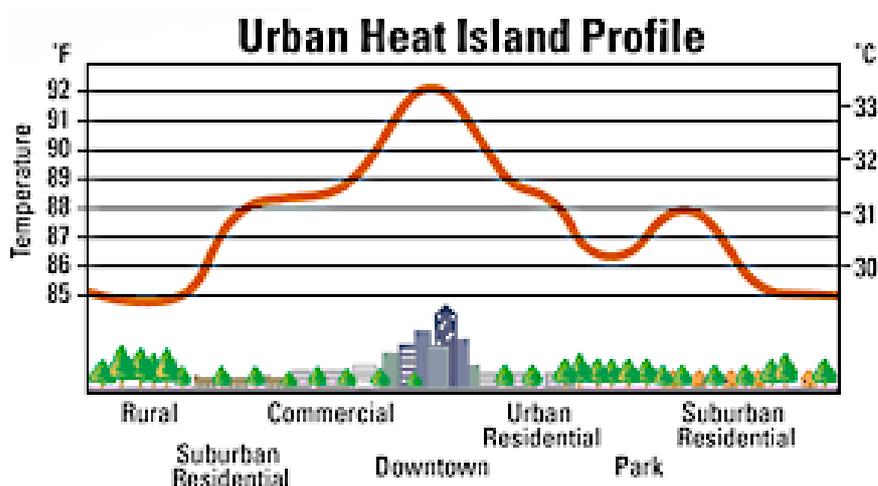


Figura 4.5 – Perfil Clássico da ilha de Calor de grandes centros urbanos ¹⁶

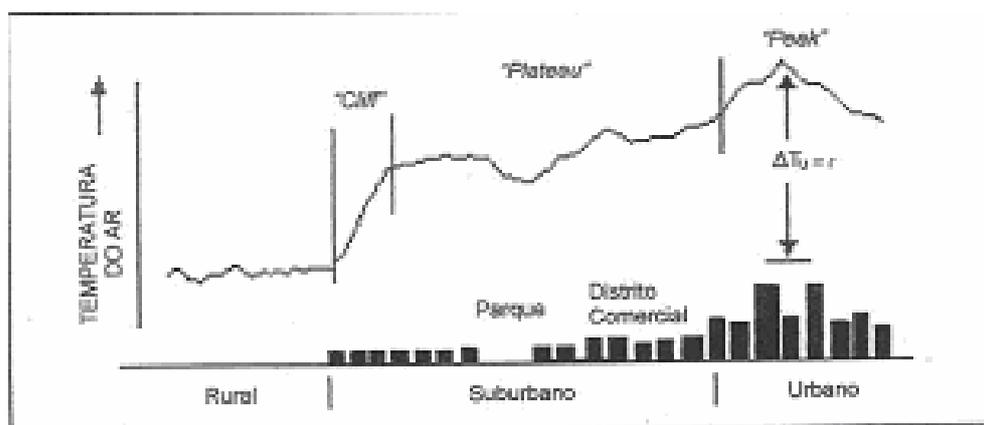


Figura 4.6 – Representação esquemática de uma seção transversal de uma típica Ilha de calor urbana, mostrando os conceitos de “pick”, “cliff” e “plateau”¹⁷

¹⁶ Fonte: Site EPA – Environmental Protection Agency (www.epa.gov/heatisland).

¹⁷ Fonte: MONTEIRO e MENDONÇA (2003) citando OKE (1978).

Conforme visto nas figuras 4.5 e 4.6, parques urbanos e as áreas verdes da cidade causam uma diminuição na temperatura local, fenômeno esse chamado de Ilhas de Frescor (IF).

4.2.1.4 Ilhas de Frescor (IF)

O conceito de Ilha de Frescor (IF) está intimamente ligado à ação das áreas verdes nas cidades (LOMBARDO et al., 1991; PEREZ et al., 2001; GOMEZ, 1993a). PEREZ et al. (2001) explicam que as plantas, em seu processo de evapotranspiração, liberam vapor d'água em seus arredores, aumentando a umidade relativa e diminuindo a temperatura do ar. A liberação de vapor d'água gera uma perda de calor que vai de 24.5 a 29.5 MJ/m² em ambientes áridos e úmidos e, em climas temperados essa perda varia entre 0.7 a 7.4 MJ/m² (JONES et al., 1990).

Dessa maneira a vegetação urbana tem um papel muito importante no clima de uma cidade (PEREZ et al., 2001; SPRONKEN-SMITH, 2002). Os parques urbanos se convertem em pequenas ilhas que são mais frescas e úmidas que seus arredores e produzem, dentro de um ambiente mais quente e seco, um mosaico urbano de microclimas (GOMEZ, 1993b).

De maneira equivalente às IC, o balanço de energia estabelece o grau de esfriamento que pode apresentar um parque urbano. A dissipação de energia disponível está relacionada com a quantidade de água que evapora da superfície, moldando, assim, o fluxo de calor sensível. Esses comportamentos dos fluxos de calor se modificam de acordo com as estações do ano (PEREZ et al., 2001).

JÁUREGUI (1997) observando as Ilhas de Frescor da Cidade do México encontrou diferença de -2.5°C na temperatura dos parques com relação à cidade (sinal negativo se refere ao parque mais frio que os arredores, e este é usado quando se refere às IF). BIAS et al. (2003) encontrou - 9°C de diferenças entre parques urbanos e as áreas vizinhas urbanizadas em Brasília. PEREZ et al. (2001) explicam que as diferenças térmicas dependem, principalmente, do tamanho, da constituição e da quantidade de trânsito de veículos dentro e nas áreas próximas do parque.

Diante disso, as áreas verdes exercem enorme importância no clima das cidades, principalmente no que diz respeito à temperatura. Diversas pesquisas pontuam que a vegetação urbana é essencial para se atenuar os efeitos causados pela alteração do clima local (TARIFA e AZEVEDO, 2001; WENG, 2003; SILVA FILHO, 2004; HARRIS, 2004).

4.2.1.5 Áreas Verdes Urbanas

Muitas são as definições para áreas verdes urbanas. Diversos autores classificam as áreas verdes das cidades de acordo com a sua utilização, com o tamanho e com a função (espaços livres, espaços para recreação, parques, praças) (BARBIN, 2003).

Inúmeros são os benefícios que as áreas verdes trazem à cidade e dentre eles destaca-se a importância que estas trazem ao clima (LOMBARDO et al., 1991). Além do conforto térmico causado pelo fato de amenizarem o fenômeno das IC, as áreas verdes reduzem a velocidade do vento (GREY e DENEKE, 1978) e melhoram diretamente a qualidade do ar, uma vez que absorvem gases poluentes (ozônio, óxido de nitrogênio) (CASTRO, 2000) através de suas folhas, interceptam materiais particulados e liberam oxigênio através da fotossíntese (McPHERSON et al., 1999). Outra função importante é a redução do nível de gás carbônico atmosférico, uma vez que o vegetal fixa o carbono durante a fotossíntese (NOWAK, 1993; CASTRO, 2000).

As áreas verdes também atuam na hidrologia urbana por tornarem os solos permeáveis, melhorando o escoamento das águas da cidade. Além disso, as árvores, ao interceptarem as chuvas, reduzem o volume das enxurradas decorrentes das tempestades (DWYER et al., 1992). Desta maneira, a vegetação é importante, para a redistribuição espacial e temporal da umidade relativa (GREY e DENEKE, 1978; McPHERSON e SIMPSON, 2002). As sombras das árvores nas construções reduzem os gastos com energia elétrica, principalmente nos meses de verão. McPHERSON e SIMPSON (2002) observaram economia de energia devido à redução do uso de ar condicionado nas residências com sombra.

Por fim, vale ressaltar que além de atenuar a poluição sonora (GREY e DENEKE, 1978) as áreas verdes trazem um enorme valor estético às cidades e à população, contribuindo para a harmonia da paisagem, fornecendo abrigo à fauna da região e melhorando a saúde mental da população (MELO FILHO, 1985; GONÇALVES, 2000; PAIVA, 2000).

4.2.2 Material e Métodos

4.2.2.1 Material

Imagens de Satélite

Foram utilizadas as bandas 3,4,5 e 6h do satélite Landsat 7 ETM⁺ da órbita 220 ponto 76, dos dias 08/01/2003 (representando a estação do verão); 13/05/2002 (representando a estação do

outono); 17/08/2002 (representando a estação de inverno) e 29/11/1999 (representando a estação da primavera). As imagens foram cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Fotografias Aéreas

Foram utilizadas fotografias do levantamento aerofotogramétrico do ano de 2000, na escala 1.5000 disponibilizadas pela Prefeitura do Município de Piracicaba. As fotografias utilizadas foram as únicas disponíveis em formato digital.

Dados Vetoriais

Os dados vetoriais georreferenciados e em formato digital da malha urbana, dos bairros e da área total do Município de Piracicaba foram cedidos pelo Laboratório de Silvicultura Urbana da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).

Softwares

Na fase de pré-processamento das imagens de satélite e das fotografias aéreas o software utilizado para a correção geométrica das imagens foi o ERDAS 8.5. Para a classificação das imagens utilizou-se o software ENVI 4.0. Para a transformação das bandas termais do Landsat 7, em temperatura aparente da superfície, utilizou-se o software IDRISI 3.2 (que foi validado no capítulo 2 – Landsat 7 (ETM⁺) e Idrisi 3.2: validação do algoritmo de transformação termal) e, para os acabamentos finais, tanto das imagens de satélite como das fotografias aéreas, utilizou-se o ArcView GIS 3.3.

4.2.2.2 Métodos

4.2.2.2.1 Localização da área de estudo e clima do Município

O Município de Piracicaba (SP) situa-se entre as coordenadas geográficas 22°42' de latitude sul e 47°38' de longitude oeste de Greenwich. A cidade está a 138 km de distância (em linha reta) da capital do Estado, São Paulo, a uma altitude de 540 m (SILVA FILHO, 2004). A cidade possui uma população de 355.039 habitantes sendo 90% habitantes da área urbana (IBGE, 2005) (Figura 4.7).

Em termos geomorfológicos Piracicaba localiza-se na zona do médio Tiête, na Província Geomorfológica da Depressão Periférica Paulista. O nível de base regional é o Rio Piracicaba e a geologia local, formada por rochas da Bacia Sedimentar do Paraná, destacando-se as dos grupos Tubarão e Passa Dois e os arenitos diabásios do Grupo São Bento (LIMA, 1993).

SILVA FILHO (2004) descreve que o clima da cidade é subtropical úmido com estiagem no inverno, em julho e agosto, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio inferior a 18°C.

4.2.2.2.2 Pré-processamento e processamento das Imagens de Satélite

Para a realização dessa etapa seguiu-se o seguinte fluxograma:

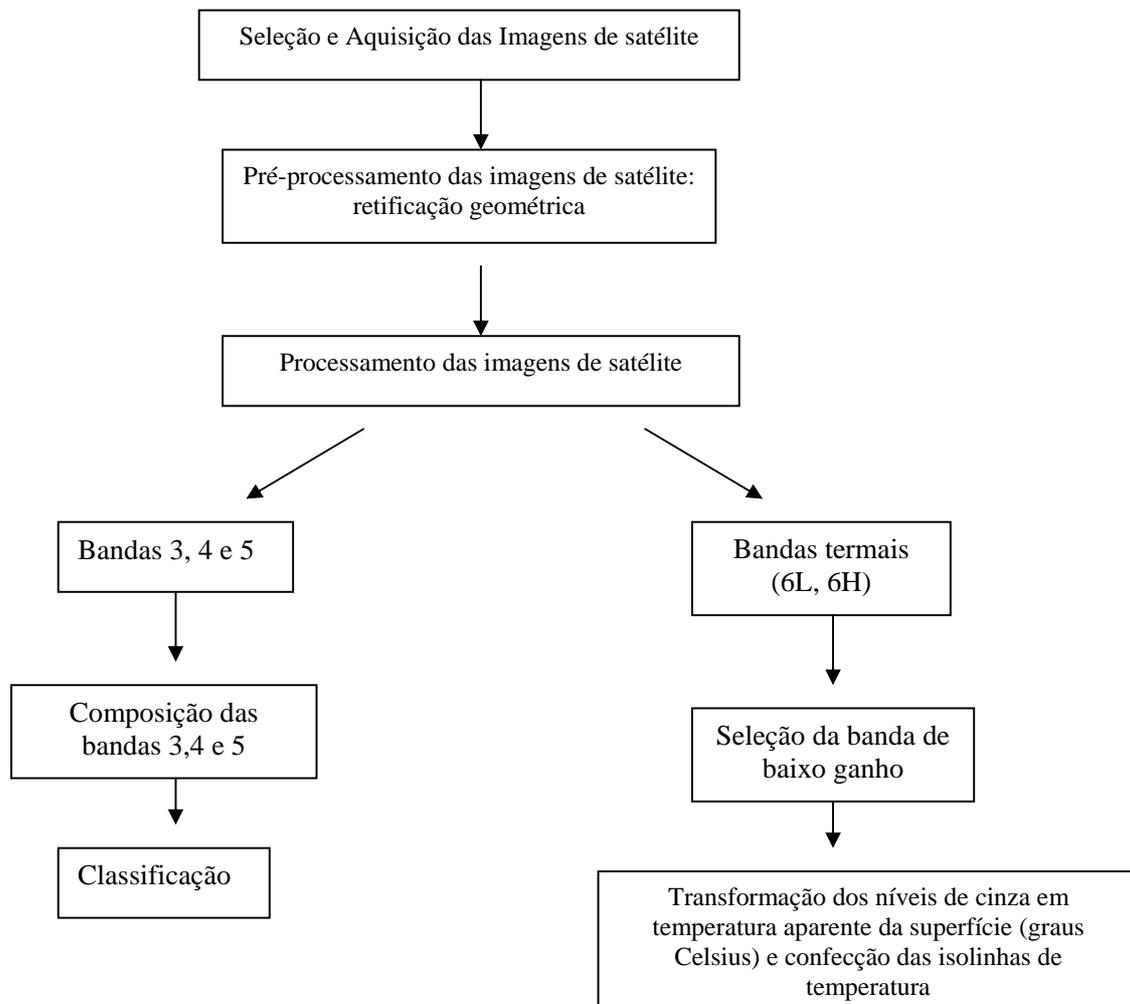


Figura 4.9 – Fluxograma das etapas de pré-processamento e processamento das imagens digitais

Segundo IWAI (2003) as imagens do satélite Landsat 7 fornecem uma visão geral do uso e ocupação dos solos urbanos pois apresentam uma escala de análise compatível com o estudo desejado, além de sua melhor acessibilidade. Assim, no presente trabalho, foram escolhidas imagens do satélite Landsat 7. Estas foram selecionadas de acordo com as condições meteorológicas (dias sem nuvens).

A correção geométrica das imagens é de extrema importância na localização geográfica dos elementos que compõe a cena. Nesse aspecto, NOVO (1989) ressalta que a reorganização dos pixels em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica pode ser obtida através de técnicas de re-amostragem dos pixels que reformatam uma determinada cena em uma dada base cartográfica. IWAI (2003) ressalta que através da correção geométrica a imagem adquire propriedades de um mapa, com todos os pixels referenciados a um sistema de Projeção Cartográfica. O registro é o ajuste da imagem com um sistema de referência, através de cartas topográficas ou coordenadas obtidas pelo GPS (“Global Positioning System”).

IWAI (2003) ressalta que o registro facilita a superposição de imagens distintas, de modo que as características geométricas comuns às duas imagens estejam na mesma localização geográfica, corrigindo-se assim as diferenças de deslocamento nas direções horizontais e verticais.

Assim, as imagens selecionadas foram retificadas no software ERDAS IMAGINE 8.5 e, para tanto, foram coletados 10 pontos de controle a partir de uma imagem já corrigida da Universidade de Maryland. Cabe ressaltar que quando o registro é feito na forma imagem-imagem (como o realizado neste trabalho) utiliza-se a denominação retificação geométrica.

O sistema de projeção e o “datum” utilizados foram Latitude/ Longitude e WGS 84 respectivamente, e o interpolador utilizado foi o “nearest neighbor” (vizinho mais próximo) que, segundo CROSTA (1992) e WENG (2002) é o mais utilizado por não alterar o valor dos níveis de cinza dos pixels da imagem.

O software ERDAS 3.5 apresenta ao final do processo de retificação o Erro Quadrático Médio (RMS). QUINTANILHA et al.(1998b) e IWAI (2003) ressaltam que o RMS descreve o erro posicional típico de todos os pontos em relação à equação e, de acordo com o U.S National Map Accuracy Standards, o RMS por imagem deve ser menor que a metade da resolução na imagem de saída. O erro obtido na retificação das imagens foi menor que 0.5 pixel, valor, portanto, dentro do esperado.

A primeira fase do processamento digital das imagens consistiu na transformação dos níveis de cinza das bandas termais em temperatura aparente de superfície. Para tanto, utilizou-se da metodologia proposta no capítulo 2 – Landsat 7 (ETM⁺) e Idrisi 3.2; validação do algoritmo de transformação termal, utilizando-se o software IDRISI 3.2. As isolinhas de temperatura também foram confeccionadas no software IDRISI 3.2 através do algoritmo “contour” da “surface analysis” (algoritmo de contorno das análises de superfície).

Para o processamento das composições das bandas 3,4 e 5 utilizou-se o método de classificação supervisionada pela disponibilidade de fotos aéreas e mapa de uso do solo do Município. NOVO (1989) ressalta que a classificação supervisionada leva em consideração as informações fornecidas pelo usuário, a verdade terrestre ou mapas de referência.

Em função da resolução do satélite Landsat 7 optou-se por trabalhar com seis classes de uso de solo: água, solo urbano, remanescente florestal, cana de açúcar, pasto e solo exposto.

A classe água foi representada pelo limite do Rio de Piracicaba (Figura 4.10).

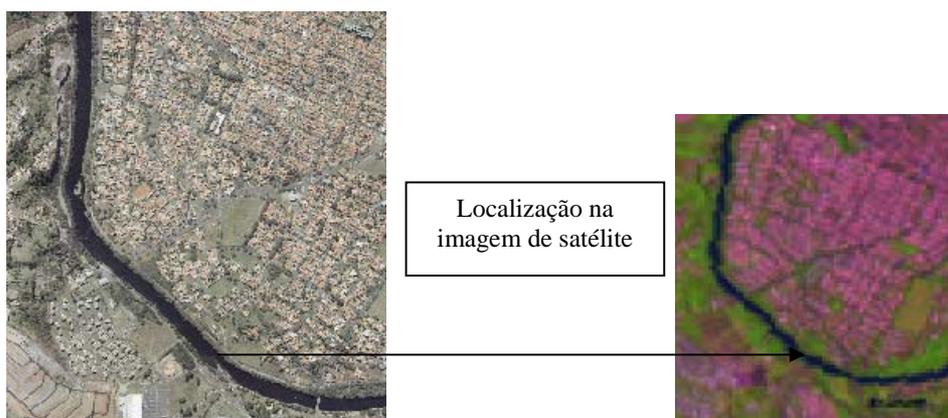


Figura 4.10 – Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “água”

A classe “solo urbano” caracterizou-se por áreas de uso tipicamente urbano, com predominância de materiais de construção civil.

