

Estimativa da impermeabilização do solo urbano da cidade de São Paulo combinando dados demográficos e de sensoriamento remoto

Luiz Roberto de Campos Jacintho¹
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida²
Sidney Schaberle Goveia²

¹Prefeitura do Município de São Paulo – PMSP/SVMA
Rua do Paraíso, 387 – 04130-000 – São Paulo – SP, Brasil
luizjacintho@prefeitura.sp.gov.br

²Universidade de São Paulo - USP/IGc
Rua do Lago, 562- 05508-080 - São Paulo, SP - Brasil
talmeida@usp.br, sidney@igc.usp.br

Abstract. This paper describes a method to estimate urban impervious surfaces from remote sensing data. High and medium spatial resolution images are combined to calculate impervious surface coefficients for São Paulo city urban zone. The proposed method is based on the premise that in a humid tropical region the exposed soil is quickly covered by vegetation. Thus the calculation of impervious area is actually the area's plants, including the sub pixel information. The Ikonos and ETM-Landsat images are processed with the application of Soil adjusted vegetation index (SAVI) and a correlation between digital numbers and percent of impervious surface is adjusted. To normalize the relationship between digital number and area covered by vegetation we considered four points: one from 0% of vegetation (a roof industrial building), one of 100% of vegetation (forest of low albedo) and two intermediate points, with the vegetation cover obtained from IKONOS images in two very different areas. These four points generated a first degree curve with a R² of 0.9952. Allowing this equation, from the medium digital number of any sub area, it is possible estimate the permeable area.. The results are compared with those obtained from the use of population density as predictor of impervious cover, showing discrepancy because this method is valid only for the residential use scenario. Nevertheless, the use of both methods coupled appears to be a promising approach.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, urban planning, sensoriamento remoto, processamento de imagens, gestão ambiental urbana.

1. Introdução

Uma parte considerável da população do planeta vive em grandes concentrações urbanas e a qualidade de vida é altamente dependente de variáveis relacionadas à ocupação do meio físico, principalmente a densidade populacional e porcentagem de área verde. Entretanto, em cidades grandes e de crescimento desordenado, com forte disparidade na distribuição de renda, como no caso de São Paulo, a densidade de população nem sempre se correlaciona inversamente com as áreas verdes. A busca por métodos para a avaliação da impermeabilização do solo urbano tem sido constante e vem se modernizando com o surgimento e difusão das chamadas tecnologias de geoinformação (Campana e Tucci, 1994; Caetano, 2001; Bird et al, 2001; Phin et al, 2002).

No presente artigo é sugerido um método de estimativa da impermeabilização do solo urbano a partir de dados de sensoriamento remoto, explorando o marcante comportamento espectral da vegetação e considerando a correlação entre presença de vegetação e permeabilidade do solo. Para isso foi combinado o uso de imagens Landsat, que esbarram no que sempre foi considerado um problema para seu uso em áreas urbanas: a inadequada resolução espacial (GAMBA *et al.*, 2003); com imagens de alta resolução espacial (IKONOS) em sítios de referência. Os dados obtidos nestas imagens permitiram normalizar as respostas de imagem ETM Landsat e regionalizar dados relativos à permeabilidade. Os resultados foram comparados com outros obtidos em função da densidade demográfica, usuais em hidrologia urbana, para avaliação da sua efetividade e aplicabilidade.

2. Área de Estudo

A área estudada corresponde a 73 distritos administrativos dentro da Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana da Cidade de São Paulo. Esta região, que foi definida no plano diretor estratégico (PDE), apesar de apresentar diferentes graus de consolidação se configura na zona urbana da cidade, e por isso foi escolhida para estudo.

Ocupando uma área de aproximadamente 67.640 ha no centro da Região Metropolitana de São Paulo, os distritos são habitados por cerca de 7.502.251 pessoas (São Paulo, 2007), assentadas sobre uma extensa, contínua e adensada mancha urbana, no coração de uma das maiores metrópoles do mundo (Figura 1).

