

Mapeamento automático de padrões de urbanização e cobertura da terra na Região Metropolitana de São Paulo utilizando imagens CCD-CBERS-2

Tessio Novack ¹
Hugo Abi Karam ²
Ailton Luchiar ¹
Mariana Sgarbi Claro ¹
Augusto José Pereira Filho ³

¹ Departamento de Geografia – FFLCH/USP
Av. Prof. Lineu Prestes 338 – Cidade Universitária
05508-000 – São Paulo – SP – Brasil
{tessionovack, mariana_claro@yahoo.com.br}, aluchiar@usp.br

² Departamento de Meteorologia – IGEO/UFRJ
Av. Brigadeiro Trompowski s/n – Cidade Universitária – Ilha do Fundão
21949-900 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
hakaram@acd.ufrj.br

³ Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP
Rua do Matão 1226 – Cidade Universitária
05508-090 – São Paulo – SP – Brasil
apereira@model.iag.usp.br

Abstract. In this paper, the remote sensing of a larger urban surface was realized by the SPRING facility tools applied on the CBERS-2 multi-spectral images. The surface of the Metropolitan Area of São Paulo (MASP) was investigated up to a nominal resolution of 20m. Different supervised and non-supervised algorithms for segmentation and classification, such as statistical maximum-likelihood classifier, K-means clustering, and NDVI slicing have been used in order to obtain realistic urbanization patterns on the MASP. The results was compared against many direct ground-true observations and photographs, i.e., for every-class of urban land use, including building areas and two types of vegetation coverage. An amount of 115 urban sites were visited throughout the investigated area, whose correspondences with the classified pixels were summarized in a contingency table, accomplishing a skill distribution between 70% to 94%, depending of the urbanization class.

Palavras-chave: remote sensing, satellite CBERS-2, software SPRING, classification, urbanization pattern, Metropolitan Area of São Paulo, sensoriamento remoto, satélite CBERS-2, aplicativo SPRING, classificação, Região Metropolitana de São Paulo.

1. Introdução

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) agrega 39 municípios onde convivem aproximadamente 20 milhões de pessoas em uma área urbanizada de 2.139 km² (IBGE, 2006). A cidade de São Paulo é considerada, social e economicamente, a principal cidade do país, sendo uma das mais verticalizadas do mundo e apresentando problemas típicos de uma metrópole de terceiro mundo, na zona de transição dos climas subtropical para tropical. Em relação aos fenômenos atmosféricos, a RMSP apresenta problemas associados: (1) às tempestades severas no verão, sobretudo quando a Zona de Convergência do Atlântico Sul está ativa; (2) à poluição do ar e à baixa umidade relativa durante o inverno; (3) ao conforto ambiental e a distribuição desigual de áreas verdes que implica na formação de ilhas de calor urbanas e (4) ao abastecimento de água potável, dado que um dos efeitos da metrópole é o

aumento da chuva sobre sua área central em detrimento da precipitação sobre as áreas de captação de água potável localizadas no entorno da área urbana.

A superfície da RMSP é bastante complexa do ponto de vista da urbanização já implementada. Do ponto de vista de seus “elementos rugosos” a RMSP apresenta diferentes tipos de cânions urbanos, alguns definidos por edifícios altos, em bairros assistidos por maior ou menor fração de áreas verdes, outros definidos por projetos estruturais (ou seletivos) como as grandes avenidas e corredores de info-vias e, ainda outros, sobre uma extensa área periférica até a borda de áreas de preservação florestal e de mananciais, segundo uma ocupação de lotes realizada pela maioria da população. As interações entre as superfícies dos cânions urbanos e a atmosfera têm sido destacadas por Oke (1987) no contexto dos balanços de radiação e energia. Desde 2000, os cânions urbanos tem sido cada vez mais utilizados na representação das superfícies urbanas nos modelos de previsão do tempo e tempestades dedicados às áreas metropolitanas.

Os cânions urbanos encontrados nas áreas periféricas da RMSP em geral são fruto de uma urbanização informal ou de autoconstrução pela população. A existência de extensas áreas ocupadas por mesmo padrão de urbanização torna o imageamento realizado pelo sensor CCD do segundo satélite sino-brasileiro dos recursos da Terra, o CBERS-2 (2006), adequado para a geração de mapas dos padrões de uso da superfície urbana até escalas de 1:100000. O limite de resolução espacial nominal do CBERS é de 20 m, suficiente para permitir a caracterização das diferenças multiespectrais encontradas entre os quarteirões urbanos da RMSP. A área abrangida pelas cenas do CBERS-2 permite que se obtenha o mapeamento da superfície metropolitana como um todo, na direção de uma relação custo-benefício muito satisfatória.