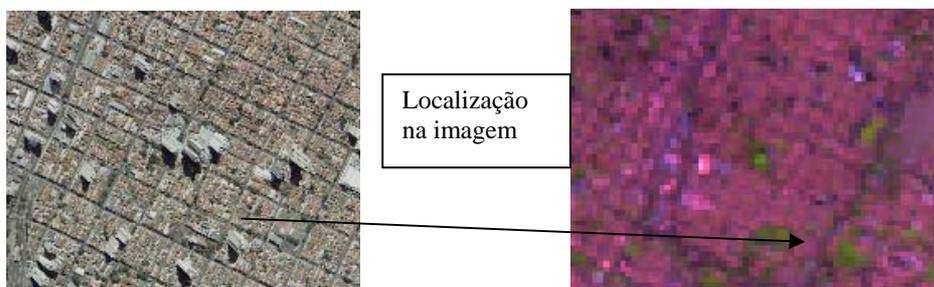


Figura 4.11– Indicação dos elementos escolhidos para a seleção da classe “solo urbano”

A classe “remanescente florestal” caracterizou-se pelos pixels que tinham em sua composição árvores de qualquer espécie, tamanho ou forma. Áreas em regeneração, florestas remanescentes, florestas exóticas e grandes parques urbanos (como por exemplo, o Parque da Rua do Porto) foram incluídos nessa classe.

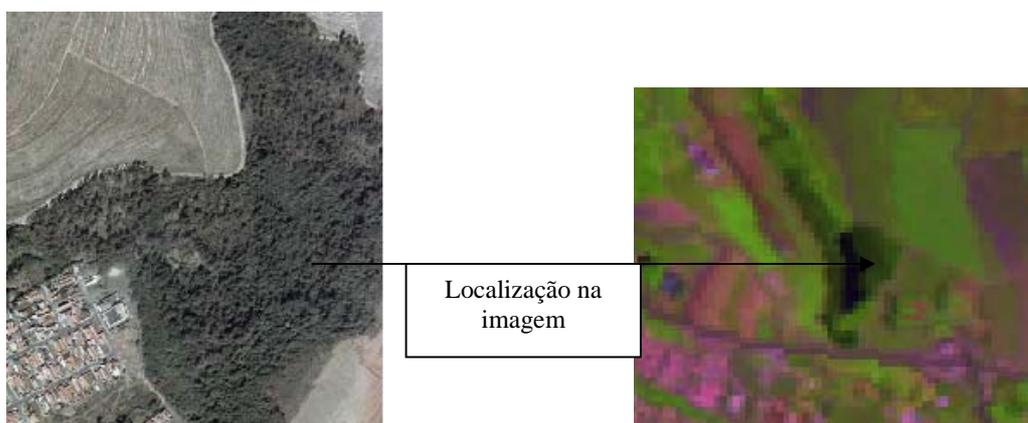


Figura 4.12 – Indicação de um dos elementos escolhidos para seleção da classe “remanescente florestal”

Para a classe “cana-de-açúcar” foram selecionados os pixels que continham a cultura em qualquer estágio de desenvolvimento.

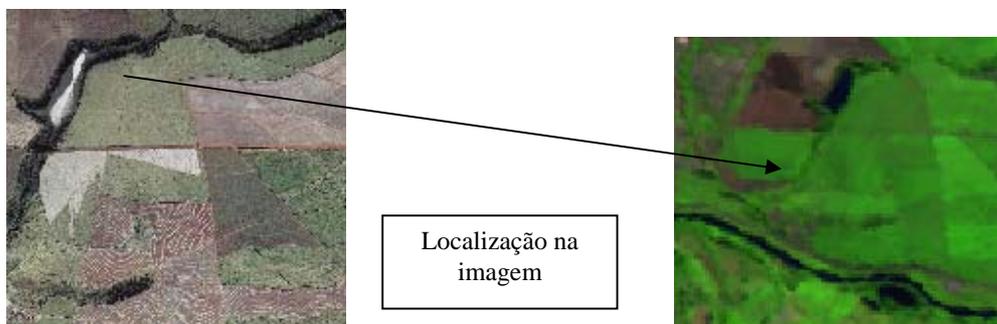


Figura 4.13 – Indicação de um dos elementos para seleção da classe “cana de açúcar”

Para a classe “pasto” foram selecionados pixels que continham pasto em qualquer estágio de desenvolvimento, de qualquer variedade de capim.



Figura 4.14 – Indicação do elemento pasto na imagem para a seleção da classe “pasto”

Na classe “solo exposto” foram selecionados os pixels que não tinham nenhum tipo de cobertura.



Figura 4.15 – Indicação do elemento solo exposto para a seleção da classe “solo exposto”

Definidas as classes de interesse, optou-se pelo algoritmo de classificação de máxima verossimilhança, que segundo QUINTANILHA et al. (1998a) é o mais indicado para estudos urbanos. Em seguida, foi realizada a pós-classificação e a edição das imagens.

4.2.2.2.3 Análise das ilhas de calor (IC) do Município de Piracicaba, SP

Para a análise das IC do Município o trabalho foi dividido em três partes: análise da Morfologia urbana das IC; análise sazonal e diferença da temperatura rural e urbana.

🚧 Análise da Morfologia Urbana das IC

A superfície da cidade construída de área edificada influi de maneira tridimensional na interação que existe entre a estrutura urbana e a atmosfera. As condições climáticas de uma área urbana extensa e de construção densa são totalmente distintas daquelas dos espaços abertos circundantes, podendo haver diferenças de temperatura, de velocidade do vento, de umidade, de pureza do ar, entre outros. O desenho físico urbano, desde a escala de edifícios até as áreas metropolitanas, pode ter fortes repercussões nas condições climáticas locais (LOMBARDO, 1985).

Nesse sentido, LOMBARDO (1985) e PIELKE e AVISSAR (1990) destacam que quando se analisa as IC das cidades deve-se levar em consideração a configuração geométrica dos edifícios, as propriedades dos materiais de construção, as cores das superfícies exteriores, a extensão e a densidade da área construída, as condições de sombra nas ruas e nos estacionamentos, a distribuição das áreas verdes, as relações entre os índices de áreas construídas e espaços livres.

No presente trabalho, as ilhas de calor de cada um dos 62 bairros da cidade foram identificadas e analisadas morfologicamente. As IC são mais intensas no verão do que nas demais estações do ano, motivo pelo qual optou-se pelo estudo da morfologia urbana na estação do verão (VUKOVICH, 1983; LOMBARDO, 1985, CARNAHAN e LARSON,1990; OKE et al., 1991; GOLDREICH, 1995; PEREZ et al., 2001; WENG, 2001; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003, ARNFIELD, 2003; PONGRACZ et al., 2005).

Para identificar quais as estruturas urbanas que compunham as IC do verão, foram utilizadas as informações das fotografias aéreas da cidade e, para a localização exata das IC, as fotografias aéreas foram retificadas geometricamente no software ERDAS, com a mesma projeção e “datum” das imagens (Latitude/Longitude, WGS 84). Para essa análise e discussão dos dados foram escolhidos 20 bairros, sendo 10 com IC mais intensa e 10 com IC menos intensa.

✚ Análise Sazonal

As coordenadas das IC (dos 62 bairros) da estação de verão foram localizadas nas imagens das estações do outono, inverno e primavera, com o intuito de verificar sua variação sazonal. O calor produzido pela cidade é dinâmico, ou seja, as IC não são sempre fixas a um mesmo lugar, variam espacialmente (ORGAZ e PINHO, 2000). Assim, o ponto mais quente de cada bairro foi identificado em cada uma das outras imagens (outono, inverno e primavera), o qual nem sempre coincidiu com as coordenadas das IC do verão.

✚ Diferença da temperatura rural e urbana.

Em uma escala maior, a principal característica de uma IC é o fato das áreas das cidades terem temperaturas mais elevadas quando comparadas às áreas rurais (OKE, 1974; LOMBARDO, 1985; CAMILLONI e BARROS, 1997; MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Nesse sentido, um método para se quantificar a intensidade da IC de uma cidade é comparar a temperatura da área urbana com a da área rural (KARL et al, 1988). Assim, localizou-se a IC mais intensa da área urbana da cidade de Piracicaba e a IF mais fria da área rural. A intensidade da IC foi calculada para cada uma das quatro estações do ano, de acordo com a seguinte fórmula adaptada de CAMILLONI e BARROS (1997):

$$\Delta T^{\circ}C_{r-u} = T^{\circ}C \text{ IC urbana} - T^{\circ}C \text{ IF rural}$$

Tabela 4.2 – Coordenadas e temperatura das IC de cada bairro do Município de Piracicaba-SP

(continua)

Bairro	Loc. X	Loc. Y	T °C da imagem de verão (08/01)
Unileste	-47.58704	-22.726525	39.70
Jardim Primavera	-47.656691	-22.697345	37.79
Morumbi	-47.628317	-22.737625	36.59
Morato	-47.672993	-22.725441	36.20
Paulicéia	-47.648594	-22.741025	35.40
Centro	-47.645491	-22.720895	35.40
Pompéia	-47.598936	-22.753384	35.40
Monte Alegre	-47.603179	-22.703392	35.40
Vila Rezende	-47.649189	-22.703673	35.40
Santa Terezinha	-47.686127	-22.676491	34.60
Cidade Alta	-47.646107	-22.729416	34.59
Taquaral	-47.591341	-22.782951	34.59
Vila Industrial	-47.674675	-22.686779	34.20
Santa Cecília	-47.614416	-22.728864	34.20
Areião	-47.639383	-22.691014	34.20
Parque Piracicaba	-47.703596	-22.67803	33.80
Bairro Verde	-47.642423	-22.748708	33.79
São Dimas	-47.640439	-22.713327	33.00
Agronomia	-47.618041	-22.71166	33.00
Nova Piracicaba	-47.665452	-22.715066	33.00
Santa Rosa	-47.611353	-22.684491	33.00
Monte Líbano	-47.65196	-22.75102	33.00
Jardim São Francisco	-47.591072	-22.764365	32.60
Cidade Jardim	-47.640743	-22.714978	32.60
Higienópolis	-47.641241	-22.738749	32.59
Dois Córregos	-47.608491	-22.73812	33.79
Vila Independência	-47.628116	-22.72109	33.79
Monumento	-47.663478	-22.709832	33.79
Nhoquim	-47.66653	-22.705493	33.79
Algoal	-47.66157	-22.697789	33.79
Vila Fátima	-47.657453	-22.69168	33.79
Vila Sonia	-47.693842	-22.67179	33.40
Vale do sol	-47.701231	-22.68143	33.40
Jardim Califórnia	-47.64304	-22.763529	33.40
Água Branca	-47.62586	-22.755327	33.40
Nova América	-47.631153	-22.741211	33.40
Vila Monteiro	-47.630431	-22.734798	33.40
Novo Horizonte	47.674661	-22.760368	33.00
Jardim Planalto	-47.669336	-22.742829	33.00
Vila Cristina	-47.658225	-22.746471	33.00
Paulista	-47.659276	-22.737316	33.00
Jardim Caxambu	-47.635192	-22.750413	33.00
Piracicamirim	-47.626514	-22.73945	33.00
Cecap	-47.592994	-22.774127	33.00
Conceição	-47.576868	-22.742701	33.00

Tabela 4.2 – Coordenadas e temperatura das IC de cada bairro do Município de Piracicaba-SP

Bairro	Loc. X	Loc. Y	(conclusão)
			T °C da imagem de verão (08/01)
Ondas	-47.683821	-22.701562	32.59
Jupia	-47.683208	-22.711244	32.59
Castelinho	-47.663334	-22.733665	32.59
Jaraguá	-47.665801	-22.734738	32.59
Jardim Elite	-47.640675	-22.7399	32.59
Mario Dedini	-47.659278	-22.680584	32.20
Glebas Califórnia	-47.675994	-22.723176	32.20
Santa Rita	-47.595918	-22.758923	32.20
Jardim Abaeté	-47.602537	-22.731129	32.20
São Judas	-47.637926	-22.720027	32.20
Guamium	-47.622954	-22.667324	32.20
São Jorge	-47.683657	-22.749647	31.79
Jardim Itapuã	-47.66104	-22.75431	31.79
Campestre	-47.645457	-22.764651	31.39
Parque da Rua do Porto	-47.651935	-22.71896	30.90
Clube de campo	-47.646633	-22.711126	30.10
Ondinhas	-47.692309	-22.693915	29.29

Observados os valores da tabela verificou-se que a amplitude térmica das IC da cidade (ilha de calor mais intensa – ilha de calor menos intensa) ficou em torno de 10°C, apresentando valores semelhantes aos de cidades de grande porte, como São Paulo e Porto Alegre (MENDONÇA, 2003) e Rio de Janeiro e Belo Horizonte (TEZA e BAPTISTA 2005). Estes valores são muito superiores aos observados em Salvador (4.6°C) por SAMPAIO (1981) e em São José dos Campos (3.4°C) por TARIFA (1981).

4.2.3.1.1 Análise morfológica das dez IC mais intensas

Os dez bairros com IC mais intensas selecionados para a análise da morfologia urbana estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Os dez bairros com IC mais intensas

Bairro	Loc. X	Loc. Y	T°C na imagem do verão (08/01/2003)
(1) Unileste	-47.58704	-22.726525	39.70
(2) Jardim Primavera	-47.656691	-22.697345	37.79
(3) Morumbi	-47.628317	-22.737625	36.59
(4) Morato	-47.672993	-22.725441	36.20
(5) Paulicéia	-47.648594	-22.741025	35.40
(6) Centro	-47.645491	-22.720895	35.40
(7) Pompéia	-47.598936	-22.753384	35.40
(8) Monte Alegre	-47.603179	-22.703392	35.40
(9) Vila Rezende	-47.649189	-22.703673	35.40
(10) Sta Terezinha	-47.686127	-22.676491	34.60

A Figura 4.17 apresenta o vetor com a localização dos bairros com as ilhas de calor mais intensas.

Localização:

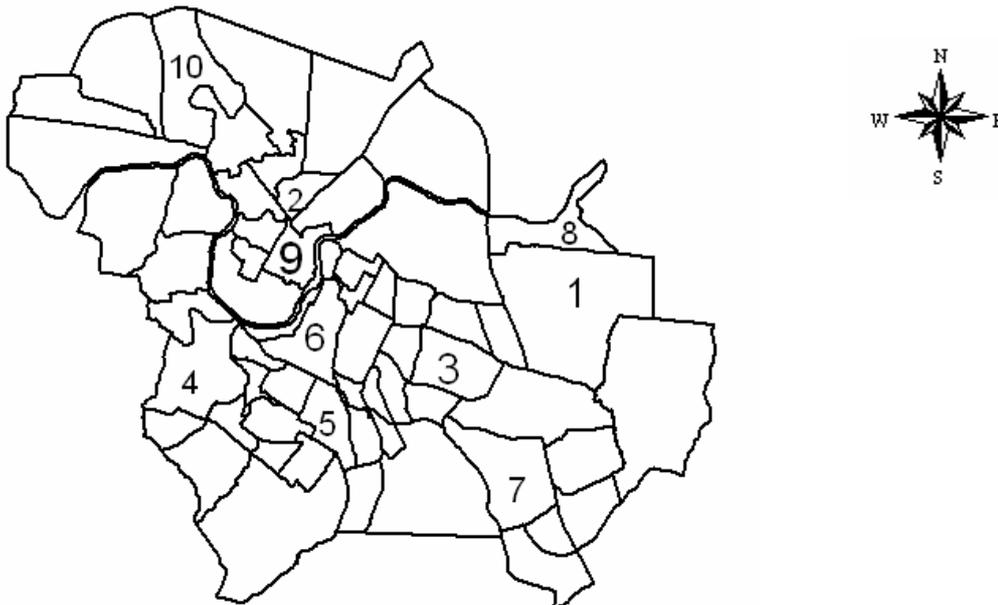


Figura 4.17 – Vetor dos bairros com a indicação dos 10 bairros mais quentes

As figuras 4.18 a 4.27 apresentam a morfologia urbana das IC mais intensas. Estão divididas em quatro partes: imagem termal, composição das bandas 3,4 e 5, fotografia aérea e imagem do bairro com as isolinhas de temperatura (as escalas de temperatura das isolinhas encontram-se ao lado da imagem termal).