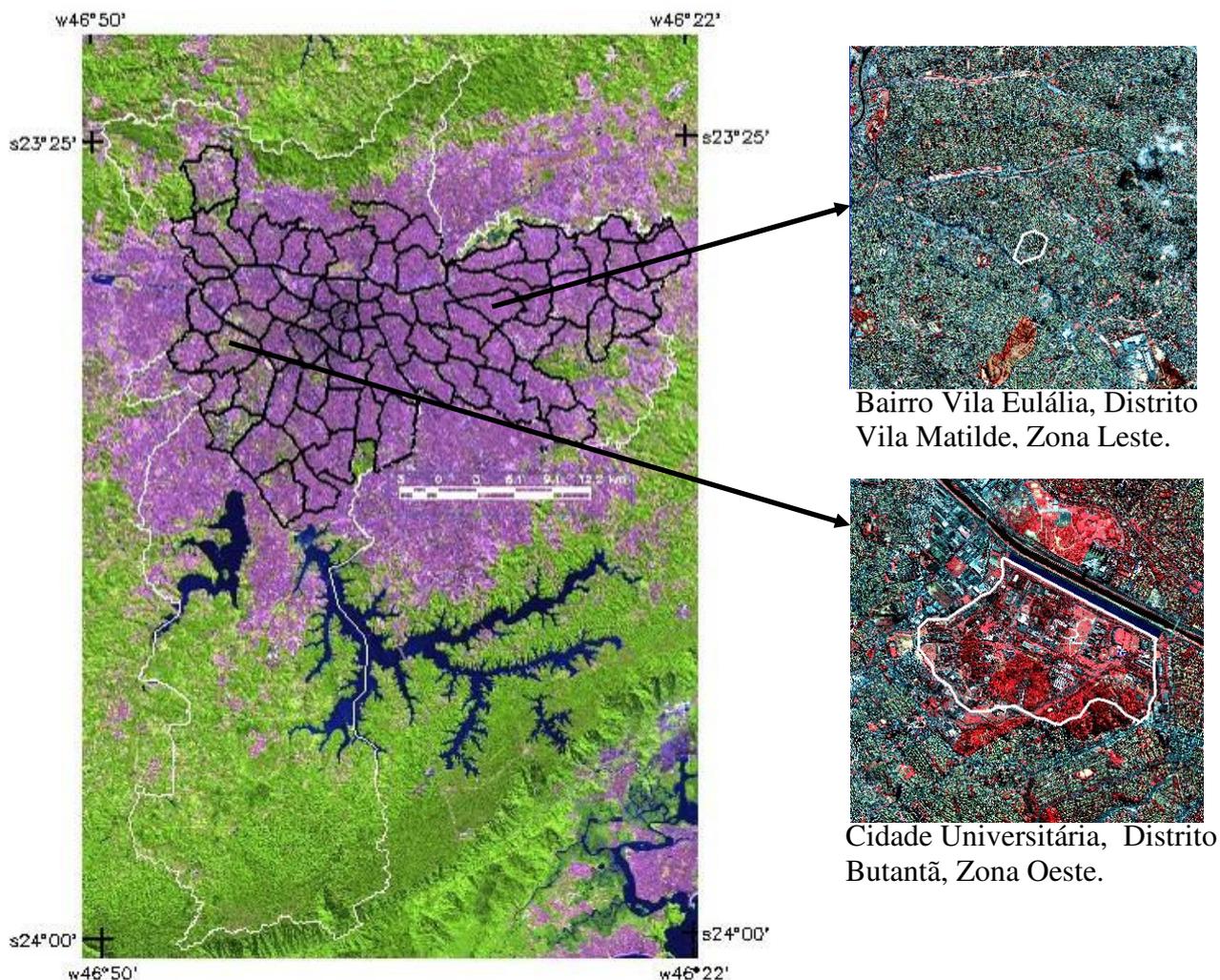


Figura 1. Delimitação do município de São Paulo, distritos e sítios de referência estudados

3. Métodos

Para a estimativa da impermeabilização do solo em São Paulo foram combinados dados de sensoriamento remoto de alta e média resolução espacial, além de dados censitários. O trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- Pré-processamento das imagens
- Processamento das imagens
- Integração e análise dos dados

3.1 Imagens usadas e pré-processamento

No desenvolvimento do trabalho foi usada uma imagem IKONOS do *campus* principal da Universidade de São Paulo (Distrito Butantã – figura 1), obtida em 09/6/2002, e outra do bairro de Vila Eulália (Distrito Vila Matilde, figura 1), obtida em 15/6/2003. Tais imagens são compostas de 4 bandas multiespectrais com 4 metros de resolução espacial, nos seguintes intervalos de comprimento de onda: Banda 1 (0,45-0,52µm, azul); Banda 2 (0,52-0,60µm, verde); Banda 3 (0,63-0,69µm, vermelho) e Banda 4 (0,76-0,90µm, infravermelho próximo - NIR). Foi utilizada ainda a banda pancromática (obtida no intervalo de 0,45 - 0,90µm), com 1 m de resolução espacial, para fusão com as imagens multiespectrais.

