

Mapeamento de Recifes Costeiros Utilizando Imagens Orbitais

CLÁUDIA ZUCCARI F. BRAGA¹

DOUGLAS FRANCISCO MARCOLINO GHERARDI¹

¹PROGRAMA HIDRO/INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
claudia@ltid.inpe.br
douglas@ltid.inpe.br

Abstract A new methodology is being proposed for the mapping of all Brazilian coastal reefs, using TM Landsat and HRV SPOT images. This is a joint effort involving researchers from Diretoria de Áreas Protegidas/Ministério do Meio Ambiente, Programa HIDRO/INPE and Projeto Recifes Costeiros/UFPE-IBAMA-BID. This methodology is built upon the experience gathered during the mapping of coastal reefs from an environmental protected area called Costa dos Corais, located between the States of Pernambuco and Alagoas (Northeast Brazil). Initially, remote sensing images were classified using segmentation techniques to identify and map the following themes: 1) water; 2) sand flat environments; 3) shoals; 4) "breaker zone"; 5) river plume; 6) beach; 7) intertidal and shallow subtidal reefs; and 8) reef surfaces partially covered by sediments. Segmentation of LANDSAT bands TM1, 2 e 5 reached the highest mapping precision (74%). Segmentation of band TM1 followed by the classification of bands TM1, 2 e 5 resulted in the most cost effective mapping (69%), demanding less computer time and interaction with the analyst. However, visual interpretation of TM LANDSAT images allowed the identification of most themes and showed to be the most efficient way to map the reefs. Based on the above results, a mapping strategy will be applied where TM LANDSAT images will be appropriately filtered and resampled to the best spatial resolution possible and visually interpreted. Whenever possible, local managers will be invited to be trained on GIS and mapping techniques using digital images. This effort aims at improving the coastal zone management skills of people involved in the management of reef protected areas.

Keywords: coastal reefs, remote sensing, digital image processing, coastal management.

Introdução

Ao longo dos seus mais de 7.400 km de costa, o Brasil apresenta uma grande diversidade de ecossistemas, tais como manguezais, recifes de corais, dunas, restingas, praias arenosas, costões rochosos, lagoas e estuários, que abrigam inúmeras espécies de flora e fauna, muitas das quais endêmicas e algumas ameaçadas de extinção (Prates e Pereira, 2000). Diagnósticos recentes, apresentados durante o *workshop* "Avaliação e Ações Prioritárias para a Zona Costeira e Marinha" (PROBIO, 1999), apontaram sérios problemas de descaracterização e fragmentação da zona costeira e marinha, resultantes, principalmente, da especulação imobiliária, da sobrepesca (industrial e artesanal), da poluição dos estuários e do turismo desordenado. A situação de maior criticidade identificada refere-se aos ecossistemas de recifes de coral, únicos no Atlântico Sul e

sob forte impacto da ação antrópica, que necessitam ser objeto de novas unidades de proteção e de um programa de monitoramento e gestão específico. Um dos diagnósticos apresentados por ocasião deste *workshop* recomenda, como principais ações a serem tomadas, o mapeamento das áreas de ocorrência dos recifes de corais e a capacitação dos gestores dessas áreas.

A importância de se preservar a integridade das áreas onde se encontram recifes de coral se deve ao fato dos recifes serem áreas de alta biodiversidade e produtividade. Enquanto os recifes de coral cobrem apenas 0,2% da superfície dos oceanos, eles podem conter até 1/3 das espécies de peixe (Myers, 1997). Entretanto, para a preservação eficiente destas áreas é necessário que se considere os seguintes níveis hierárquicos: a) genético, b) população-espécies, c) comunidade-ecossistema, e d) espacial.