(1) Unileste

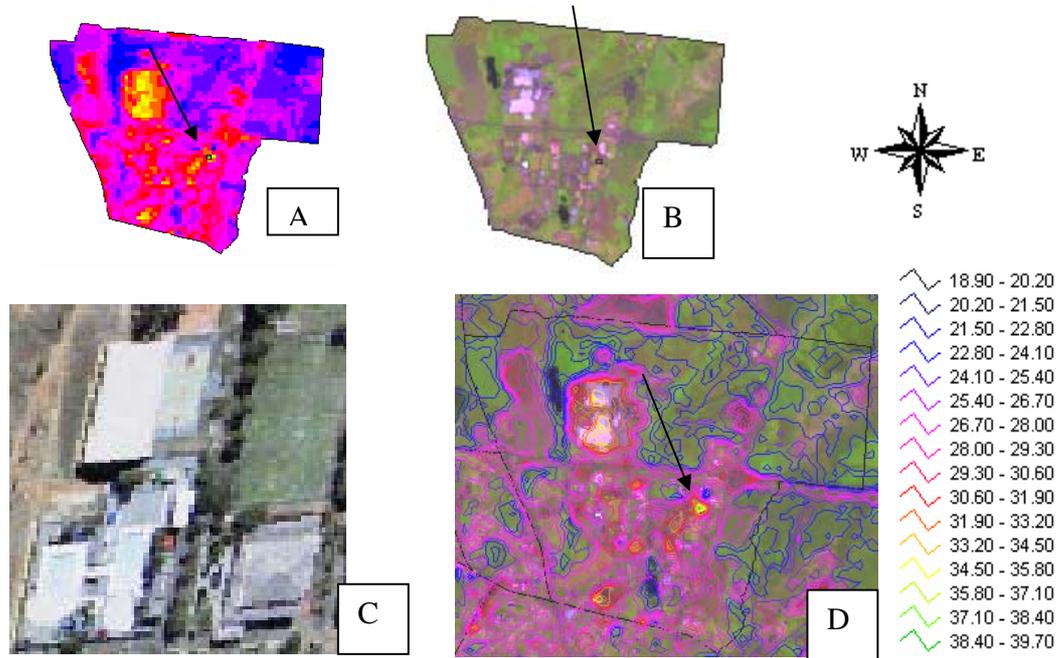


Figura 4.18 - Morfologia urbana da IC do bairro Unileste. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

(2) Jardim Primavera

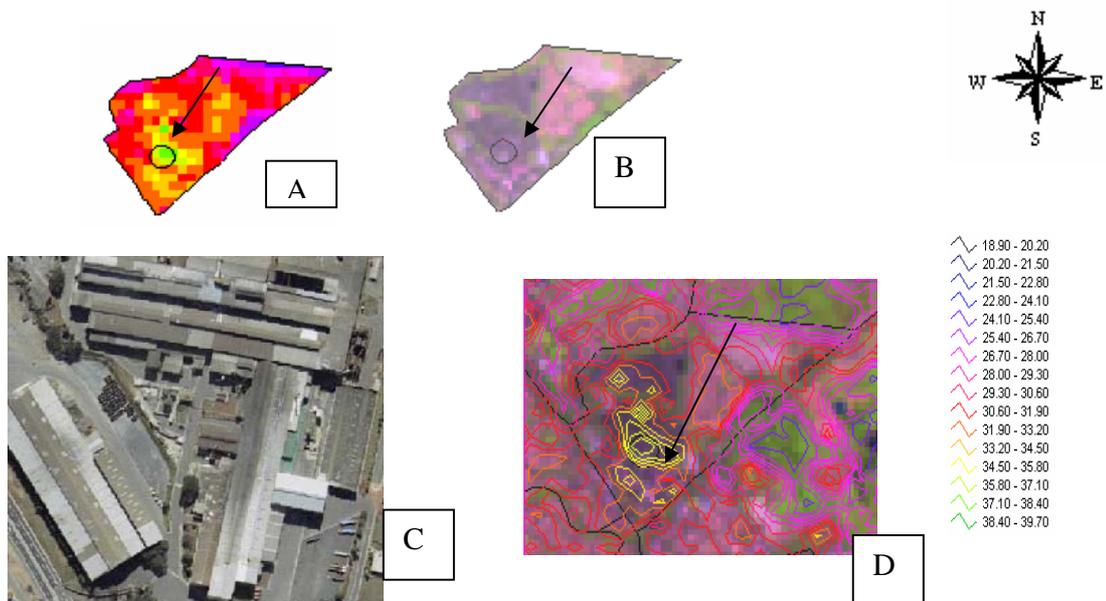


Figura 4.19 - Morfologia urbana da IC do bairro Jardim Primavera. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (3) Morumbi

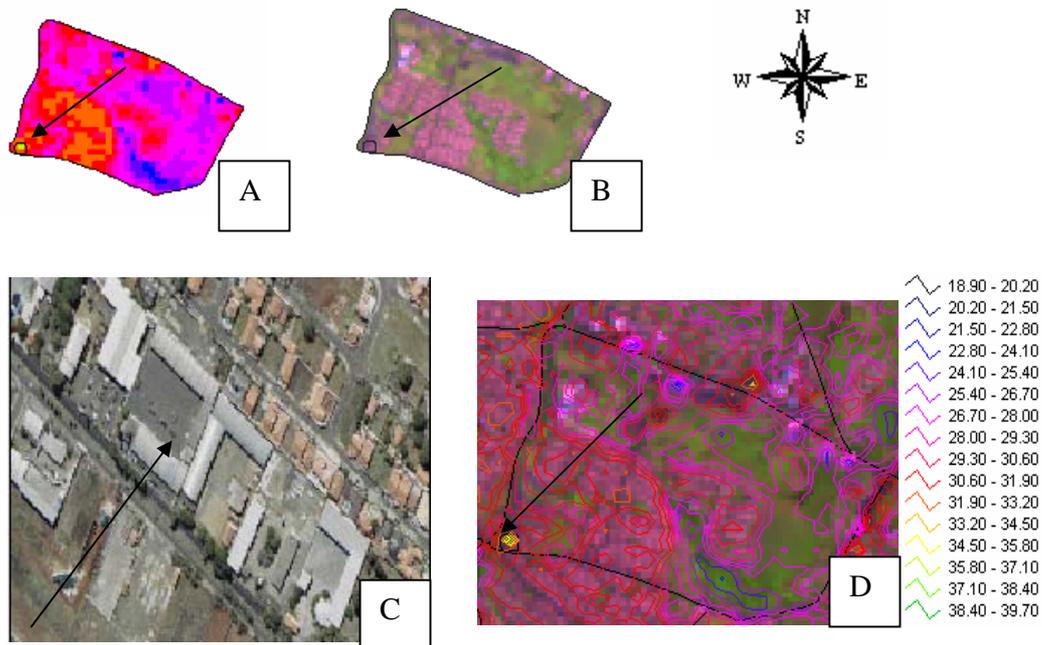


Figura 4.20- Morfologia urbana da IC do bairro Morumbi. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (4) Morato

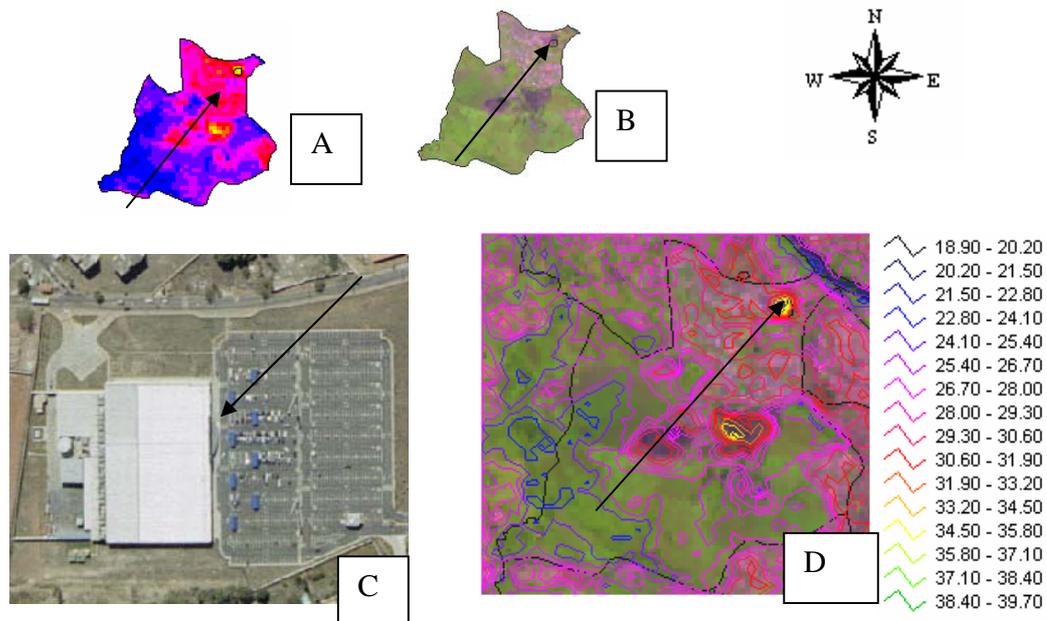


Figura 4.21- Morfologia urbana da IC do bairro Morato. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

(5) Paulicéia

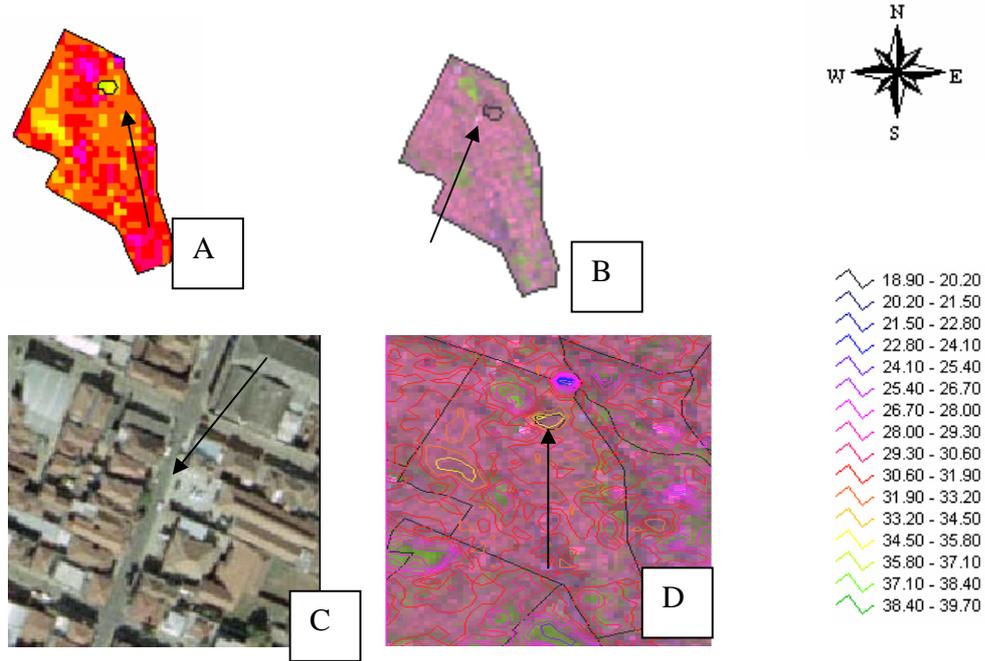


Figura 4.22- Morfologia urbana da IC do bairro Paulicéia. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

(6) Centro

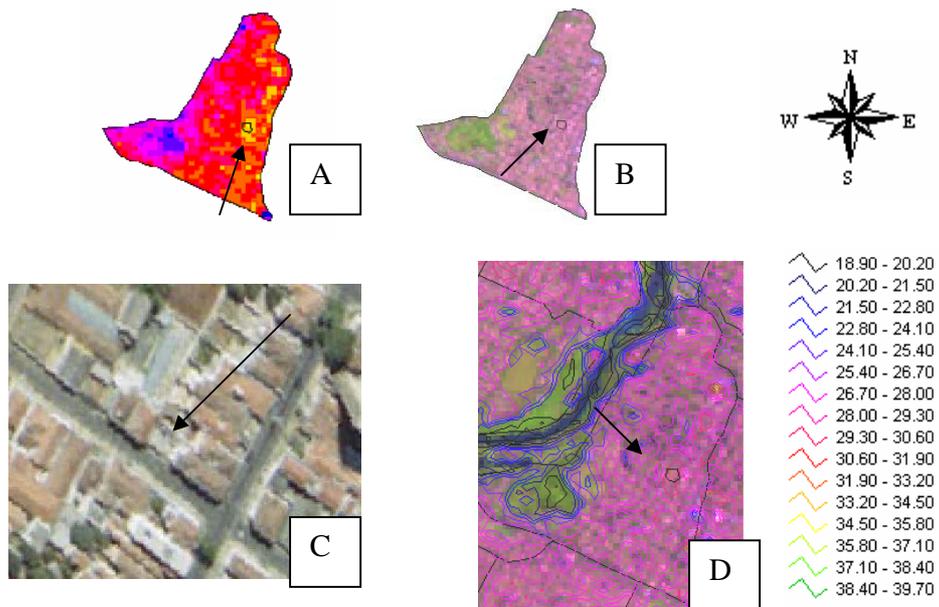


Figura 4.23- Morfologia urbana da IC do bairro Centro. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

(7) Pompéia

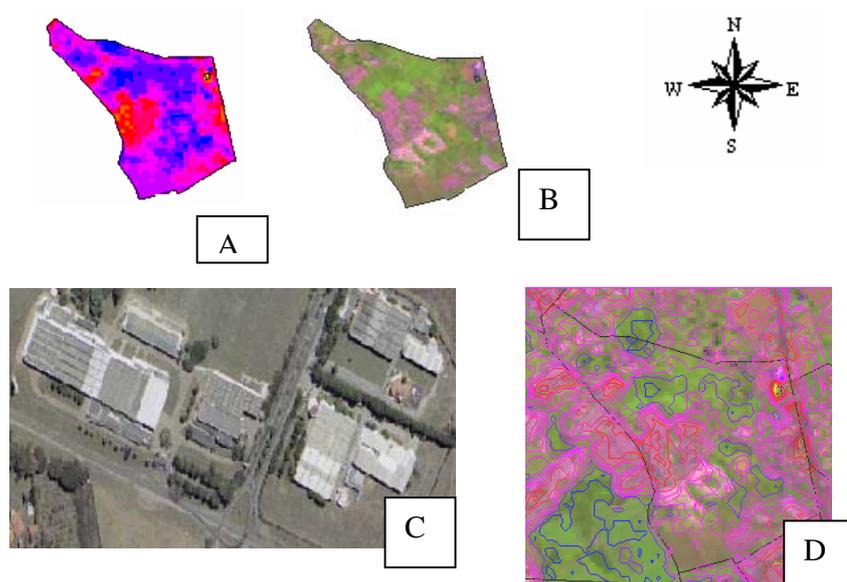


Figura 4.24 – Morfologia da IC do bairro Pompéia. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

(8) Monte Alegre

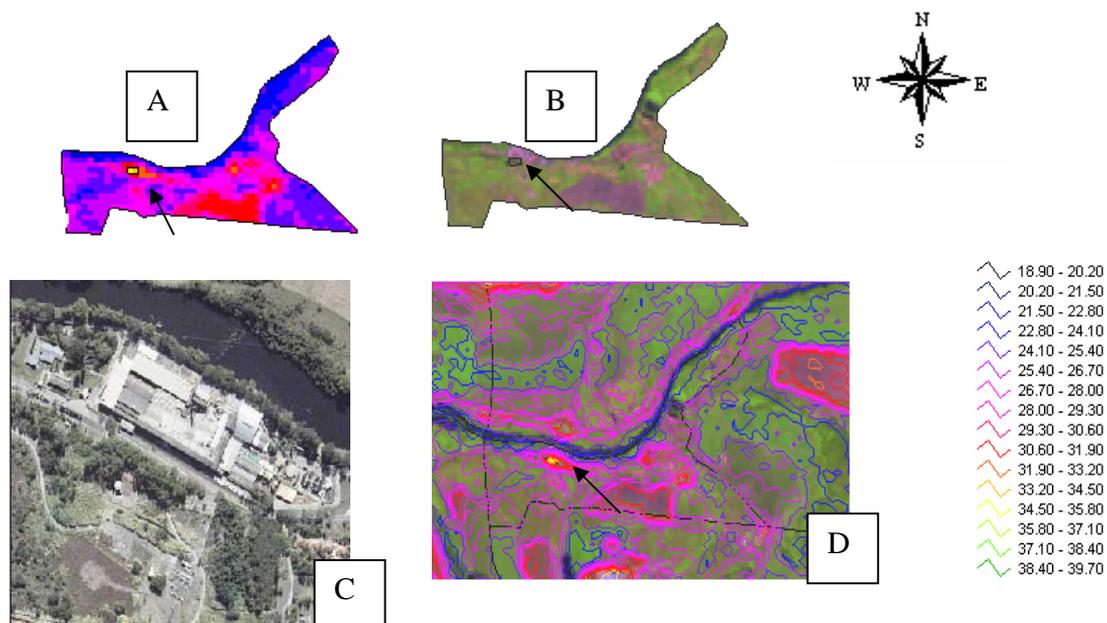


Figura 4.25 – Morfologia da IC do bairro Monte Alegre. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

📍 (9) Vila Rezende

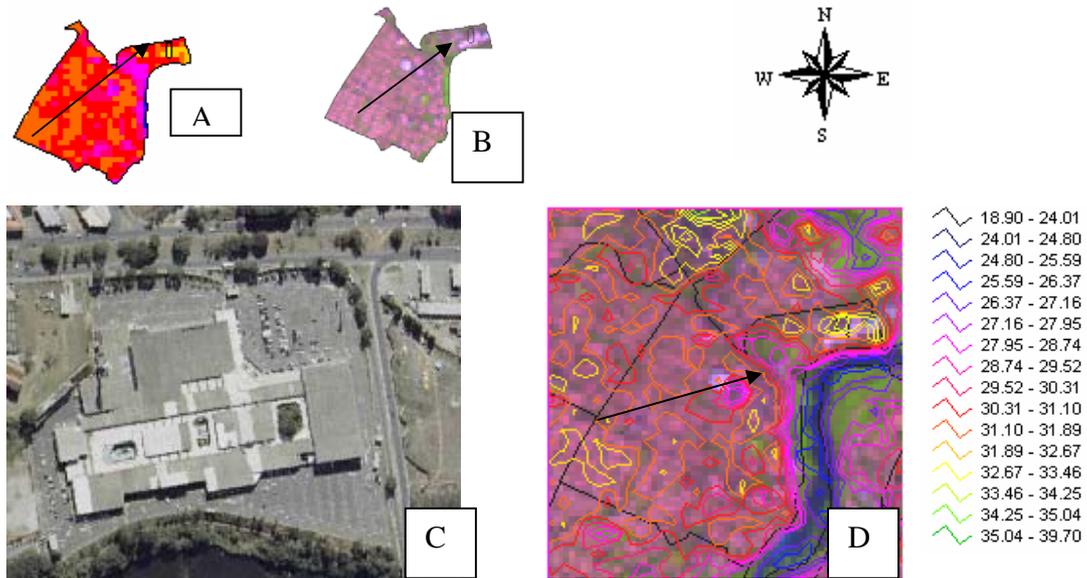


Figura 4.26 – Morfologia da IC do bairro Vila Rezende. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

📍 (10) Santa Terezinha

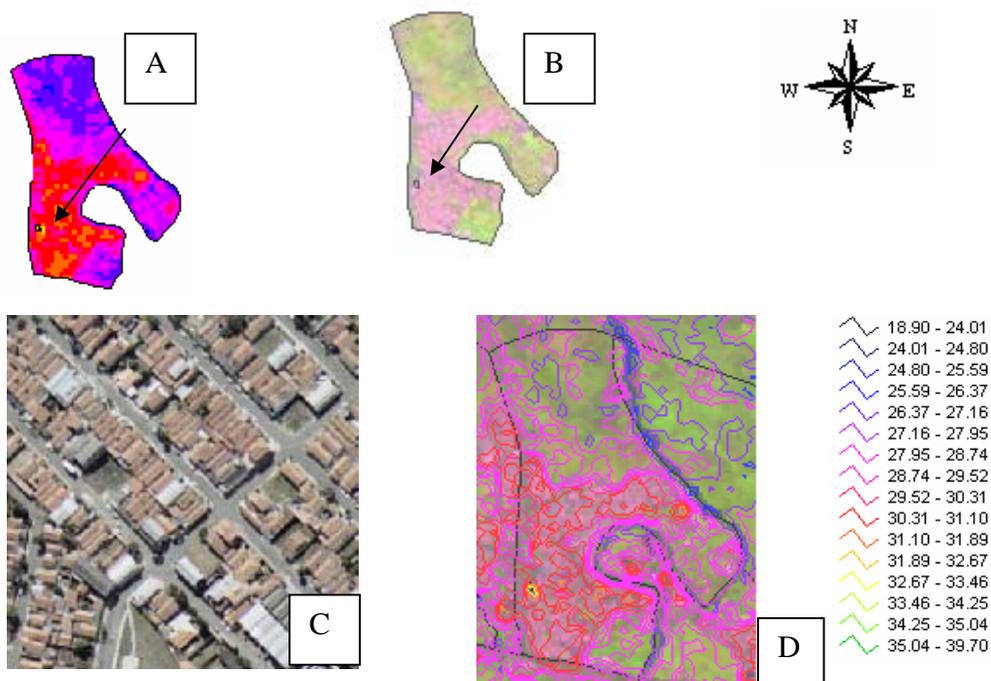


Figura 4.27 – Morfologia da IC do bairro Santa Terezinha. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

Todos as IC são caracterizadas pelo excesso de material de construção civil. Dos dez bairros com IC mais intensas, sete deles (Unileste, Jardim Primavera, Morumbi, Morato, Pompéia, Monte Alegre e Vila Rezende) apresentaram estruturas com telhas de cimento, amianto e asfalto. MONTEIRO (1976), LOMBARDO (1985), LIMA (2005), PAIVA (2005) destacam que esses materiais são responsáveis pela formação da maioria das IC das cidades.