Além das imagens IKONOS, foi usada também uma Imagem Landsat ETM+ de 17/06/2000, nas bandas do espectro refletido da região do visível e infra-vermelho próximo, cujos intervalos de comprimento de onda se equiparam aos das bandas IKONOS. A imagem, com 30 m de resolução espacial, foi registrada com referência em imagens Landsat ETM+ ortoretificadas, obtidas junto ao sistema NASA-Geocover. As imagens IKONOS foram co-registradas com as imagens ETM, respeitando-se um RMS máximo menor que 1,0.

3.2 Processamento das imagens

Partindo-se da simplificação de se considerar como *pixels* de superfície permeável os com presença de vegetação, foram testados diferentes índices espectrais para o realce da resposta de vegetação. Em função de se trabalhar em áreas urbanas, escolheu-se o índice proposto por Huete (1988), que reduz significativamente a influência de solo (e materiais como cimento, telhas, asfalto etc.) na resposta, deixando-a mais pura. Trata-se do *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), que é obtido com a equação 2:

$$SAVI = (1+L) [(NIR-R) / (NIR+R+L)] \quad (2)$$

Sendo: L valor entre 0 e 1,0 (usualmente 0,5); NIR banda no infravermelho próximo (banda 4 nas imagens IKONOS e ETM); R banda na região espectral do vermelho (banda 3 nas imagens IKONOS e ETM).

Este índice permite ainda a clara separação dos *endmembers* de alto e baixo albedo (cimento e asfalto, por exemplo) da resposta de vegetação, já que o histograma apresenta três modas, com as duas primeiras referindo-se a pixels sem vegetação (baixo e alto albedo, respectivamente) e apenas a terceira moda referindo-se a vegetação. Assim, trabalhando-se o histograma de forma a englobar na mesma classe as duas primeiras modas, eliminam-se as superfícies não vegetadas. Em relação às superfícies com vegetação, adotou-se apenas uma classe, englobando vegetação arbórea densa ou simples presença dominante de clorofila.

As imagens IKONOS permitem, por sua excelente resolução espacial (1m na imagem fundida com a banda pancromática), analisar o resultado do realce, pela comparação com composições coloridas de bandas no infravermelho próximo – vermelho – verde. Nos testes foram comparados resultados de aplicação do NDVI e do SAVI sobre locais conhecidos do *campus* da USP com variada cobertura vegetal, de 0 a 100% e, entre os de 0%, com alto e baixo albedo. A figura 2 mostra o histograma da imagem com aplicação do índice SAVI em imagem IKONOS. Já as figuras 3a e 3b mostram as mesmas áreas, em 3a o resultado da manipulação de histograma indicada na figura 2 e em 3b uma composição colorida falsa cor com as bandas IKONOS 432 em RGB, com indicação de locais de alto e baixo albedo e variada cobertura vegetal. Observar que na figura 3a estas quatro categorias de coberturas se reduzem a duas, com e sem presença de vegetação.

Sobre a imagem SAVI-IKONOS, fatiada para dois níveis de cinza (como na figura 3a), foi então contabilizada a percentagem de área com vegetação para os dois sítios de referência (Vila Eulália e Campus da USP). Os resultados alcançados foram a base para transformação

dos números digitais da imagem SAVI-ETM dos sítios de referência, em porcentagem de área permeável e estimativa da impermeabilização de toda a área de estudo.

