

TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NA BAÍA DE GUAJARÁ, BELÉM-PA.

Automatic Techniques for generation of environmental sensitivity index map to oil spill in the Guajará Bay, Belém-PA.

Fabrício Dias Gonçalves¹
Pedro Walfir Martins e Souza Filho¹
Fernando Pellon de Miranda²
Waldir Renato Paradella³

¹**Universidade Federal do Pará**
Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT)
Av. Augusto Corrêa 1, CEP 66075 - 110, Belém - PA.
{fdias,walfir}@ufpa.br

²**Petróleo Brasileiro S.A.**
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CENPES)
Ilha do Fundão, Quadra 7, Rio de Janeiro - RJ.
fmiranda@petrobras.com.br

³**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**
Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR)
Caixa Postal 515 - 12201 - 970 - São José dos Campos - SP
waldir@itid.inpe.br

RESUMO

Uma rotina de técnicas e procedimentos foi estabelecida para a elaboração de mapas de Índices de Sensibilidade Ambiental (ISA) a derramamentos de óleo, a partir de dados de sensores remotos Landsat ETM+ 7, Radarsat-1 Wide 1, fusão de dados multisensores e sistema de informação geográfica. Desta forma, foram reconhecidas sete unidades de paisagem associadas à terra firme (tabuleiro costeiro com Estruturas Artificiais - ISA 8B e Muro de arrimo - ISA 1B) e aos ambientes sedimentares recentes, bem como seus ISA (várzea - ISA 10B; Manguezal - ISA 10A; Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; Praia estuarina - ISA 4; Falésia - ISA 3). Estes resultados propiciarão à indústria petrolífera encarar desafios tecnológicos na área de segurança operacional e proteção do meio ambiente, destacando a avaliação de risco sócio-ambiental, tecnologias para emergências, monitoramento costeiro e sistemas de informação ambiental.

Palavras-chave: sensibilidade ambiental, sensoriamento remoto, Amazônia, ETM+ Landsat-7, Wide RADARSAT-1.

ABSTRACT

A routine of techniques and procedures was established in order to produce Environmental Sensitivity Index (ESI) maps for oil spill based on optical (Landsat ETM+ 7) and radar (Radarsat-1 Wide 1) remote sensing, multi-sensor data fusion and geographic information system. Seven landscape units were recognized related to high-land (coastal plateaus with artificial structures - ISA 8B and Estuarine wall - ISA 1B) and recent coastal environments, as well as their ESI (flood plain - ISA 10B; Mangrove - ISA 10A; Vegetated muddy banks - ISA 9B; Estuarine beach - ISA 4; Cliff - ISA 3). The results obtained in the investigation have opened new perspectives in oil industry regarding the operational security and environmental protection, social-environmental assessment, technology for emergencies, coastal management and environmental information system.

Keywords: environmental sensibility, remote sensing, Amazon, Landsat-7 ETM+, RADARSAT-1 Wide.

1. INTRODUÇÃO

Os diversos casos de derramamentos de óleo ocorridos no mundo têm incentivado os órgãos e entidades envolvidas nestes episódios a aperfeiçoarem os métodos, tanto preventivos como corretivos, para a minimização dos danos gerados (CUNHA et al., 2004). A necessidade do monitoramento de áreas onde há atividades de exploração, produção e transporte de derivados de petróleo é expressa pela legislação ambiental vigente (Lei nº 9.996/2000, MMA), que exige para certificação ambiental e liberação das atividades relacionadas, estudos de impacto ambiental (EIA) e um plano de emergência individual (PEI).

Dentro destas perspectivas, os mapas de sensibilidade a derramamentos de óleo utilizados desde a década de 1970, representam uma importante ferramenta para priorização dos ambientes a serem protegidos (GUNDLACH & HAYES, 1978). Tais mapas fornecem informações em formato de fácil leitura e compreensão, sendo úteis para determinar prioridades de proteção e a mobilização mais eficiente das equipes de proteção e limpeza. Assim, possibilitam a mitigação dos impactos, bem como ações de valoração e recuperação ambiental dos ambientes afetados por um evento poluidor (NOAA, 2002).

O objetivo deste trabalho é utilizar técnicas de classificação automática de imagens de satélite (supervisionada e não-supervisionada) para a geração de mapas de índices de sensibilidade ambiental (ISA) a derramamentos de óleo nos ambientes flúvio-estuarinos amazônicos, e ainda comparar estes resultados com a classificação não-automática (visual), visando aferir a confiabilidade das técnicas de classificação. Estas técnicas são de grande importância, pois permitem a elaboração de mapas de ISA com rapidez e precisão, uma vez que em situações emergenciais a agilidade nas ações de resposta é imprescindível para uma estratégia eficaz, com a proteção dos ambientes e mitigação dos danos gerados.

