

Análise multitemporal da evolução urbana e sua influência na modificação do campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo para os anos de 1985, 1993 e 2003

Flávio Fortes Camargo¹
Gabriel Pereira¹
Elisabete Caria Moraes¹
Luís Gonçalves Longo de Oliveira¹
Marcos Adami¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fortes, gabriel, bete, luis, adami}@dsr.inpe.br

Abstract. The present work has as its main goal the multitemporal analysis of thermal field's alteration in São Paulo's metropolitan region in 1985, 1993 and 2003. For obtaining the apparent temperature, has used the data from Thematic Mapper (TM)/Landsat 5 satellite and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)/Landsat 7 satellite, in 6 band, with nominal spatial resolution of 120m and 60m, respectively. The supervised classification using Maximum Likelihood - ICM (Iterated Conditional Modes) method was used to discriminate the impact of landuse/landcover changes on temperature by using the Kruskal-Wallis ANOVA non-parametric test. The land use/land cover class that had more influence in the increase of temperature, in the elapsing years, was the urban area that had the greater growth in the detection changes table.

Palavras-chave: Apparent temperature, landuse/landcover, non-parametric statistic, temperatura aparente, uso e cobertura do solo, estatística não-paramétrica.

1. Introdução

Alterações nos tipos de cobertura do solo promovem interferências nos fluxos de calor sensível e latente. Sabe-se que a ocorrência de superfícies úmidas e vegetadas favorece a absorção do fluxo radiante solar e, conseqüentemente, a redução do calor sensível e da temperatura. Neste sentido, qualquer alteração natural e/ou antrópica que altere a quantidade de vegetação e de áreas úmidas possibilita alterações climáticas de escalas espacial e temporal variadas (Weng, 1999; Chudnovsky et al, 2004). Neste contexto, o conhecimento detalhado da variabilidade do campo térmico, ocasionada por modificações na cobertura do solo, apresenta destacada importância.

Há a necessidade do gestor/planejador público compreender de que forma e com que intensidade o incremento de temperatura interfere nos regimes de chuvas e de enchentes, na poluição atmosférica e, também, no conforto térmico da população. Vários autores têm contribuído para o entendimento das conseqüências da expansão urbana sobre o clima local e/ou regional (Lombardo, 1985; Weng, 1999; Saaroni, 2000; Streutker, 2003).

Para áreas rurais, os pesquisadores se concentram, principalmente, nos relacionamentos entre temperatura e evapotranspiração potencial e, por conseguinte, nas condições fitofisiológicas de cultivos. Kustas et al (2004) e French et al (2005) apontam que elevações na temperatura, promovidas por alterações na cobertura do solo, interferem significativamente na taxa de evapotranspiração de cultivos. De acordo com French et al (2005), a quantidade de calor oriunda do processo de evapotranspiração pode ser adequadamente estimada através do conhecimento da quantidade de energia radiante transportada.

Em áreas urbanizadas, foco deste trabalho, as dimensões horizontais (extensão), verticais e temporais das anomalias térmicas estão intimamente relacionadas com a quantidade de construções, com o uso do solo, com o clima e com as condições meteorológicas regionais (Weng, 1999; Voogt e Oke, 2003). Sendo assim, as alterações no campo térmico estão

associadas aos condicionantes derivados de ações promovidas pelo homem sobre o meio ambiente (em termos de revestimento do solo) e aos condicionantes do meio físico e seus atributos geoecológicos (Lombardo, 1985).

Os estudos sobre a variabilidade do campo térmico em áreas urbanizadas podem ser realizados através de coleta de dados *in situ* (estações meteorológicas, utilização de automóveis equipados com termômetros especiais, etc.), através de sensoriamento remoto em nível de campo, aéreo e orbital e através da integração de ambos os tipos de dados (Streutker, 2003). Com relação ao sensoriamento remoto, Voogt e Oke (2003) apontam, principalmente, a utilização de imagens (de plataformas aéreas e orbitais) na faixa do infravermelho termal em estudos sobre o balanço de energia e as relações entre tipos de cobertura do solo e temperatura aparente ou de superfície.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é verificar as relações entre mudanças na cobertura da terra e no campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) durante os anos de 1985, 1993 e 2003, através da conversão de números digitais (ND) em temperatura e, também, através de estatísticas não-paramétricas.

2. Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho abrange parte da RMSP e se localiza entre os pares de coordenadas 23° 46' 20''S; 46° 57' 59''W e 23° 20' 32''S; 46° 17' 10''W. A **Figura 1** apresenta a sua localização.

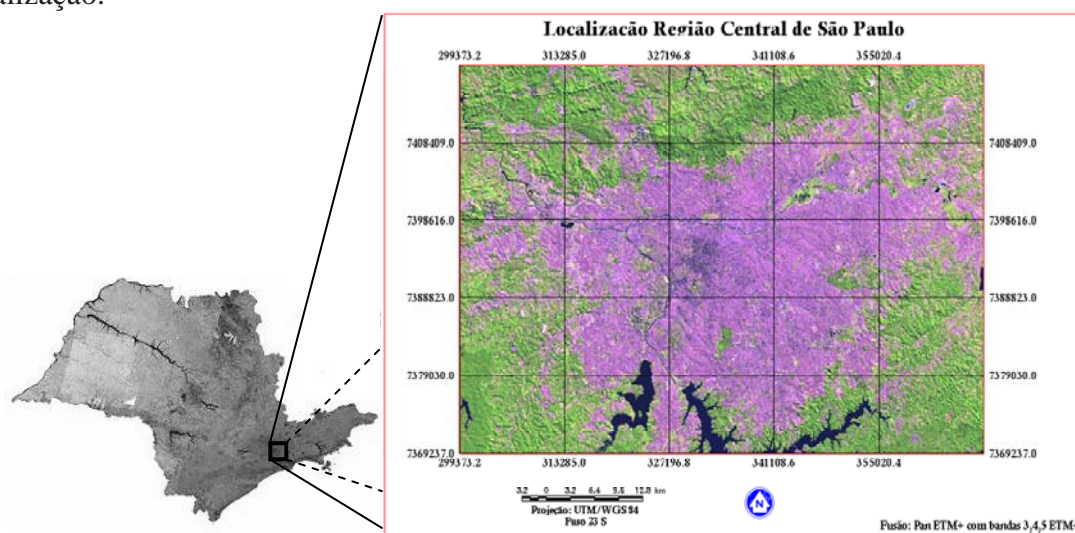


Figura 1 – Localização da Área de Estudo

No que se refere à expansão das superfícies construídas na RMSP, na década de 1950, a taxa de urbanização do município de São Paulo era de aproximadamente 88%, ocasionada por um processo de periferização da população em direção aos municípios vizinhos (SEP, 2003). Mesmo com a redução da taxa de crescimento populacional a partir da década de 1980, devido principalmente à crise econômica (que provocou desaquecimento da economia, descentralização do desenvolvimento industrial e redução na taxa de fecundidade), a população do município era estimada em 8.475.380 habitantes (SEP, 2003). Em 2005, a população do município de São Paulo era estimada em 10.927.983 habitantes. Acréscimo, em relação à década de 1980, de 28,93%.

Concomitantemente, a RMSP apresentou um crescimento espacial de sua área urbana de aproximadamente 40% entre os anos de 1985 e 2003. Atualmente, a RMSP apresenta em torno de 19 milhões de habitantes (SEADE, 2004). Isto representa um aumento de cerca de 137%, em relação aos dados da década de 1980.

3. Material e Métodos

O aplicativo de geoprocessamento utilizado neste trabalho foi o Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Parte da etapa de processamento de dados (transformação dos ND em temperatura e amostragens aleatórias e estratificadas) foi feita na LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) implementada no SPRING.

Para minimizar as distorções sistemáticas presentes nas imagens, realizou-se a correção geométrica, que permitiu a comparação multitemporal das imagens provenientes de dois satélites distintos. Segundo Vergara et al. (2001) o processo de correção geométrica da imagem pode ser dividido em três etapas: estabelecimento da relação entre as coordenadas da imagem e as coordenadas geográficas (mapeamento direto ou transformação geométrica), definição dos níveis de cinza da imagem corrigida (mapeamento inverso) e atribuição do nível de cinza correspondente à imagem (reamostragem). Neste trabalho utilizou-se o modelo polinomial de 1º grau e o interpolador vizinho mais próximo. Para as imagens dos sensores TM/Landsat 5 (12/03/1985 e 29/11/1993) e ETM+/Landsat 7 (02/02/2003), os erros de pontos de controle (*Root Mean Square Error* – RMSE) foram, respectivamente, 0,671, 0,631 e 0,371.