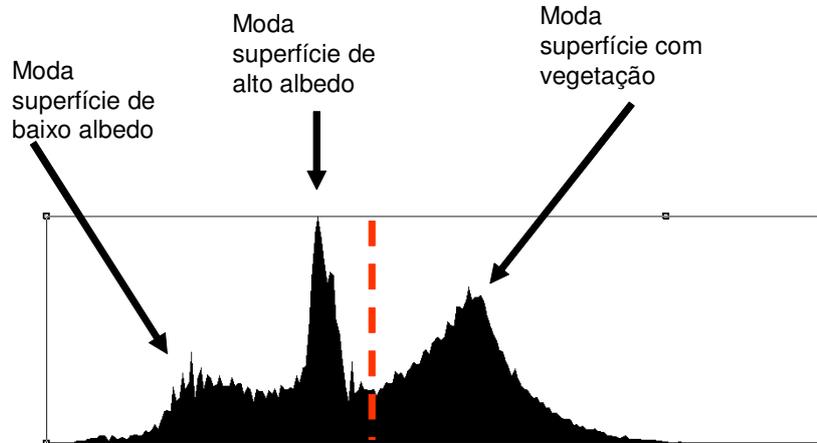


Figura 2 – Histograma de níveis de cinza mostrando limite dos NDs não relacionados a vegetação (zero) e vegetação (255).



Figura 3 –(a) Imagem resultante – SAVI fatiada para dois níveis de cinza (ausência de vegetação, em azul e presença em vermelho); (b) Imagem IKONOS falsa-cor (432 em RGB) da mesma área: Praça do Relógio USP e cercanias.

Obteve-se o Número Digital Médio (NDm) resultante da aplicação do índice SAVI em cada sítio de referência na imagem ETM, adotando-se um aumento de contraste único para toda a área. Conhecendo-se as áreas permeáveis de Vila Eutália e do Campus Butantã da USP, pode-se correlacionar aqueles dados com os NDs médios dos sítios de referência. Este procedimento passa a incluir a informação de *sub-pixel*, ou seja, a informação que influencia um dado *pixel*. Em uma imagem como a analisada, onde a resposta de vegetação é fortemente diferenciada da de não-vegetação, mesmo porcentagens entre 5 e 10% de vegetação serão computadas e o resultado mais próximo à realidade.

Para obter mais dois pontos confiáveis, adotou-se uma área de floresta de baixo albedo, onde a porcentagem de 100% de área permeável foi associada ao ND de 255. Com isso, qualquer área com 100% de vegetação, mesmo tendo albedo mais alto em função da arquitetura do dossel, por exemplo, terá associado 100% de permeabilidade. Para áreas impermeáveis, ou seja, com permeabilidade de 0%, associou-se o ND zero (0% de participação de vegetação, como presente em inúmeras construções de grande porte).

Dispondo-se dos quatro pontos acima descritos, pôde-se montar uma tabela e analisar o R^2 da curva obtida. Considerando-se uma curva de tendência de primeiro grau, a equação 3 fornece um excelente R^2 de 0,9952 para o conjunto de pontos obtidos (os dos sítios de referência) e dos extremos (zero e 100%).

$$y = 2,5373x - 5,3506 \quad (3)$$

O praticamente perfeito ajuste dos quatro pontos (Figura 4) não comprova o acerto da relação ND e permeabilidade, já que a origem destes NDs é o comportamento espectral da vegetação. Mas indica existir uma relação quase-linear muito clara entre os NDs e a vegetação, a qual necessariamente guardará uma forte correlação com as áreas permeáveis.

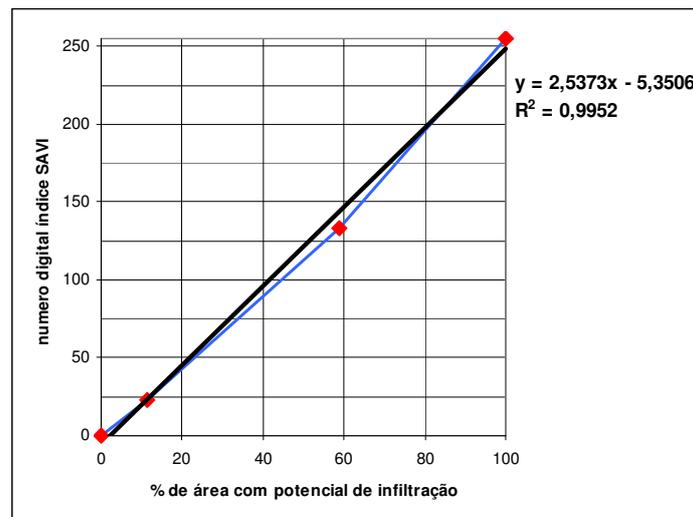


Figura 4. Curva de transferência de número digital para porcentagem de área com potencial de infiltração. Observar o excelente R^2 para uma curva de tendência linear, indicando a quase-linearidade da correlação.