LIMA (2005) encontrou correlação positiva entre o número de pavimentos e o aumento das temperaturas mínimas, médias e máximas em Curitiba. Segundo LOMBARDO (1985) o asfalto aprisiona grande quantidade de energia, motivo pelo qual áreas com excesso de asfalto se caracterizam por uma temperatura de superfície mais elevada. A mesma autora destaca que esse tipo de material libera o calor aprisionado principalmente à noite, o que faz com que muitas das IC dos centros urbanos se intensifiquem no período noturno.

As telhas de cimento e amianto são materiais que têm alta reflectância o que aumenta significativamente a irradiação de calor para a atmosfera (TEZA e BAPTISTA, 2005). Essa alta irradiação emitida para atmosfera interfere de forma drástica no balanço de energia local causando um reflexo imediato na temperatura (SERRATO et al., 2002). Assim, locais com excesso de materiais como telhas de cimento amianto interferem significativamente na intensidade das IC. Essa interferência é tão drástica que nem mesmo as áreas verdes localizadas nos arredores destas construções podem amenizar a temperatura no ponto exato em que as telhas de cimento amianto se encontram.

As áreas verdes são capazes de amenizar a temperatura. Através das isolinhas traçadas observa-se claramente que locais com densa urbanização e pouca ou nenhuma quantidade de área verde apresentam temperatura maior. Por outro lado, em locais onde há vegetação, a temperatura caracteriza-se por ser menor, concordando com os resultados de MONTEIRO e MENDONÇA (2003), LOMBARDO (1985), TARIFA e AZEVEDO (2001) e LU e WENG (2005). Isto pode ser visualizado no bairro Centro, onde está localizado o Parque da Rua do Porto. O local se destaca por apresentar temperatura menor (23.79°C) com relação ao resto do bairro, caracterizando, assim, uma Ilha de Frescor (IF) (figura 4.28).

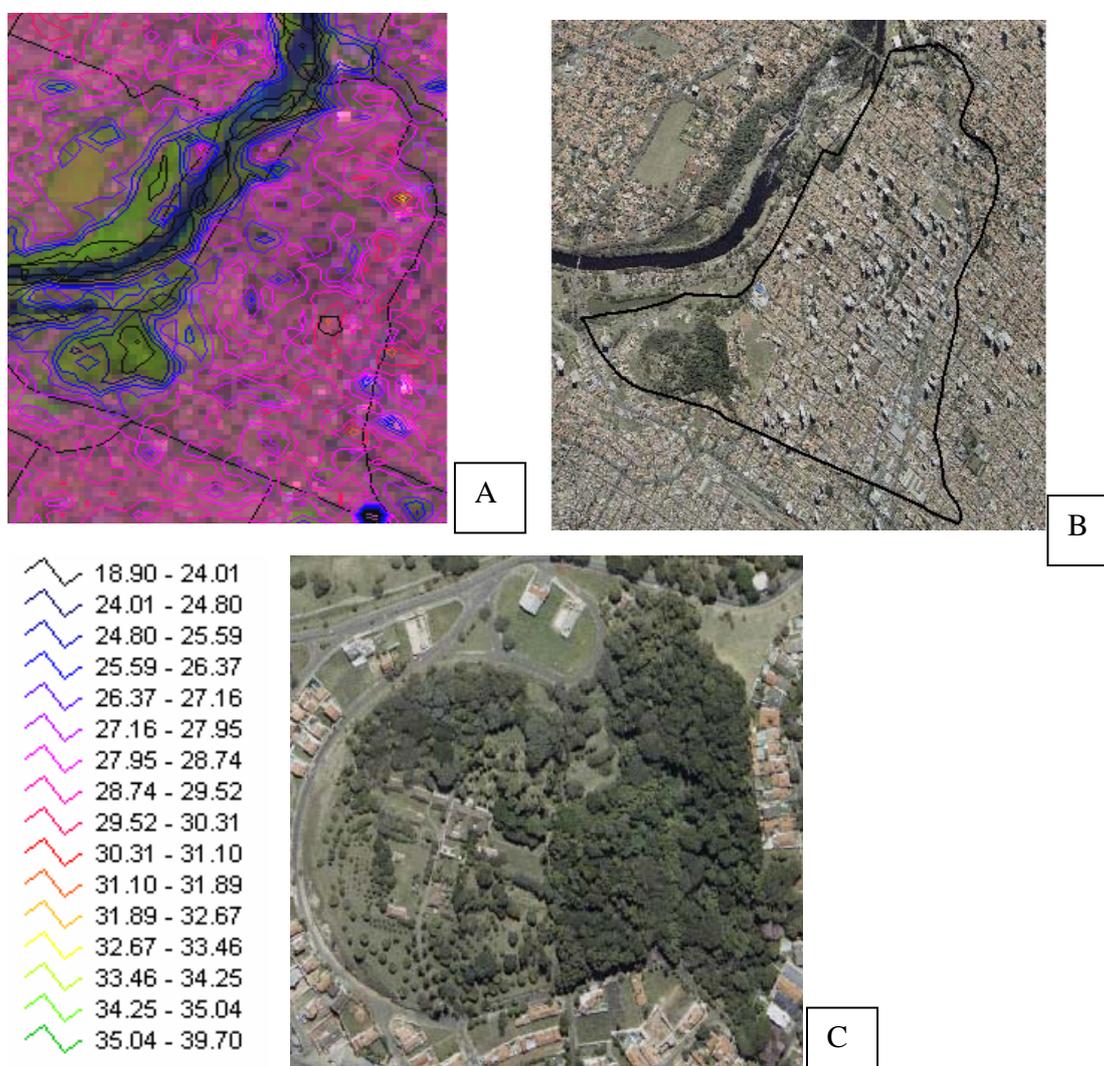


Figura 4.28 –Ilha de Frescor (IF) do centro (Parque da Rua do Porto). A= composição das bandas 3,4 e 5 com sobreposição das isolinhas de temperatura aparente da superfície e delimitação do bairro centro. B = Fotografia aérea com delimitação do bairro centro. C = Detalhe do Parque da Rua do Porto (IF) e escalas de cores das temperaturas (a esquerda)

OKE (1974) descreveu esses locais altamente arborizados e de temperatura menor como as áreas mais amenas e confortáveis de uma cidade. O autor explica que essas áreas exercem um “efeito oásis” e promovem uma descontinuidade nas IC. A diferença entre a IC e a IF do bairro Centro ultrapassou a 10°C. MENDONÇA (2003) encontrou diferença de 7.9°C na cidade de Londrina.

4.2.3.1.2 Particularidade do Bairro Centro

Na maioria dos estudos urbanos o perfil da IC é o clássico, descrito por OKE (1974), no qual o centro da cidade caracteriza-se por ser mais quente quando comparado aos demais bairros. TARIFA e AZEVEDO (2001), delimitando as unidades climáticas da cidade de São Paulo, também identificaram a área central da Metrópole como sendo a mais quente. TEZA e BAPTISTA (2005) identificaram o perfil clássico da IC em Belo Horizonte e no Rio de Janeiro. Os autores sugerem que a região central é o lugar onde ocorrem as maiores transformações de energia, massa e poluição, derivadas da urbanização, provocando mudanças tanto nos balanços de radiação solar quanto nas trocas aerodinâmicas (ligadas ao vento), bem como alterando a composição do ar e liberando grandes quantidades de calor antropogênico.

No entanto, no Município de Piracicaba o bairro Centro não tem a IC mais intensa da cidade. Comparativamente ao perfil apresentado por OKE (1974), o “Peak” das IC não coincidiu com o centro comercial, que o autor denomina CBD (“Central Business District”). Resultado semelhante foi encontrado por MENDONÇA (2003) estudando o clima de Londrina.

Uma das prováveis explicações para esse fato é que cidades de médio e pequeno porte possuem características geográficas bem diferentes das de grande porte e os espaços definidos por OKE (1974) (“urban boundary layer”, “cannopy boundary layer”, “pick”, “cliff” e “plateau”), não se manifestam (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003). Os mesmos autores explicam que a inexistência de subúrbios nessas cidades impede a formação de ambientes de transição entre o rural e o urbano.

Além disso, há o “efeito oásis” no bairro centro, provocado pelo parque da Rua do Porto e pela proximidade do Rio. Nesse caso, o microclima formado pela água do Rio e pela IF resfriaria uma parte do ar do centro e, essa camada de ar mais frio, seria levada para seus arredores através da ventilação local, provocando uma descontinuidade da IC central e uma conseqüente queda na temperatura.

4.2.3.1.3 Análise Morfológica das dez ilhas de calor (IC) menos intensas

A tabela 4.4 apresenta as dez IC menos intensas localizadas na imagem de verão.

Tabela 4.4 – Dez bairros com Ilhas de Calor (IC) menos intensas

Bairro	Loc. X	Loc. Y	T°C na imagem de verão
(1) Ondinhas	-47.692309	-22.693915	29.29
(2) Clube de campo	-47.646633	-22.711126	30.10
(3) Pq. da R do Porto	-47.651935	-22.71896	30.90
(4) Campestre	-47.645457	-22.764651	31.39
(5) São Jorge	-47.683657	-22.749647	31.79
(6) Jardim Itapuã	-47.66104	-22.75431	31.79
(7) Santa Rita	-47.595918	-22.758923	32.20
(8) Jardim Abaeté	-47.602537	-22.731129	32.20
(9) São Judas	-47.637926	-22.720027	32.20
(10) Guamium	-47.622954	-22.667324	32.20

A Figura 4.29 indica a localização dos dez bairros com as IC menos intensas.

Localização:

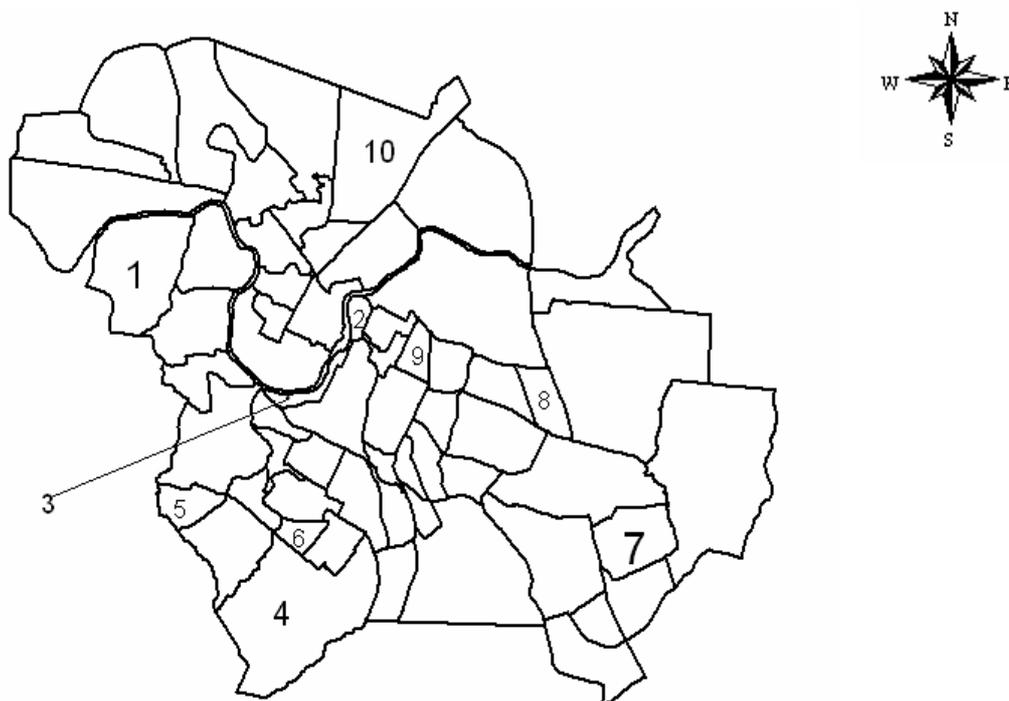


Figura 4.29 – Vetor com a localização dos bairros com IC menos intensas

As figuras 4.30 a 4.39 apontam a morfologia urbana das IC menos intensas. Estão divididas em quatro partes: imagem termal, composição das bandas 3,4 e 5, fotografia aérea e imagem do bairro com as isolinhas de temperatura (as escalas de temperatura das isolinhas encontram-se ao lado da imagem termal).

✚ (1) Ondinhas

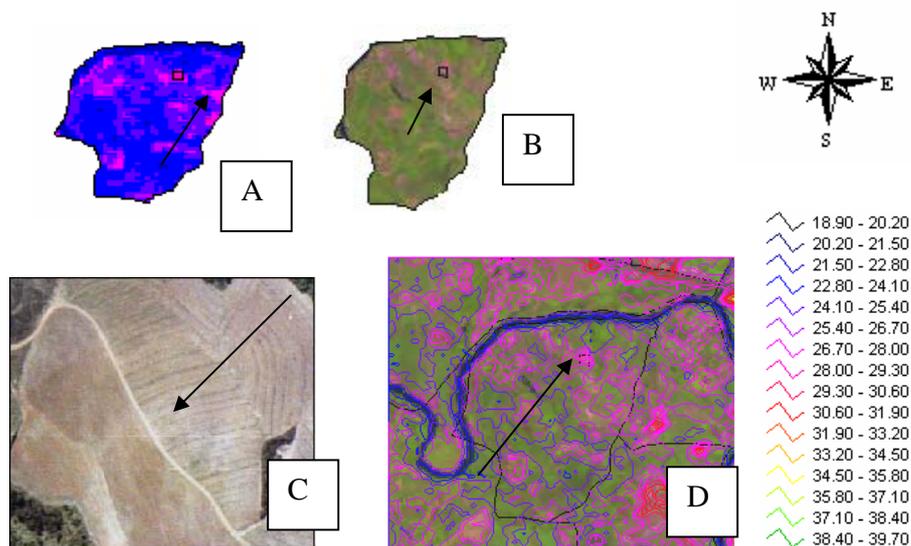


Figura 4.30 – Morfologia da IC do bairro Ondinhas. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (2) Clube de Campo

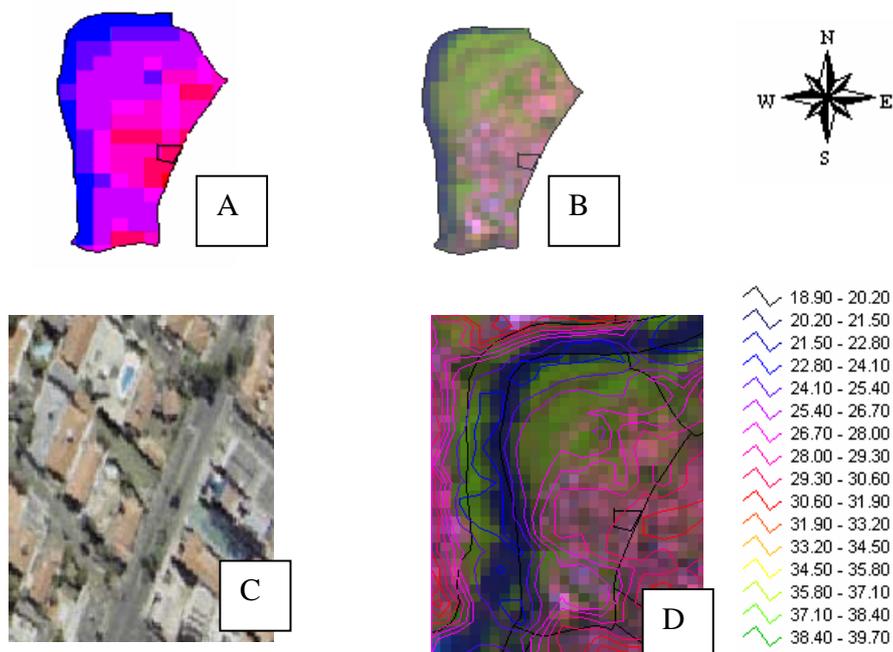


Figura 4.31 – Morfologia da IC do bairro Clube de Campo. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (3) Parque da Rua do Porto

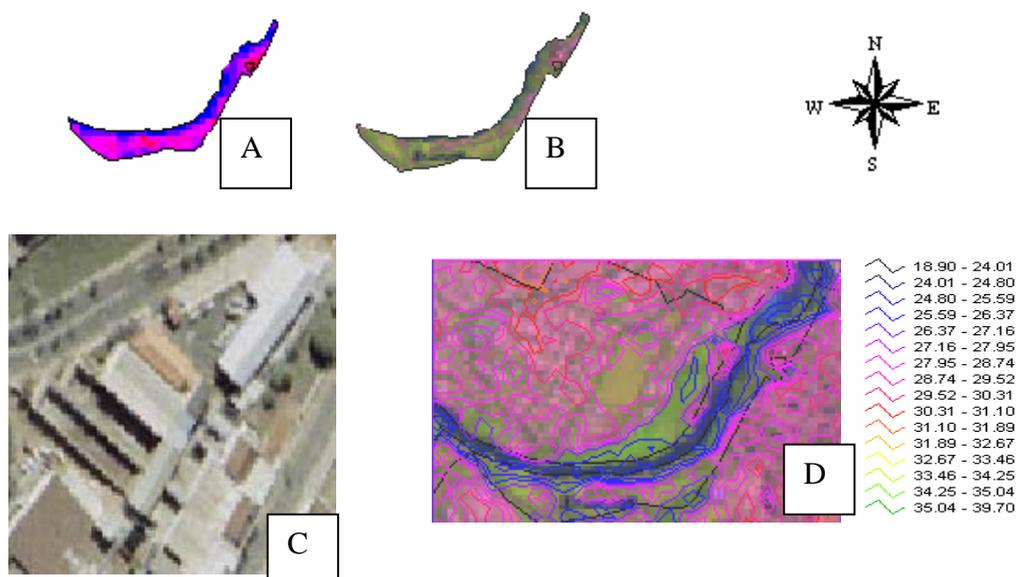


Figura 4.32 – Morfologia da IC do bairro Parque da Rua do Porto. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (4) Campestre