Obteve-se a base de referência através das imagens geocover, que são constituídas em dados da série de satélites Landsat (MSS, TM e ETM+), submetidos a procedimentos de ortorretificação para ajuste das imagens aos deslocamentos do relevo. Na primeira etapa do projeto geocover, as cenas do sensor TM foram ortorretificadas através de modelos digitais de elevação (com acurácias entre 30m e 1 km). Posteriormente, as cenas dos sensores MSS e ETM+ foram co-registradas aos dados ortorretificados do sensor TM. Na etapa final, realizou-se a validação posicional das cenas. Os dados geocover são disponibilizados no formato *Mr. Sid* (.sid) com projeção UTM/WGS-84 (GLCF).

Para a classificação supervisionada das imagens em 5 classes (“Urbano”, “Solo Exposto”, “Hidrografia”, “Floresta”, “Herbáceos”) utilizou-se o classificador Máxima Verossimilhança - *Iterated Conditional Modes* (Maxver-ICM). Este classificador baseia-se em critérios estatísticos de média, variância e covariância.

Através dos conjuntos de treinamento são observadas, para cada *pixel*, as probabilidades de ocorrência de uma dada classe em uma função normal de densidade de probabilidade (RST, 2006). Com relação a este classificador, Jensen (1996) aponta que os dados dos conjuntos de treinamento em cada banda devem apresentar uma distribuição gaussiana. Se os histogramas dos conjuntos de treinamento forem bi ou tri-modais, por exemplo, o cálculo das probabilidades será prejudicado. Ao final do processo o classificador atribui uma classe a um determinado *pixel* através da consideração das classes atribuídas aos *pixels* vizinhos (valor modal). Desse modo, considera, também, a dependência espacial na imagem (SPRING). Cabe destacar, que as imagens obtidas não foram submetidas a procedimentos de validação em função da ausência de dados de verdade terrestre para cada data de passagem dos satélites.

Para a obtenção da temperatura aparente foi necessária a transformação do sinal digital proveniente do satélite em radiância ($\text{w.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$), através da **Equação 1**.

$$L = \left\{ \left[(L_{\max} - L_{\min}) / (NC_{\max} - NC_{\min}) \right] * (NC - NC_{\min}) \right\} + L_{\min} \quad (1)$$

Onde L_{\max} e L_{\min} representam os valores de máxima e mínima radiância que podem ser detectados pelo sensor, NC_{\max} representa o nível de cinza máximo, dada a quantização, NC_{\min} representa o nível de cinza mínimo e NC representa o nível de cinza de cada *pixel* da imagem.

Posteriormente, realizou-se a conversão em temperatura através do inverso da lei de Planck (**Equação 2**).

$$\text{Temp}(\text{°C}) = \left\{ (K_1) / \ln \left[(K_2 / L) + 1 \right] \right\} - 273,15 \quad (2)$$

K_1 e K_2 são constantes de calibração para a banda do infravermelho termal (10,4 – 12,5 μ m).

Com relação ao tratamento estatístico dos dados amostrais, empregou-se o teste não-paramétrico Kruskal-Wallis ANOVA.

A abordagem estatística da Análise de Variância (ANOVA) permite o particionamento da variação total em diferentes fontes e torna possível testar diferenças significativas entre médias de classes ou tratamentos. Porém, os tratamentos, submetidos a este procedimento, devem ser independentes entre si e apresentarem amostras com distribuições do tipo normal ou gaussiana (StatSoft, 2001).

Em situações nas quais essas premissas não podem ser atendidas, torna-se adequada a utilização de procedimentos estatísticos não-paramétricos na comparação entre tratamentos. Um procedimento não-paramétrico similar à ANOVA é o Kruskal-Wallis ANOVA (StatSoft, 2001). Este procedimento promove a ordenação dos valores de todos os tratamentos e estabelece a posição (*ranks*) dos valores individuais. Desse modo, as medianas dos tratamentos são adotadas como critério de comparação (não mais as médias como na ANOVA). Com base nos p-valores do teste Kruskal-Wallis e na soma dos *ranks*, as diferentes classes de cobertura do solo (tratamentos) foram comparadas, com relação ao atributo temperatura. As comparações foram realizadas para cada data (1985, 1993 e 2003).