3.3 Integração dos dados

Os dados de sensoriamento remoto foram integrados com aqueles referentes ao censo demográfico de 2000 (IBGE). Os dados do censo, agregados por distritos e por setores censitários, são disponibilizados em formato “shape” pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM). A integração se deu com o Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING), onde foi feito o recorte da região de estudo.

Com a aplicação da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), através de operações zonais, foi calculada a média dos DNs da imagem SAVI-ETM para cada um dos 73 distritos administrativos, bem como para os cerca de 11.000 setores censitários, que abrangem a área estudada. Os valores calculados foram incluídos nas respectivas tabelas de atributos, permitindo análises posteriores e o cruzamento das informações extraídas das imagens, com as do censo demográfico. Os resultados, na forma de tabelas não espaciais, foram exportados para tratamento estatístico com o software MsOffice-Excell. Assim, através do ND médio da imagem SAVI-ETM de cada distrito, lançado na equação 3, foram estimados os valores de impermeabilidade. Os resultados foram então cotejados, através da avaliação da correlação estatística, com aqueles obtidos da aplicação do método proposto por Campana e Tucci (op. cit.), em que a taxa de impermeabilização é estimada em função da densidade demográfica, segundo as equações 4 e 5.

$$A_{imp} = -3,86 + 0,55 d \text{ (para } 7,02 \leq d \leq 115 \text{ hab/ha)} \quad (4)$$

$$A_{imp} = 53,2 + 0,054 d \text{ (para } d > 115 \text{ hab/ha)} \quad (5)$$

Sendo A_{imp} a % de área impermeável e d a densidade populacional (hab/ha)

Foi feita ainda uma classificação dos setores censitários, combinando parâmetros de Densidade Demográfica e Cobertura Vegetal (média de ETM-SAVI), também com aplicação da LEGAL (expressões booleanas), para diferenciação de padrões urbanísticos. Para tanto foram estabelecidas as classes listadas no quadro 1. Tais classes foram definidas com base nos valores de corte também listados no quadro 1, sendo que esses valores foram estabelecidos a partir da análise do histograma da imagem ETM-SAVI e da média dos valores de densidade demográfica para a amostra de distritos da área de trabalho, além de diversos testes realizados.

Tabela 1. Descrições dos padrões urbanísticos e respectivos critérios de classificação

Padrão Urbanístico	SAVI-ETM (DNmédio)	Densidade Demográfica (hab/ha)
Residencial Denso: Regiões com uso predominantemente residencial, carentes em vegetação e com alta densidade demográfica.	<93,98	>100
Urbano não-residencial: Regiões com uso predominantemente não residencial (industrial ou comercial), também carente em vegetação, mas com densidade demográfica menor.	<93,98	<100
Residencial arborizado: Regiões com menor densidade demográfica e com vegetação, abrangendo os bairros jardins e bairros periféricos, onde se configura um mosaico de áreas urbanas e áreas vegetadas.	93,98-150	<100
Bosque: Alta densidade de vegetação arbórea – bosques urbanos .	>150	<100
Outros: Alta densidade demográfica e presença da vegetação, principalmente em áreas verticalizadas e arborizadas ou favelas em terrenos com vegetação ruderal (“mato”).	>93,98	>100

4. Resultados e Discussão

Na figura 5 está representada a distribuição dos resultados alcançados com a aplicação do método proposto para a estimativa da impermeabilização do solo dos distritos da zona urbana de São Paulo. Os valores variaram entre o mínimo de 53,7% para o distrito Jaraguá, e o máximo de 84,3% para o distrito Brás. Eles apontam maior impermeabilização nos distritos da zona central e leste, acompanhando as bacias hidrográficas do rio Tietê e seus afluentes da margem esquerda, como o Tamanduateí e o Aricanduva. De fato, são regiões com ocorrência freqüente de eventos de alagamento que causam inúmeros transtornos à população paulistana e são, por isso, alvo de constantes investimentos em infra-estrutura de combate às cheias, como os reservatórios de contenção, os chamados “piscinões”.