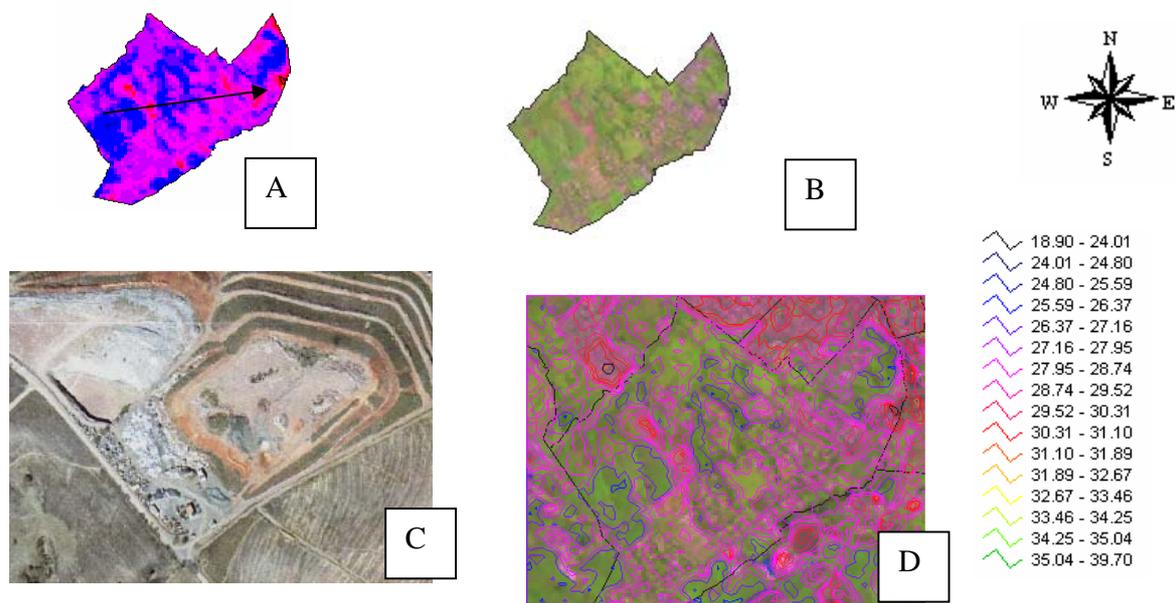


Figura 4.33 – Morfologia da IC do bairro Campestre. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (5) São Jorge

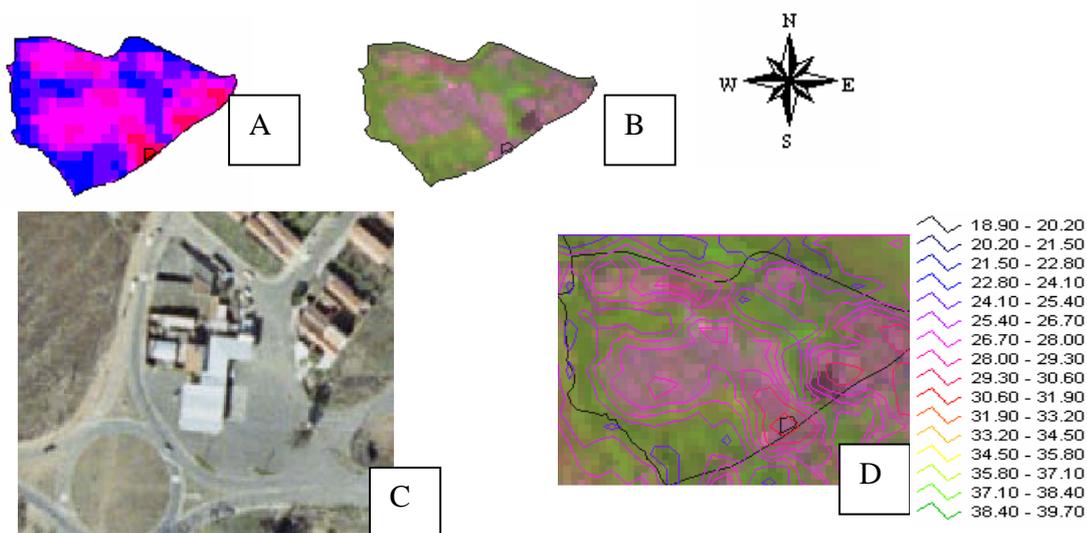


Figura 4.34 – Morfologia da IC do bairro São Jorge. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (6) Jardim Itapuã

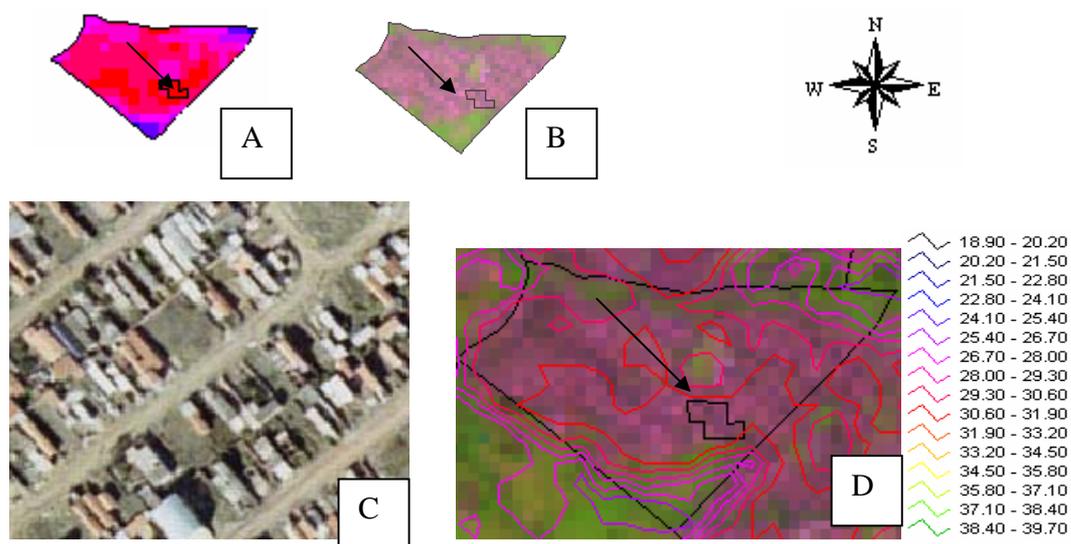


Figura 4.35 – Morfologia da IC do bairro Itapuã. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

🚧 (7) Santa Rita

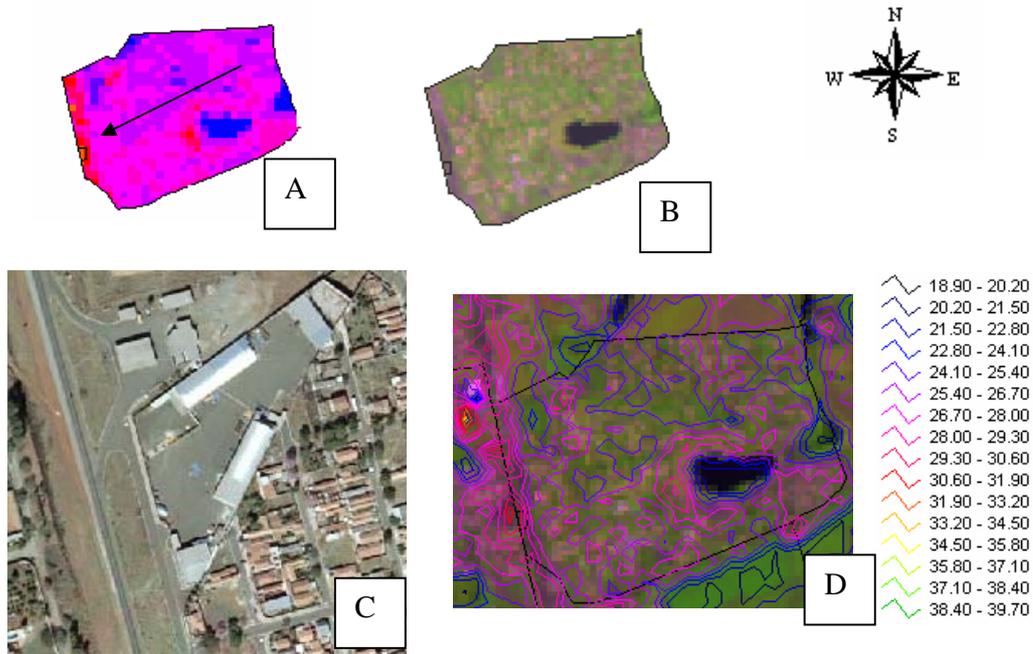


Figura 4.36 – Morfologia da IC do bairro Santa Rita. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

🚧 (8) Jardim Abaeté

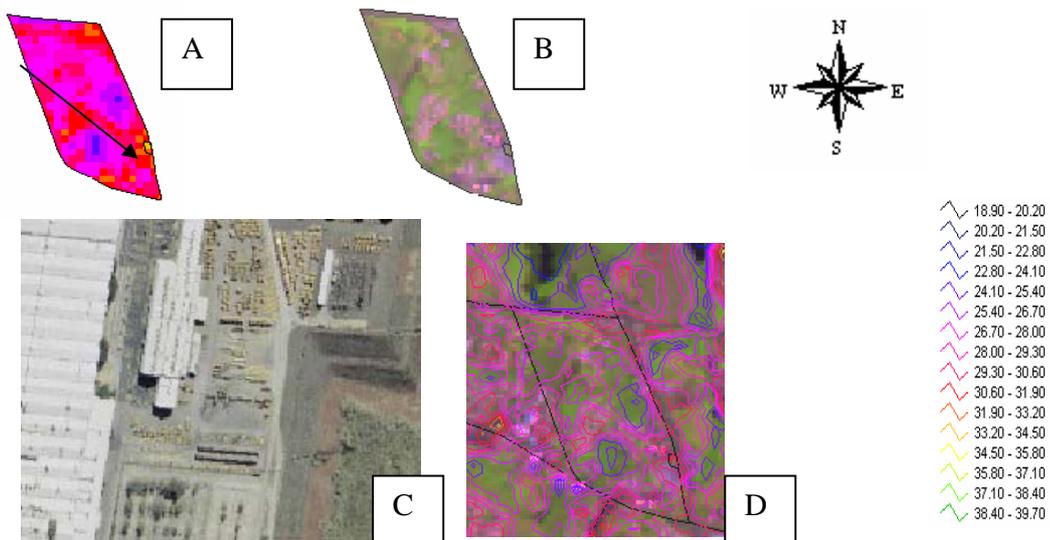


Figura 4.37 – Morfologia da IC do bairro Jardim Abaeté. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (9) São Judas

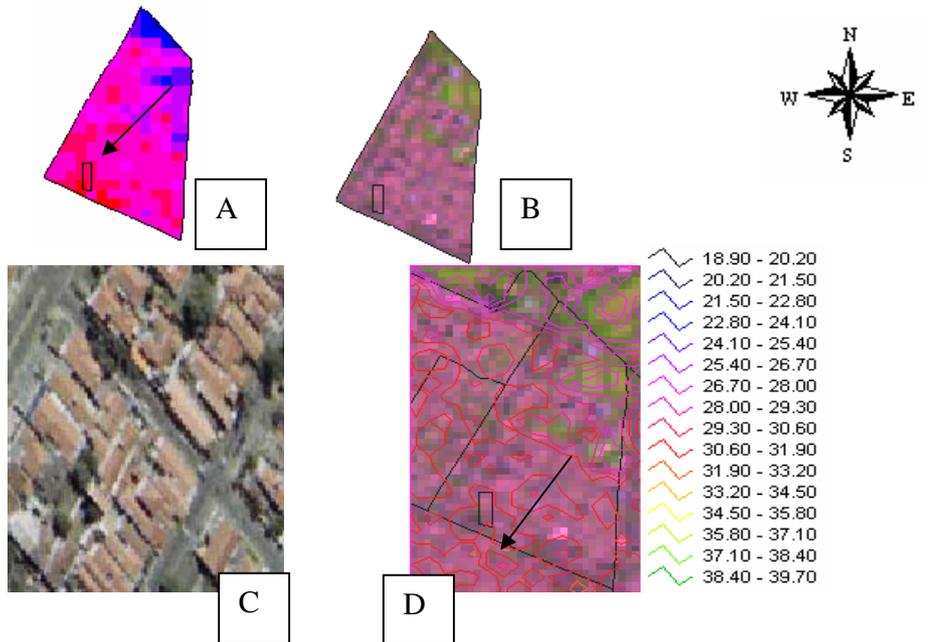


Figura 4.38 – Morfologia da IC do bairro São Judas. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

✚ (10) Guadium

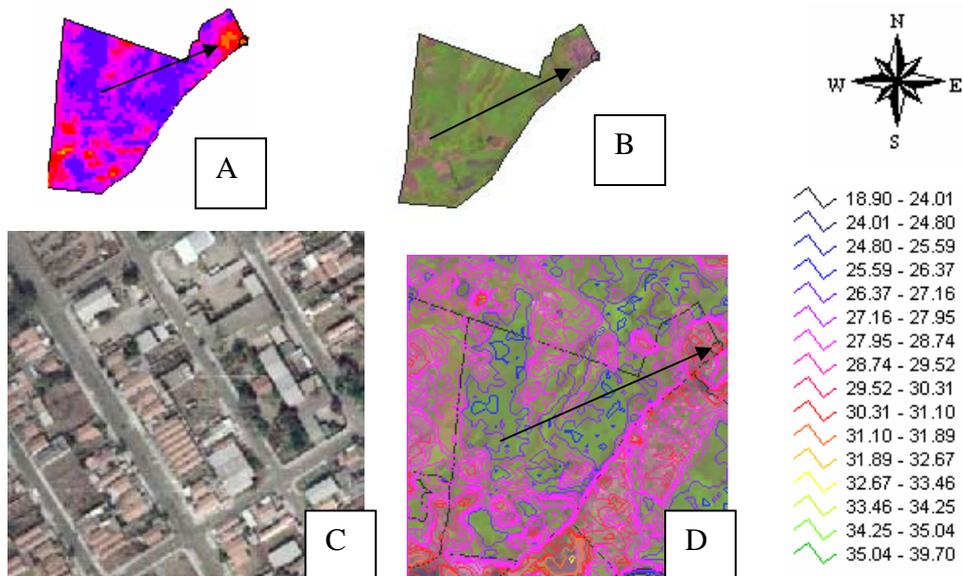


Figura 4.39 - Morfologia da IC do bairro Guadium. Em (A) a imagem termal com seta na IC, em (B) a composição das bandas 3,4 e 5, em (C) a fotografia aérea e em (D) a imagem do bairro com as isolinhas de temperatura

Em geral, as IC menos intensas localizam-se em regiões periféricas da cidade, com grande quantidade de área verde no bairro todo (neste caso entende-se por área verde não somente parques urbanos, mas também locais com vegetação, seja com cana de açúcar, pasto, áreas em regeneração). Os bairros Parque da Rua do Porto, São Judas e Clube de Campo, embora não sejam bairros de periferia, localizam-se em regiões bem arborizadas e com presença de água (Rio). Embora as IC desses bairros sejam menos intensas, sua morfologia ainda é composta por excesso de materiais de construção civil, como asfalto e telhas. O que as diferencia das IC mais intensas é a composição do bairro como um todo. Resultados semelhantes foram encontrados por LOMBARDO (1985), MENDONÇA (2003) e BRANDÃO (1996).

Diante do exposto percebe-se que são muitos os fatores que contribuem para a formação e a intensificação de IC dos bairros, e dentre eles destacam-se a quantidade de área verde do bairro, o tipo e quantidade de material de construção civil e a localização do bairro (proximidade com água e/ou com áreas verdes).

4.2.3.2 Sazonalidade das ilhas de calor

Para a identificação do comportamento das IC nas demais estações do ano, primeiramente, foi necessário identificar as mesmas coordenadas das IC encontradas nas imagens do verão nas imagens do outono, inverno e primavera. A tabela 4.5 apresenta os valores encontrados.