O uso da tecnologia de sensoriamento remoto, em função da rapidez, precisão e periodicidade de obtenção de dados, permite a elaboração de mapas atualizados e em escala apropriada, com rapidez, acurácia e menor custo. Tal ponto é de grande relevância em áreas com acesso difícil e base cartográfica desatualizada, tal como ocorre na Zona Costeira Amazônica, que não dispõe de mapas temáticos e cartas plani-altimétricas em escala adequada (1: 50.000) para a geração de mapas de ISA.

Assim, a região da Baía de Guajará (Belém-PA) foi escolhida como área teste, em função de sua importância econômica, social e ainda pela localização do Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR), que apresenta grande atividade de transporte de derivados de petróleo na região amazônica, sendo uma fonte potencial para derramamentos de óleo.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo está situada na Zona Costeira Amazônica brasileira, que constitui a maior e bem preservada região tropical úmida do planeta (Figura 1A). Esta região, localizada no norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão, onde os principais processos condicionantes da dinâmica ambiental é a energia das marés e a descarga fluvial (SOUZA FILHO, 2005). Na Costa Amazônica não há atividades de exploração e produção de petróleo, no entanto, existe um intenso tráfego de navios petroleiros, que atingiu a marca de 1300 desembarques no ano de 2005 (Capitania dos Portos, comunicação verbal).

A Baía de Guajará é uma região tipicamente flúvio-estuarina, situada em um domínio de mesomare com amplitude máxima de 3.8 metros. Na Região Metropolitana de Belém concentram-se indústrias e importantes núcleos habitacionais, com 1,5 milhão de habitantes, segundo senso do IBGE em 2000 (Figura 1B). Esta área é constituída por ambientes de elevada sensibilidade a derramamentos de óleo, representados por várzeas e rios que são utilizados pela população local como via de transporte, fonte de subsistência alimentar e econômica (GONÇALVES & SOUZA FILHO, 2005).

Dentre as áreas com grande atividade de transporte de derivados de petróleo na Região Amazônica, destaca-se o Terminal Petroquímico de MIRAMAR (Figura 1C), onde é predominantemente transportado óleo diesel, GLP (gás de cozinha), querosene para avião, gasolina comum e mistura MF-380. O tráfego de embarcações em MIRAMAR no ano de 2001 foi de 366 navios, movimentando 442.302 toneladas de produtos (informativo CDP, maio/2002), estes produtos abastecem a Região Metropolitana de Belém e parte do interior do Estado do Pará.

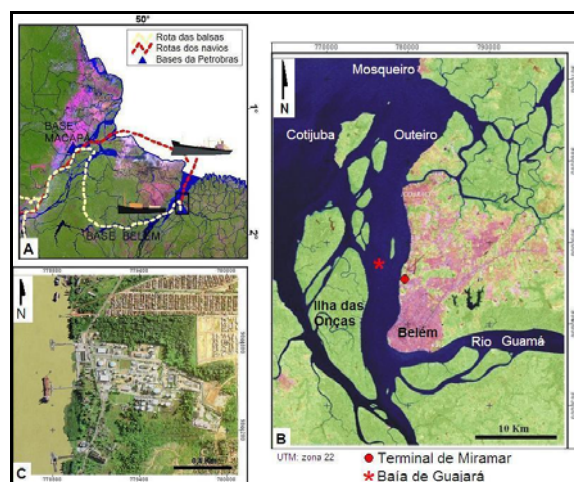


Fig. 1 - localização da área em estudo. A) Terminais de abastecimento e rotas de transporte de derivados; B) Baía de Guajará (Landsat-7 ETM+); C) Terminal Petroquímico de Miramar (aerofoto de alta resolução).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método para elaboração dos mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo foi baseado na proposta de JENSEN *et al.* (1993), que utiliza a integração de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG).

