

## **Mapeamento de mudanças ambientais a partir de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em regiões costeiras. Caso de estudo: Sistema Estuarino de Santos/São Vicente - estado de São Paulo.**

Luis Américo Conti<sup>1,2</sup>  
Carlos Alberto Sampaio de Araujo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo - USP/ Escola de Artes Ciências e Humanidades EACH  
Av. Arlindo Bettio, 1000 – São Paulo - SP, Brasil  
lconti@usp.br

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo - USP/ Instituto Oceanográfico IO  
Pça do Oceanográfico, 191 – São Paulo - SP, Brasil

### **Abstract.**

This paper examines the evaluative characteristics of an impacted tropical estuary (Santos/São Vicente region, São Paulo state) providing opportunities to assess the cumulative impact of environmental changes and their consequences on the land use/occupation. To achieve this objective we have proposed the implementation and analysis of a geographically referenced database based on a series of 12 temporal satellite images (from 1986 to 2008) in order to select a set of target areas where we will investigate the relationships between various environmental patterns such as local vegetation, human occupation and erosional and depositional indicators. Based on the empirical relationships found, the project assesses the utility of models of land-use patterns based on remote sensing as indicators of environmental conditions, furthering the integration of causal factors into environmental monitoring frameworks for coastal zones.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, processamento de imagens, manguezais, zonba costeira, índices de Vegetação, detecção de mudanças.

### **1. Introdução**

A zona costeira pode ser considerada como um ambiente extremamente complexo e de difícil sistematização, tanto no que se refere a parâmetros físicos quanto sócio-ambientais. Associam-se uma infinidade de processos e variáveis, o que torna um estudo sistemático e analítico um grande desafio, já que para tal é necessário estabelecer generalizações e aproximações, nem sempre claras ou definidas. Neste contexto, as técnicas de sensoriamento remoto, enquanto instrumentos metodológicos de tratamento integrado de informações de natureza espacial, têm se afirmado, como fonte eficaz de subsídios para a compreensão da funcionalidade de um ambiente e têm sido cada vez mais utilizadas nas últimas décadas.

Aplicações de sensoriamento em áreas costeiras ainda carecem de técnicas estabelecidas. Segundo Wrigth (2003) muito ainda resta a ser feito para a melhoria e expansão da capacidade de uso de SR e Sistemas de Informações Geográficas nesses ambientes. Os impedimentos para tal desenvolvimento não são apenas tecnológicos, mas também conceituais: a falta de conhecimento completo da natureza espacial e temporal dos dados continuam a obstruir soluções para sua manipulação em ambientes digitais, entretanto, um grande esforço internacional tem sido feito de modo a contemplar a integração destas informações de modo a construir um foco especificamente costeiro em termos de metodologia de aplicação.

Diversas são as potenciais aplicações de geoprocessamento, principalmente ao que se refere a estudos ambientais de áreas alagadas como manguezais e marismas, uma vez que a integração de dados de diversas naturezas é necessária para o estabelecimento de uma visão

completa e global a respeito de fenômenos e sistemas naturais. Esta aplicabilidade pode, em um nível mais baixo, referir-se a uma base espacial de dados, como inventário ou mapeamento de informações, ou em um nível mais alto, ser utilizado na produção de modelos estatísticos ou determinísticos de integração e/ou previsão de determinados fenômenos (Lyon & McCarthy, (1995)).

No que se refere a análises multitemporais de detecção de mudanças (ou *Time Change detection* - TCD), os trabalhos pioneiros de Townshend *et al.* (1992); Green *et al.* (1994) entre outros deram o primeiro passo para o estabelecimento de metodologias estruturadas para a realização de operações de análise entre imagens. Desde então diversos trabalhos foram publicados estabelecendo técnicas distintas e potencialidades em diversas aplicações. Lu *et al.* 2003 revisaram e sistematizaram as técnicas de TCD em 22 diferentes categorias que incluem “análises visuais”, “diferença de imagens”, “razão de imagens”, “diferenças de índices de vegetação”, “comparação de modelos de mistura”, “comparação de classes”, “análise de mudanças vetoriais” etc