4. Resultados e Discussão

Ao se analisar a evolução das classes de uso e cobertura do solo, observa-se que a maior redução de área, entre 1985 e 2003, ocorreu nas classes “Solo Exposto” e “Floresta”. A classe “Floresta” cedeu áreas principalmente para vegetações dos tipos herbáceo-arbustivas e gramíneas. Já “Solo Exposto” e “Herbáceos” foram substituídas pela urbanização. Estas modificações são apresentadas na **Figura 2**.

Através da tabulação cruzada entre as classes de 1985 e 2003, pôde-se verificar o percentual de evolução de cada classe, e o tipo de uso e cobertura do solo que mais retrocedeu. Como demonstra a **Tabela 1**, a expansão populacional ocasionou o crescimento das classes “Urbano” e “Herbáceos”, que aumentaram a sua área em 43,49% e 79,28%, respectivamente.

Tabela 1 – Evolução das classes de uso e cobertura do solo, comparação entre os anos de 1985 e 2003.

Classes	Percentual de Modificação
Floresta	-35,68
Herbáceos	79,28
Hidrografia	-1,37
Solo Exposto	-96,66
Urbano	43,49

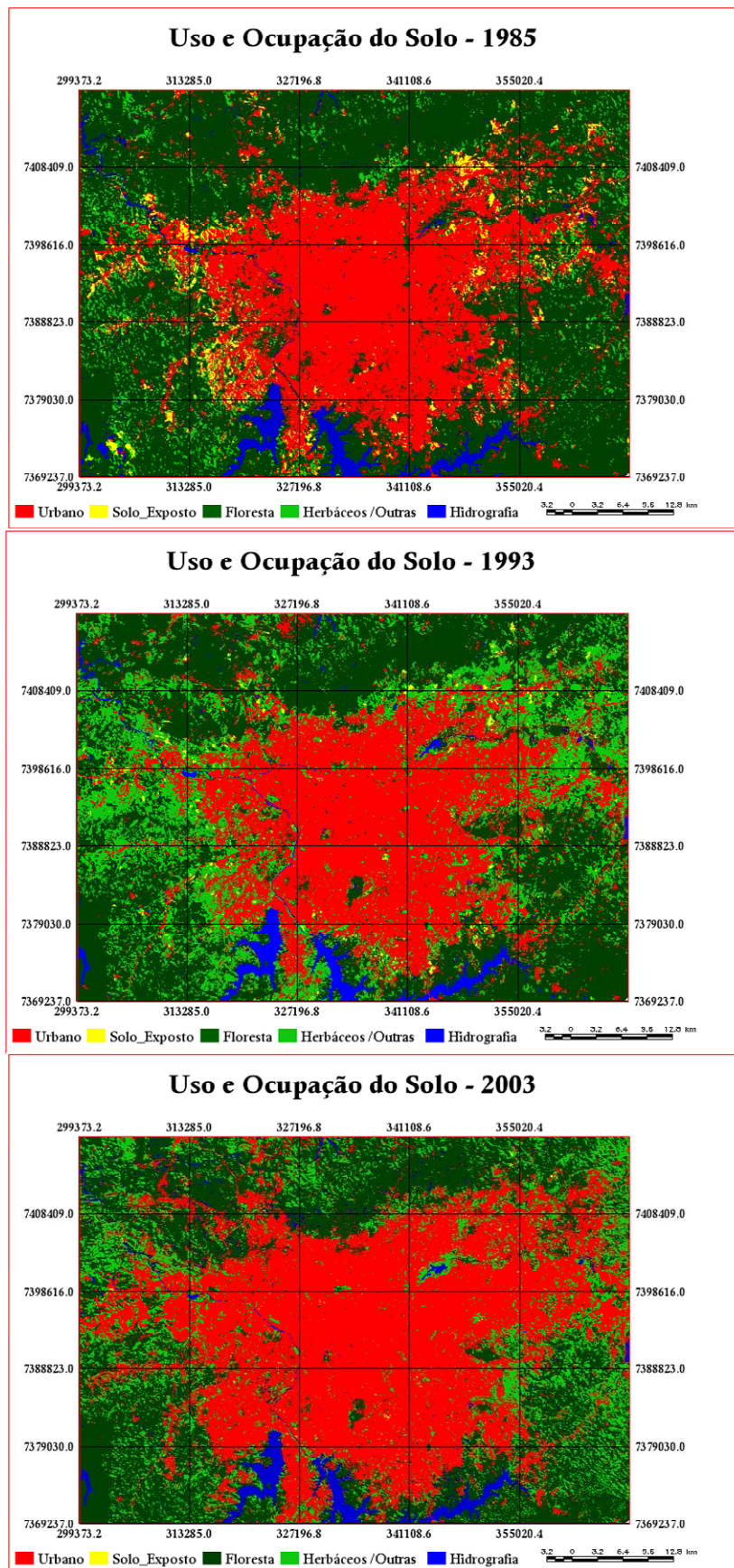


Figura 2 – Uso e cobertura do solo para porção central da RMSP nos anos de 1985, 1993 e 2003.

