

Cartografía de arrecifes de coral en el Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais, Brasil, mediante fusión de imágenes

Gil Marcelo Reuss-Strenzel¹

¹ Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC/DCAA
Rodovia Ilhéus-Itabuna, Km16 - 45662-000 - Ilhéus - BA, Brasil
gmrstrenzel@uesc.br

Abstract. This work aims to contribute with coral reef mapping in shallow waters with moderate turbidity applying image fusion techniques. An aerial panchromatic photograph of 1970 and a Landsat TM of 1998 were blended by Principal Component Analysis. The resulting image was applied to coral reef mapping by visual interpretation up to 6 m deep, under turbid conditions. The results show a bigger proportion of infralittoral reef mapped compared to conventional techniques. Also, it is possible to observe changes in the seascape that occurred during the time interval between each image. This possibility opens a range of applications for image fusion in the management and monitoring of marine protected areas.

Palavras-chave: remote sensing, image fusion, coral reefs, sensoriamento remoto, fusão de imagens, recifes de coral.

1. Introducción

A lo largo de cerca de 2500 Km de la costa nordeste brasileña, entre los estados de Bahia y Maranhão, se distribuyen los únicos arrecifes de coral de todo el Atlántico Sur. Aislados en la escala de tiempo geológico de los corales caribeños por las descargas de sedimento y agua dulce de los ríos Amazonas y Orinoco, se trata de la fauna de corales hermatípicos con mayor proporción de endemismos en el mundo. Diez de las dieciocho especies conocidas son endémicas y algunas tienen características arcaicas. Tres especies del género *Mussismilia*, endémicas de aguas brasileñas, se encuentran actualmente apenas como fósiles en el Mediterráneo y Florida (Laborel, 1967).

En el margen brasileño del Atlántico tropical, los corales se encuentran tanto en zonas oceánicas como en zonas costeras. Las oceánicas son plataformas de islas colonizadas, como Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Archipiélago de Abrolhos y cadenas de montañas submarinas, como el Banco de Abrolhos y el Royal Charlot. Los corales costeros suelen crecer paralelos a línea de costa, sobre arrecifes de arenita cimentados por carbonato cálcico (*beach-rocks*) (Laborel, 1967), formados a lo largo de antiguas líneas de costa separadas por fluctuaciones del nivel medio del mar durante el Holoceno (Testa y Bosence, 1999).

Las comunidades recifales cambian naturalmente según los gradientes de sedimentación, turbidez, salinidad y nutrientes formados entre aguas oceánicas y aguas interiores. Hay una tendencia de que las macroalgas (en aguas eutróficas) y los organismos filtradores (en aguas aún más eutróficas) actúen desplazando los organismos simbioses capaces de reciclar nutrientes, que dominan el bentos bajo condiciones oligotróficas (Fabricius, 2005). Según Leão y Kikuchi (2005), la regresión marina registrada en Brasil durante el Holoceno incrementó el drenaje fluvial en el área de los arrecifes costeros, causando el desplazamiento de la fauna coralina por otra más adaptada a los elevados niveles de turbidez y sedimentación. Para ellos, esta situación de stress agregada al rápido aumento de la presión humana en las últimas décadas (incremento en la tasa de sedimentación, eutrofización de aguas costeras, contaminación industrial, sobreexplotación pesquera, turismo submarino, cambios climáticos etc.), pone en riesgo la capacidad de recuperación de los corales, reduciendo las probabilidades de recolonización tras episodios de extinción localizados.

Tal situación no podrá ser revertida sin un esfuerzo integrado de gestión costera, apoyado por una planificación minuciosa de las acciones de protección y mitigación de impactos. Sin embargo, la cartografía de hábitats marinos es fundamental para la implementación de planes de gestión de la zona costera (Clark, 1996), principalmente cuando la estrategia de gestión se vincula a espacios restringidos, como es el caso de Áreas Marinas Protegidas (AMPs) o redes de AMPs (Salm y Clark, 2000; Sala et al., 2002), pues favorece una visión sinóptica de la distribución espacial del mosaico formado por los elementos del paisaje costero, incluyendo los hábitats marinos.

Gran parte de la cartografía de hábitats marinos en aguas someras, como arrecifes de coral o praderas de fanerógamas marinas, ha sido obtenida por teledetección óptica (Green et al., 1996), a pesar de las limitaciones impuestas por la naturaleza física de las interacciones entre la luz y la columna de agua. De modo general, los detectores pasivos usados en cartografía submarina están diseñados para adaptarse a los niveles de reflectancia de los ambientes terrestres. Los niveles de reflectancia en ambientes acuáticos, se reducen bastante a partir de los primeros metros de profundidad, resultando una señal pobre con relación al ruido, que necesita ser realzada para que se pueda emplearla eficientemente (Louchard et al., 2003).

