

MAPEAMENTO DE ÁREAS URBANIZADAS COM IMAGENS LANDSAT E CLASSIFICAÇÃO BASEADA EM OBJETO

Mapping of Urban Areas with Landsat Images and Object Based Image Analysis

Claudia Durand Alves¹
Teresa Gallotti Florenzano¹
Madalena Niero Pereira¹

¹ **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**
Observação da Terra - Divisão de Sensoriamento Remoto
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
durand@dsr.inpe.br
teresa@dsr.inpe.br
madalena@dsr.inpe.br

RESUMO

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de classificação automática de áreas urbanizadas contínuas e dispersas que seja replicável em diferentes regiões do Brasil. Com essa metodologia busca-se o aumento da exatidão do mapeamento bem como reduzir a subjetividade e o tempo empregado no procedimento. Para este fim, aplicou-se, usando o software Definiens, a classificação baseada em Objeto em imagem LANDSAT da região de Piracicaba, Limeira e Rio Claro, do estado de São Paulo, obtida em 2007. Este procedimento consiste na segmentação multiresolução das imagens e na classificação baseada na lógica fuzzy. Na avaliação dos resultados foram utilizadas imagens de alta resolução, disponíveis no Google Earth. O bom desempenho obtido na classificação automática da área de estudo (índice global de 0,94 e Kappa de 0,72) indica a viabilidade do método aplicado para outras áreas urbanizadas.

Palavras-chave: Análise Baseada em Objeto, Áreas Urbanizadas, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

This study attempts to develop an automatic method to map urban areas and urban sprawl, and that have the possibility of replicating to different urbanization regions of Brazil. The objective is to achieve a methodology for the increase of precision and reduction of processing time and subjectivity. Object-based Image Analysis with Definiens software and LANDSAT images (acquired in 2007) of the Piracicaba, Limeira and Rio Claro region (São Paulo state) were used. The object based approach is a spatial analysis method based essentially on segmentation and classification outputs. Primitive objects are created on given space scale levels with different resolution, and classification rules are applied based on a fuzzy rule decision tree classifier. High resolution images available at Google Earth were used for accuracy assessment. The good results obtained (Overall Accuracy: 0.94 and Kappa Index: 0.72) from automatic classification of the study area indicate that the object-based method can be suitable for semi-automatic urban mapping.

Keywords: Object Based Image Analysis, Urban Areas, Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

Embora ocupem aproximadamente 1% da superfície terrestre, é nas áreas urbanas que se desenvolve a maior parte das atividades humanas. Segundo Powell et al. (2008) são nestas áreas que ocorrem significativas transformações dos recursos naturais, sendo alteradas as propriedades dos

ecossistemas nas quais elas estão inseridas e daqueles que fazem parte de seu entorno.

Em estudo desenvolvido por Quevedo Neto e Lombardo (2006) sobre dinâmica da paisagem na área de transição urbano-rural, os autores destacam que essa dinâmica advém da pressão exercida pelo ambiente urbano, que estimula a especulação imobiliária, proliferação de atividades urbanas, mudanças nas

atividades agropecuárias e nos ecossistemas naturais. O resultado se traduz na transformação da paisagem que é então caracterizada por um mosaico de diferentes usos da terra, onde emergem conflitos que devem ser compreendidos para se constituir uma base de dados que possibilite sua operacionalização em termos de políticas públicas de uso e ocupação da terra, preservando assim a qualidade da paisagem.

As modificações que estão ocorrendo, quanto à forma de crescimento das cidades brasileiras tem motivado estudos, entre eles o de Reis (2006), que visam apresentar um diagnóstico e análise do novo processo de desenvolvimento. Conforme esse autor, as mudanças no processo de urbanização do Brasil ocorrem: com a formação de áreas de urbanização dispersa que se estendem pelo vasto território, separadas no espaço físico, mas mantendo estreitos vínculos entre si, como elemento de um único sistema; com a regionalização do cotidiano das pessoas que adotam novos modos de vida devido à mobilidade; com novas formas de gestão do espaço pelo surgimento de formas condominiais diversificadas como condomínios residenciais, grandes shoppings centers, complexos universitários, entre outras.

De acordo com Ojima (2007), a orientação em que se dá a urbanização também assume papel importante no processo de expansão urbana e no conseqüente menor ou maior grau de dispersão. Algumas aglomerações podem se desenvolver condicionadas por constrangimentos físicos, como serras, rios, mar ou outras barreiras naturais, além de terem uma estreita relação com outros elementos, como rodovias, ferrovias, pólos econômicos regionais, etc, indicador de linearidade, que mede o grau em que as áreas urbanizadas se distribuem e se ajustam a um formato mais circular ou elíptico.

Segundo Spósito (2007) o estudo das novas formas de expansão urbana tem sua importância ampliada à medida que se verificam, em várias cidades do globo, novas formas de crescimento urbano marcadas pela descontinuidade territorial. Em estudo desenvolvido tendo como referência 22 (vinte e duas) áreas urbanas do Estado de São Paulo, a descontinuidade dos tecidos urbanos é característica de todas as áreas analisadas, independentemente de suas dimensões territoriais e populacionais, assim como de aspectos físicos que podem acentuar ou amenizar a descontinuidade das áreas urbanizadas, como o relevo e a hidrografia.

A modelagem urbana em geral, incluindo estas novas formas de expansão, entretanto, apresenta problemas de falta de conhecimento e compreensão dos fatores físicos e socioeconômicos que contribuem para determinado padrão urbano e a dinâmica das cidades. Muitas destas informações podem ser obtidas por dados de Sensoriamento Remoto. As técnicas de Sensoriamento Remoto têm se mostrado de grande aplicação no mapeamento de áreas urbanas e na análise e modelagem do crescimento urbano e mudanças de uso do solo.