O objetivo do trabalho foi mapear os padrões de urbanização sobre o extenso domínio superficial da RMSP. As versões digitais dos mapas obtidos podem servir à definição de condições de contorno superficial utilizadas em modelos de previsão do tempo e tempestades sobre a RMSP, especialmente no contexto do *Town Energy Budget* (TEB) de Masson (2000), um modelo que representa de forma explícita o balanço de energia sobre os cânions urbanos.

2. Metodologia

Um retângulo envolvente foi definido de forma que a área de estudo corresponda aos limites da carta topográfica do IBGE em escala 1:50.000 do município de São Paulo (folha SF 23-Y-C-VI-2). Essa área abrange aproximadamente 850 km² e compreende, além de São Paulo, os municípios de São Caetano do Sul, Santo André, São Bernardo do Campo e Diadema. O ponto central da área de estudo tem a coordenada 46° 37' 20.0" W / 23° 35' 46.0" S. A cena correspondente é a do órbita/ponto 154/126 do CBERS-2 tomada na passagem do satélite aproximadamente às 10 HL do dia 30/12/2004.

As classificações obtidas distinguem três diferentes classes de urbanização, duas classes associadas às áreas com vegetação, uma classe para superfícies de corpos de água e uma classe para alvos de elevada reflectância.

Os padrões de urbanização foram classificados em (**Figura 1**): (a) padrão horizontal-arbustivo, onde predominam edifícios com um ou dois pavimentos e forte presença de área verde no sistema viário e nos jardins das casas; (b) padrão horizontal, onde predominam edificações com um ou dois pavimentos e fraca presença de áreas verdes e (c) padrão vertical, predominantemente composto por edifícios verticais e próximos um ao outro. As áreas vegetadas foram separadas em áreas de vegetação arbórea, onde ocorreriam pixels puros correspondentes aos dosséis das árvores, e áreas de vegetação de gramíneas, caracterizada por grama, capim e árvores dispersas.

Para cumprir com o objetivo de mapear os padrões de urbanização e a cobertura terra na RMSP utilizamos os seguintes materiais: (a) cena do CCD-CBERS-2 órbita/ponto 154/126,

bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo; (b) carta topográfica 1:50.000 do IBGE (folha SF 23-Y-C-VI-2) digitalizada e georeferenciada, formato .tiff; (c) GPS Garmin com os parâmetros geodésicos ajustados aos da carta topográfica usada para o registro; (d) aplicativo SPRING v. 4.3 (Câmara et al., 1996).

Como procedimento metodológico, cumpriu-se em ordem cronológica as seguintes tarefas: registro das imagens geradas pelo sensor CCD, importação dos 115 pontos coletados em campo (média de 23 pontos por classe), análise estatística das imagens, realização de classificações pelo algoritmo K-Médias, cálculo e fatiamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), realização supervisionada pelo método de classificação MAXVER e análise dos resultados. Revisões das técnicas de processamento e classificação em sensoriamento remoto podem ser encontradas em Schowengerdt (1983), Jensen (2000) e Moreira (2001).

Para reduzir o uso de informação redundante, diminuir o tempo despendido e custo computacional, foram selecionadas entre as quatro bandas, as três menos correlatas, a partir da matriz de correlação das imagens (**Tabela 1**). A análise da **Tabela 2** indica que a banda do infravermelho próximo é a que mais contribui em informação devido ao seu maior desvio padrão e variância.

Tabela 1 Matriz de correlação das bandas utilizadas dentro do retângulo envolvente adotado.

| | Azul (B1) | Verde (B2) | Vermelho (B3) | Infravermelho (B4) |
|---------------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|
| Azul (B1) | 1.00 | 0.94 | 0.86 | 0.03 |
| Verde (B2) | 0.94 | 1.00 | 0.94 | 0.17 |
| Vermelho (B3) | 0.86 | 0.94 | 1.00 | 0.12 |
| Infravermelho (B4) | 0.03 | 0.17 | 0.12 | 1.00 |

Tabela 2 Estatística descritiva da área de estudo.

| Banda | Média | Desv. padrão | Variância |
|--------------|--------------|---------------------|------------------|
| 1 | 80.24 | 11.34 | 128.65 |
| 2 | 113.54 | 21.69 | 170.34 |
| 3 | 65.10 | 13.57 | 184.28 |
| 4 | 123.25 | 26.41 | 697.64 |

| | |
|---|---|
| (a) padrão horizontal-arbustivo | (b) padrão horizontal |
|  |  |
| (c) padrão vertical | (d) vegetação de gramíneas |
|  |  |
| (e) vegetação arbórea | |
|  | |

Figura 1 Padrões de urbanização e classes de vegetação da RMSP. (a) padrão horizontal-arbustivo; (b) padrão horizontal; (c) padrão vertical; (d) vegetação de gramíneas; (e) vegetação arbórea.