Este trabalho envolveu a proposição de uma metodologia de análise evolutiva das características de uso e cobertura do solo em regiões adjacentes aos canais do Sistema Estuarino de Santos/São Vicente e das relações entre processos naturais e antrópicos de ocupação da área, baseada em análises de um banco de dados com diversas informações cartográficas, análise de uma série temporal de imagens de satélite (LANDSAT TM, TM+, Quickbird) e Aerofotografias, visando a investigação de diversas inter-relações ambientais associadas ao adensamento demográfico da área nas últimas décadas.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1. Aquisição de Imagens**

As Imagens Landsat 5 e 7 (Sensores TM e ETM + respectivamente), foram adquiridas em formato GEOTIFF banda a banda nas datas: 02/05/1986, 01/06/1991, 22/06/1993, 12/06/1995, 17/06/1997, 10/08/1999, 30/04/2000, 12/06/2001, 20/07/2003, 21/06/2005, 16/08/2007, 17/07/2008. As área de estudo encontra-se no limite de corte entre as orbitas 219-077 e 219-076 do satélite Landsat, de modo que foi necessária a elaboração de um mosaico para envolver a área como um todo.

Para atender os objetivos do trabalho, foram buscadas imagens adquiridas em condições climáticas similares, haja vista que mudanças sazonais no padrão de vegetação e hidrografia podem resultar em estimativas errôneas de tendências temporais. (Coppin *et al.* (2004).

Imagens Quickbird e aerofotos foram também processadas com o intuito de se realizar análises em escala de detalhe de áreas alvo com características ambientais específicas dentro do contexto da Baixada Santista. Dentro deste objetivo imagens foram selecionadas de modo a oferecer uma ampla gama de cenários ambientais com características distintas de modo a validar os processamentos das imagens Landsat. Foram processadas, assim, imagens de três áreas alvo para análise de detalhe obtidas respectivamente em 13.04.2008, 19.05.2008 e 24.05.2008 nas áreas de estudo: a) Cubatão/Cosipa b) Bertioga e c) São Vicente / Praia Grande (figura 1).