Já os distritos onde os resultados indicam menor impermeabilização, correspondem àqueles em que predomina o uso estritamente residencial e os bairros jardins, com presença marcante da arborização urbana, das praças e jardins residenciais. Também é menor a impermeabilização nas regiões periféricas, de expansão urbana, onde se assiste uma dinâmica acelerada de urbanização, que deve ser monitorada e planejada adequadamente, para que possa incorporar o verde urbano como elemento de aprimoramento da qualidade ambiental.

Em comparação com os valores estimados em função da densidade demográfica (equações 4 e 5), os resultados são em média 80% sobreestimados, o que pode ser explicado em parte pela existência de vários distritos onde o uso urbano não residencial predomina (figura 6). Estes locais que se caracterizam pela baixa densidade demográfica e alta densidade construtiva, foram definidos no PDE como Macroárea de Reestruturação e Requalificação

Urbana, que inclui o centro metropolitano, a orla ferroviária, antigos distritos industriais e áreas no entorno das marginais (São Paulo, 2002).

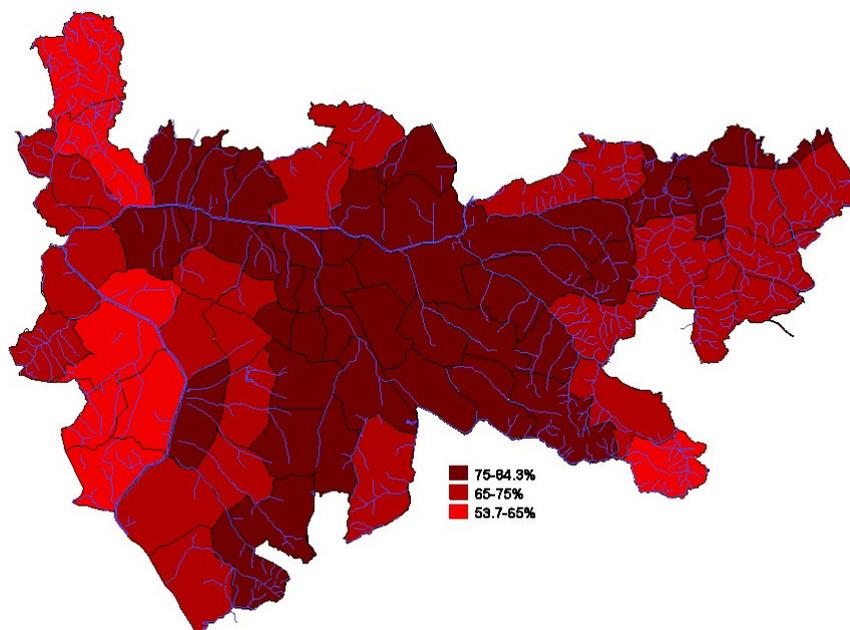


Figura 5. Distribuição espacial da porcentagem de área impermeável dos distritos da zona urbana de São Paulo, calculada com base nos valores médios do ND da imagem ETM-SAVI

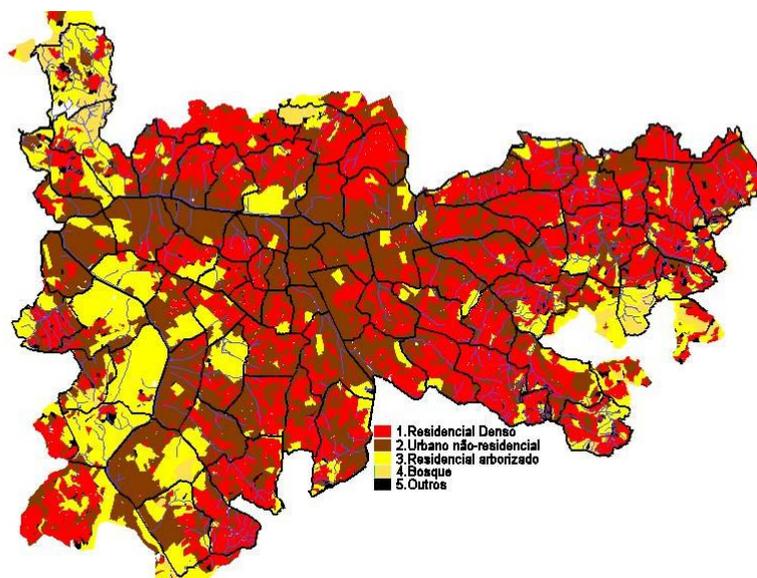


Figura 6. Classificação dos setores censitários segundo diferentes padrões de densidade demográfica e de densidade de vegetação