A etapa de classificação pelo algoritmo de agrupamento K-Médias consistiu na experimentação com o classificador não-supervisionado de agrupamento K-Médias e no processamento e fatiamento do índice de vegetação IVDN. Pelo algoritmo K-Médias, gerou-se imagens classificadas (a partir das bandas 1, 3 e 4) que apresentam entre 3 a 15 classes; enquanto o IVDN, processado a partir do programa LEGAL do SPRING, foi fatiado em 10 classes, sendo a primeira fatia de -1.0 a 0.1 e as outras com intervalo de 1 décimo até 1.

3. Resultados

A classificação com 10 classes do agrupamento K-Médias (**Figura 2**) apresentou a melhor correspondência com os dados de campo, separando satisfatoriamente os padrões de urbanização e classes de vegetação (**Tabela 3**). Já o IVDN foi eficiente na separação das áreas verdes em geral (sem distinção entre as classes de gramíneas e arbórea), atingindo o desempenho de 92,4%. Tais áreas aparecem no intervalo de 0.4 a 0.7 do índice. Para as outras classes, o IVDN apresentou resultado inferior ao do K-Médias.

Tabela 3 Correspondência entre os dados de campo e as classes geradas pelo K-Médias.

| | Gramma | Arbórea | Vertical | Horizontal arbustivo | Horizontal | Total | E.U. |
|----------------------|--------|---------|----------|----------------------|------------|-------|-------|
| Gramma | 12 | 2 | 0 | 1 | 0 | 15 | 80.0% |
| Vegetação | 1 | 23 | 0 | 0 | 1 | 25 | 92.0% |
| Vertical | 0 | 0 | 32 | 6 | 3 | 41 | 78.0% |
| Horizontal-Arbustivo | 0 | 0 | 0 | 18 | 1 | 19 | 94.7% |
| Horizontal | 0 | 0 | 4 | 0 | 11 | 15 | 73.3% |
| Total | 13 | 25 | 36 | 25 | 15 | 115 | |
| E. P. | 92.3% | 92.0% | 88.8% | 72.0% | 73.3% | | |