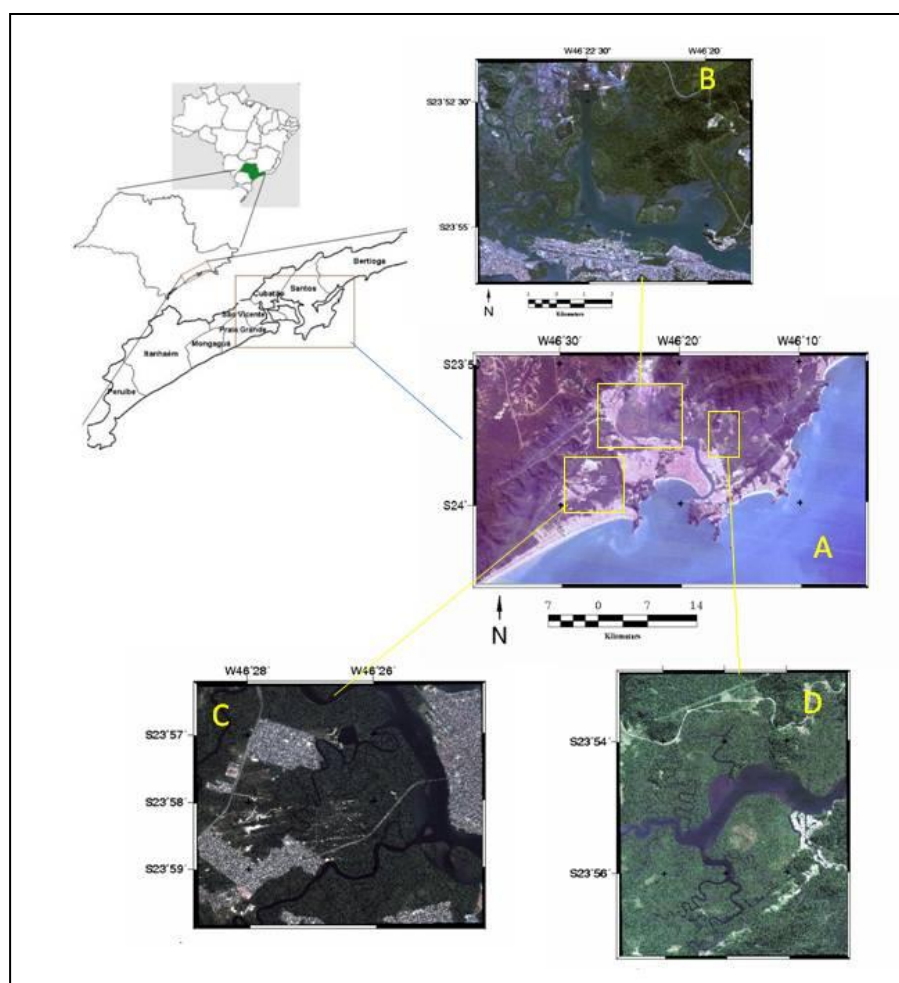


Figura 1 – Localização da área de estudo – A) Área total (Landsat) B) Região de Cubatão. C) São Vicente. D) Bertioga (Quickbird)

Dados complementares de altimetria (oriundos do sensor SRTM) além de informações censitárias da região em estudo também foram utilizados na organização do banco de dados do projeto.

## 2.2 Pré Processamento

Quando uma série de imagens é utilizada com o objetivo de se estabelecer uma análise de mudanças temporais e caracterização de evolução ambiental, é imperativo que as imagens possuam um alto grau de correlação geométrica. No caso do presente trabalho, uma das imagens foi utilizada como base, a partir da qual, pontos de controle foram gerados visando a retificação de todas as outras imagens sob a mesma base. 18 pontos de controle (GCP – *Ground control points*) foram escolhidos para a correção geométrica das outras imagens a partir do método de retificação polinomial de segunda ordem. O erro quadrático médio (RMS) foi considerável aceitável apenas quando menor do que 15 metros ( $1/2$  dimensão do *pixel*) como descrito em Armston *et al.*, 2002 entre outros. Para a correlação com as imagens *Quickbird*, outros GCP foram estabelecidos de modo a diminuir o RMS a níveis compatíveis com a resolução das imagens. Ressalta-se que as tais imagens foram adquiridas com nível 3 de correção, ou seja, com acurácia geométrica abaixo de  $1/3$  de *pixel*, não sendo necessária a retificação. Foi realizado um procedimento de correção atmosférica baseado no método

descrito em Chávez (1996), baseado na normalização dos pixels em radiância e posterior subtração de pixels escuros.

### 2.3. Processamento

Segundo Edwards (2000), os principais métodos de utilização de processamento de imagens de sensores remotos orbitais em áreas costeiras, associam-se a 1) Interpretação visual, 2) Classificações espectrais, e 3) Razão entre Bandas e 4) Análise de textura. A estratégia deste trabalho baseou-se, desta forma, na aplicação tais técnicas a todos os conjuntos de imagens a fim de criar um banco de dados associados a planos de informações relativos a cada tipo de processamento visando o entendimento de aspectos específicos das áreas relativo ao uso e cobertura do solo junto à região estuarina. Foram gerados, desta maneira, 38 tipos de planos de informação baseados em processamento das imagens LANDSAT para cada área de trabalho; dado que foram analisadas 12 imagens de datas distintas, foi produzido no projeto mais de 350 planos de Informação que foram armazenadas dentro de um projeto construído em arquitetura ESRI. Alguns dos processamentos envolveram a área como um todo, produzindo, também planos de informações gerais para a Baixada Santista enquanto outros foram restritos a áreas alvo (Cubatão, Bertioga, São Vicente). Planos de informações associadas às Aerofotos, Modelos Digitais de Terreno, Vetores (como linhas de costa e arruamento) e outros, também foram associados ao Projeto criando, deste modo, um Banco de Dados georreferenciado com 456 níveis de informação.

As técnicas de TCD utilizadas neste trabalho basearam-se, principalmente, na subtração e divisão de bandas individuais, razões de bandas, (principalmente NDVI) e diferenças entre componentes principais.