Através das técnicas de sensoriamento e SIG podem-se obter dados espaciais atualizados, detalhados do território e com alta frequência temporal, além de séries históricas de dados. Esses dados possibilitam uma visão espacial e temporal do processo de crescimento urbano e permitem obter informações deste ambiente como uso do solo, infra-estrutura, e inferir determinadas características sócio-econômicas. De acordo com Herold et al (2003) o desenvolvimento de novos sensores orbitais proporciona dados adequados para a análise da dinâmica urbana em escalas geográficas mais detalhadas.

O Sensoriamento remoto e o GIS têm sido reconhecidos como ferramentas na análise urbana e modelagem. O SPRING, como sistema GIS, proporciona um ambiente flexível para armazenar, analisar dados digitais de várias fontes, necessários para levantamento, mapeamento de dados de uso e cobertura vegetal natural da terra, detecção de mudanças e análise espacial destes dados. Isto pode ajudar na definição de políticas públicas, na elaboração de estratégias de desenvolvimento urbano.

Dados multiespectrais, multitemporais e multiresolução são transformados, por meio de novos métodos de análise, em informações importantes para entender e monitorar os processos urbanos (Li and Weng, 2007). O trabalho desenvolvido por Li and Weng (2007) apresenta metodologia para a criação de índice de qualidade de vida, usando como área teste a cidade americana de Indianópolis, baseando-se na integração de dados de imagens orbitais LANDSAT/ETM+ e informações censitárias em ambiente GIS. As variáveis ambientais, como quantidade de vegetação, superfícies impermeáveis e temperatura foram extraídas das imagens e as socioeconômicas dos dados censitários. Estes autores verificaram que a vegetação tem correlação positiva com renda, valor das residências e nível educacional, tendo correlação negativa com temperatura, superfícies impermeabilizadas e população/densidade de residências. O trabalho também demonstrou que o ambiente GIS pode proporcionar uma plataforma efetiva para integrar diferentes modelos de dados de variadas fontes, como dados de sensoriamento remoto e censitário para medir qualidade de vida em ambiente urbano.

Sparovek e Costa (2006) desenvolveram trabalho com o objetivo de verificar a interferência da evolução urbana sobre a quantidade, qualidade, e distribuição da cobertura vegetal. Para isto, foi analisada a dinâmica da ocupação e da evolução da mancha urbana da cidade de Piracicaba através do uso de fotografias aéreas e SIG no período entre 1940 e 2000 em cinco datas distintas 1940, 1962, 1978, 1995, e 2000. No levantamento da vegetação verificaram que as maiores porções de cobertura vegetal se encontram no entorno urbano e salientam a necessidade de conhecer e planejar as áreas periurbanas antes que estas sejam modificadas pelas estruturas urbanas.

Hanqiu (2007) propõe técnica para extração de áreas urbanas construídas usando dados dos sensores

TM e ETM+ do satélite LANDSAT e classificação automática dos dados. Foram elaborados três índices que representam classes amplas de uso do solo: área construída (índice de área construída), corpos d'água (índice de água) e solo exposto/vegetação (índice ajustado solo, vegetação) gerando três novas imagens usadas na classificação. As áreas urbanas construídas foram mapeadas com uma precisão média de 95%, sendo que a maior obtida foi de 98,5%.

Entre as novas abordagens de obtenção de informações a partir de dados de sensoriamento remoto, destaca-se a análise baseada em objetos. A classificação por meio da análise orientada ao objeto baseia-se no agrupamento de pixels a partir da segmentação da imagem em objetos homogêneos e contíguos. Uma multiplicidade de variáveis pode ser calculada como pertencente a um sub ou super objeto, numa hierarquia multiníveis (segmentação multi-resolução). Para a classificação é utilizado o maior grau de pertinência dos objetos à determinada classe por meio da lógica fuzzy (Chubey et al. 2006).

Os estudos de Pinho (2005), Araújo (2006), Rocha (2007), Antunes e Cortese (2007), entre outros, confirmam a grande potencialidade da classificação orientada a objeto para mapeamento urbano, utilizando imagens de alta resolução espacial. Com relação ao mapeamento urbano com imagens de média resolução espacial, utilizando essa técnica, cabe destacar o artigo de Alves et al. (2009). Estes autores mostraram o bom desempenho da classificação automática de manchas urbanas contínuas e dispersas utilizando análise orientada a objeto em imagens Landsat (média resolução espacial, 30m) de 1985 e 1999, do município de São José dos Campos, SP.

Dada a importância do mapeamento e monitoramento das áreas urbanas e com base nesses estudos, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de metodologia para mapeamento automático de áreas urbanizadas contínuas e dispersas usando dados de Sensoriamento Remoto e sistema de classificação baseado em objeto. O desenvolvimento da metodologia representa um esforço no sentido de diminuir a interferência humana no processo de mapeamento (escala menor que 1:50.000), a partir da exploração de dados de média resolução espacial (imagens Landsat, 30m), e reduzir o trabalho de edição vetorial dos dados para corrigir áreas erroneamente classificadas. Neste estudo, as imagens de alta resolução (QuickBird) foram utilizadas para a avaliação da exatidão da classificação.

2. ÁREA DE ESTUDO

Para a realização do trabalho foi utilizada como área de estudo a região do Estado de São Paulo compreendida pelos municípios de Piracicaba, Limeira, Rio Claro, Cordeirópolis, Santa Gertrudes e Iracemápolis, correspondendo no território a uma área de 2.815 km². Estes municípios localizam-se no setor centro leste do Estado de São Paulo, em uma das regiões mais industrializadas e produtivas do estado de São Paulo (FIGURA 1).