Assim, foi utilizada uma imagem RADARSAT-1 Wide-1 (banda C-HH), órbita descendente, e imagens Landsat-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7), para elaboração dos mapas de unidades de paisagem da área. As imagens Landsat-7 e RADARSAT-1 foram ortoretificadas no software OESE (*OrthoEngine Satellite Edition*), usando o modelo digital de elevação adquirido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e pontos de controle no terreno (GCPs) obtidos a partir de cartas digitais do IBGE na escala 1:100.000. Foi aplicado o filtro adaptativo *Enhanced Frost*, para redução do *speckle*, na imagem RADARSAT-1, simultaneamente ao processo de ortoretificação, evitando múltiplos processos de reamostragem (PCI GEOMATICS, 2004). Na imagem Landsat-7 foi aplicado o método da subtração do pixel escuro para a correção do efeito atmosférico, o que possibilita a redução do efeito aditivo da atmosfera na resposta do sensor óptico (CHAVEZ JR., 1988).

As imagens RADARSAT-1 e Landsat-7 foram integradas usando a técnica SPC-SAR (PARADELLA *et al.*, 1999; SOUZA FILHO & PARADELLA, 2005; GONÇALVES, 2005). Devido à intensa cobertura de nuvens na região, não foi possível a utilização de imagens Landsat obtidas em época próxima à aquisição do RADARSAT-1. Os principais parâmetros das imagens utilizadas neste trabalho podem ser vistos na tabela 1.

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS UTILIZADAS.

Plataforma	Sensor /modo	Data de aquisição	Resolução Espacial (m)	Tamanho pixel (m)
RADARSAT-1	C-HH/ Wide 1	5 Jan. 03	33x27	12,5
Landsat - 7	ETM+	3 Out. 01	30	30
SRTM	InSAR	Fev. 00	90	90

O método usado para identificação dos ambientes e seus respectivos índices de sensibilidade ambiental (ISA) foi adaptado do método proposto pela NOAA (2002), considerando-se as especificidades e peculiaridades da Zona Costeira Amazônica (SOUZA FILHO *et al.*, 2004). ARAÚJO *et al.* (2002) e MMA (2002) adaptaram o método NOAA para as Zonas Costeiras das regiões sul, sudeste e nordeste.

O método da NOAA é mundialmente empregado na elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. Tal método utiliza uma escala de sensibilidade ambiental variando de 1 a 10.

Para o desenvolvimento dos mapas de ISA é necessária, preliminarmente, a elaboração de mapas de unidades de paisagem, pois descrevem o ambiente quanto seus componentes naturais (parâmetros físicos e biológicos) e antropogênicos (parâmetros sócio-econômicos relacionando as atividades geradoras de risco) (NOAA, 2002). Assim, foram produzidos mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, a partir dos mapas de unidades de paisagem gerados pela classificação digital e visual das imagens. Ademais, os diferentes polígonos classificados foram identificados e corroborados pelos trabalhos de campo.

4. CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS

A aplicação de técnicas de classificação automática tem como finalidade substituir a subjetividade da interpretação visual de imagens, maximizando a extração de informações, de forma mais rápida e precisa. Isso é feito pela aplicação de regras de decisão baseadas nos parâmetros estatísticos das imagens, que agrupam os pixels de uma imagem digital em várias classes ou temas.

Nesse trabalho, técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada foram utilizadas tanto para as imagens Landsat-7 como para o produto híbrido (SPC-SAR), buscando-se avaliar a confiabilidade destas abordagens para a área em estudo, considerando a facilidade e rapidez na geração de mapas de unidades de paisagem e seus respectivos ISA.

O procedimento para classificação das imagens digitais foi executado em três etapas, começando com a delimitação do número de classes de interesse (várzea, terra firme, água e áreas urbanas). Em seguida, foram delimitados polígonos das áreas de treinamento representativos das classes determinadas anteriormente (somente para classificação supervisionada). Por último, foi feita a avaliação da exatidão do mapeamento.

As técnicas e procedimentos de classificação foram realizadas utilizando o módulo *ImageWorks* e *Focus* do software PCI Geomática (PCI GEOMATICS, 2004). Assim, a técnica de classificação automática não-supervisionada Iseog (ISODATA) foi aplicada nas bandas espectrais (1, 2, 3, 4, 5 e 7) do Landsat-7 ETM+, enquanto que, no produto híbrido (SPC-SAR) foi utilizado o classificador K- médias (*K-means*). Tanto as imagens Landsat-7 quanto a imagem híbrida foram submetidas a uma classificação supervisionada usando o algoritmo de Máxima Verossimilhança - MAXVER (*Maximum Likelihood*) (ROSENFELD & LINS, 1986; CONGALTON, 1991; RANSEY III *et al.* 1998).