A utilização de imagens de sensores orbitais para o mapeamento e o estudo de recifes de coral data do final da década de 70, quando foram lançados os primeiros satélites ambientais. Em 1985, a Unesco (UNESCO, 1986) organizou, na Austrália, um *workshop* sobre as aplicações de técnicas digitais de sensoriamento remoto para estudos oceanográficos, estuarinos e, mais especificamente, para o estudo de recifes de corais. Nesta ocasião, Kuchler (1985) apresentou os resultados de um mapeamento do recife de Heron (Great Barrier Reef), realizado a partir de dados MSS Landsat-4, onde se obteve uma precisão de aproximadamente 75% em relação à verdade de campo. A análise destes resultados revelou que a variação de profundidade da água, o contraste entre as diversas classes recifais e a identidade espectral de cada tipo de cobertura foram os fatores limitantes do índice de precisão atingido. Outros aspectos importantes levantados por Jupp (1985), participante deste mesmo evento, se referem às limitações impostas pela resolução espacial, espectral e temporal de cada sistema sensor. No entanto, já naquela época, o autor ressaltava as vantagens de se acoplar dados digitais dos sensores remotos então disponíveis aos dados dos levantamentos realizados *in situ*, o que permite formar uma base de dados histórica e contínua, por sua vez capaz de dar suporte e diminuir substancialmente os custos das atividades de gerenciamento ambiental.

Mais recentemente, outros exemplos de aplicações de imagens de satélite para o mapeamento de recifes de corais ou outras feições submersas podem ser citados, como o trabalho de Khan *et al.* (1992), que realizaram um mapeamento dos *habitats* subtidais na região oeste do Golfo Árabe utilizando imagens Landsat-5 TM; ou o trabalho de Maritorena (1996), que propõe um método para correção dos efeitos de atenuação da luz na água em imagens TM e SPOT para facilitar o mapeamento de recifes de coral na Polinésia Francesa.

Área de Estudo

A investigação sistemática das construções recifais encontradas no litoral norte e nordeste do Brasil iniciou-se com Hartt, em 1867, seguido por Branner (1904) e Verrill (1868, 1902, *op. cit.* Laborel, 1969). Jacques Laborel (Laborel, 1969), a bordo do navio oceanográfico Calypso, visitou o Brasil duas vezes, entre 1961 e 1964, e produziu o primeiro levantamento sistemático da composição dos recifes de origem orgânica, estabelecendo a distribuição das espécies que compõem a fauna de corais do Brasil. Desde então, pouco se acrescentou ao conhecimento da estrutura, composição e distribuição dos recifes de coral do Nordeste brasileiro, com exceção do trabalho de Leão (1982).

Iniciou-se, em 1998, com o apoio do IBAMA, a estruturação e implementação da Área de Proteção Ambiental (APA) Costa dos Corais, que inclui 12 municípios entre Paripueira (AL) e Tamandaré (PE). Até o momento, não se dispõe de qualquer informação detalhada sobre o tamanho, densidade e distribuição destes corais, embora relatos sobre os “recifes de franja”

encontrados na costa de Pernambuco sejam anteriores à visita de Charles Darwin à América do Sul (Darwin, 1842). Segundo Maida e Ferreira (1997), dados quantitativos sobre a ecologia dos recifes da APA são quase inexistentes e, aparentemente, apenas os recifes de Tamandaré (PE) foram investigados, dispondo-se agora de informações sobre sua composição e estrutura. Estes autores coordenam o “Projeto Recifes Costeiros”, estabelecido para o gerenciamento ambiental da APA Costa dos Corais, com o apoio do IBAMA e recursos do BID. Em 1999, pesquisadores do então Programa Oceanografia/OBT/INPE juntaram-se a esse projeto, visando avaliar a utilização de dados de imagens orbitais para o mapeamento dos recifes da APA e avaliação ambiental da zona costeira em geral nesta região (Gherardi *et al.*, 1999).

Objetivos

O presente trabalho apresenta os resultados preliminares do mapeamento da distribuição dos recifes na porção sul da APA Costa dos Corais, e a metodologia desenvolvida para o mapeamento dos recifes costeiros do Brasil, utilizando dados de sensoriamento remoto orbital. Esses resultados permitiram o desenvolvimento da metodologia a ser empregada no projeto “Estabelecimento de Rede de Proteção aos Recifes Coralíneos”, para auxiliar o trabalho de manejo e proteção dos recifes de coral da costa brasileira. Os objetivos específicos deste projeto, abaixo enumerados, dão ênfase à utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a extração de informações necessárias ao manejo de recursos vivos em áreas de proteção ambiental e ao treinamento e formação de recursos humanos capacitados a aplicar e desenvolver estas metodologias.