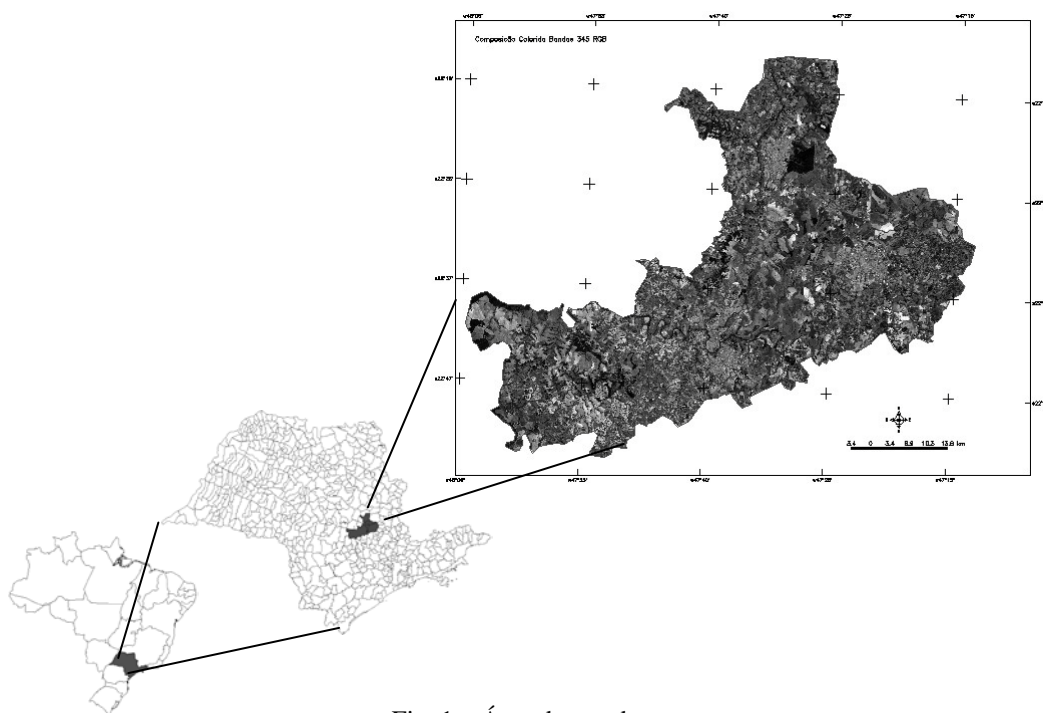


Fig. 1 – Área de estudo

Esta região apresenta intensa atividade agrícola com destaque para a cultura temporária de cana de açúcar e cultura permanente de laranja, sendo esta última a cultura dominante no município de Limeira. Com relação ao relevo, estes municípios estão situados na depressão periférica paulista. A população dos municípios analisados, para os anos de 2000 e 2007, e suas respectivas áreas territoriais, segundo o IBGE, são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 - ÁREA E POPULAÇÃO NOS ANOS DE 2000 E 2007 DOS MUNICÍPIOS ANALISADOS

	<i>População (número de habitantes)</i>				<i>Área (km²)</i>
	1980	1991	2000	2007	
<i>Piracicaba</i>	214.307	283.833	329.158	358.108	1.370
<i>Limeira</i>	150.561	207.770	249.046	272.734	581
<i>Rio Claro</i>	110.202	138.243	168.218	185.421	498
<i>Cordeirópolis</i>	9.379	13.338	17.591	19.309	137
<i>Sta Gertrudes</i>	7.987	10.485	15.906	19.044	98
<i>Iracemópolis</i>	8.283	11.752	15.555	18.026	116
Total	500.719	665.421	795.474	872.642	2.800

Fonte: Censo Demográfico IBGE

3. MATERIAL E MÉTODO

Na realização deste trabalho foram utilizadas as imagens dos canais 3, 4 e 5 TM/LANDSAT 5 (órbita/ponto 220/75 e 220/76) obtidas em 08 de setembro de 2007. Na região de estudo esta data corresponde ao final da estação seca e período do calendário agrícola em que as áreas cultivadas especialmente com cana de açúcar encontram-se em estágio de colheita com grande quantidade de solo exposto. As áreas urbanizadas se confundem com solo exposto o que dificulta a separação entre estes dois tipos de alvo nas imagens obtidas neste período. Neste contexto, a seleção desta data visou definir e testar chaves de interpretação para diferenciar áreas urbanas de solo exposto que corresponde ao maior problema de super estimativa de áreas urbanizadas em função de resposta espectral semelhantes. Outro motivo refere-se à dificuldade na obtenção de imagens principalmente em períodos chuvosos quando a vegetação encontra-se mais densa, o que aumenta a discriminação entre alvos urbanos e áreas de pasto antrópico e culturas.

O mapeamento da cultura de cana de açúcar realizado pelo projeto CANASAT da Divisão de Sensoriamento do INPE relativo ao ano de 2007 (RUDORFF, 2007) foi utilizado como um dado auxiliar na etapa de segmentação das imagens e na análise dos resultados da classificação. Os dados, espacializados e georreferenciados, de áreas com cana de açúcar foram

utilizados para a verificação de áreas ocupadas com esta cultura, erroneamente classificadas como urbanizadas, pois na época da aquisição da imagem a região de estudo encontrava-se com solo exposto associado à cana colhida.

No processo de classificação foi utilizada a análise baseada em objeto por meio do software Definiens 5.0. Este tipo de classificação baseia-se nos objetos ou segmentos da imagem e não nos pixels individualizados. Na imagem um objeto representa uma identidade que pode ser individualizada por seus atributos e propriedades da classe que lhe deu origem (Definiens, 2006). Nesse processo foi feita a segmentação e, em seguida, a classificação das imagens. Na segmentação a imagem é dividida em objetos homogêneos e contíguos e são criados diferentes layers contendo os objetos em diferentes escalas, de acordo com critérios de tamanho, forma e cor, conectados entre si. Diferentemente dos procedimentos tradicionais, neste podem ser considerados outros atributos, além das características espectrais dos objetos, tais como as relações topológicas, textura, forma, tamanho.

Inicialmente foi definida uma legenda ampla de uso e cobertura vegetal natural da terra que incluiu as seguintes classes: área urbanizada; solo exposto; vegetação e corpos d'água. Dentro da classe vegetação agruparam-se neste trabalho áreas de mata/capoeira, pastagem e campo antrópico.