Na etapa de pós-classificação, para os produtos supervisionado e não-supervisionado foram usadas ferramentas de edição e agregação de classes, a fim de resolver possíveis confusões e erros de mapeamento. Por último, foi aplicado um filtro de média com janela 3x3 com o intuito de homogeneizar as classes geradas, resultando em uma imagem com melhor aspecto para o usuário final. O processo de classificação automática está sujeito a erros, devido à qualidade dos dados usados

e/ou dos métodos empregados. Por esse motivo, um procedimento para avaliação da acurácia do mapeamento foi realizado, permitindo a quantificação dos erros e valorizando a qualidade do mapeamento, justificando a confiabilidade e praticidade do método (JENSEN, 1996).

A avaliação da acurácia do mapeamento foi realizada pela distribuição estocástica de 100 pontos de referência, sobre a área em estudo, e comparados com a verdade terrestre (checagem de campo), auxiliado pela experiência do analista e quando necessário foi usado um mapa de referência interpretado por GONÇALVES (2005). Em seguida, foram geradas as matrizes de confusão, mostrando o número de pixels mapeados de forma correta e, além disso, utilizado o índice *Kappa* para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático classificado (CONGALTON, 1991).

O valor da estatística *Kappa* dá um indicativo do desempenho da classificação. O índice de exatidão geral é um parâmetro estatístico simples, derivado da matriz de confusão, que é dado pela divisão da soma dos valores da diagonal principal dessa matriz pela quantidade total de amostras usadas para o cálculo da matriz de confusão (JENSEN, 1996).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As técnicas de classificação automática (supervisionada e não-supervisionada), tanto para o conjunto de dados Landsat-7 (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) como para o produto híbrido gerado (SAR/óptico) foram de grande valia. Tais classificações foram avaliadas quanto sua exatidão e sumarizadas segundo o índice *Kappa* na Tabela 2.

TABELA 2 - TESTE KAPPA PARA AS CLASSIFICAÇÕES AUTOMÁTICAS GERADAS.

Classificação	Índice Kappa	Desempenho
Landsat-7 (Isoseg)	0.816	Excelente
SPC-SAR (K-média)	0.602	Muito Bom
Landsat-7 (MAXVER)	0.774	Muito Bom
SPC-SAR (MAXVER)	0.729	Muito Bom
Landsat-7 (MAXVER) *	0.960	Excelente
SPC-SAR (MAXVER) *	0,953	Excelente

(*) Classificação baseada nas áreas de treinamento.

A avaliação dos erros de classificação baseada na análise estatística das áreas de treinamento apresentou altos valores de exatidão (0,960 para o Landsat-7 ETM+ usando MAXVER), se comparada pela avaliação realizada com a distribuição estocástica de pixels de referência na área estudada (0,774 para o Landsat-7 ETM+ usando MAXVER), Tabela 2. Tal efeito ocorre porque a distribuição dos pixels é orientada pelo conhecimento prévio do analista (verdade terrestre) e concentrada nas regiões das áreas de treinamento (JENSEN, 1996).

A matriz de confusão é usada para avaliar o resultado da classificação, pela comparação da verdade terrestre (dados de referência) com a classificação

produzida, mostrando quantitativamente os pixels classificados de forma correta.

As matrizes de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral são mostradas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

TABELA 3 - MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA (ISOSEG) DA IMAGEM LANDSAT-7.

Dado de Referência					
Classificado	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	Σ Linha
Várzea	36	4	2	0	42
Terra Firme	4	16	3	0	23
Área Urbana	0	0	9	0	9
Água	0	0	0	26	26
Σ Coluna	40	20	14	26	100

Índice Kappa = 0.816

Exatidão geral = 87/100 = 87%

TABELA 4 - MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA (K-MÉDIA) DO PRODUTO HÍBRIDO.

Dado de Referência					
Classificado	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	Σ Linha
Várzea	30	7	4	0	41
Terra Firme	8	13	7	0	28
Área Urbana	1	0	3	0	4
Água	1	0	0	26	27
Σ Coluna	40	20	14	26	100

Índice Kappa = 0.602

Exatidão geral = 72/100 = 72%

TABELA 5 - MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA (MAXVER), IMAGEM LANDSAT-7.

Dado de Referência					
Classificado	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	Σ Linha
Várzea	36	6	1	0	43
Terra Firme	3	14	3	0	20
Área Urbana	1	0	10	2	13
Água	0	0	0	24	24
Σ Coluna	40	20	14	26	100

Índice Kappa = 0.774

Exatidão geral = 84/100 = 84%

TABELA 6 - MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA (MAXVER) DO PRODUTO HÍBRIDO.