- 1 Identificar e delimitar os recifes costeiros utilizando imagens orbitais TM previamente restauradas e realçadas;
- 2 Realizar um estudo comparativo da precisão dos mapeamentos dos recifes através de medidas *in situ* numa área teste a ser selecionada;
- 3 Identificar e mapear a área de influência direta e indireta das diversas atividades humanas que resultem na alteração da paisagem costeira local, a partir de mapas de uso da terra obtidos por segmentação de imagens multiespectrais, numa faixa de, no mínimo, 15 km de largura. As seguintes atividades, principalmente, serão enfocadas: a) turismo, b) despejo de rejeitos industriais, c) desmatamento, d) agricultura, e) ocupação urbana, e f) mineração e dragagem;
- 4 Identificar e diagnosticar aquelas atividades humanas que estejam causando e/ou possam vir a causar a degradação dos recifes costeiros;
- 5 Desenvolver o zoneamento da zona costeira tendo como objetivo a hierarquização de diferentes áreas quanto às condições de sobrevivência e de manutenção da biodiversidade dos recifes de coral; e
- 6 Orientar trabalhos de pós-graduação de alunos do Inpe e das demais instituições envolvidas, no âmbito dos objetivos supra-citados, e oferecer cursos de treinamento em sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica a pesquisadores, técnicos e gestores de áreas protegidas, em função das demandas do projeto.

Metodologia

Teste de mapeamento por classificação automática de imagens realizado previamente

O processamento digital das imagens, incluindo a classificação automática, foi realizado através do programa SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (<http://www.dpi.inpe.br/spring>), tendo sido cumpridas as seguintes etapas: 1) Georreferenciamento (registro) com cartas topográficas do IBGE, cuja precisão foi avaliada a partir de medidas de GPS coletadas durante o trabalho de campo; 2) geração de imagem-máscara utilizando-se o Índice Diferença Normalizada de Água (“Normalized Difference Water Index” - NDWI) (McFeeters, 1996) para a classificação da linha de costa e rotinas do módulo LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico)/SPRING para a eliminação da parte terrestre das imagens; 3) seleção de bandas por OIF (“optimum index factor”) (Chavez *et al.*, 1982), permitindo identificar-se a combinação de três bandas que contivesse a maior variância e menor correlação das informações multispectrais; 4) classificação das imagens por segmentação (procedimento que considera as características de textura das imagens e o contexto espacial da sua variabilidade (Coutinho, 1997)) para a identificação e mapeamento das feições recifais de interesse. No caso dos dados Landsat, foram classificadas, separadamente, as imagens selecionadas pelo OIF, a banda 1 e as três bandas do espectro visível. No caso dos dados Spot, foram classificadas separadamente as bandas no espectro visível (1 e 2) e a banda 3; utilizaram-se limiares de área e de similaridade iguais a dois e quatro *pixels*, respectivamente; 5) geração do mapa de verdade de campo, a partir da interpretação visual da composição colorida das bandas TM1, TM2 e TM3 em *overlay* transparente, que foi posteriormente digitalizada; e 6) estimativa da exatidão das classificações, a partir do coeficiente Tau (Ma e Redmond, 1995) e escolha do método para classificação;

Metodologia para mapeamento dos recifes costeiros empregando restauração de imagens

A partir dos resultados obtidos através da metodologia descrita no item anterior, foram estabelecidas as etapas metodológicas para a execução do projeto “Estabelecimento de Rede de Proteção aos Recifes Coralíneos”. O desenvolvimento das duas primeiras etapas ocorrerá simultaneamente ao treinamento de um grupo de gestores e técnicos ligados às principais áreas de proteção marinhas onde se encontrem formações recifais. 1) Pré-processamento das imagens Landsat ou Spot- restauração para elementos de maior resolução espacial; aplicação de filtros isotrópicos; georreferenciamento; realce de contraste; 2) interpretação visual e edição vetorial manual das feições recifais e ecossistemas associados; estabelecimento de legenda temática comum; 3) trabalhos de campo; 4) *workshop* para discussão dos resultados dos mapeamentos e fixação do conhecimento adquirido; 5) integração dos projetos desenvolvidos em um único banco de dados; e 6) análise dos dados de distribuição, área de cobertura e densidade dos recifes, visando a melhoria da gestão de áreas marinhas além da identificação de novas áreas a serem protegidas (âmbito governamental).