Com relação às comparações realizadas, observou-se, em todas as datas, que os testes Kruskal-Wallis ANOVA foram significativos (p -valores $<0,0001$) e que, portanto, todas as classes se apresentaram distintas em relação ao atributo temperatura. Também em todas as datas, verificou-se, através das somas dos *ranks*, que a classe que apresentou temperaturas mais elevadas foi “Urbano”, seguida de “Solo Exposto”, “Herbáceos”, “Floresta” e “Hidrografia”. Estes dados são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Teste Kruskal-Wallis ANOVA.

Classes	Nº. de Amostras			Soma dos <i>Ranks</i>		
	1983	1993	2003	1983	1993	2003
Urbano	23	21	24	1805	1394,5	2362
Herbáceos	18	11	30	995	573	1841,5
Solo Exposto	17	13	24	1086	490	2016,5
Hidrografia	20	16	24	531,5	265	594,5
Floresta	22	17	23	632,5	358,5	1060,5

Cada componente espacial presente na cena possui uma característica que lhe é peculiar. Estas propriedades térmicas como, por exemplo, calor específico, capacidade de calor, condutividade térmica e taxa de difusão térmica, irão influenciar diretamente na reflexão, absorção e transmissão da radiação de ondas curtas e na emissão de radiação de ondas longas. Com base nisto, observa-se, nas **Figuras 3 e 4**, que na RMSP, a diferença na emissão da radiação de ondas longas apresenta um elevado contraste entre os alvos urbanos e os alvos naturais (diversos tipos de vegetação e de minerais).

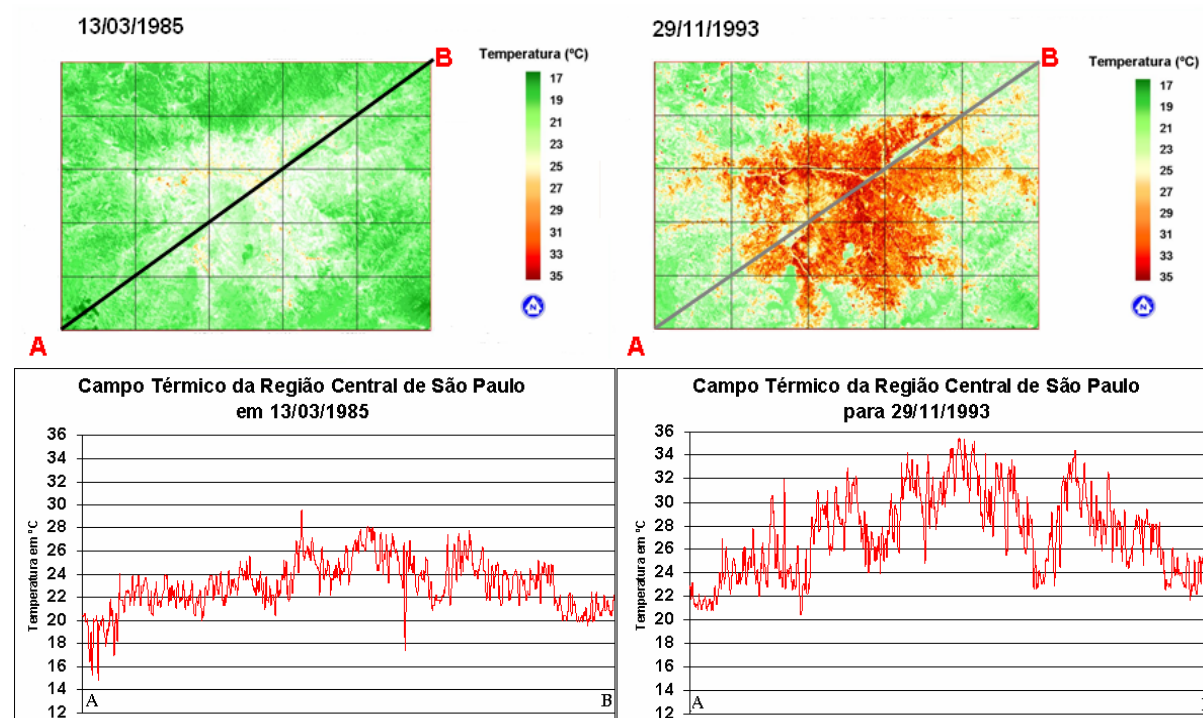


Figura 3 – Campos térmicos da porção central da RMSP e perfis de temperatura para os anos de 1985 e 1993.