Dado de Referência					
Classificado	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	Σ Linha
Várzea	35	6	3	0	44
Terra Firme	4	12	3	0	19
Área Urbana	0	2	8	0	10
Água	1	0	0	26	26
Σ Coluna	40	20	14	26	100

Índice Kappa = 0.729

Exatidão geral = 81/100 = 81%

Dessa forma, o método de amostragem aleatória é o mais apropriado para avaliar a acurácia do mapeamento, pois adquire informações em todas as unidades de paisagem presentes na área.

Para a matriz de confusão da Tabela 3, os componentes da diagonal principal (em **negrito**) representam os pixels que foram classificados de forma correta. Para a classe várzea, no mapa temático gerado, foram corretamente classificados 36 pixels. No entanto, 4 pixels classificados como várzea, quando observados os dados de referência, pertencem à classe terra firme e 2 pixels que também foram classificados como várzea, pertencem à classe áreas urbanas. Portanto, dos 42 pixels da classe várzea, 36 pixels (85 %) foram bem classificados, enquanto que 6 pixels foram mal classificados (14 %). Este erro de classificação é chamado de erro de inclusão ou comissão, dado que, pixels de outras classes são incluídos na classe em análise.

Dentre os 14 pixels da classe área urbana, 9 foram classificados corretamente (64 %), 2 foram classificados como várzea (14%) e 3 pixels foram classificados como terra firme (21 %). Esse erro de classificação é chamado de erro de omissão, pois pixels pertencentes à classe área urbana foram atribuídos a outras classes (Tabela 3).

A análise estatística apontou bons resultados para as técnicas de classificação, permitindo aferir a exatidão dos mapeamentos e corroborando a rapidez e confiabilidade do método.

As técnicas de classificação empregadas, tanto para a imagem Landsat-7 ETM+ quanto para o produto híbrido (SPC-SAR) mostraram ser de grande utilidade, em função da qualidade dos mapas temáticos gerados, bem como pela acurácia e rapidez dos procedimentos (Figura 2).

O mapa de unidades de paisagem, gerado pela classificação ISOSEG para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat-7, apresentou o melhor resultado quanto à discriminação dos ambientes ($Kappa$ 0.816 - Figura 2A), enquanto o pior resultado foi observado para a classificação K-médias do produto SPC-SAR ($Kappa$ 0.602 - Figura 2B). O segundo melhor resultado foi obtido para classificação MAXVER da imagem landsat-7 ($Kappa$ 0.774 - Figura 2C). O melhor resultado para o produto híbrido (SPC-SAR) foi obtido pela classificação MAXVER ($Kappa$ 0.729 - Figura 2D).

A técnica de fusão de dados SPC-SAR (Landsat-7 e RADARSAT-1) permite a geração de um produto híbrido com informações referentes a diferentes faixas do espectro eletromagnético (visível, infravermelho e microondas). Assim, as imagens ópticas forneceram informações das propriedades físico-químicas dos alvos, enquanto que a imagem nas microondas forneceu informações referentes à rugosidade superficial (macro e micro topografia) e propriedades elétricas dos alvos (conteúdo de umidade). No entanto, o efeito *speckle* do radar compromete a acurácia da classificação, originando erros de comissão e omissão (Figura 2B).