É importante considerar que a aplicação do método de estimativa da impermeabilização pela densidade demográfica, apesar de freqüente, tendo sido aplicado no plano diretor de macrodrenagem da bacia do Alto Tiete (São Paulo, 1999), deve ser limitada a regiões urbanas com predomínio de uso residencial (Campana e Tucci, op. cit.), justamente por subestimar os resultados em regiões tão heterogêneas como a área estudada.

A combinação dos dados de densidade demográfica e de vegetação (inferidos do processamento de imagens de sensoriamento remoto) evidencia a heterogeneidade da ocupação urbana de São Paulo (figura 6).

5. Conclusões

Face a relação quase-linear entre os NDs das imagens geradas pela aplicação do SAVI e a vegetação, a qual necessariamente guardará uma forte correlação com as áreas permeáveis, considera-se o método efetivo na estimativa da impermeabilização do solo em áreas urbanas. Contudo, os resultados foram bastante discrepantes daqueles obtidos com métodos usuais de inferência da área impermeável, aplicados em hidrologia urbana. Assim, somos levados a concluir que são grandes as limitações, tanto do uso de dados censitários como de imagens de resolução média, para o cálculo das taxas de impermeabilidade do solo urbano, porém seu uso combinado apresenta ganhos consideráveis e é bastante promissor enquanto método de análise ambiental urbana.

Futuramente o método pode ser utilizado na construção de indicadores ambientais, para comparação entre cidades e mesmo para o monitoramento da dinâmica urbana ao longo do tempo. Trata-se ainda de importante ferramenta para estudos hidrológicos e para o zoneamento ambiental, essenciais para a promoção do desenvolvimento urbano sustentável.

6. Bibliografia

- Bird, S.L; Stephen W. Albery and Linda R. Exum. 2001. Generating High Quality Impervious Cover Data. **Journal of Quality Assurance**, v. 8, n. 2, p. 91 – 103, 2000.
- Caetano, P.M.D. **Avaliação da taxa de impermeabilização do Município de São Paulo**. Prefeitura do Município de São Paulo. 2001
- Campana, N.; Tucci, C. E. M. Estimativas de área impermeável de macrobacias urbanas. **Revista Brasileira de Engenharia**. V.2, n.12, 1994
- Campana, N.; Tucci, C.E.M. Previsão da vazão em macrobacias urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* v.4 n.1 p.19-33,1999
- Centro de Estudos da Metrópole – CEM. Bases de dados demográficos e divisão territorial. Disponível em: www.centrodametropole.org.br. Acesso em: 05.out.2008.
- Gamba, P.; Benediktsson, J.A. & Wilkinson, G. (2003) Foreword to the special issue on urban remote sensing by satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9):1903-1904.
- Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI), **Remote Sens. Environ.** 25: 295-309, 1988.
- IBGE. Censo Demográfico 2000. IBGE, Rio de Janeiro, 2000
- Phinn, S.; Stanford, M.; Scarth, P.; Murray, A.T. & Shyy, P.T. – Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soils (VIS) model by subpixel analysis techniques. **International Journal of Remote Sensing**, 23 (20): 4131-4153. 2002.
- Pozzi, F. and C. Small Exploratory Analysis of Suburban Land Cover and Population Density in the U.S.A. In **Proceedings of the IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas**, pp. 250-254. 2001
- Pozzi, F. and C. Small. Vegetation and Population Density in Urban and Suburban Areas in the U.S.A. In **Proceedings of the Third International Symposium of Remote Sensing of Urban Areas**, 11-13 June 2002, Istanbul, Turkey, pp. 489-496. 2002
- São Paulo – Estado. DAEE. **Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê. Bacia do Rio Aricanduva: diagnóstico geral e ações recomendadas**. São Paulo, 1999. (DAEE-PDAT1-HI-RT-159)
- São Paulo : Município. Lei nº 13.430: Institui o Plano Diretor Estratégico (PDE) e o Sistema de Planejamento e Gestão do Desenvolvimento Urbano do Município de São Paulo. 2002.