Tabela 4.5 – IC nas quatro estações do ano

Bairro	Loc. X	Loc. Y	(Continua)			
			T° na imagem do verão	T° na imagem do outono	T° na imagem do inverno	T°C na imagem da primavera
Vila Sônia	-47.693842	-22.67179	33.40	21.60	25.50	37.00
Sta Terezinha	-47.686127	-22.676491	34.60	22.89	25.10	38.90
Mario Dedini	-47.659278	-22.680584	32.20	20.70	24.60	35.40
Vila Industrial	-47.674675	-22.686779	34.20	22.00	23.70	37.79
Pq.Piracicaba	-47.703596	-22.67803	33.80	22.00	25.50	36.59
Vale do sol	-47.701231	-22.68143	33.40	22.39	24.60	37.40
Ondinhas	-47.692309	-22.693915	29.29	22.00	25.50	36.20
Ondas	-47.683821	-22.701562	32.59	21.10	21.10	38.20
Jupia	-47.683208	-22.711244	32.59	21.60	25.10	37.00
Glebas						
Califórnia	-47.675994	-22.723176	32.20	21.60	25.10	37.40
Morato	-47.672993	-22.725441	36.20	22.00	26.79	40.90

Tabela 4.5 – IC nas quatro estações do ano

(continuação)

Bairro	Loc. X	Loc. Y	T° na imagem do verão	T° na imagem do outono	T° na imagem do inverno	T°C na imagem da primavera
São Jorge	-47.683657	-22.749647	31.79	20.70	22.89	33.79
Novo Horizonte	47.674661	-22.760368	33.00	21.60	24.20	36.59
Campestre	-47.645457	-22.764651	31.39	21.10	24.60	35.79
Castelinho	-47.663334	-22.733665	32.59	21.60	25.50	36.59
Jaraguá	-47.665801	-22.734738	32.59	19.79	23.79	35.79
Jardim Planalto	-47.669336	-22.742829	33.00	22.00	25.50	38.50
Vila Cristina	-47.658225	-22.746471	33.00	22.39	25.10	36.59
Jardim Itapuã	-47.66104	-22.75431	31.79	20.70	24.60	34.59
Paulista	-47.659276	-22.737316	33.00	21.10	24.60	36.59
Paulicéia	-47.648594	-22.741025	35.40	23.29	25.50	39.29
Jardim Califórnia	-47.64304	-22.763529	33.40	22.39	24.60	36.59
Água Branca	-47.62586	-22.755327	33.40	22.00	24.60	36.59
Jardim Caxambu	-47.635192	-22.750413	33.00	22.89	24.60	37.00
Bairro Verde	-47.642423	-22.748708	33.79	22.89	25.50	37.00
Higienópolis	-47.641241	-22.738749	32.59	21.60	24.60	35.00
Centro	-47.645491	-22.720895	35.40	20.70	24.60	38.20
Cidade Alta	-47.646107	-22.729416	34.59	22.00	25.10	37.00
Jardim Elite	-47.640675	-22.7399	32.59	21.10	23.79	35.40
Nova América	-47.631153	-22.741211	33.40	22.39	24.60	37.00
Piracicamirim	-47.626514	-22.73945	33.00	22.00	24.60	35.79
Vila Monteiro	-47.630431	-22.734798	33.40	22.39	25.10	37.79
Morumbi	-47.628317	-22.737625	36.59	21.60	25.10	38.20
Pompéia	-47.598936	-22.753384	35.40	19.79	21.10	40.90
Cecap	-47.592994	-22.774127	33.00	20.70	25.50	38.50
Taquaral	-47.591341	-22.782951	34.59	19.79	25.50	38.50
Jd. São Francisco	-47.591072	-22.764365	32.60	21.60	24.60	37.00
Santa Rita	-47.595918	-22.758923	32.20	22.00	25.50	34.59
Dois Córregos	-47.608491	-22.73812	33.79	19.79	24.20	33.79
Conceição	-47.576868	-22.742701	33.00	19.79	24.60	38.20
Unileste	-47.58704	-22.726525	39.70	19.79	22.00	43.09
Jardim Abaeté	-47.602537	-22.731129	32.20	21.10	24.20	37.00
Monte Alegre	-47.603179	-22.703392	35.40	18.89	23.79	40.50
Santa Cecília	-47.614416	-22.728864	34.20	22.39	24.20	33.79
V. Independência	-47.628116	-22.72109	33.79	22.00	24.60	36.59
São Judas	-47.637926	-22.720027	32.20	21.60	24.60	36.20
Cidade Jardim	-47.640743	-22.714978	32.60	21.10	23.80	36.59
São Dimas	-47.640439	-22.713327	33.00	20.70	22.89	37.00
Clube de Campo	-47.646633	-22.711126	30.10	19.79	24.20	34.59
Agronomia	-47.618041	-22.71166	33.00	21.60	25.90	37.00
Nova Piracicaba	-47.665452	-22.715066	33.00	21.60	25.10	37.40
Monumento	-47.663478	-22.709832	33.79	21.10	25.10	37.40
Vila Rezende	-47.649189	-22.703673	35.40	21.60	24.60	42.00
Nhoquim	-47.66653	-22.705493	33.79	21.60	25.10	38.50

Tabela 4.5 – IC nas quatro estações do ano

Bairro	Loc. X	Loc. Y	(conclusão)			
			T° na imagem do verão	T° na imagem do outono	T° na imagem do inverno	T°C na imagem da primavera
Algodoal	-47.66157	-22.697789	33.79	20.70	24.60	36.59
Jardim Primavera	-47.656691	-22.697345	37.79	24.20	29.70	43.09
Areião	-47.639383	-22.691014	34.20	18.39	26.29	39.70
Vila Fátima	-47.657453	-22.69168	33.79	21.60	24.20	37.40
Guamium	-47.622954	-22.667324	32.20	20.70	24.20	36.20
Santa Rosa	-47.611353	-22.684491	33.00	22.89	28.00	38.50
Pq. da Rua do Porto	-47.651935	-22.71896	30.90	21.10	23.29	33.79
Monte Líbano	-47.65196	-22.75102	33.00	21.10	25.10	36.59

A média de todas as IC de cada estação do ano foi:

- ✚ Média IC verão: 33.42°C
- ✚ Média IC outono: 21.40°C
- ✚ Média IC inverno: 24.71°C
- ✚ Média IC primavera: 37.24°C

Verificou-se, então, que as IC da primavera eram, aproximadamente, 3.81°C mais intensas que as do verão e, as IC do inverno eram 3.3°C mais intensas que as do outono. Estes resultados podem ser explicados com base na sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar. Na época da entressafra (estações de inverno e primavera) as IC são, em média, 3.5°C mais intensas que as IC da época de safra (estações de verão e outono). Observando as imagens de satélite das quatro estações do ano verifica-se que, de fato, a imagem da primavera (entressafra) apresenta valores de temperatura de superfície superiores à do verão (safra) e, a imagem do inverno (entressafra) à do outono (safra).

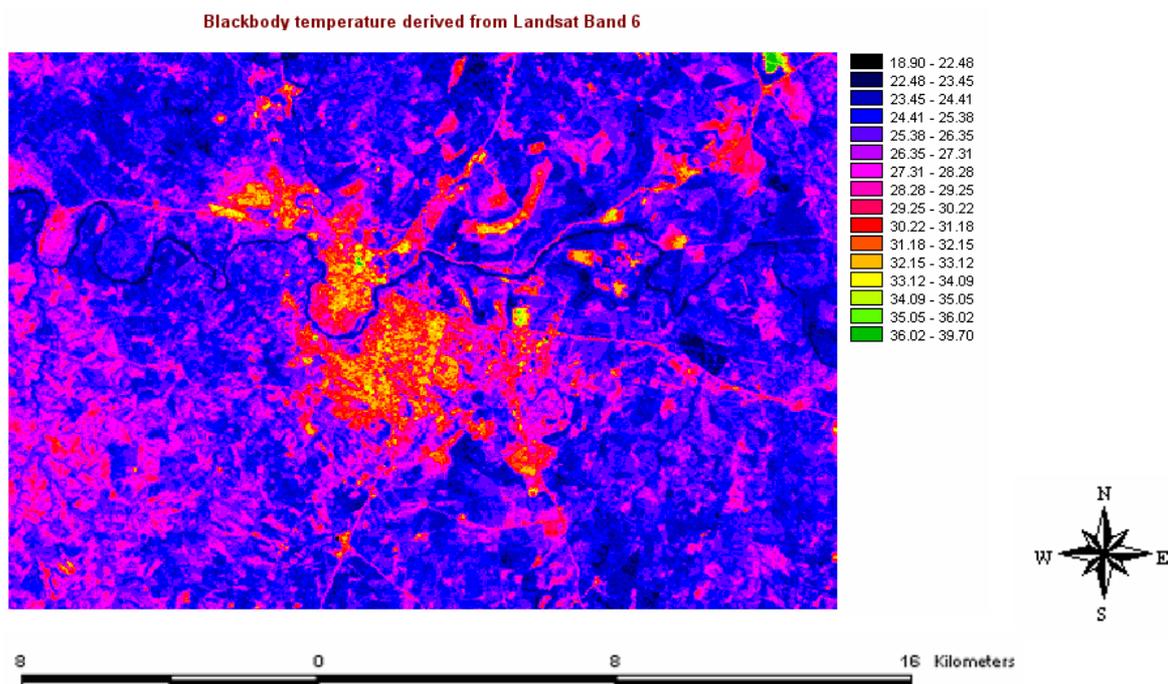


Figura 4.40 – Imagem da banda termal do satélite Landsat 7 do dia 08/01/2003 (verão/ safra) com temperatura aparente de superfície. Projeção Latitude e Longitude. Datum: WGS 84

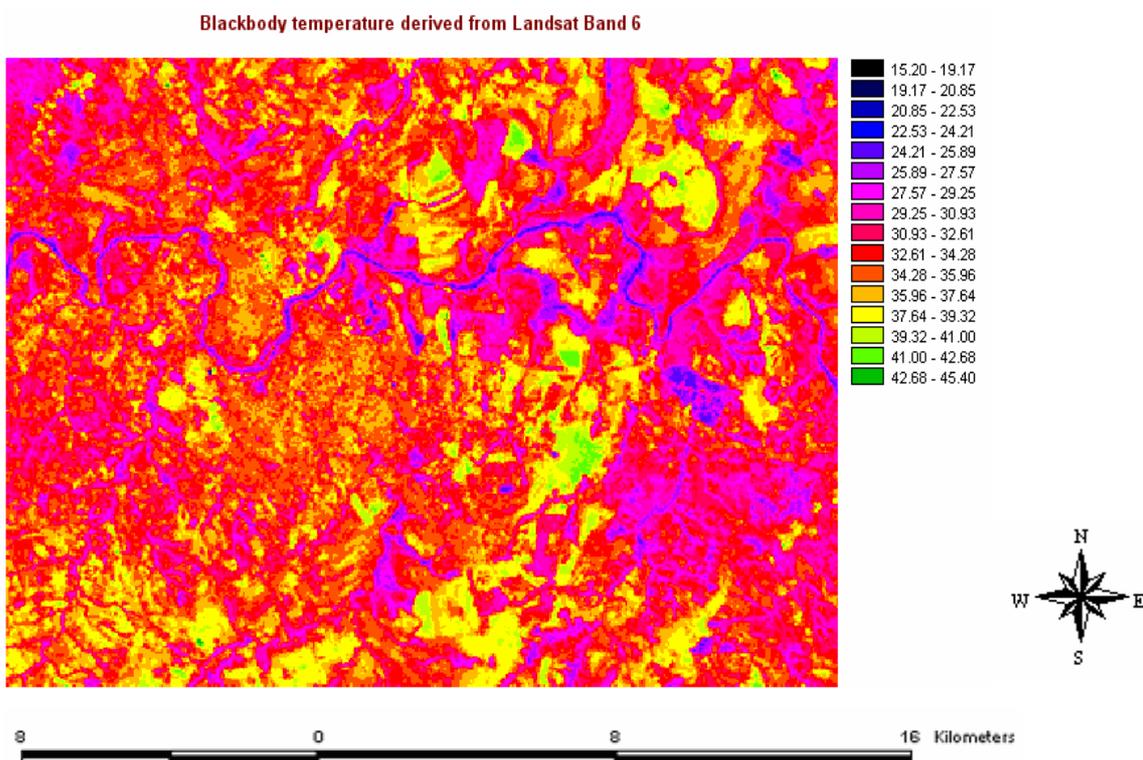


Figura 4.41 – Imagem da banda termal do satélite Landsat 7 do dia 29/11/1999 (primavera/ entressafra) com temperatura aparente de superfície. Projeção Latitude e Longitude. Datum: WGS 84

A figura 4.44 apresenta o comportamento da intensidade das IC nas quatro estações do ano:

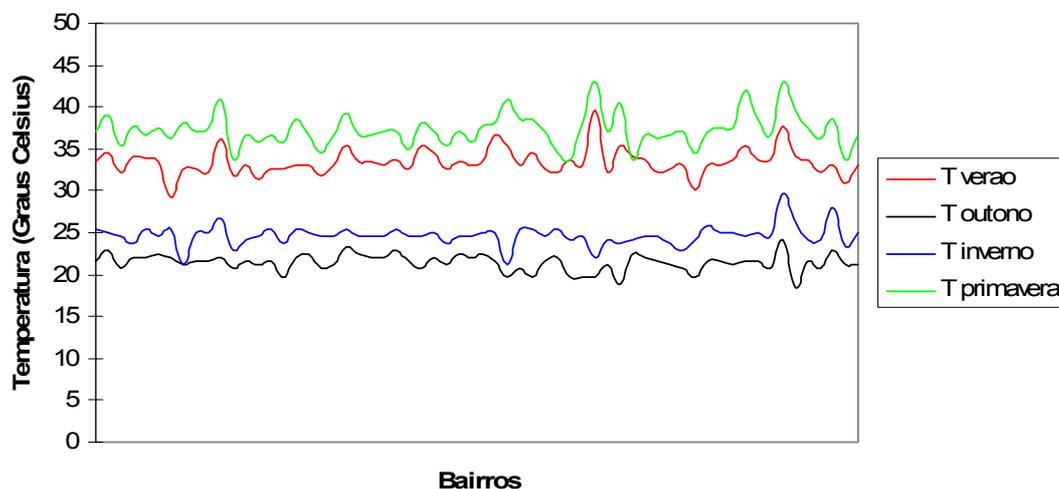


Figura 4.44 – Comportamento das IC nas quatro estações. Em verde a temperatura (°C) das IC do primavera, em vermelho a temperatura (°C) as IC do verão, em azul a temperatura (°C) do inverno e em preto a temperatura (°C) das IC do outono

Verificando as condições meteorológicas do dia das imagens (tabela 4.6) nota-se que as condições de verão e primavera, com exceção dos ventos, são bem parecidas e, o dia de inverno se caracterizou por ser mais frio que o de outono (temperaturas máxima, média e mínima são menores) e mais seco (umidade relativa menor).

Tabela 4.6 – Condições meteorológicas dos dias das imagens

Época	R. Global	Insolação	Precipitação	Umidade Relativa	Vento Máximo	Vento médio	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Evaporação
	(cal/cm ²)	(h/d)	(mm)	(%)	(m/s)	(km/s)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Média (°C)	
Verão	551	12	0	68	4.5	5.3	32.3	17.2	24.8	6.55
Outono	395	6.8	0	75	4.7	5.2	31	16.2	23.6	3.8
Inverno	415	8.3	0	50	6.2	5.6	28.4	13.8	21.1	3.35
Primavera	573	11.0	0	67	11.2	11.7	32.8	16.2	24.5	5.74

A forte intensidade do fenômeno no inverno e na primavera se deu, principalmente, devido às condições do entorno da cidade. Observando as imagens de satélite classificadas notou-se que os meses de inverno e de primavera eram entressafra da cultura da cana-de-açúcar,

portanto a área rural do município estava com grande quantidade de solo exposto. As figuras 4.45 (verão), 4.46 (outono), 4.47 (inverno) e 4.48 (primavera) mostram as imagens classificadas. A Tabela 4.7 apresenta os valores, em porcentagem, de distribuição de cada uma das classes em cada uma das estações.

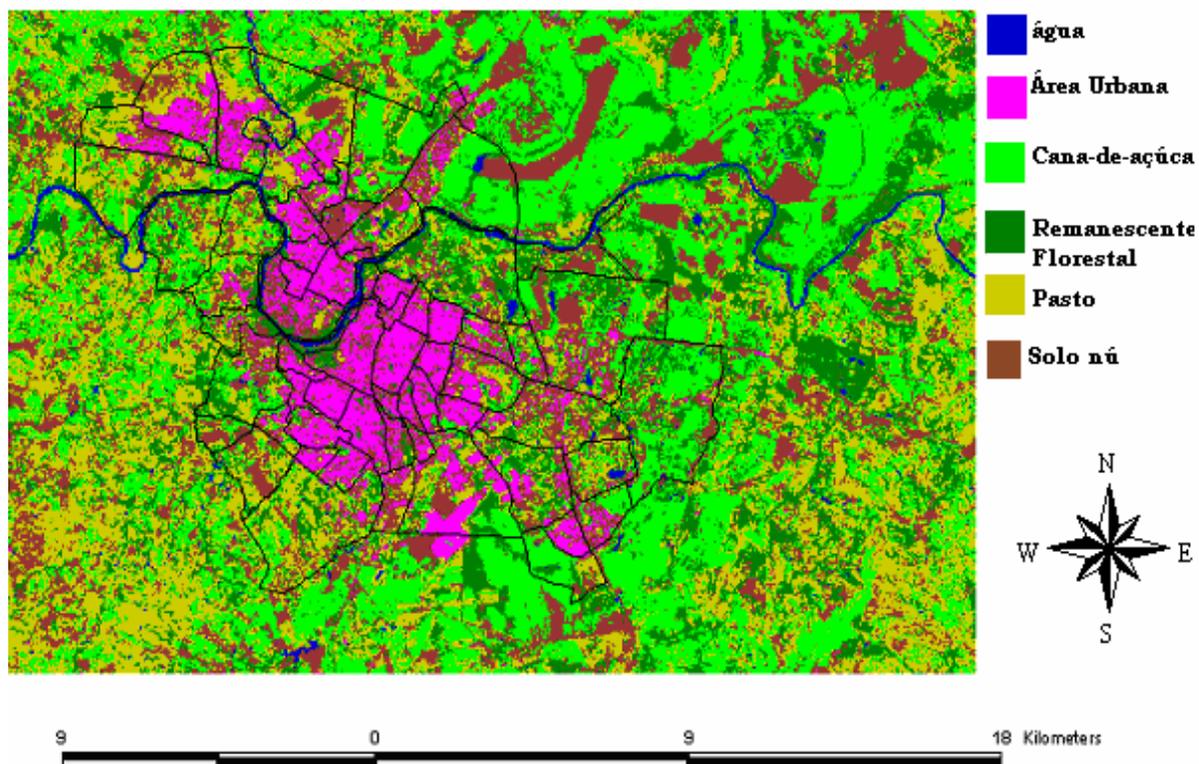


Figura 4.45 – Imagem Landsat 7 (bandas 3,4 e 5) classificada da estação de Verão (08/01/2003). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude. Esquerda = Legenda