Resultados e discussão

Imagens TM

Os três arquivos de bordas resultantes da segmentação da banda 1, das bandas 1, 2 e 3 e das bandas 1, 2 e 5 (estas selecionadas pelo OIF), foram utilizados para classificar as bandas 1, 2 e 3 e as bandas 1, 2 e 5, separadamente. Os limiares de similaridade e de área que permitiram os maiores índices de exatidão dos mapeamentos foram, respectivamente, iguais a 2 e 4. A classificação da banda 1, em todos os casos, apresentou uma baixa discriminação dos diferentes alvos (para um total de, 19 temas, 14 pertenciam à classe água), o que levou à sua exclusão dos resultados a serem posteriormente analisados.

Partindo da segmentação da banda TM1, os melhores resultados foram obtidos com a classificação das bandas 1, 2 e 5, com limiar de aceitação de 99%, que apresentou uma precisão (valor de Tau após o mapeamento) de 69%. Com a segmentação das bandas 1, 2 e 3, a maior precisão de mapeamento foi de 72%, correspondente à classificação destas mesmas três bandas, com limiar de aceitação de 99%. Finalmente, partindo da segmentação das bandas 1, 2 e 5 e posterior classificação destas mesmas bandas, atingiu-se o maior índice de exatidão dentre todos aqueles testados, igual a 74%, embora o limiar de aceitação, neste caso, tenha sido inferior, igual a 90%. Testes posteriores indicaram que este resultado era significativamente melhor que o anterior, com precisão de 72%.

Por outro lado, ao se comparar os valores de Tau com o número de temas produzidos (Figura 1), podemos observar que a melhor relação custo/benefício foi oferecida pela classificação das bandas 1, 2 e 5 a partir da segmentação da banda 1, com limiares de similaridade e área iguais a dois, e limiar de aceitação igual a 99,9%. Isto porque esta classificação produz um número reduzido de classes a serem mapeadas, ao mesmo tempo em que o mapeamento obtido apresenta um índice de exatidão relativamente alto (68%). Ou seja, é o método mais rápido, dentre os pesquisados, e satisfatoriamente preciso para se avaliar, de maneira global, a distribuição dos recifes da APA.

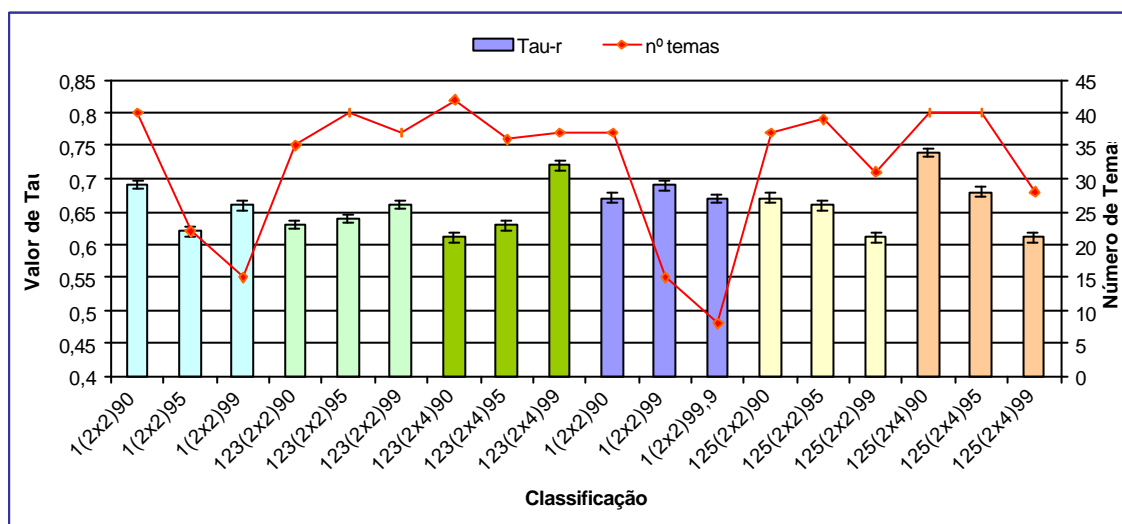


Fig.1 - Valores de Tau para o mapeamento com diferentes combinações de bandas e limiares de classificação. Adaptado de Morelli (2000)