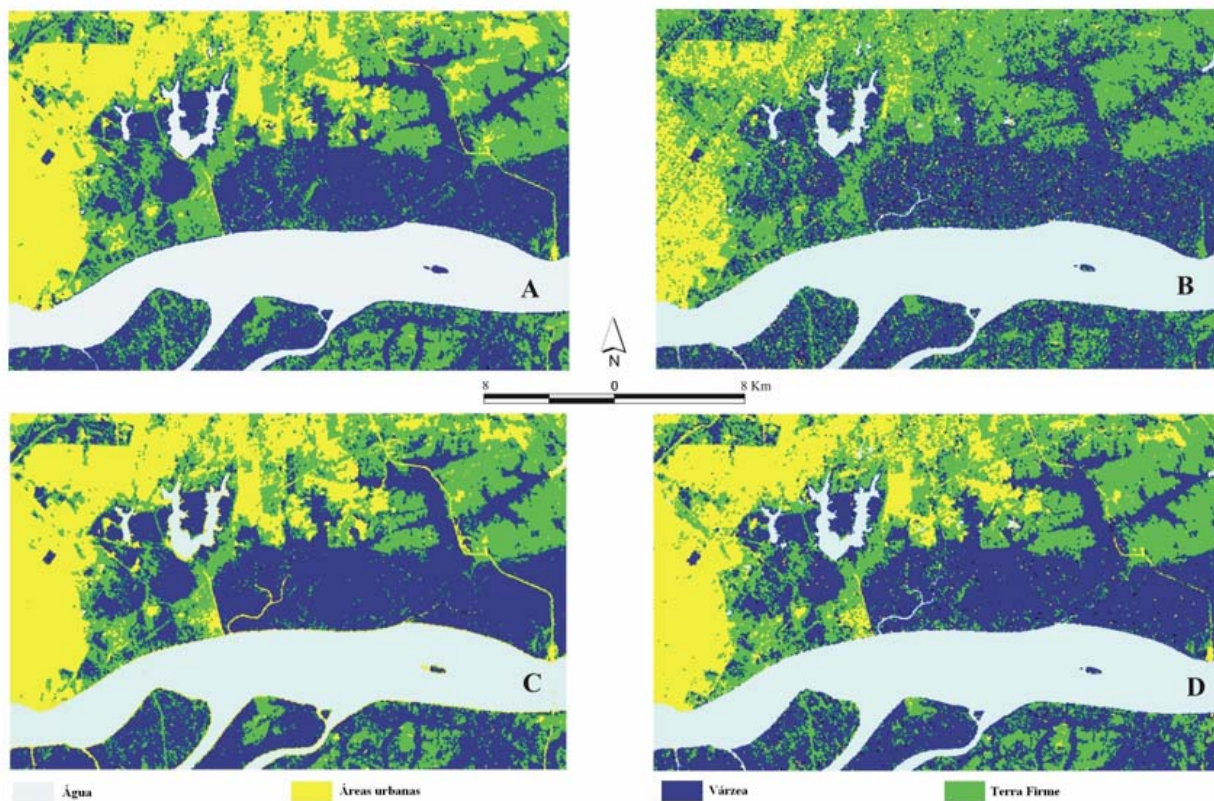


Fig. 2 - Técnicas de classificação automáticas usadas para confecção dos mapas de unidades de paisagem: A) ISOSEG nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat-7 ETM+; B) K-Médias na imagem SPC-SAR; C) MAXVER nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 do Landsat-7 ETM+; D) MAXVER na imagem SPC-SAR.

Assim, as imagens Landsat-7 foram usadas como base para elaboração do mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

O mapa de unidades de paisagem que apresentou o melhor índice *Kappa* para as imagens classificadas é mostrado na Figura 3.

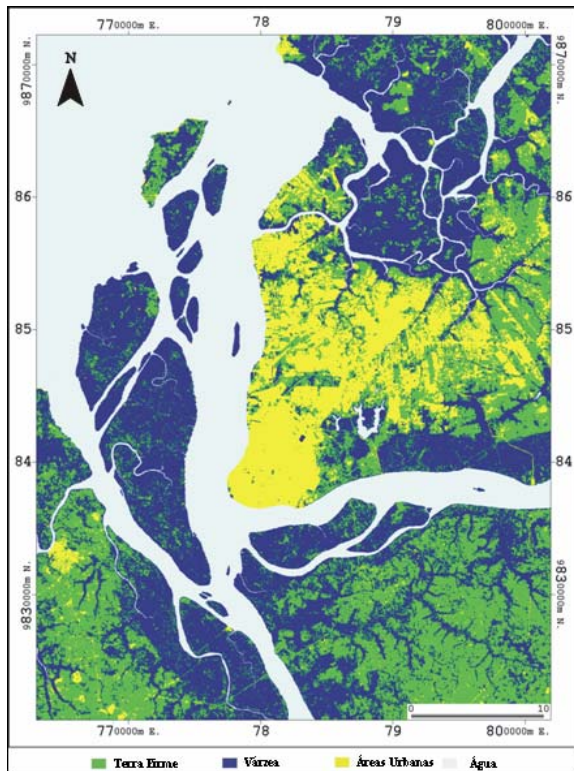


Fig. 3 - Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática que obteve o melhor índice *Kappa* (classificação ISOSEG da imagem Landsat-7).

O mapeamento das unidades de paisagem é a base para a confecção do mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo (ISA). Tais mapas puderam ser elaborados em um pequeno intervalo de tempo, em função da automação dos procedimentos empregados.

Nos produtos gerados pelo processamento digital de imagens e classificação automática, aliados as informações de campo, foram identificados sete índices de sensibilidade ambiental (ISA) ao derramamento de óleo, para área estudada. Assim, os ambientes foram ordenados de acordo com sua sensibilidade em: i) Muro de arrimo - ISA 1B; ii) Falésia - ISA 3; iii) Praia - ISA 4; iv) Estruturas Artificiais - ISA 8B; v) Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; vi) Manguezal - ISA 10A; vii) Várzea - ISA 10B (Figura 4).