Em seguida foi gerado um banco de dados contendo as imagens (bandas 3, 4 e 5) do TM-LANDSAT 5, o mapa temático de áreas de cultura da cana de açúcar e os limites municipais da região analisada. Nestes dados temáticos foi aplicada a segmentação multiresolução na qual todos os polígonos gerados nos níveis superiores ou inferiores seguem os limites da primeira. Este procedimento permitiu que os limites das áreas urbanizadas, a serem definidos posteriormente, respeitassem espacialmente os limites dos planos temáticos, facilitando assim a análise e quantificação dos dados por município ou região de estudo, assim como sua comparação com o mapa de cana.

As imagens TM foram segmentadas, utilizando os parâmetros de escala (10), forma (0,1) e cor (0,9), definidos em trabalho desenvolvido por Alves (2007) com base nas características espaciais dos dados e dos alvos a serem identificados. Esta segmentação (SMR), ainda que tenha gerado um número muito grande de segmentos, foi considerada adequada principalmente por permitir a identificação dos núcleos urbanos dispersos, descontínuos da mancha urbana principal dos municípios. Para contornar o problema do grande número de segmentos gerados para alvos que necessitariam de um parâmetro de escala maior foi utilizado um outro tipo de segmentador disponível no Definiens 5.0, denominado Segmentação por Diferença Espectral (SDE).

Neste sentido, aplicou-se a segmentação por diferença espectral na SMR já realizada visando o agrupamento dos segmentos existentes a partir de um

parâmetro de escala (intervalo no qual os segmentos contíguos devem ser agrupados baseando-se na média do valor espectral de cada um deles) definido empiricamente. Como parâmetro de escala, selecionou-se o valor 20, que permitiu o agrupamento de segmentos contíguos pertencentes às classes solo exposto e água, exemplificados na Figura 2.

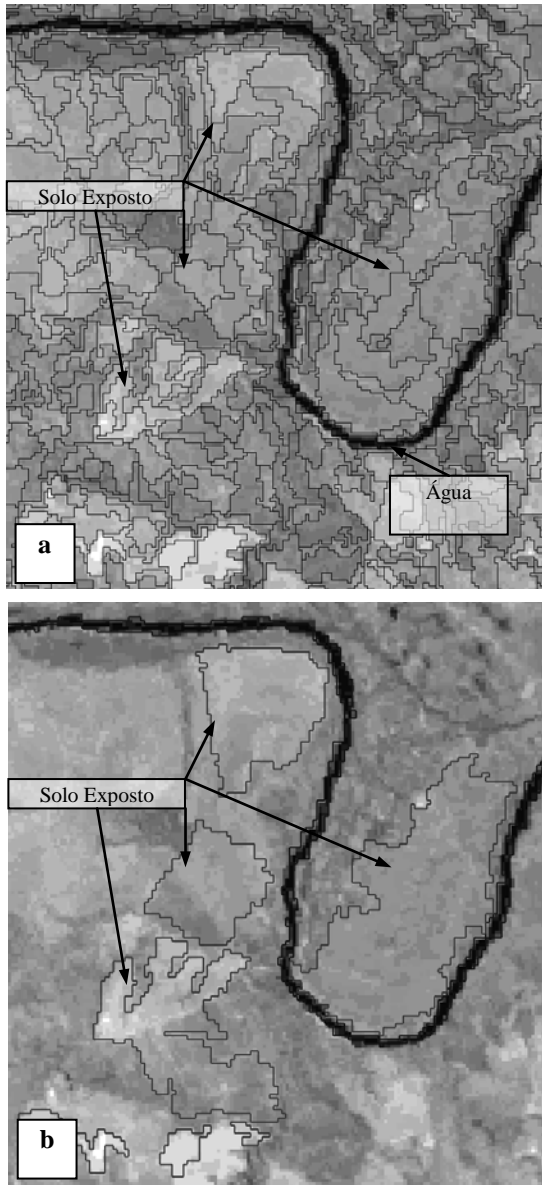


Fig. 2 – Resultados da segmentação SMR (a) e SDE (b)

A partir dos dois níveis de segmentação foram realizadas as classificações, sendo que para as classes área urbanizada e vegetação utilizou-se a SMR e para as classes solo exposto e água a SDE. Este procedimento pode ser feito devido ao recurso da segmentação multiresolução existente no Definiens, que traz o conceito de hierarquia para o banco de dados, possibilitando o relacionamento dos objetos no mesmo plano de informação ou em planos superiores ou inferiores em relação àquele observado, por meio dos conceitos de sub-objetos e super-objetos.

Os conjuntos de atributos que descrevem cada classe a ser mapeada são denominados descritores. No processo de determinação dos descritores foram coletadas amostras de treinamento na SMR para as classes área urbanizada e vegetação e na SDE para as classes solo exposto e água. Analisaram-se atributos do objeto, de relacionamento entre as classes, relacionamento global e operadores lógicos para a elaboração dos descritores utilizados na classificação. A seleção dos atributos que compõem os descritores das classes é realizada com base no conhecimento do intérprete em relação aos dados analisados e aos objetos de estudo, em seus diversos aspectos: espectrais, espaciais, dimensão, textura, contexto, relacionais, entre outros. Foram espacializados os atributos mais relevantes, em ambos os planos de segmentação, para verificar o poder de cada atributo na discriminação das amostras. Essa espacialização dos valores de cada atributo, sob a forma de uma imagem (FIGURA 3), permite visualizar e avaliar o seu comportamento no conjunto das amostras facilitando o processo de seleção dos atributos.