Um grande problema observado durante o desenvolvimento deste estudo foi a similaridade espectral entre os alvos de interesse, principalmente entre os recifes e a pluma de alguns rios. As áreas referentes aos temas “planície de areia” e “banco de areia” mapeados com as imagens TM foram as que apresentaram maior diferença com relação à verdade de campo. Observou-se também que alguns erros de classificação aconteceram pela confusão entre a classe “recife coberto” e a classe “banco de areia” (Fig. 2). Neste exemplo, a água do rio Santo Antônio Grande (representado pelo número 1 na figura) apresentou confusão com a classe “recife”. Este erro encontra-se, provavelmente, relacionado ao alto teor de sedimentos em suspensão na água do rio, o que a torna espectralmente mais parecida com o tema “recife”. Assim, o rio (tema

“água” no mapa de campo - figura 2b) foi classificado como “recife” no mapa gerado pela segmentação (Figura 2c e 2d).

Outro exemplo de confusão na classificação referiu-se à pluma do rio, que se dispersa para nordeste (Figura 2a), e foi classificada como “recife coberto”.

As regiões que nas imagens correspondem a águas turbidas foram classificadas como recifes em todos os procedimentos testados. Isto demonstra que a resolução espectral das imagens TM é insuficiente para se discriminar, através de procedimentos automáticos de classificação, os principais alvos presentes nesta região da APA. No entanto, a análise visual da composição das bandas TM1, 2 e 3 permitiu uma identificação bastante nítida destes alvos, conforme comprovado na visita à área de estudo, sendo este o método recomendado para se realizar o mapeamento de toda a APA.