É importante considerar que feições de pequena expressão na área (muro de arrimo, falésia, praia, estruturas artificiais), não foram identificadas automaticamente, em função da escala do mapeamento, valendo-se nesses casos da checagem em campo e da experiência do analista.

As áreas de manguezal e de várzea não puderam ser discriminadas pela classificação

automática, apenas através da análise visual das imagens (Figura 5), em função das respostas espectrais semelhantes, representando uma limitação da técnica.

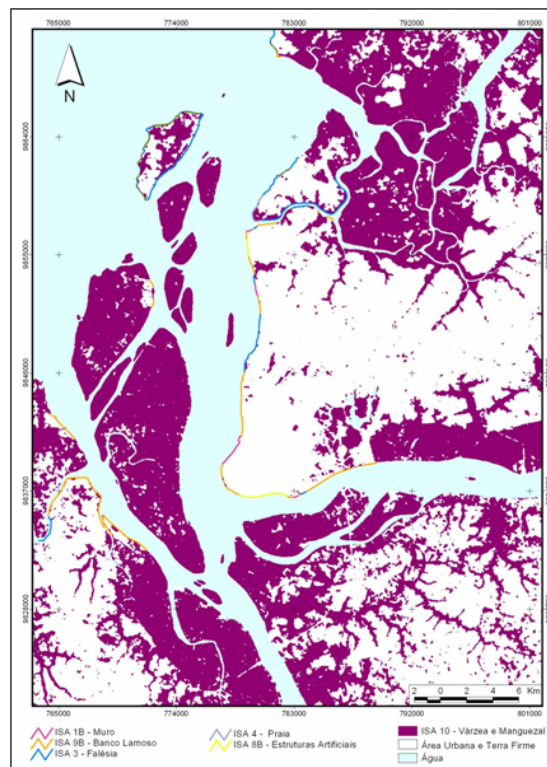


Fig. 4 - Mapa de ISA elaborado pela classificação automática ISOSEG da imagem Landsat-7 (GONÇALVES, 2005).

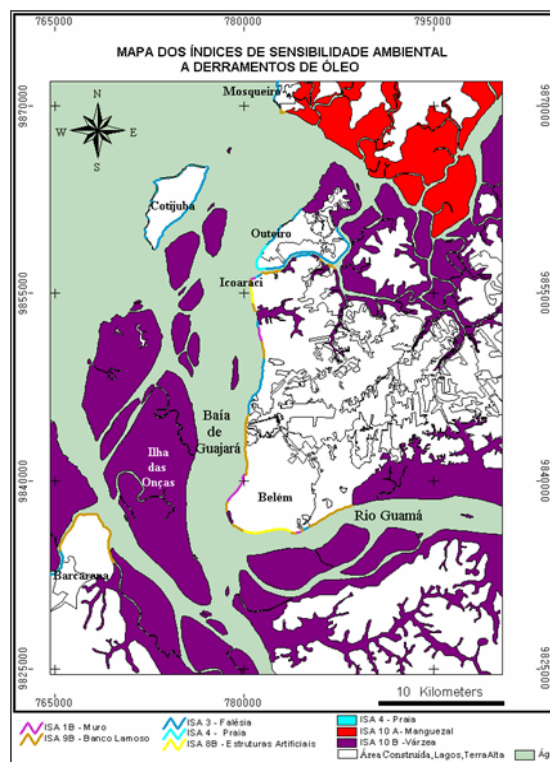


Fig. 5 - Mapa de ISA elaborado pela classificação visual da imagem Landsat-7 ETM+ (GONÇALVES & SOUZA FILHO, 2006).

6. CONCLUSÕES

Técnicas de classificações supervisionadas e não-supervisionadas mostraram ser importantes, em função da facilidade e rapidez para o mapeamento das unidades de paisagem, fornecendo resultados confiáveis num pequeno intervalo de tempo, subsidiando dessa forma, a elaboração de mapas preliminares de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

Em situações emergenciais a agilidade nas ações de resposta é a chave para uma estratégia de contingência eficaz, com a proteção dos ambientes ameaçados e mitigação dos danos gerados, principalmente em áreas cujas variáveis ambientais não são bem conhecidas, tal como acontece na Amazônia. É importante ter em mente, que os produtos classificados servem como uma informação preliminar, sendo indispensável um extenso trabalho de campo.