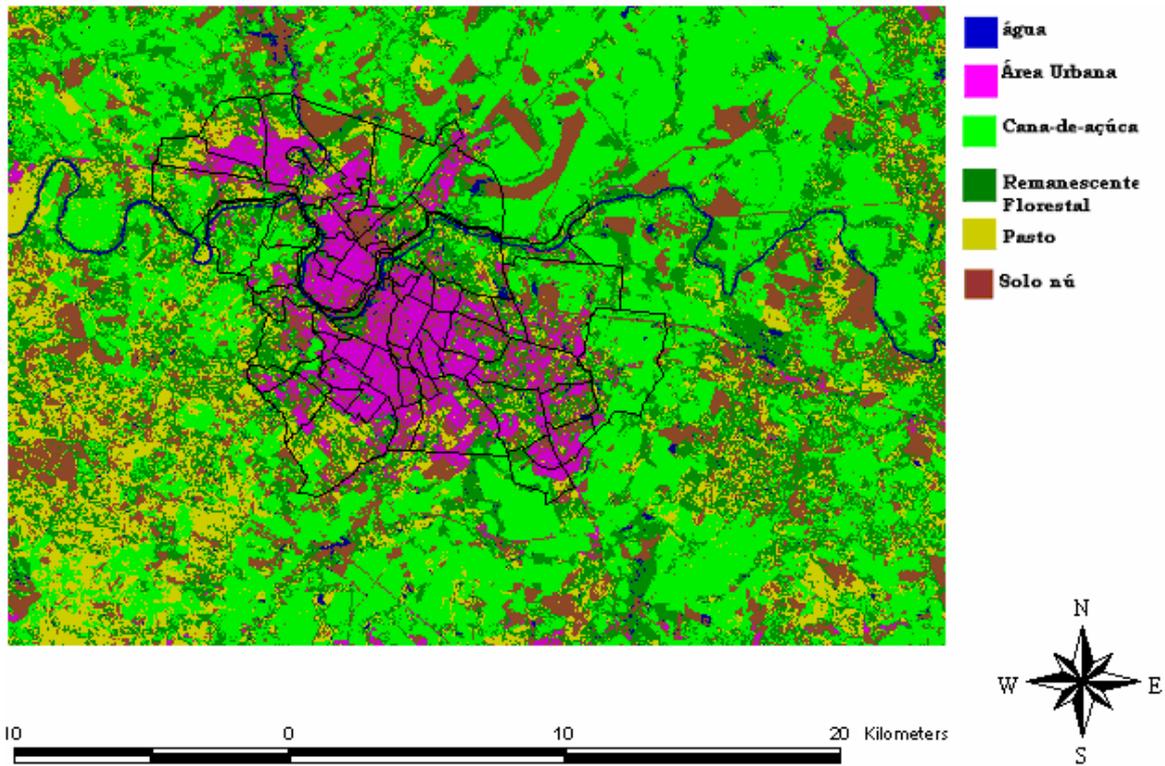


Figura 4.46 – Imagem Landsat 7 (bandas 3,4 e 5) classificada da estação do outono (30/04/2003). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude

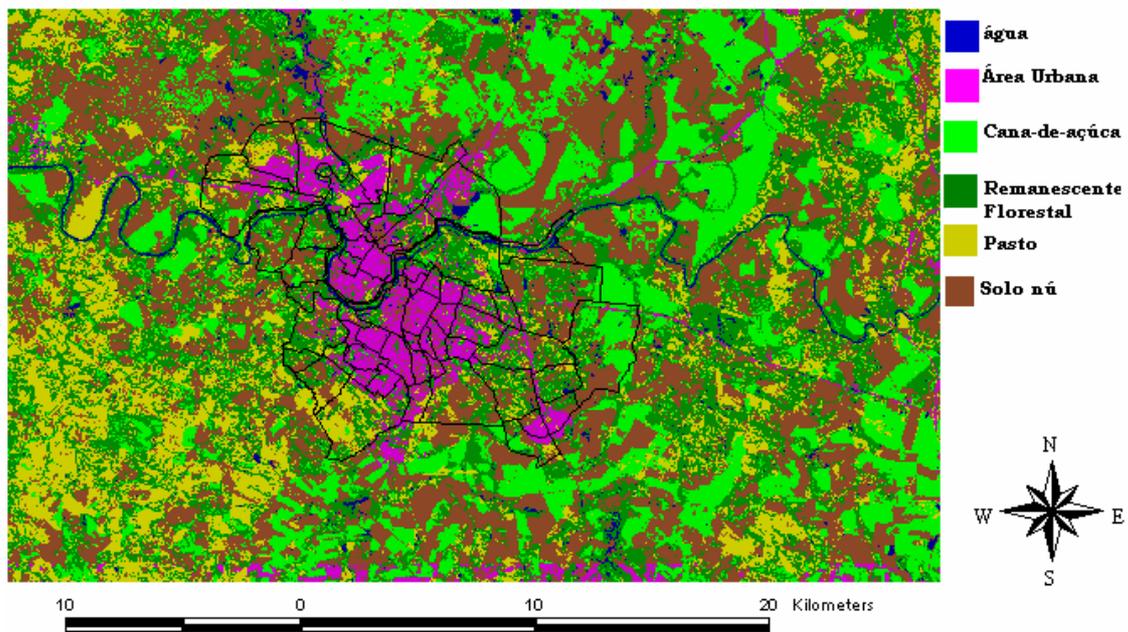


Figura 4.47 – Imagem Landsat 7 (bandas 3,4 e 5) classificada da estação de Inverno (17/08/2002). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude

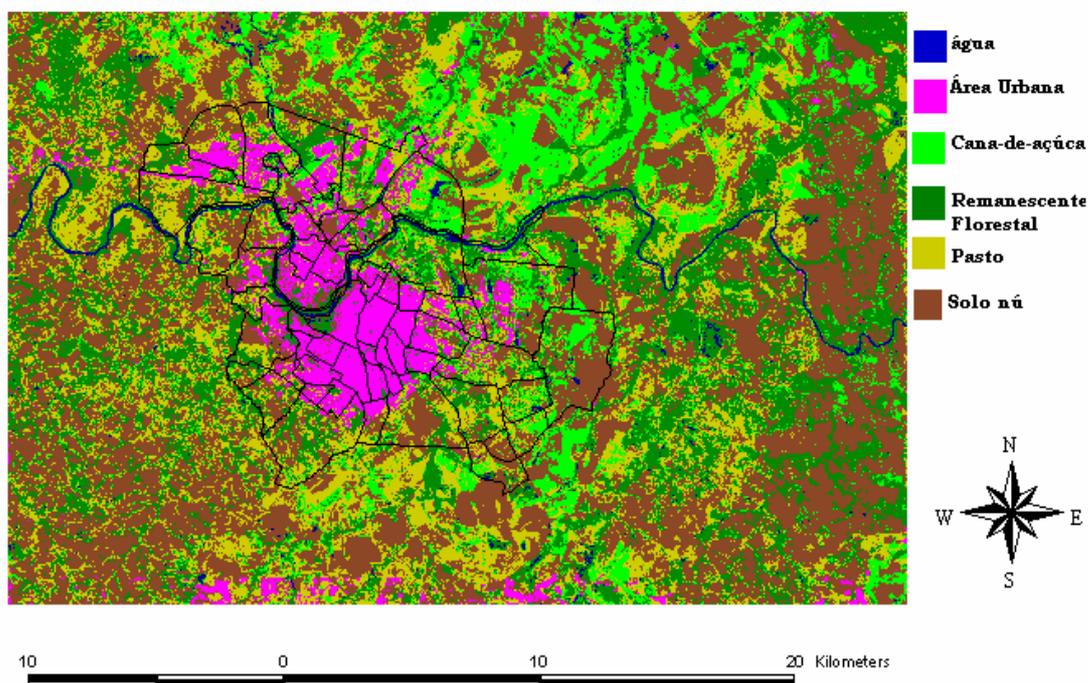


Figura 4.48 – Imagem Landsat 7 (bandas 3,4 e 5) classificada da estação da Primavera (29/11/1999). Datum: WGS 84, Projeção: Latitude e Longitude

Tabela 4.7 – Distribuição das classes (%) de uso do solo nas quatro estações do ano.

Classe	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Água	1.518%	1.585 %	1.895 %	1.498 %
Área Urbana	6.359%	5.579 %	5.358 %	5.825 %
Cana-de-açúcar	31.293%	41.708 %	22.463 %	12.11 %
Remanescente Florestal	17.822%	22.326 %	22.388 %	20.507 %
Pasto	22.432%	12.992 %	13.986 %	20.068 %
Solo Nú	20.575%	15.809 %	33.9 %	39.891 %

MONTEIRO e MENDONÇA (2003) explicam que a geografia circunvizinha à cidade desempenha papel mais preponderante na formação de seu clima urbano quanto menor ela for. Trata-se, em muitos casos de microclimas urbanos pontuados dentro de um clima de floresta, de um clima de montanha ou de um clima de área agrícola.

No caso de Piracicaba a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar influencia diretamente na intensidade das ilhas de calor e, conseqüentemente, no microclima urbano. A área urbana de Piracicaba é um microclima dentro de um clima de área agrícola (devido à extensa área cultivada

com a cultura da cana-de-açúcar). Nesse sentido, vale ressaltar que o estudo do clima de cidades de médio e pequeno porte deve levar em consideração a abordagem geográfica detalhada tanto do fator urbano quanto da área rural contígua (MENDONÇA, 2000).

Conforme observado nas imagens de satélite classificadas, grande parte do solo rural fica exposto na época de entressafra (39.8% na primavera e 33.9% no inverno). Nessas condições de solo exposto modifica-se a inércia térmica do solo e o processo de calor sensível que se desenvolve sobre ele intensifica o aquecimento atmosférico. Esse aquecimento é transportado pelos ventos para a cidade, ou seja, o balanço de energia modifica-se drasticamente.

BASTIAANSSEN (1995) propôs um algoritmo de balanço de energia para superfície continental com emprego de suposições empíricas que representariam as questões do fluxo de calor no solo. Para o autor, o fluxo de calor no solo é determinado em função do índice de vegetação, da radiação líquida e da temperatura e albedo da superfície. Segundo esse algoritmo a relação solo exposto / temperatura é inversamente proporcional, ou seja, em solos cobertos por vegetação a temperatura é baixa e em solos expostos, sem nenhuma vegetação, a temperatura é alta. Nesse sentido, em época de entressafra, o excesso de solo exposto causaria um aumento da temperatura e os ventos transportariam esse calor para a cidade. A cidade, que ainda estoca calor devido as diferentes propriedades dos materiais que a constituem, recebe esse ar mais quente vindo da área rural, e, como consequência, se aquece mais, intensificando, assim, as ilhas de calor. Resultados semelhantes foram encontrados por MENDONÇA (2003) estudando o clima de Londrina.

PIELKE e AVISSAR (1990) descreveram esse processo de fluxo de calor em solo exposto e em solo vegetado. De acordo com estes autores, a vegetação limita o aumento da temperatura da superfície e do ar pelo equilíbrio das energias de entrada e de saída do sistema. Nas áreas vegetadas a rugosidade da superfície influencia o fluxo de calor.

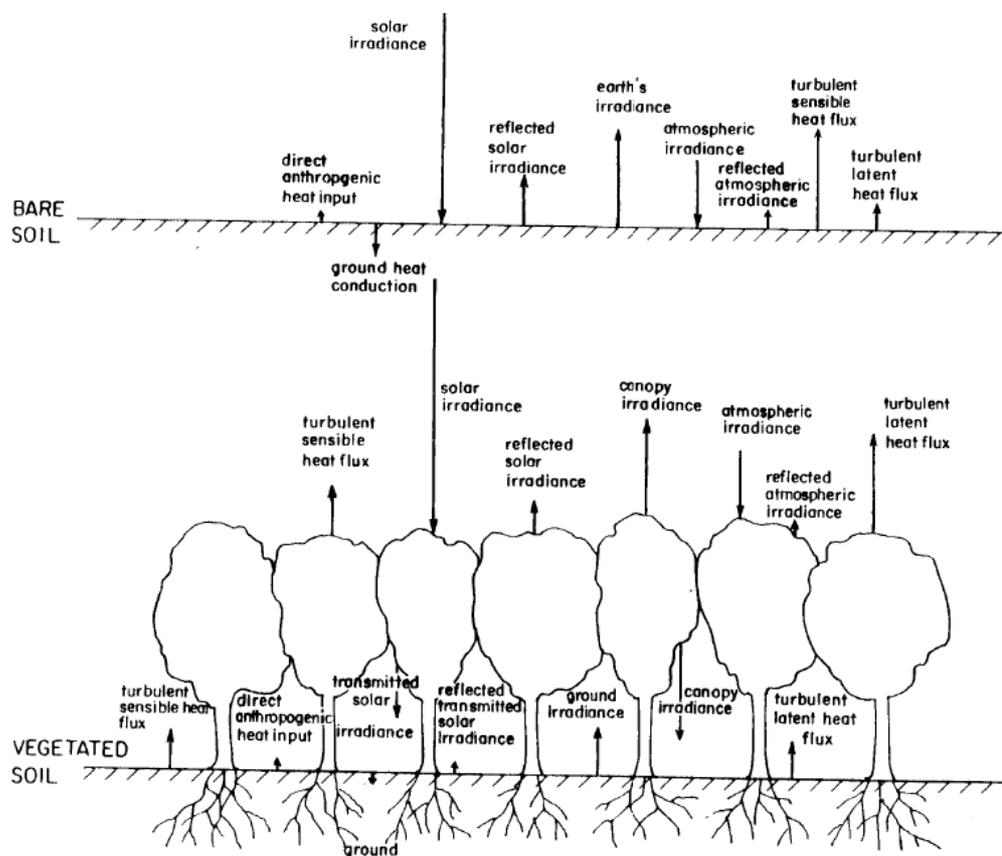


Figura 4.49 – Balanço energético em solos expostos (“bare soil”) e solos vegetados (“vegetated soil”)¹⁸

Em algumas cidades, a influência da área circunvizinha é tão forte que a cidade se torna uma Ilha de Frescor em relação ao meio rural, caso constatado por CARNAHAN e LARSON (1990) em Indiana (EUA).

Outro fator importante a ser ressaltado é que, nas análises das imagens da banda termal das quatro épocas do ano verificou-se que nem sempre as IC da primavera, outono e inverno estavam no mesmo lugar que as IC do verão. Assim, para cada bairro, localizou-se o ponto mais quente (IC) em cada estação do ano. A tabela 4.8 apresenta a temperatura de superfície das IC dos bairros da cidade nas quatro estações do ano.

¹⁸ Fonte: PIELK e AVISSAR (1990).

Tabela 4.8 – IC nas estações do ano

(continua)

Bairro	T°C IC do verão	T°C IC do outono	T°C IC do inverno	T°C IC da primavera
Agronomia	33.00	22.00	28.89	40.90
Água Branca	33.40	22.89	26.79	42.00
Algodual	33.79	21.60	26.29	38.90
Areião	34.20	22.00	27.60	42.79
Bairro Verde	33.79	22.89	26.79	37.40
Campestre	31.39	22.39	27.60	40.90
Castelinho	32.59	22.89	27.60	38.20
Cecap	33.00	21.60	25.50	38.50
Centro	35.40	23.39	26.29	39.29
Cidade Alta	34.59	22.00	25.50	38.20
Cidade Jardim	32.60	21.60	24.60	36.59
Clube de campo	30.10	19.79	24.20	35.79
Conceição	33.00	21.60	28.00	42.40
Dois Córregos	33.79	21.60	27.20	42.00
Glebas Califórnia	32.20	21.60	25.10	38.50
Guamium	32.20	23.79	27.60	40.09
Higienópolis	32.59	22.00	24.60	35.00
Jaraguá	32.59	21.60	25.89	38.50
Jardim Abaeté	32.20	21.60	25.89	39.70
Jardim Califórnia	33.40	22.39	26.29	40.09
Jardim Caxambu	33.00	22.89	25.50	38.50
Jardim Elite	32.59	21.60	25.10	36.59
Jardim Itapuã	31.79	21.60	25.10	36.59
Jardim Planalto	33.00	22.00	25.50	38.50
Jardim Primavera	37.79	24.20	29.70	43.50
Jd. São Francisco	32.60	22.39	27.20	39.29
Jupia	32.59	21.60	27.20	39.70
Mario Dedini	32.20	21.60	25.10	37.40
Monte Alegre	35.40	19.79	26.79	40.50
Monte Líbano	33.00	21.10	25.50	39.79
Monumento	33.79	21.10	25.89	37.40
Morato	36.20	22.89	29.29	41.59
Morumbi	36.59	22.39	25.50	38.90
Nhoquim	33.79	21.60	25.89	39.29
Nova América	33.40	22.89	25.50	40.50
Nova Piracicaba	33.00	21.60	25.50	39.70
Novo Horizonte	33.00	21.60	26.29	40.50
Ondas	32.59	22.00	25.89	39.29
Ondinhas	29.29	22.00	26.79	38.90
Pq. da Rua do Porto	30.90	21.10	23.29	37.79
Parque Piracicaba	33.80	22.00	26.79	38.20
Paulicéia	35.40	23.29	26.29	39.29
Paulista	33.00	21.60	25.50	37.40
Piracicamirim	33.00	22.89	27.20	38.90
Pompéia	35.40	21.60	26.29	40.90
Santa Cecília	34.20	22.39	25.50	38.90
Santa Rita	32.20	22.00	26.29	39.70

Tabela 4.8 – IC nas diferentes estações do ano

Bairro	(conclusão)			
	T° IC do verão	T° C IC do outono	T° C IC do inverno	T° C IC da primavera
Santa Rosa	33.00	22.89	28.00	39.70
São Dimas	33.00	21.60	24.20	37.40
São Jorge	31.79	22.30	25.50	38.50
São Judas	32.20	21.60	24.60	39.70
Sta Terezinha	34.60	23.29	27.20	38.90
Taquaral	34.59	21.60	26.29	39.29
Unileste	39.70	22.00	28.89	43.09
Vale do sol	33.40	22.39	27.60	39.29
Vila Cristina	33.00	22.39	25.50	36.59
Vila Fátima	33.79	22.39	26.79	37.79
Vila Independência	33.79	22.00	24.60	37.79
Vila Industrial	34.20	22.00	25.50	40.09
Vila Monteiro	33.40	22.39	25.10	38.20
Vila Rezende	35.40	22.00	25.89	42.00
Vila Sonia	33.40	22.39	27.60	37.40

A média das IC mais intensas de cada estação foi:

- ✚ Verão: 33.42°C
- ✚ Outono: 22.06°C
- ✚ Inverno: 26.25°C
- ✚ Primavera: 39.17°

Através das médias calculadas nota-se que as IC da primavera são, em média, 5.74°C mais intensas que as do verão e, as IC do inverno são, em média, 4.18°C mais intensas que as do outono. Isso significa dizer que as IC da época da safra da cultura da cana-de-açúcar são, em média, 4.96°C mais intensas que as IC da época da entressafra. No caso da primavera, verifica-se que, além da alta quantidade de solo exposto, as condições atmosféricas do dia favoreceram ainda mais a intensificação das IC, pois, a velocidade do vento e as temperaturas estavam elevadas.

De acordo com ORGAZ e PINHO (2000), as IC variam temporal e espacialmente e essa variação se deve, principalmente aos fluxos de calor que se modificam com as estações do ano, com as condições meteorológicas e com o uso e cobertura do solo urbano e rural (PEREZ et al., 2001).