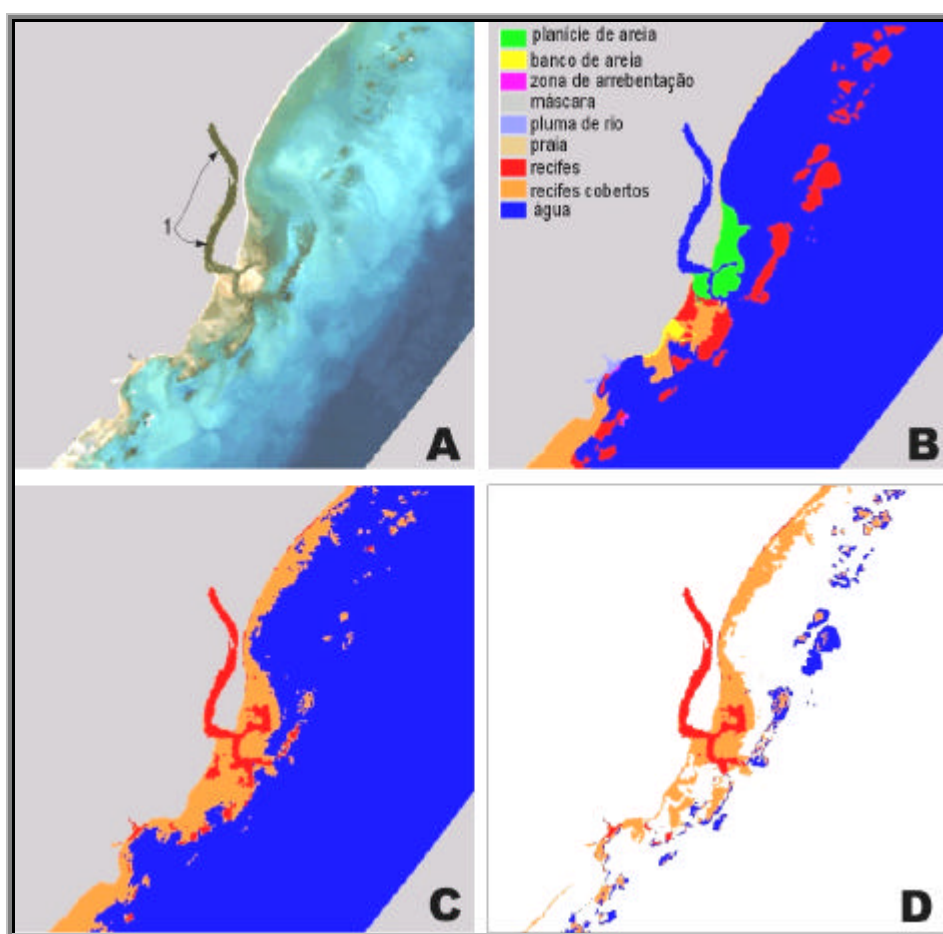


Fig. 2- Exemplo da confusão ou erro de classificação. A) Composição colorida das bandas TM 1, 2 e 3; B) mapa de verdade de campo; C) Imagem classificada (TM 1, 2 e 3); e D) Mapa de erro da classificação. Adaptado de Morelli (2000)

Imagens SPOT

As imagens HRV-SPOT não apresentaram o mesmo desempenho que as imagens TM para o mapeamento dos recifes da APA. O mapeamento de maior precisão foi obtido com a segmentação e posterior classificação da banda HRV3 (Tau igual a 67%). Para a segmentação e

classificação das bandas HRV1 e 2, atingiu-se uma precisão de 61%. Este resultado justifica-se, provavelmente, pela melhor resolução espectral do sensor TM, mais especificamente pela banda TM1, que permite obter dados de uma coluna d'água mais profunda que as bandas HRV. Por outro lado, a maior resolução espacial dos dados SPOT possibilitou a identificação de locais onde se verifica alta incidência de zonas de arrebentação que, segundo informações dos pescadores locais, correspondem à ocorrência de recifes mais profundos. Isto sugere a possibilidade de se mapear recifes mais profundos com imagens SPOT, sob condições de maré baixa.

Apesar das imagens Spot apresentarem maior resolução espacial que as imagens TM, sua área de cobertura corresponde a um quarto da cobertura das TM, o que, somado à alta frequência de ocorrência de nuvens na zona costeira nordeste do Brasil, resulta numa baixa disponibilidade de dados para a realização destes mapeamentos. Em todo o período pesquisado, disponível no acervo do INPE (1989 –, 1998), não foi possível obter imagens deste satélite para cobrir toda a extensão da APA, nem mesmo através de mosaico de diferentes datas, devido à cobertura de nuvens. A região mais crítica é a Baía de Tamandaré, que está completamente coberta por nuvens em todas as imagens SPOT disponíveis.

Conclusões

- ❖ A segmentação das imagens TM apresentou melhores resultados que as imagens SPOT para o mapeamento dos recifes da APA Costa dos Corais (máximo índice de exatidão dos mapeamentos com imagens TM de 74%; das imagens SPOT, de 67%). Os limiares de similaridade e de área mais adequados ao mapeamento desta área foram iguais a 2 e 4, respectivamente.
- ❖ A utilização do OIF para otimizar a seleção de bandas para a classificação mostrou-se adequada, uma vez que os melhores resultados foram encontrados utilizando-se a composição de bandas selecionada por este método, ou seja, bandas TM1, 2 e 5.
- ❖ Identificou-se um método alternativo, de menor custo de processamento, e com precisão pouco inferior (Tau igual a 68%), utilizando a segmentação da banda TM1 e posterior classificação das bandas TM1, 2 e 5.
- ❖ Através da interpretação visual de uma composição colorida das bandas TM1, 2 e 3 é possível se construir um mapa da distribuição dos recifes costeiros, capaz de ser utilizado para gerenciamento destes ecossistemas.

Continuação do projeto

Dada a insuficiência quase generalizada de dados sobre os recifes brasileiros e sua biota, o primeiro passo a ser tomado diz respeito à capacitação de gerentes e técnicos de áreas protegidas visando o mapeamento dos ecossistemas, aliado a uma estimativa da área ocupada pelos recifes coralíneos ao longo da costa brasileira. O treinamento de técnicos com conhecimento de campo para a geração de mapas temáticos será essencial para o acompanhamento do estado dos recifes coralíneos, planejamento ambiental e para o delineamento de estratégias de indicação e implementação de novas unidades de conservação.