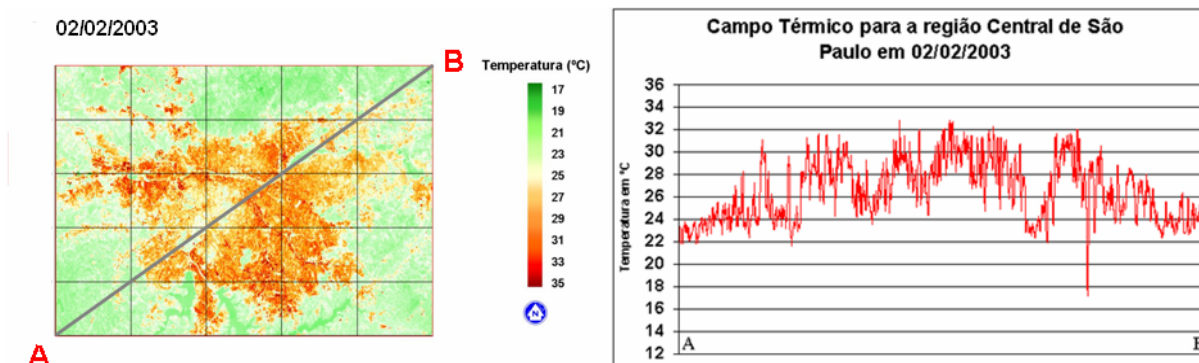


Figura 4 – Campo térmico da porção central da RMSP e perfil de temperatura para 2003.

As **Figuras 3 e 4** apresentam variações no campo térmico da RMSP ao longo do perfil A – B (SO – NE), para as três datas. Em todos os gráficos observa-se o contraste térmico entre áreas urbanizadas e não-urbanizadas. Em 1985 ocorreu uma amplitude de aproximadamente 8 °C entre o centro urbanizado e áreas periféricas florestadas. Com relação aos anos de 1993 e 2003, com condições atmosféricas semelhantes às de 1985, as amplitudes térmicas foram de 11°C e 10°C, respectivamente.

As comparações focaram as amplitudes térmicas entre as diferentes datas devido ao fato de que as condições atmosféricas e a geometria de imageamento implicam em padrões de aquecimento distintos para cada data. Assim, torna-se inviável a comparação multitemporal dos valores absolutos de temperatura aparente nos casos estudados.

As modificações nos tipos de uso e cobertura do solo ocasionaram alterações na amplitude do campo térmico, conforme apresenta a **Figura 5**. Pode-se perceber que nas distâncias 18.356 m, 44.957 m e 61.335 m, no sentido A – B, houve diferenciações significativas na amplitude térmica. Isto se relaciona às modificações no uso e cobertura do solo que indicam a mudança da classe “Floresta” para “Urbano” conforme apresentado na **Figura 2**.

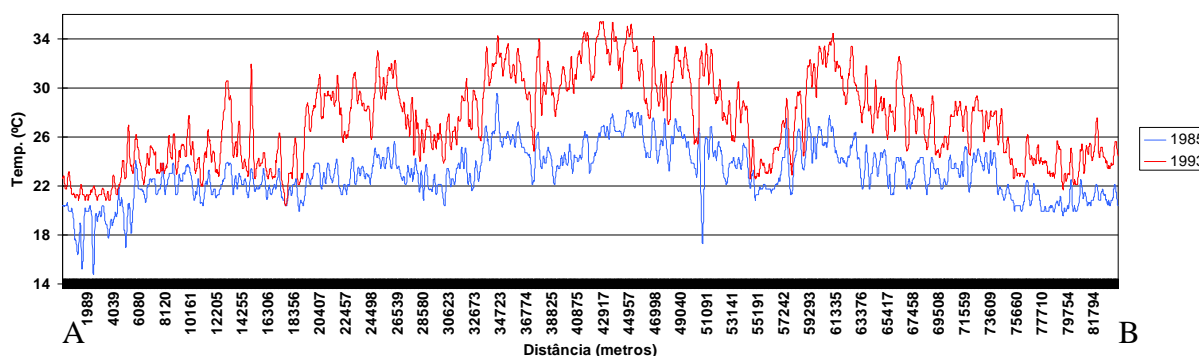


Figura 5 – Perfis de temperatura (1985 e 1993).