O esquema metodológico das etapas de processamento e análise de dados no projeto georreferenciado é mostrado na figura 2

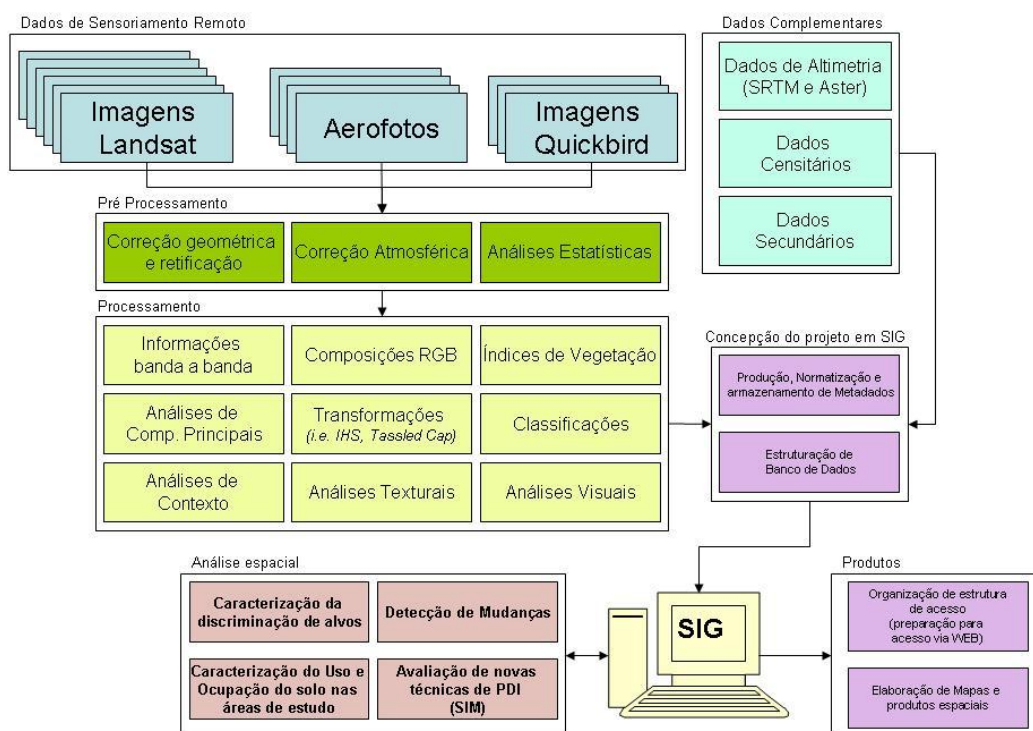


Figura 2 – Esquema Metodológico utilizado no Trabalho

### 3. Resultados e Discussão

Dentro dos limites da escala temporal e espacial desenvolvida, a dinâmica da ocupação e dos sistemas naturais costeiros na baixada santista mostraram, de maneira geral, uma certa estabilidade, principalmente se levarmos em consideração a evolução da área ao longo da segunda metade do Séc. XX como indicado por diversos autores como Jakob (2003), Cunha *et al.* (2003) e Carmo e Maques (2009). No que se refere a extensão e distribuição da malha urbana, dentro dos limites de estudo, não houve particularmente nenhum desafio metodológico no que se refere a sua determinação caracterização, uma vez que as características espectrais de áreas urbanas são bastante peculiares (mesmo com certa confusão em relação a solo exposto, como destacado por Congalton (1991). A Homogenidade de resultados referentes a eficácia de classificadores (com confiança acima de 90%) e a conseqüente similaridade das classes associadas a diferentes algoritmos comprovam a viabilidade de uso de imagens Landsat/Quickbird no mapeamento urbano.

Na totalidade das áreas de classes “áreas urbanas + Solo exposto” geradas a partir de um algoritmo classificador não supervisionado (com KAPPA de 92%), observou-se uma baixa variação nos resultados das classificações, tanto na configuração das manchas urbanas quanto em termos de área (no caso da imagem de 2008 a área classificada foi de 153,812 km<sup>2</sup> classificador não supervisionado; 152,888 km<sup>2</sup> “mínima distancia” e 154,002 km<sup>2</sup> Paralelepípedo). Nesta escala de trabalho, e observando as séries temporais das imagens, foi possível observar que a partir de 1986 não houve uma significativa expansão de áreas urbanas em termos nucleados e sim um adensamento nas áreas previamente ocupadas. Observou-se que o maior adensamento urbano, foi localizado na porção continental do município de São Vicente, no bairro do Jardim Rio Branco. Esta mesma região foi um foco de crescimento também na década seguinte, até 2007. No mesmo período, observou-se, também, um núcleo de adensamento junto a estrada Piaçaguera Guarujá, no município de Bertioga. Esta última região apresentou um significativo núcleo de urbanização identificado partir das análises de Landsat, entretanto, uma análise mais cuidadosa mostrou que esta região acolhe não sítios urbanos mas estruturas industriais e de serviços como Aterros Sanitários, pedreiras e áreas industriais.