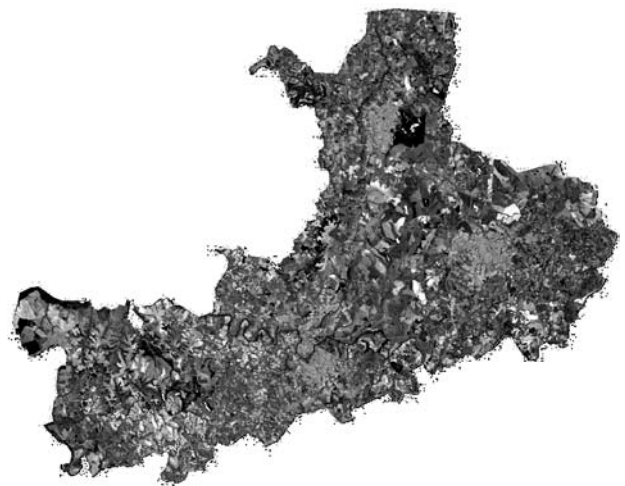


Fig. 3 – Exemplo da espacialização do atributo média na banda 3

Os atributos apresentados na Tabela 2 foram selecionados por permitirem uma melhor separabilidade entre os objetos amostrais que representam as classes de interesse.

TABELA 2 – Atributos selecionados para as classes de interesse

Classes	Atributos	Tipo de Atributo
água	média Banda 5	espectral
	existência água (super-objeto)	Contextual
solo exposto	NDVI	Espectral
	média Banda 3	
	Homogeneidade	Textural
	existência de solo exposto (super-objeto)	Contextual
área urbanizada	NDVI	Espectral
	média Banda 3	
	Homogeneidade	Textural
vegetação	NDVI	Espectral

Após a seleção dos atributos foram estabelecidos os intervalos dos valores de cada um deles. Para isto, foram gerados gráficos a fim de se determinar a função correspondente à inclusão dos objetos nas classes. Este procedimento é feito tomando-se por base os valores encontrados nos polígonos amostrais selecionados para cada classe de interesse. Nesta etapa os atributos selecionados são avaliados a partir da separabilidade entre os objetos de classes distintas, bem como refinados os conjuntos de amostras selecionadas para cada classe, observando-se a sua coerência em função de cada atributo.

A partir dos histogramas gerados para os atributos selecionados foram estabelecidas as funções de pertinência baseadas em lógica fuzzy. Estas funções definem a inclusão de um objeto em uma determinada classe baseando-se em um grau de pertinência dado por limites imprecisos. Os gráficos dos atributos da classe urbanizada, e suas respectivas funções de pertinência fuzzy, são mostrados na Figura 4.

O processo de classificação foi realizado em duas etapas: a primeira teve como base a SDE, e foram obtidas as classes água e solo exposto. A segunda utilizou a SMR e o resultado da primeira como atributo contextual obtendo-se, além das classes anteriores, as classes áreas urbanizadas e vegetação. Para a classe solo exposto foi utilizado o atributo contextual de existência desta classe no layer SDE, visando melhorar sua exatidão, uma vez que alguns objetos possuíam valores de atributos de textura e média na banda 3 semelhantes às áreas urbanizadas.

Como produto foi obtido um mapa temático com as classes área urbanizada; solo exposto; vegetação; água e áreas não classificadas. Posteriormente, para atender os objetivos do trabalho foi gerado um mapa contendo duas classes: área urbanizada e área não-urbanizada (composta pelo agrupamento de todas as demais classes). Esse produto foi exportado do Definiens e inserido em um banco de dados criado no SPRING 4.3.3 (CÂMARA et al., 1996). Neste banco foram incluídos também as imagens analisadas e o mapeamento de áreas de cana de açúcar realizado pelo projeto CANASAT da Divisão de Sensoriamento do INPE relativo ao ano de 2007, que ajudou na edição final do mapa das áreas urbanizadas.

Foi realizada análise qualitativa da classificação a partir da comparação do mapeamento com imagens de alta resolução do satélite QuickBird disponíveis no Google Earth que cobrem a maior parte das áreas urbanizadas do mundo. O uso dessas imagens, de datas relativamente recentes, em conjunto com dados de média resolução, conforme já citado por Sutton et al. (2007), se mostra como poderosa ferramenta de avaliação de classificação com dados como os do Landsat, por exemplo, e permite reduzir visitas a campo.

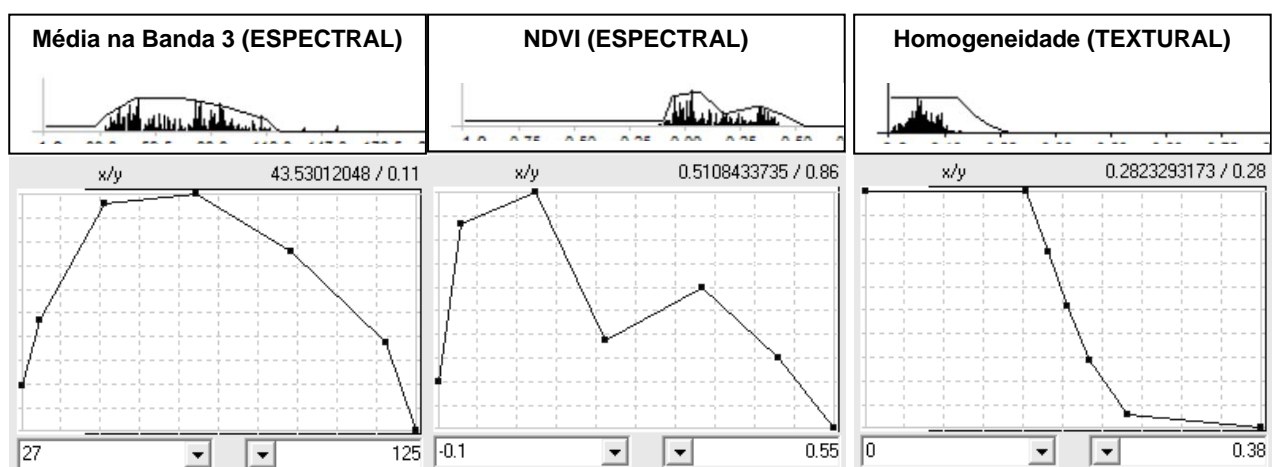


Fig. 4 – Gráficos e funções fuzzy gerados para os atributos da classe área urbanizada