A partir dos resultados da pesquisa de Morelli (2000) e da disponibilidade de novos recursos para realce de feições de pequena dimensão no SPRING, estabeleceu-se uma metodologia para o mapeamento dos recifes de toda a costa brasileira, utilizando-se imagens Landsat nas bandas

TM1, 2 e 3, ou imagens SPOT, restauradas e realçadas. Inicialmente, irá se completar o mapeamento de toda a região da APA Costa dos Corais. Paralelamente, estão sendo firmados os convênios de cooperação entre as instituições participantes do projeto e alocando-se os recursos para a implementação das etapas descritas no item "Metodologia" acima.

Referências

- Chavez, P. S.; Jr., Graydon L. Berlim, e Sowers, L. B, Statistical Method for Selecting Landsat MSS Ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*. vol 8. nº 1, 1982.
- Darwin, C. *The structure and distribution of coral reefs*. The University of Arizona Press., 1984. 239 p.
- Gherardi, D.F.M.; Braga, C.Z.F.; Morelli, F.. A discontinuous, 100 km long coralline-algal reef system in the Tropical South Atlantic, Northeast Brazil. *Reef Encounter*, 1999, p. 32-33, 1999.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Macrodiagnóstico da Zona Costeira do Brasil na Escala da União*. Min. do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasília, 1996.
- Jupp, D. L. B. The application and potential of remote sensing in the Great Barrier Reef region. *GBRMPA Research Publication Series*, Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville, Q. Australia, 1985.
- Khan, M. A.; Fadlallah, Y. H. e Al-Hinai, K. G. Thematic mapping of subtidal coastal habitats in the western Arabian Gulf using Landsat TM data – Abu Ali Bay, Saudi Arabia. *Int. Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 4, p. 605-614, 1992.
- Kuchler, D. A. *Geomorphological separability, Landsat MSS and aerial photographic data: Heron Island Reef, Australia*. Ph.D. Thesis, Dept. of Geography, James Cook University, Townsville, Australia. 1985.
- Laborel, J. L. Madreporaires et hydrocoralliaires recifaux des côtes bresiliennes. Systematique, ecologie, repartition verticale et geographie. *Ann. Inst. Oceanogr. Paris*, n. 47, p. 171-229, 1969.
- Leão, Z. M. *Morphology, geology and developmental history of the southernmost coral reefs of western Atlantic, Abrolhos Bank, Brazil*. Tese de Doutorado. University of Miami, Florida, 1982. 218 p.
- Ma, Z.; Redmond, R. L. Tau Coefficients for Accuracy assessment of classification of Remote Sensing Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 61, n. 4, p. 435-439, 1995.
- Maida, M. e Ferreira, B. P. Coral reefs of Brazil: an overview. *Proc. 8th Int. Coral Reef Sym*, 1, p. 263-274, 1997.
- Maritorena, S. Remote sensing of the water attenuation in coral reefs: a case study in French Polynesia. *Int. Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 1, p. 155-166, 1996.
- McFeeters, S. K. The use of the normalized Water Index (NDWI) in delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17. N.7, p. 1425 -1432, 1996

- Morelli, F.M. Mapeamento dos recifes costeiros de Paripueira, Barra de Santo Antônio e Passo do Camaragibe (AL), através da classificação de imagens Landsat-TM e HRV-SPOT. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, 2000.
- Myers, N. Global biodiversity II: losses and threats. *Principles of Conservation Biology*, 2nd edition. Eds. Meffe, G. K.; Carroll, C. R. and contributors. p. 123-149, 1997.
- Prates, A.P.L. e Pereira, P.M. Representatividade das unidades de conservação costeiras e marinhas: análise e sugestões. Artigo submetido e aceito para o II Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação. Campo Grande, nov., 2000. No prelo.
- PROBIO - Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira. <http://www.bdt.org.br/workshop/costa> Diagnósticos e resultados do Workshop realizado em Porto Seguro - BA, 25-29 de outubro de, 1999.
- UNESCO The application of digital remote sensing techniques in coral reef, oceanographic and estuarine studies. In: CLAASEN, D. VAN R (Ed.) Regional Unesco/COMAR/GBRMPA Workshop, Townsville,, 1985. *Unesco reports in marine science*, v. 42, 1986.