A partir das análises de evolução da cobertura vegetal com base em parâmetros derivados de índices de vegetação, foram segmentadas em 4 classes: Alta densidade, Densidade Média/Alta, Densidade Média e Densidade Baixa. Tal metodologia seguiu os trabalhos de Jha e Unni (1994); Collins e Woodcock (1996) entre outros. As análises mostraram variação dos padrões de vegetação de alta densidade em termos de perda e recuperação. Observa-se que para os anos de 1986 a 1997, houve uma significativa perda de vegetação, principalmente nas áreas ao norte de Santos e Cubatão, junto a COSIPA e em faixas marginais em canais estuarinos na região de Bertioga/Guarujá.

O maior salto, entretanto, ocorreu entre os anos de 1995 e 2003, quando boa parte da região central e sul da área mostraram padrões vegetação mais densos do que anteriormente. A maior concentração de recuperação se da na região do manguezal a oeste do Canal da Piaçaguera, junto ao canal do Rio Cubatão. No total, a área considerada “em recuperação” foi estimada em mais de 8.000 Km<sup>2</sup>. Este processo de recuperação foi descrito no trabalho de Menezes *et al.* (2005), a partir da análise de núcleos de reflorestamento. Aparentemente, também, houve uma contribuição importante de input de sedimentos por processos de assoreamento na área que permitiu o acúmulo de material não consolidado junto a região em questão, possibilitando a colonização da vegetação. Não é claro se tal processo ocorrido entre os anos de 1997 e 2000 foi associado a dragagem de canais ou a outros fatores. A figura 3 mostra a colonização da área em seqüência de Imagens (1986, 1997, 2002 e 2008), mostrando um detalhe da área em questão.