Na avaliação da exatidão da classificação automática das áreas urbanizadas considerou-se apenas a área coberta pelas imagens QuickBird. Para isto, foi gerada uma grade com resolução de 1Km x 1Km através do programa LEGAL e definidos pontos centrais de cada quadrícula utilizando a opção “geração de pontos amostrais pelo centro de massa” do SPRING. Foram sorteados 184 pontos amostrais correspondentes a 10% do total de quadrículas que cobrem a área de estudo. Para esta avaliação realizou-se uma análise visual das imagens de alta resolução QuickBird e foram definidos os erros de omissão e comissão da classificação.

Como etapa final foi realizada a edição vetorial do mapa obtido da classificação automática para reduzir os erros deste produto. Neste sentido, o aspecto híbrido, mapeamento automático e manual, da metodologia desenvolvida neste trabalho visa aumentar a aplicação do mapa para estudos urbanos e subsidiar políticas públicas. Para sistematizar o processo de edição do mapa gerou-se uma grade de resolução de 5km x 5km, que direcionou as correções realizadas. As quadrículas foram analisadas individualmente e uma correção preliminar foi feita por meio da interpretação manual, considerando-se critérios de fotointerpretação e utilizando-se a edição vetorial do SPRING. Com o dado auxiliar referente à cultura de cana de açúcar eliminaram-se os polígonos de áreas agrícolas erroneamente classificados como área urbanizada.

Os erros de inclusão foram reduzidos pela eliminação de polígonos classificados erroneamente como urbanos. Os erros de omissão foram reduzidos incorporando-se polígonos pertencentes às áreas

urbanizadas, mas atribuídos às demais classes. Para isto retomou-se a classificação e a segmentação inicial dos dados em que os alvos são definidos por polígonos associados às diferentes classes e acrescentou-se ao mapeamento os polígonos referentes à classe área urbanizada.

Como foram verificadas dúvidas quanto ao uso do solo em determinadas áreas edificadas esparsas após o refinamento da classificação estas foram demarcadas e realizado trabalho de campo. As dúvidas correspondem a situações em que não foi possível definir se as áreas edificadas correspondem à urbanização dispersa com condomínios de alto padrão ou à segunda residência no campo com a finalidade de lazer.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na classificação da imagem Landsat foram obtidas as classes de uso e cobertura da terra: área urbanizada; solo exposto; vegetação e corpos d’água. Tem-se também a classe denominada não classificada que corresponde a áreas não enquadradas em nenhuma das classes de uso definidas. Foram classificados 29 polígonos pertencentes à classe área urbanizada, como: solo exposto, 72 como vegetação e 106 como não classificada. Neste estudo foi avaliada apenas a classe área urbanizada mostrada na Figura 5.

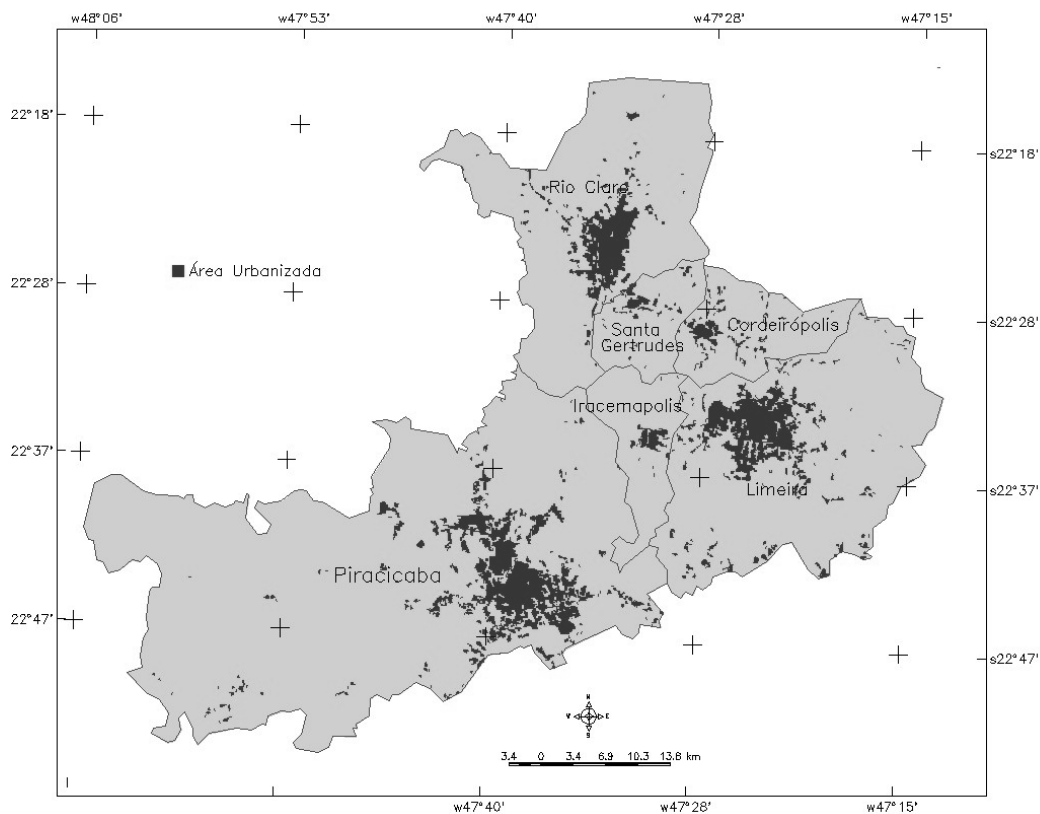


Fig. 5 - Área urbanizada (dados de 2007)

Pela análise dos resultados verificou-se que na classe denominada solo exposto foram incluídas áreas de cana colhida associadas a diferentes tipos de solo. A classe vegetação engloba áreas de fragmentos de mata/capoeira, reflorestamento, pastagem/campo antrópico, e cana em estágio máximo de crescimento. As áreas não classificadas apresentam uso semelhante à classe solo exposto, ou seja, dominância de áreas de cana colhida com solos de alta reflectância e solos de baixa resposta espectral (terra roxa), e auto-estradas.