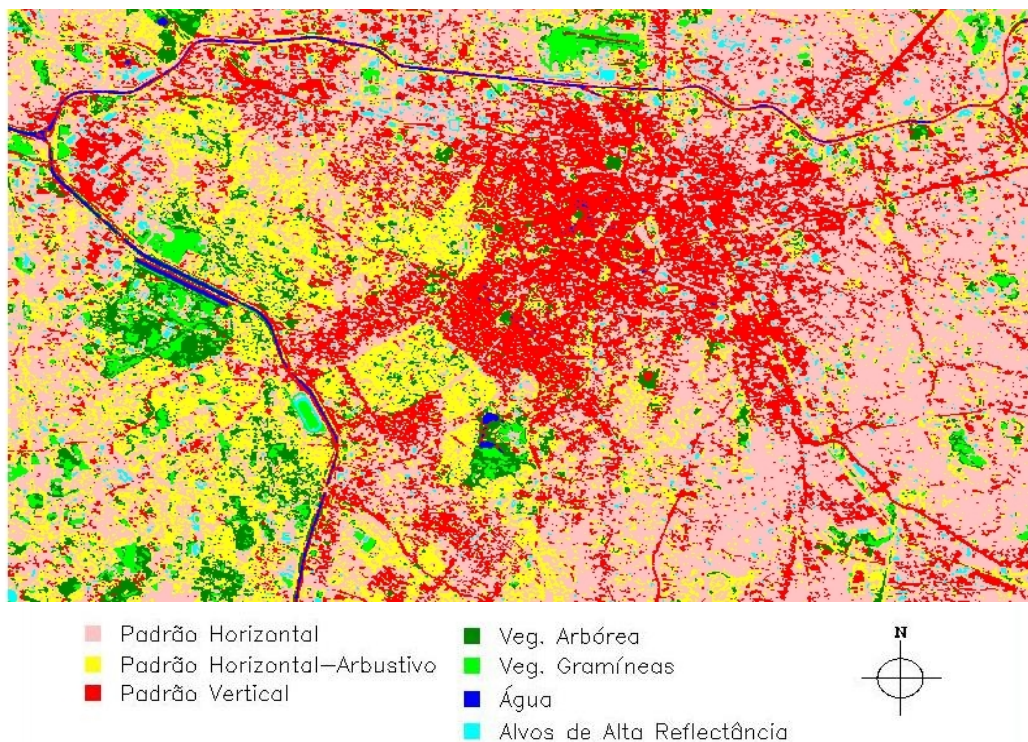


Figura 2 Centro da RMSP classificado pelo método K-Médias

As classes geradas de forma não-supervisionada e que tiveram boa correspondência com os dados de campo foram usadas como base para a coleta de áreas de treinamento para o classificador supervisionado Maxver (**Figura 3**). Tal classificação atingiu o desempenho geral de 91.29%, confusão média de 8.71% e 0.00% de abstenção média. O desempenho e a confusão para cada classe e de correspondência com os dados de campo são mostrados nas **Tabelas 4 e 5**.

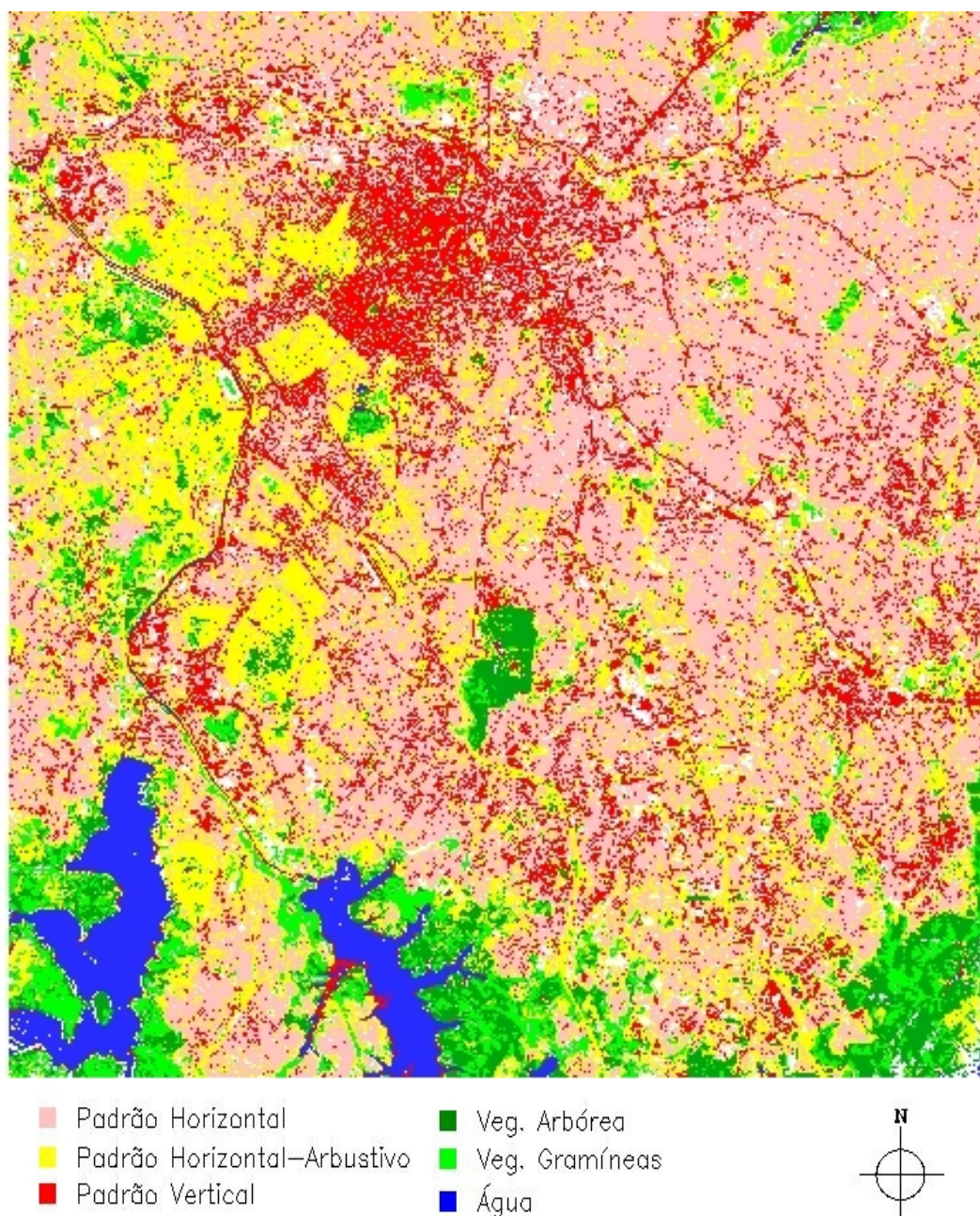


Figura 3 Classificação pelo método Maxver para a área de estudo.