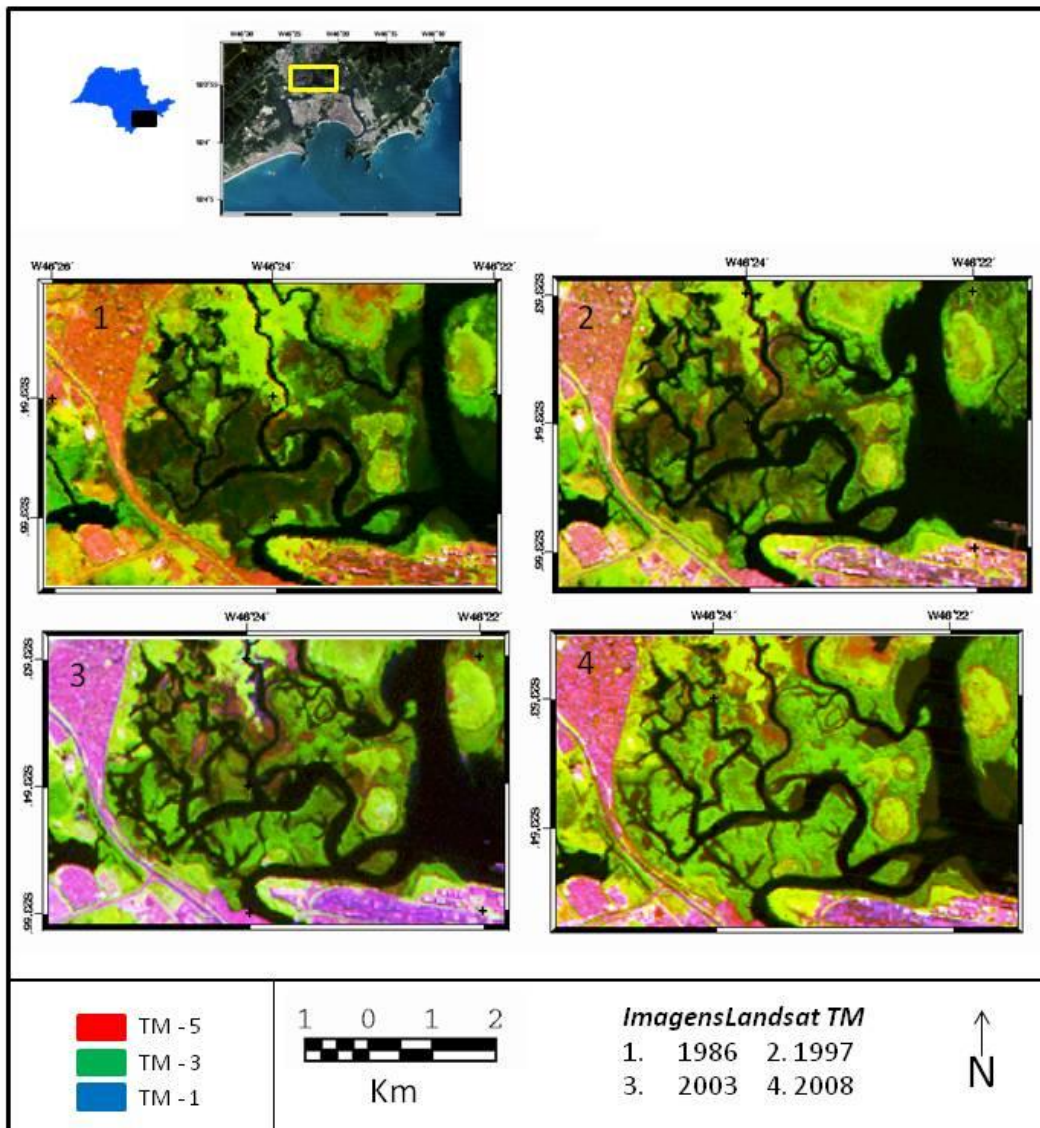


Figura 3 Área do manguezal da região do Canal Piaçaguera / Rio Cubatã. Imagens Landsat TM - composições 431 para os anos de: 1) 1986; 2) 1997; 3) 2002 e 4)2008.

Embora a recuperação possua, em termos de resposta espectral, um comportamento típico de manguezais (tendo sido classificada como tal em todos os algoritmos classificadores) a literatura (Wang *et al* 2003, Jupiter *et al.* 2007) e dados *in situ* (obtidos a partir de sobrevôos por helicóptero, apontam para uma cobertura mais associada a uma fisionomia típica de capoeira rala ou campo alagadiço, embora haja, uma predominância de vegetação de mangue (principalmente *R. Mangle*). Pelo fato de a região possuir um substrato alagado e uma estrutura semelhante ao manguezal, a identidade espectral destas áreas reflorestadas são virtualmente idêntica às áreas de manguezal. Tal resultado pode ter uma importância significativa nos mapeamentos de manguezais em áreas costeiras já que um número considerável de trabalhos de mapeamento de cobertura de solo se baseiam simplesmente em tratamento de imagens e, neste caso, boa parte das áreas mapeadas como manguezais podem estar superestimadas. Uma investigação mais detalhada com dados quantitativos obtidos em campo e uma correlação com a resposta espectral deste tipo de formação além do uso de

imagens Hiperespectrais pode, no futuro, dar condições para a identificação e discriminação deste tipo de ambiente para efeito de mapeamento.

#### 4. Conclusões

A análise de uma grande série temporal de imagens, submetidas a diversas formas de processamento envolvendo suas características texturais e espectrais, possibilitou a realização de diversas análises e considerações envolvendo áreas da baixada santista. As análises foram precedidas pela criação de um projeto estruturado e espacialmente referenciado, o que permitiu a integração de diversas informações derivadas do processamento das imagens e poderá servir de base para uma grande quantidade de estudos a ser realizados na região no futuro. Há, entretanto, diversas restrições ao uso de imagens como uma ferramenta única de análise ambiental, dentre as quais foram apontadas neste trabalho, a saber: 1) A adequação da escala dos processos à escala (global e a resolução) das imagens – ou *Problema de resolução espacial*. 2) A incerteza a respeito da calibração de alvos com as bandas estudadas – ou *Problema da resolução espectral* 3) A incerteza da frequência e repetitividade dos processos discriminados pelas imagens – ou *Problema da resolução temporal*. Tais questões podem ser, ao menos em parte, contornados com a utilização de um conjunto de imagens de resoluções (espaciais e espectrais) e frequências distintas.