Por meio da análise qualitativa da Figura 5 verificou-se que a quase totalidade das áreas de solo exposto referentes à cultura de cana de açúcar não foram incluídas na classe área urbanizada, como provavelmente ocorreria se utilizado o algoritmo de classificação baseado apenas no atributo espectral (Alves, 2008). As áreas urbanizadas também foram discriminadas das áreas pastagem/ campo antrópico o que indica o grande poder discriminatório do software utilizado, principalmente se considerado que na época de obtenção da imagem estes campos têm cobertura vegetal com menor vigor (seca).

Os principais problemas associados a erros de omissão ocorreram com as áreas urbanizadas afastadas do núcleo urbano principal, compostas por residências esparsas que ocupam grandes terrenos com piscinas, áreas verdes formadas por gramados e vegetação arbórea. Essas características, que indicam ocupação por classe socioeconômica de renda alta, influenciaram na sua classificação como áreas de vegetação. Ocorrem também situações em que as áreas edificadas localizam-se junto a estradas vicinais com arruamento partindo destas com padrão de ocupação espinha de peixe (FIGURA 6).



Fig. 6 – Exemplo de área urbanizada, destacada na imagem da alta resolução, que não foi classificada como urbana (erro de omissão)

Os erros de inclusão estão em sua maior parte relacionados com: áreas de mineração, associadas à indústrias de cerâmica; auto-estradas e trevos rodoviários; praças de pedágios; bordas de talhões de cana cortada e corpos d'água com material em suspensão (FIGURA 7).



Fig. 7 – Exemplo de área de mineração, destacada na imagem da alta resolução, classificada como urbanizada (erro de inclusão).

Com relação ao problema de superposição entre áreas urbanizadas e auto-estradas, este poderia ser solucionado com a utilização de um layer da malha rodoviária na classificação automática das imagens. Na Tabela 3 é apresentada a matriz de erros e os índices obtidos no cálculo da exatidão da classificação a partir da grade amostral de quadrículas utilizadas. A Figura 8 mostra a distribuição espacial dos erros de omissão e inclusão resultantes da classificação da imagem.

TABELA 3 - MATRIZ DE ERROS RESULTANTES DA CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA

	Urbanizada	Não urbanizada	Total
Urbanizada	23	4	27
Não urbanizada	6	151	157
Total	29	155	184

Exatidão Global: 0,94

Índice Tau: 0,88

Índice Kappa: 0,72

Verifica-se pela análise da Tabela 3 e Figura 8 que os erros de omissão (6) foram superiores aos erros de inclusão (4) sendo estes representativos da classificação da área como um todo. Isto fica claro quando se analisa o resultado da classificação que mostra áreas edificadas, afastadas do núcleo principal, não discriminadas. Essas áreas correspondem em sua maior parte a condomínios de uso misto, chácaras de lazer e residências de pessoas que trabalham na cidade conforme verificação de campo.

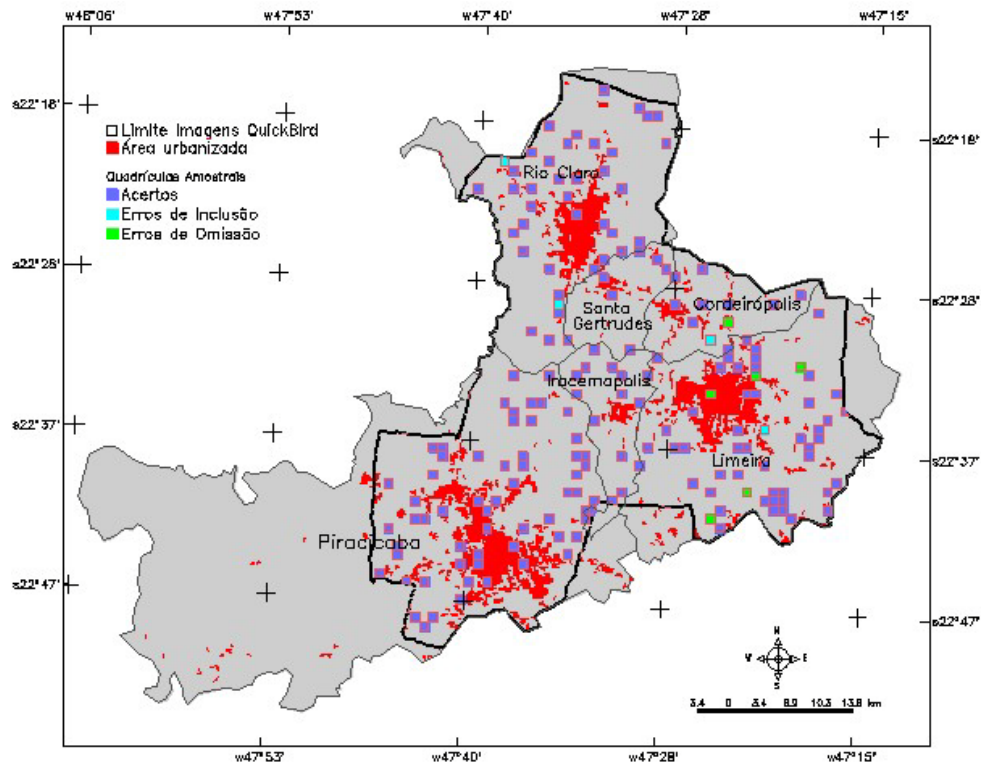


Fig. 8 – Distribuição espacial dos erros nas quadrículas de amostragem

De acordo com os valores de exatidão global (0,94), índices Kappa (0,72) e Tau (0,88) obtidos da classificação os resultados podem ser considerados muito bom, de acordo com a tabela de conceitos de eficiência dos índices Kappa, confirmando a análise qualitativa.