A utilização dos dados de sensores remotos orbitais permitiu a produção de mapas atualizados, em escala adequada, com maior rapidez, exatidão e menor custo. Além disso, a visão sinóptica obtida com esses sensores propiciou o melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros amazônicos, bem como suas inter-relações, dado que possibilitaram a análise integrada das relações espaciais e o reconhecimento mais eficaz dos ambientes em campo.

Doravante, é possível aplicar em outras áreas da Zona Costeira Amazônica, a rotina de procedimentos apresentada para a identificação e o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, objetivando dessa maneira um maior grau de conhecimento sobre a região.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão de uma bolsa de fixação de recursos humanos (Edital CT-Amazônia/MCT/CNPq nº32/2005 proc. # 553175/2005-0) e ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT/UFPA) pela infra-estrutura para o processamento digital das imagens, bem como aos projetos PIATAM mar I e PETRORISCO, pelo suporte à realização desse estudo, projetos financiados pela Petrobras e FINEP. O segundo e quarto autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de produtividade em pesquisa (Proc. # 303238/2002-0 e # 300985/90-8, respectivamente). Esta contribuição representa o artigo n.ºXX do projeto PIATAM Mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, S.I.; SILVA, G. H.; MUEHE, D. C. E. H. 2002. **Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras: Ambientes Costeiros e Estuarinos**. Rio de Janeiro, 134p.

- CHAVEZ JR., P.S. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.
- CONGALTON, R. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, p. 35- 45, 1991.
- CUNHA, E.R.S.P.; SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; SALES, M.E.C.; LANDAU, L. O Projeto Piatam Mar e a gestão ambiental e social da zona costeira amazônica. In: Rio Oil & Gás Expo and Conference, Rio de Janeiro, Brasil, **Anais...** Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2004.
- GONÇALVES, F.D. **Utilização de dados de sensores remotos para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na Baía de Guajará, Belém-PA**. Belém, Universidade Federal do Pará (Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica), 179p (Dissertação de Mestrado), 2005.
- GONÇALVES, F.D. & SOUZA FILHO, P.W.M. Integração digital de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA). In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, **Anais**. p. 1789-1796. 2005.
- GONÇALVES, F.D. & SOUZA FILHO, P.W.M. Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo na Zona Costeira Amazônica (Baía de Guajará) Usando Imagens Ladsat-7 ETM+ e Sistema de Informação Geográfica. In: CASTRO, E. & PROST, M.T. in press, 2006.
- GUNDLACH, E.R. & HAYES, M.O. Classification of coastal environments in terms of potential vulnerability to oil spill impact. **Marine Technology Society Journal**, v. 12: p. 18-27, 1978.
- JENSEN, J.R.; MURDAY, M.; SEXTON, W.J.; GREEN, C.J. Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. **Geocarto International**, v. 2: p. 5-13, 1993.
- JENSEN, J.R.. **Introductory digital image processing - A remote sensing perspective**. Prentice Hall: New Jersey, second edition, 1996.
- MMA. 2002. **Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (cartas SAO)**. Rio de Janeiro, 22p.
- NOAA. **Environmental sensitivity index guidelines**, NOAA: Seattle. Version 3.0. 89p, 2002.
- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P. MORAIS, M. C. **Avaliação de dados do RADARSAT-1 em aplicação geológica na Província Mineral de Carajás, Estado do Pará**. Relatório Final: FAPESP #10946-4/1997, INPE, São José dos Campos, 1999.
- PCI GEOMATICS. **Geomatica: User Manual**. PCI geomatics, Version 9.1, 129p, 2004.

- RANSEY III, E.W.; NELSON, G.A.; SAPKOTA, S.K. Classifying coastal resources by integrating optical and radar imagery and color infrared photography. **Mangroves and Salt Marshes** v. 2: p. 109-119, 1998.
- ROSENFELD, G.H. & LINS, K.F. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric and Remote Sensing**, v. 52 (2): p. 223-227, 1986.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; BEISL, C.H.; ALMEIDA, E.F.; GONÇALVES, F.D. Environmental sensitivity mapping for oil spill in the Amazon coast using remote sensing and GIS technology. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Anchorage, Alaska, **Proceedings...**IEEE Geoscience and Remote Sensing, p. 1-6. 2004.
- SOUZA FILHO, P.W.M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação do maior cinturão contínuo de manguezais do mundo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, in press, 2005.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31(3): p. 214- 224, 2005.