No caso da Baixada Santista, uma das questões que mereceram destaque na pesquisa e que já foram apontados por diversos trabalhos, refere-se à complexidade de padrões: Em áreas cuja complexidade de processos atuantes é muito grande, é muito difícil trabalhar com um padrões pré-estabelecidos de discriminação espacial. Em outras palavras: a interação de processos complexos simultâneos (como interação entre urbanização, desflorestamento, reflorestamento, erosão, etc) não geram uma assinatura espacial que possa ser especificada de modo que os limites, áreas, graus de intensidade e demais parâmetros, não são facilmente medidos ou representados. Novas metodologias, como a aplicação de lógica *Fuzzy* e análises fractais podem contribuir para o entendimento e representação destes padrões espaciais complexos (e, por conseguinte, o mapeamento) de aspectos ambientais que não mostram fronteiras e ou gradientes facilmente determináveis por métodos tradicionais.

#### Referencias Bibliográficas

- Armston, J.D.; Danaher, T.J.; Goulevitch, B.M.; Byrne, M.I. 2002 Geometric Correction of Landsat MSS, TM, and ETM+ Imagery for Mapping of Woody Vegetation Cover and Change Detection in Queensland. In: *Eleventh Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference Proceedings*, Brisbane, Australia.
- Wright, D.; Halpin, P.N. Blongewicz, M. Grisé, S. Breman, J. 2003 ArcGIS Marine Data Model. Esri Special Publication. Publ. Eletr. [http://dusk.geo.orst.edu/djl/arcgis/docs/marine\\_conceptual\\_Jun03.pdf](http://dusk.geo.orst.edu/djl/arcgis/docs/marine_conceptual_Jun03.pdf)7.
- Lyon, J.G. & McCarthy, J. (Ed.). 1995 Wetland and Environmental applications of GIS. CRC press Lewis.London. 1<sup>st</sup> edition.
- Townshend, J. R. G., Justice, C. O., Gurney, C., and Mcmanus, J., 1992, The effect of image misregistration on the detection of vegetation change. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30, p.1054–1060.
- Green, K., Kempka, D., and Lackey, L., 1994, Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60, p. 331–337.

- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. & Moran, E. 2003 Change detection techniques. **Int. J. Remote Sens.** 25, p.2365–2407
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. & Lambin, E. 2004 Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **Int. J. Remote Sens.** 9, p.1565–1596.
- Chavez, P.S.Jr, 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 62. p. 1025-1036.
- Carmo, R. L.; Marques, C. A. M. 2007; Gestão da Água na Baixada Santista (São Paulo): temas e conflitos em um contexto metropolitano. In: Hogan, D. J. (Org.) **Dinâmica populacional mudança ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro. Campinas: Núcleo de Estudos de População -NEPO/UNICAMP**, 2007. P. 187-204
- Jakob, A. A. E.; 2003 Análise sócio demográfica da constituição do espaço urbano da Região Metropolitana da Baixada Santista no período 1960-2000. Tese (Doutorado em Demografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, 37 v.1. p. 5-46.
- Jha, C. S., and Unni, N. V. M., 1994, Digital change detection of forest conversion of dry tropical forest region. **International Journal of Remote Sensing** 15. p. 2543–2552.
- Collins, J. B., and Woodcock, C. E., 1996, An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, 56. p. 66–77.
- Wang, Y.; Bonyng, G.; Nugranad, J.; Traber, M.; Ngusaru, A.; Tobey, J.; Hale, L.; Bowen, R. & Makota, V. 2003. Remote Sensing of Mangrove Change Along the Tanzania Coast. **Marine Geodesy**, 26. p. 35-48.
- Jupiter SD, Potts DM, Phinn SR, Duke NC. 2007 Natural and anthropogenic changes to mangrove distributions in the Pioneer River Estuary (QLD, Australia). **Wetl Ecol Manag**;15 p.51–62
- Menezes, G.V., Shaeffer Novelli, Y. Poffo, I.R.F. e Eysink, G.G.J. 2005 Recuperação de Manguezais, Um estudo de caso na Baixada Santista de São Paulo. **Braz. J. Aquat. Science Technol.** 9(1) p65-72