De modo geral a classificação apresentou resultados de elevada confiabilidade no mapeamento das manchas urbanas contínuas tanto nas áreas em que as cidades são limitadas por regiões de agricultura intensa (Norte e Oeste de Piracicaba; Norte e Leste de Limeira), quanto naquelas circundadas por pastagens ou campo antrópico. Os erros maiores, embora não significativos estão associados a núcleos dispersos que podem corresponder a chácaras de recreação.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostram a viabilidade de aplicação da metodologia utilizada no mapeamento de áreas urbanizadas e no estudo da nova forma de urbanização (urbanização dispersa) que está ocorrendo com a ocupação de áreas distantes do núcleo urbano central principalmente pela classe de renda econômica mais elevada em busca de melhor qualidade de vida, espaço e segurança. É necessário, no entanto, aprimorar o método utilizado testando e incorporando novos atributos no processo de classificação.

Esses resultados confirmam que o método de classificação orientada a objeto tem um grande potencial para o mapeamento e monitoramento de áreas urbanizadas (escala inferior a 1:50.000), não somente

com a utilização de imagens de alta resolução espacial, mas também com a de imagens de média resolução espacial. Isto é muito importante, considerando a extensão da área urbanizada no Brasil e a disponibilidade de um banco de imagens de média resolução espacial (30m) referentes a um período acima de 30 anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C.D.; PEREIRA, M.N.; FLORENZANO, T.G.; Souza, I.S.. Análise Orientada a Objeto com Imagens Landsat no Mapeamento de Áreas Urbanas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n 1, p.120-141, jan-mar, 2009.

ANTUNES, A., F., B.; CORTESE, S., C. Determinação de áreas de ocupação irregulares por meio de análise orientada a objeto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis, SC, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 481-487. ISBN 978-85-17-00031-7.

ARAÚJO, E. H. G. **Análise multitemporal de cenas do satélite QuickBird usando um novo paradigma de classificação de imagens e inferências espaciais. Estudo de caso: Belo Horizonte, MG.** 2006. 175 p. (INPE-13956-TDI/1062). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.43>>. Acesso em: 02 dez. 2007.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M.B. **Anatomia de sistemas de informações geográficas**. São José dos Campos: INPE, 1996. 205 p. (INPE-8094-RPQ/716). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.13.36>>.

CHUBEY, M.S.; FRANKLIN, E.; WULDER, M.A. Object – Based Analysis of Ikonos -2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 72, n.4, pp .383-394, apr. 2006.

HANQIU, X.. Extraction of Urban Built – Up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic – Oriented Index Combination Technique. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 73, n. 12, pp.1381 -1391, dec., 2007.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N., C.; CLARKE, K. C.. The Spatiotemporal Form of Urban Growth: Measurement, Analysis and Modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n.3, 15, pp.286–302, aug. 2003.

HOGAN, D. Mobilidade populacional, sustentabilidade ambiental e vulnerabilidade social. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, v. 22, n. 2, p. 323-338, jul/dez 2005.

LI, G.; WENG, Q. Measuring the Quality of Life in City of Indianópolis by Integration of Remote Sensing and Census Data. **International Journal of Remote Sensing and Census Data.**, vol. 28, n. 1–2, p.249–267, jan. 2007.

OJIMA , R. Dimensões da urbanização dispersa e proposta metodológica para estudos comparativos: uma abordagem socioespacial em aglomerações urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**. v.24, n.2, jul./dez. 2007.

POWELL, R.; ROBERTS, D.A.; DENNISON, P. E.; HESS, L. Sub pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n.2, p. 253-267, jan 2007.

PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos**. 2005. 180 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/11.23.13.40>>. Acesso em: 12 fev. 2008.

QUEVEDO NETO, P. S.; Lombardo, M. A. Dinâmica e Qualidade da Paisagem na Área de Transição Urbano – Rural. **Geografia**, Rio Claro, v.31, n. 2, p.257 – 268, mai/ago. 2006.

REIS, N. G. **Notas Sobre Urbanização Dispersa e Novas Formas de Tecido Urbano**. São Paulo: Via das Artes, 2006, p201.

ROCHA, A. D. **Estabelecimento de Metodologia de Classificação de Imagens de Alta Resolução para Identificar e Avaliar o Crescimento e Áreas de Ocupação Irregular**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, agosto 2007.

RUDORFF, B.F.T; SUGAWARA, L.M. Mapeamento da cana-de-açúcar na Região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário. Geotecnologias**, Belo Horizonte, v.28, n.241, p.79-86, nov./dez. 2007.

SPAROVEK, G.; COSTA, F.P.da S. Evolução da cobertura vegetal da cidade de Piracicaba – SP (1940 – 2000). **Geografia**, Rio Claro, v.31, n. 2, p.331 – 336, mai/ago. 2006.

SPÓSITO, E. S. **Cidades Médias e Eixos de Desenvolvimento no Estado de São Paulo: Metodologia da Abordagem**. In: Spósito, M. E. B. *Cidades Médias; Espaços em Transição*, São Paulo, Editora Expressão Popular, 2007, 632 p., p.215 - 232.

SUTTON, P. C.; TAYLOR, M. J.; ANDERSON, S.; ELVIDGE, C. D. **Sociodemographic Characterization of Urban Areas Using Nighttime Imagery, Google Earth, Landsat, and “Social” Ground Truthing**. In: Weng, Q.; Quattrochi, D.A. *Urban Remote Sensing*, Boca Raton: Taylor&Francis, 2007, Chapter 14, pp. 291 – 310.