5. Considerações Finais

Verificou-se um aumento significativo (43,49%) das áreas urbanizadas no período de 1985 a 2003. Entre 1985 e 1993 houve a expansão da classe “Herbáceos” em detrimento da classe “Floresta”. Posteriormente, entre 1993 e 2003, a primeira cedeu espaço para áreas urbanizadas.

Os perfis de campo térmico demonstraram o contraste entre o centro urbano e as áreas adjacentes florestadas. Através da análise multitemporal verificou-se o incremento de aproximadamente 3°C na amplitude térmica de acordo com as modificações do uso e da

cobertura do solo. Observou-se, que os dados de temperatura aparente, obtidos através das bandas termais dos satélites TM/Landsat-5 e ETM+/Landsat-7, são compatíveis aos dados meteorológicos de aeroportos e estações meteorológicas da região de estudo.

O procedimento estatístico não-paramétrico demonstrou que as classes de usos e cobertura do solo são distintas com relação ao aquecimento da superfície. A classe que mais contribuiu no aquecimento é a “Urbano”, seguida de “Solo Exposto”, “Herbáceos”, “Floresta” e “Hidrografia”.

Agradecimentos

Nós agradecemos ao Dr. Yosio Edemir Shimabukuro pela colaboração e ajuda prestada.

6. Referências

- Chudnovsky, A.; Ben-Dor, E.; Saaroni, H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. **Energy and Buildings**, n.36, 2004, p.1063 – 1074.
- French, A. N.; Jacob, F.; Anderson, M. C.; Kustas, W. P.; Timmermans, W.; Gieske, A.; Su, Z.; Su, H.; McCabe, M. F.; Li, F.; Prueger, J.; Brunsell, N. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). **Remote Sensing of Environment**, , n. 99, 2005, p. 55 – 65.
- GLCF (Global Land Cover Facility). **Geocover Technical Guide**. Produced by University of Maryland/USA. Disponível em: <<http://glcf.umd.edu/data/guide/>>. Acesso em: 10/09/2006.
- Jensen, John R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper Saddle River/NJ : Prentice-Hall, 1996. 316 p.
- Kustas, W. P.; Li, F.; Jackson, T. J.; Prueger, J. H.; MacPherson, J. I. Wolde, M. Effects of remote sensing resolution on modeled energy flux variability of croplands in Iowa. **Remote Sensing of Environment**, n. 92, 2004, p. 535 – 547
- Lombardo, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 1985, 244 p.
- RST. **Remote Sensing Tutorial**. Produced by North American Space Agency (NASA). Disponível em: <http://rst.nasa.gov/Sect1/Sect1_12.html>. Acesso em: 10/09/2006.
- Saaroni, Hadas; Ben-Dor, Eyal; Bitan, Arie; Potchter, Oded. Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. **Landscape and Urban Planning**, n.48, 2000, p.01 – 18.
- SEADE. **São Paulo – Outrora e Agora**. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados, 2004. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>. Acesso em 09/09/2006.
- SEP. **Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. Secretaria de Economia e Planejamento do Estado de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.planejamento.sp.gov.br>>. Acesso em 08/09/2006.
- SPRING. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. versão 4.3**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005.
- StatSoft, Inc. (2001). **STATISTICA (data analysis software system), version 6**. www.statsoft.com.
- Streutker, David R. Satellite-measured growth of urban heat island of Houston, Texas. **Remote Sensing of Environment**, n.85, 2003, p.282 – 289.
- Vergara, O. R.; Cintra, J. P.; D'Alge, J. C. L. Avaliação da exatidão cartográfica de documentos atualizados com imagens orbitais e sistemas de informação geográfica. **XX Congresso Brasileiro de Cartografia**, Porto Alegre, 2001.
- Voogt, J. A.; Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, n.86, 2003, p.370 – 384.
- 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**, v. 22, n.10, 2001, p. 1999 – 2014.