4.2.3.3 Diferença da Temperatura Rural e Urbana

Através da fórmula adaptada de CAMILLONI e BARROS (1997), foi calculada a diferença de temperatura entre a área urbana e rural do local de estudo para as quatro estações do ano. Encontrou-se que no verão essa diferença foi de 16.81°C; no outono, 4.41°C, no inverno, 9.2°C e na primavera, 13.81°C.

No verão, a diferença encontrada foi maior do que a maioria dos estudos de áreas urbanas e no outono, bem menor. Essas diferenças entre as estações se devem, principalmente, ao balanço de energia das estações do ano e da área rural. As diferenças encontradas na época da entressafra são menores que as do verão não porque a cidade se “resfriou” mas porque a área rural se “aqueceu” devido à baixa presença de vegetação. Já no outono, a conjunção de um dia com tempo mais ameno e a alta quantidade de vegetação no campo fez com que a cidade se “resfriasse”, chegando a valores de temperatura próximos ao do campo. SISMANOGLU e PRATES (1997) explicam que mecanismos físicos como transporte de “momentum”, e calor latente e sensível da superfície para a atmosfera são drasticamente modificados na presença de vegetação, pois o solo vegetado reflete menos (absorve mais) radiação solar e emite menos radiação de onda longa, fato esse que provocou essas diferenças encontradas. Segundo VOOGT e OKE (1997), a cobertura vegetal é um filtro ativo das trocas entre dois reservatórios (o solo e a atmosfera) e a ação desse filtro dependerá do estado dos reservatórios e do tempo.

Por fim vale ressaltar que as características de superfície da paisagem (uso e cobertura do solo) não afetam somente o clima local e regional; aparentemente elas também têm um forte impacto no clima global (PIELKE e AVISSAR, 1990). Diversos experimentos numéricos usando modelo de circulação global têm demonstrado esse fenômeno (CARSON e SANGSTER, 1981; MIYAKODA e STRICKLER, 1981; SHUKLA e MINTZ, 1982; CHARNEY et al., 1997). Assim, é de extrema importância a conscientização desses problemas tanto à população quanto aos órgãos públicos, assim como a continuidade de pesquisas que atentem a esse fator.

4.3 Conclusões e Considerações Finais

No presente trabalho conclui-se que cidades de médio e pequeno porte devem ter um estudo climático diferenciado daquelas de grande porte, pois as áreas vizinhas dessas cidades têm forte influência no clima urbano, como é o caso de Piracicaba. A intensidade das IC do Município está intimamente ligada a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar uma vez que as

temperaturas encontradas na época da entressafra são superiores às encontradas na época da safra. Quando se segue a base das coordenadas das IC do verão, as IC da época de entressafra são, em média, 3.5°C mais intensas que as IC da época de safra; e, quando se segue a base de cada uma das estações, as IC da época da entressafra são, em média, 4.96°C mais intensas que as IC da época de safra. Assim, para a cidade de Piracicaba, as IC mais intensas aconteceram na primavera, e não no verão.

Os bairros com as IC mais intensas da cidade não coincidem com o perfil clássico de Ilhas de Calor traçado por OKE (1974); assim, o centro da cidade de Piracicaba não é o bairro mais quente. O Parque da rua do Porto é caracterizado como uma IF e ameniza a temperatura do centro e dos bairros circunvizinhos. A amplitude térmica das IC dos bairros da cidade chegou a 10°C. As IC mais intensas do verão caracterizam por estarem em locais com excesso de material de construção civil (principalmente telhas e asfalto) e pouca ou nenhuma área verde.

A diferença entre as temperaturas rural e urbana variou nas imagens estudadas. Encontrou-se que no verão essa diferença foi de 16.81°C; no outono, 4.41°C, no inverno, 9.2°C e na primavera, 13.81°C, e isso se deve ao balanço de energia das estações do ano e da área rural.

O sensoriamento remoto é uma importante ferramenta para esse tipo de estudo, uma vez que permite visões em diferentes escalas. A conjunção de imagens de satélite e de fotografias aéreas foi satisfatória. A utilização de bandas térmicas é de muita utilidade para estudos de comportamento térmico, pois há a possibilidade de se observar a distribuição espacial da temperatura da superfície.

Diante do exposto é necessário a continuidade de estudos dessa natureza e estes devem, necessariamente, ser incluídos no planejamento urbano. Além disso, visto que a sazonalidade da cana de açúcar, principal cultura agrícola do Município, influencia diretamente no bem estar e no conforto da população, é necessário uma conjunção entre os planos diretores urbanos e rurais a fim de evitar épocas do ano com grande quantidade de solo exposto.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO, M.J. **O clima na região de Lisboa – contrastes e ritmos térmicos**. Lisboa: Tipografia Guerra-Viseu, 1993. 347p.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and urban heat island. **International Journal of Climatology**, Oxford, v.23, n.1, p.1-26, 2003.
- AZEVEDO, T.R.; TARIFA, J.R. **O ritmo semanal das atividades humanas e o clima na região metropolitana de São Paulo**. Laboratório de Climatologia e Biogeografia. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, série TA – Texto 008, 2001.
- BALLING, R.C.; BRAZELL, S.W. High resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.54, s.n, p.1289-1293, 1988.
- BARBIN, H.S. **Histórico da evolução do uso do solo e estudo dos espaços livres públicos de uma região do Município de Piracicaba, SP**. 2003. 196p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- BASTIAANSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite Terrain. **A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate**. 1995.273p. (Thesis) - Wageningen Agricultural University, Wageningen. The Netherlands, 1995.
- BIAS, E. S.; BAPTISTA, G.M.M.; LOMBARDO, M.A. Análise do fenômeno de Ilhas de Calor urbana por meio de combinação de dados Landsat e Ikonos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003. Belo Horizonte. **Anais...**, Belo Horizonte: INPE, 2003. p.1741-1748.
- BRADLEY, G.A. Urban Forest Landscapes: integrating multidisciplinary perspectives. In: BRADLEY (Ed.). **Urban Forest Landscapes: integrating multidisciplinary perspectives**, Seattle and London, University of Washington Press, Seattle, 1995. p.03-11.
- BRANDÃO, A.M.P.M. **O Clima urbano no planejamento da cidade**. Ciclo de palestras Ambientais. CMA, Rio de Janeiro, junho 1999.
- BRANDÃO, A.M.P.M. **O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 362p. Tese (Doutorado) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- BRISTOW, R.S.; MULLENS, J.B. Environmental geography education: urban heat islands. **Geography and Regional Planning**, Westfield, 1995.128p.

CAMILLONI, I.; BARROS, V. On the urban heat island effect dependence on temperature trends. **Climate Change**, Amsterdam, v.37, n.4, p.665-681, 1997.

CARNAHAN, W.H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.33, n.1, p.65-71, 1990.

CARSON, D.J.; SANGSTER, A.B. The influence of land-surface albedo and soil moisture on general circulation model simulations. GARP/WCRP: Research Activities in Atmospheric and Ocean Modeling. Ed. I.D. Rutherford. Numeral Experimentation Programme. **Report n.2**, p.514-521, 1981.

CASTRO, A.W.S. **Clima urbano e saúde: as patologias do aparelho respiratório associadas aos tipos de tempo no inverno, em Rio Claro – SP**. 2000. 202p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2000.

CHARNEY, J.G.; QUIRK, W.J.; CHOW, S.H.; KORNEFIELD, J. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. **Journal of the Atmospheric Science**, Boston, v.34, n.9, p.1366-1385, 1977.

COSTA, F.P da S. **Evolução urbana da cobertura vegetal de Piracicaba – São Paulo (1940-2000)**. 2004. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DWYER, F.; McPHERSON, E.G.; SCHOEDER, H.W.; ROWNTREE, R.A. Assessing the benefits and costs of the urban forest. **Journal of Arboriculture**, Illinois, v.18, n.5, p.227-234, sept.1992.

GALLO, K.P.; McNAB, A.L.; KARL, T.R.; BROWN, J.F.; HOOD, J.J.; TARPLEY, J.D. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.32, n.5, p.899-908, 1993.

GOLDREICH, Y. Urban climate studies in Israel – a Review. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.29, n.4, p.467-478, 1995.

GOMEZ, A.L. **El clima de la ciudades españolas**. Madrid: Editora Cátedra, 1993a. 267p.

_____. **El clima Urbano: teledetección de la Isla de Calor en Madrid**. Madrid. MPOT (Ministério de Obras Públicas y transportes), 1993b. 157 p.

GONÇALVES, W. Florestas Urbanas. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa, v.2, n.9, p.17-19, 1999/2000.

GREY, G.; DENEKE, F. **Urban Forestry**. New York: John Wiley, 1978. 279p.

GRIMMOND, C.S.B.; SOUCH, C. Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. **Geocarto International**, Hong Kong, v.9, s.n, p.47-59, 1994.

HARRIS, A.M. **Designing with Climate: using parking lots to mitigate urban climate**. 2004. 84p. Thesis (Master of Landscape Architecture) – Department of Landscape Architecture – College of Architecture and Urban studies. Blackburg, Virginia, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE.
Disponível em <http://www.ibge.hpg.gov.br> . Acesso em: 08 jan. 2006.

IWAI, O. K. **Mapeamento do uso do solo urbano do município de São Bernardo do Campo, através de imagens de satélite**. 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

JÁUREGUI, E. Heat island development in México City. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.31, n.22, p.3821-3831, 1997.

JONES, P.D.; GROISMAN, P.Ya.; COUGHLAN, M.; PLUMMER, N.; WANG, W-C; KAR, T.R. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. **Nature**, Londres, v.347, n.2, p.169-172, 1990.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, Londres, v.423, n.6939, p.528-531, May.2003.

KARL, T.R; DIAZ, H.F; KUKLA, G. Urbanization: its detection and effect in the United States Climate Record. **Journal of Climate**, Boston, v.1, n.11, p.1099-1123, 1988.

KIDDER, S.Q.; WU, H.T. A multispectral study of the St. Louis area under snow-covered conditions using NOAA-7 AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.22, n.2, p.159-172, 1987.

KIM, Y-H; BAIK, J-J . Spatial and temporal structure of urban heat island in Seoul. **American Meteorological Society**, Boston, v.44, n.5, p.591-605, 2005.

LANDSAT ETM⁺ 7. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999-2002- 2003. Imagem de satélite. Canal 6L e composição colorida 3, 4, 5.
Escala (cm/m): 1:25.000.

LANDSBERG, H.E. The urban climate. **International Geophysics Series**, v.28. New York: Academic Press, 1981. 275p.

LIMA, A.M.L.P. **Piracicaba/SP: análise da arborização viária na área central e em seu entorno**. 1993. 238p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

LIMA, L.P. de. **Clima e forma urbana: métodos de avaliação do efeito das condições climáticas locais nos graus de conforto térmico e no consumo de energia elétrica em edificações**. 2005.154 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, Paraná, 2005.

LOMBARDO, M.A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.

LOMBARDO, M.A.; GONÇALVES, J.C.; NETO, P.Q. A expansão urbana da cidade de São Paulo e a variação temporal da temperatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 3., Londrina, 1991. **Anais...** Londrina; UEL, 1991.190p.

LU, D.; WENG, Q. Urban Classification Using Full Spectral Information of Landsat ETM⁺ Imagery in Marion County, Indiana. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.71, n.11, p.1275-1284, nov. 2005.

MACPHERSON, E.G.; SIMPSON, J.R. A comparison of municipal forest benefits and cost in Modesto and Santa Monica, California, USA. **Urban Forestry & Urban Green**, Davis, n.1, p.61-74, 2002.

MACPHERSON, E.G.; SIMPSON, J.R.; PEPER, P.J.; XIAO, Q. **Tree guidelines for San Joaquin Valley communities**. Sacramento: Government Commission Sacramento, 1999. 68p.

MELO FILHO, L.E. Arborização urbana. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ARBORIZAÇÃO URBANA, 1., 1985, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Prefeitura Municipal de Porto Alegre; Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 1985. p. 117-127.

MIYAKODA, K.; STRICKLER, R.F. Cumulative results of extended forecast experiment. Part III: Precipitation. **Monthly Weather Review**, Boston, v.109, n.4, p.830-842, 1981.

MENDONÇA, F. de A. **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**. 1995. 322p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

_____. O clima urbano de cidades de porte médio e pequeno: aspectos teórico-metodológicos e estudo de caso. In: SANT´ANNA NETO, J.L.; ZAVATINI, J. A. (Org.) . **Variabilidade e Mudanças Climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000, p.167-192.

_____. Clima e planejamento urbano em Londrina. In: MONTEIRO, C. A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. p.93-120.

_____. O estudo do clima Urbano no Brasil. In: MONTEIRO, C. A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. p.175-192.

MONTEIRO, C.A. de F. **Teoria e Clima Urbano**. Instituto de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.181p. (Série Teses e Monografias n.25)

MONTEIRO, C. A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p.

_____. Teoria e clima urbano, in MONTEIRO, C.A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. p. 9-67.

NETO, J.L.S. As chuvas no estado de São Paulo: a variabilidade pluvial nos últimos 100 anos.In: SANT'ANNA NETO, J.L.e ZAVATINI, J. A. (Org.) . **Variabilidade e Mudanças Climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá/PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2000. p. 95-119.

NICHOL, J.E. A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapore's high-rise housing estates. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 60, n.10, p.1225-1232, 1994.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgar Blücher.1989. 308p.

NOWAK, D.J. Atmospheric carbon reduction by urban trees. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v.37, n.3, p.207-217, 1993.

OKE, T.R. Technical Note n.134: **Review of urban Climatology**, World Meteorological Organization, Geneva, WMO, p. 1968-1973. 1974.

_____. Technical Note n.169: **Review of urban Climatology**, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, p.43. 1979.

OKE, T.R.; JOHNSON, G.T.; STEYN, D.G.; WATSON, I.D. Simulation of surface urban heat islands under "Ideal" Conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-layer Meteorology**, Amsterdam, v.56, n.4, p.339-358, 1991.

ORGAZ, M.M.D.; PINHO, O. S. The urban heat island in a small city in coastal Portugal, **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v.44, n.4, p.198-203, Nov. 2000.

PAIVA, H.N. Seleção de espécies para arborização urbana. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa, v.2, n.9, p-14-16, 1999/2000.

PAIVA, C.M. **Estimativa do balanço da energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 2005. 218p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEREZ, J.C.; SÁNCHEZ, M.de los.A.V.; BARRADAS, V.L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **Red Nacional de Investigación Urbana**, Puebla, México, Ciudades 51, jul-set. 2001.

PIELKE, R.A; AVISSAR, R. Influence of landscape structure on local and regional climate. **Landscape Ecology**, Amsterdam, v.4, n.2/3, p.133-155, 1990.

PONGRACZ, R.; BARTHOLY,J.; DEZSO Z. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. **Advances in Space Research**, Oxford, June 2005. In press. Disponível em <www.elsevier.com/locate/asr>

PRICE, J.C. Assessment of the urban island effect through the use satellite data. **Monthly Weather Review**, Boston, v.107, n.11, p.1554-1557, 1979.

QUINTANILHA, J.A.; LIMA, R.A.F.; HAMBURGER, D.S. **Introdução ao processamento digital de imagens**. In: Programa de Transferência de Tecnologia GIS, 3, São Paulo, 1998a. Material Didático. São Paulo: SABESP/EDUSP, 1998a, 28p.

QUINTANILHA, J.A.; LIMA, R.A.F.; HAMBURGER, D.S. **Princípios de sensoriamento remoto**. In: Programa de Transferência de Tecnologia GIS, 3, São Paulo, 1998b. Material Didático. São Paulo: SABESP/EDUSP, 1998b, 28p.

SAMPAIO, A.H.L. **Correlações entre o uso do solo e ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador**. 1981. 103p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

ROTH, M.; OKE, T.R.; EMERY, W.J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilisation of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**, Bethesda, v.10, s.n, p.1699-1720, 1989.

SERRATO, F.B.; CASTILLO, F.J.G.; GARCIA, R.G.; VALCÁRCEL, E.C. Radiación y temperatura em el período 1990-1999 en el campo experimental de “Elardal” Murcia: studio preliminar. **Papeles de Geografia**, Barcelona, v.35, s.n, p.17-25, 2002.

SHIMODA, Y. Adaptation measures for climate change and the urban heat island in Japan’s buit environment. **Building Research and Information**, Londres, v.31, n.3/4, p.222-230, 2003.

SHUKLA J.; MINTZ, Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth’s climate. **Science**, New York, v.215, n.4539, p.1498-1501, 1982.

SILVA FILHO, D.F. da. **Aplicação de videografia aérea multiespectral na avaliação de floresta urbana**. 2004. 88p. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2004.

SISMANOGLU, R.A., PRATES, J.E. O modelo de evapotranspiração do RAMS. Parte II: modelo de vegetação, aspectos teóricos e aplicações. 5 p. 1997. (Apostila)

SOBRINO, J.A.; CASELLES, V. Thermal infrared radiance model for interpreting the directional radiometric temperature of a vegetative surface. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.33, n.3, p.193-199, 1990.

SPRONKEN-SMITH, R.A. Comparison of summer-and winter-time suburban energy fluxes in Christchurch, New Zeland. **International Journal of Climatology**, Oxford, v.22, n.8, p.979-992, 2002.

TARIFA, J.R. **A análise topo e microclimática e o trabalho de campo**: o caso de São José dos Campos. São Paulo: IGEO/USP, 1981. (Climatologia , 1).

_____. Alterações climáticas resultantes da ocupação agrícola no Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.8, p.15-28,1994.

TARIFA, J.R; AZEVEDO, T.R. (Org.). **Os climas na cidade de São Paulo**: teoria e prática. São Paulo: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão. Universidade de São Paulo: Laboratório de Climatologia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, 199p.

TAVARES, A.C. Abordagem climática local: o exemplo de Campinas. **Boletim de Geografia Teorética**. Rio Claro, v.7, n.14, p.61-86, 1977.

TEZA, C.T.V.; BAPTISTA, G.M.de M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER *on demand 08-Kinetic Temperature* (III): metrópoles brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005.16-21 abril, Goiânia. **Anais...** Goiânia; INPE, 2005. p.3911-3918.

VILLA NOVA, N.A.; SANTIAGO, A.V.; REZENDE, F.C. **Energia Solar**: aspectos físicos e de captura pela biomassa. Piracicaba. CALQ, Departamento de Ciências Exatas, Física e Meteorologia Agrícola. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2001. 20p. (Apostila)

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Complete urban surface temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.36, n.9, p.1117-1132, sept.1997.

VUKOVICH, F.M. An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St.Louis, Missouri, using HCMM satellite data. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v.22, n.4, p.560-571, jan.1983.

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 22, n.10, p.1999-2014, 2001.

WENG, Q. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v.64, n.3, p.273-284, 2002.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566, may. 2003.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.89, n.4, p.467-483, 2004.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)