Tabela 4 Correspondência entre os dados de campo e a classificação pelo método Maxver.

| | Vegetação: gramíneas | Vegetação: arbórea | Padrão vertical | Padrão horizontal- arbustivo | Padrão horizontal | Total | E. U. |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------|-------|-------|
| Veg. Gramíneas | 12 | 1 | 0 | 1 | 1 | 15 | 80.0% |
| Veg. arbórea | 1 | 23 | 0 | 4 | 0 | 25 | 92.0% |
| P. Vertical | 0 | 0 | 36 | 3 | 1 | 41 | 87.8% |
| P. Horizontal- Arbustivo | 0 | 0 | 0 | 18 | 1 | 19 | 94.7% |
| P. Horizontal | 0 | 0 | 2 | 1 | 12 | 15 | 80.0% |
| Total | 13 | 24 | 38 | 27 | 15 | 115 | |
| E. P. | 91.6% | 95.8% | 94.7 | 66.6% | 75.0% | | |

Tabela 5 Desempenho e confusão média das classes

| | Exatidão do Produtor | Exatidão do Usuário |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Gramíneas | 93.29% | 99.51% |
| Arbórea | 93.74% | 97.92% |
| Água | 100.00% | 98.64% |
| Vertical | 77.09% | 71.47% |
| Horizontal-Arbustivo | 93.83% | 89.28% |
| Horizontal | 75.76% | 84.17% |

Os principais alvos classificados como corpos de água na RMSP são os rios Pinheiros e Tietê, as represas Billings e Guarapiranga e a raia da Cidade Universitária. As áreas verdes se situam principalmente nos parques do Estado e Ibirapuera, no Campo de Marte, Cidade Universitária, Estação Ecológica do Tietê e nas margens das represas. Ao longo do Rio Tietê e pulverizado pela RMSP encontramos alvos de alta reflectância, pois aparecem com níveis de energia próximos de 255 nas bandas isoladas e se situam nos 0.01% que o Maxver se absteve de classificar em outras experimentações. Estes alvos englobam areia expostas, telhados de alumínio em área industrial etc.

4. Conclusões

Esse trabalho aplicou diferentes métodos de classificações sobre imagens multiespectrais da RMSP obtidas pelo satélite CBERS-2. O resultado desse sensoriamento remoto são mapas de classes de urbanização para a RMSP dadas pela seguinte classificação: padrão verticalizado (classe A), padrão horizontal-arbustivo (classe B), padrão densamente verticalizado (classe C), padrão horizontal (classe D). Classes associadas às superfícies de vegetação arbórea, vegetação de gramíneas e de corpos de água também foram definidas.

Mapas foram obtidos por segmentação do NDVI, pela aplicação do classificador Maxver e do agrupador K-Médias. Os resultados das diferentes classificações apresentam-se coerentes do ponto de vista qualitativo. As classificações foram confrontadas com cerca de uma centenas de alvos de superfície. O grau de correspondência com a verdade terrestre foi variável em função da classe analisada. A classificação Maxver atingiu o desempenho geral de 91.29%, confusão média de 8.71% e 0.00% de abstenção média.

O padrão de urbanização vertical ocorre principalmente no centro expandido da metrópole e em bairros de alto poder aquisitivo, como Ibirapuera, Moema, Higienópolis e Jardins. Já nos bairros do Pacaembu, Jardim Europa, Ibirapuera e Morumbi, Alto da Lapa e Vila Madalena encontramos o padrão horizontal-arbustivo, enquanto nos bairros mais afastados do centro,

principalmente nos sentidos Sul e Leste, há uma significativa baixa de áreas verdes, sendo estas áreas classificadas como padrão predominantemente horizontal.

Agradecimentos – Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J., and Mitsuo Ii, F., SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **J Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/>>. Acesso em: 3 nov. 2006.

CBERS-2. China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS). Catálogo de imagens do satélite disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 30 out. 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Informações disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 out. 2006.

Jensen, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper saddle River: Prentice-Hall, 2000.

Masson, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 357-397, 2000.

Moreira, M.A. Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001.

Oke, T. R.. **Boundary layer Climates**. Second edition. London: Methuen, 1987. 435 p.

Schowengerdt R. A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press Inc., 1983. 249 p.