El agua del mar absorbe la luz de manera exponencial y más intensamente sobre las longitudes de ondas más largas del espectro electromagnético. La profundidad máxima de visualización del fondo por teledetección en aguas transparentes (visibilidad horizontal superior a 30 m), es de unos 25 m para el azul, 15 m para el verde y 5 m para el rojo (Green et al., 2000). Lyzenga (1978, 1981) desarrolló un algoritmo sencillo para compensar el efecto causado en la luz por la columna de agua, con base en esta capacidad de absorción diferenciada. La técnica ha sido ampliamente aplicada para el cartografiado de hábitats sumergidos (Khan et al., 1992; Armstrong, 1993; Mumby et al., 1998). No obstante, el algoritmo es válido apenas en aguas claras, donde la cantidad de materia suspendida o disuelta no cambia a lo largo de la imagen. Esta restricción casi siempre impide su aplicación en la costa brasileña, donde la turbidez es naturalmente elevada y variable. Tassan (1996), propuso una solución para este problema modificando el método de Lyzenga, pero lo dejó demasiado complejo, dificultando sobremanera su aplicación.

La cartografía de arrecifes de coral mediante teledetección no es novedad en Brasil, donde el *Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais* (APACC) fue objeto de relevantes ensayos. Braga y Gherardi (2001) concluyeron que, mediante una composición en color con las bandas 1, 2 y 3 del Landsat TM, se puede elaborar mapas de distribución de los arrecifes costeros, capaces de apoyar la gestión del APACC. Siguiendo esta premisa, Renó et al. (2003) cartografiaron los arrecifes en toda área protegida por interpretación visual de imágenes TM y edición de vectores, tras su realce visual y composición en color. En el mismo año, Rudorff y Guerardi (2003) obtuvieron precisión superior a 80% en la detección de arrecifes intermareales (emergidos durante la toma de la imagen) en el APACC, por medio del procesado y clasificación de imágenes SAR. A pesar de los resultados prometedores para la cartografía de arrecifes intermareales, la detección de arrecifes sumergidos en aguas de turbidez variable ha sido poco investigada en la costa brasileña.

La vanguardia de la investigación sobre el tema se basa en imágenes tomadas por detectores hiperspectrales aerotransportados, capaces de detectar centenares de estrechas bandas, como el *Portable Hyperspectral Imager for Low-Light Spectroscopy* (PHILLS), especialmente diseñado para aplicaciones en aguas costeras, con 124 bandas entre los 3,8 y 10 μm (Sandidge y Holyer, 1998; Louchard, et al., 2003). Las imágenes hiperspectrales suelen ser contrastadas con medidas de irradiancia y radiancia tomadas *in situ*, tanto en la superficie del mar, con aparatos como el *Hyperspectral Tethered Spectral Radiometer Buoy*, con 160 bandas entre 3,95 y 7,95 μm , como próximo al fondo con el *Diver-Operated Benthic Bio-*

Optical Spectrometer, cuya resolución espectral es de 0,3 μm entre 4 y 7 μm , (Dierssen et al., 2003). Entre las técnicas de clasificación de estas imágenes, se propusieron redes neuronales (Sandidge y Holyer, 1998) y algoritmos basados en ecuaciones de transferencia radiactiva, diseñados para atenuar el efecto de la turbidez (Werdell y Roesler, 2003). De manera general, el propósito de estas líneas de investigación es viabilizar el cartografiado de hábitats marinos en aguas con turbidez moderada, a partir de un mínimo de mediciones tomadas *in situ* (Dierssen et al., 2003). Sin embargo, es razonable suponer que el costo de esa tecnología es prohibitivo a los países emergentes. Por eso, una alternativa más asequible sería conveniente, considerando la extensión del litoral brasileño.

Una perspectiva interesante, cuya aplicación en la cartografía submarina merece ser investigada con más detalle, es la fusión de imágenes de alta resolución espacial con imágenes multispectrales de menor resolución espacial. Mediante la fusión de imágenes obtenidas por distintos detectores, se busca un resultado que integre las mejores características de cada uno (Aguena y Mascarenhas, 2006). El proceso analógico de revelación de la película no permite usar las fotografías aéreas en el análisis físico de propiedades ópticas de la superficie terrestre con asignaturas espectrales (Dierssen et al., 2003). Por otro lado, las imágenes multispectrales de menor costo para el usuario, como Landsat TM o CBERS CCD, poseen baja resolución espacial (entre 20 y 30 m), lo que dificulta su interpretación visual en la escala de los arrecifes, principalmente cuando estos están sumergidos.

Una imagen fusionada con éxito, según Pohl y van Genderen (1997), reúne la información espacial de la fotografía aérea y la información espectral de la imagen orbital. En teoría, una imagen así podría ser más fácilmente clasificada, tanto por interpretación visual como por clasificación automática. Por consiguiente, el objetivo de este ensayo es evaluar la aplicación de una técnica de fusión entre fotografías aéreas pancromáticas e imágenes Landsat TM, como método de realce visual de hábitats marinos en las imágenes procesadas. Se espera que los resultados contribuyan al cartografiado de arrecifes de coral en aguas costeras, realizado por medio de interpretación visual y edición vectorial.

2. Localización

El APACC fue creada en 1996 por el gobierno brasileño, con la intención de implantar una política de gestión integrada de los recursos marinos en el litoral nordeste del país. Se trata de un área de protección marina de usos múltiples con 130 Km de costa, a lo largo de 12 municipios de los estados de Alagoas y Pernambuco, entre 8° 30' e 9° 30' de latitud sur. El APACC engloba manglares, playas y la plataforma continental hasta el comienzo del talud, a unas 18 millas náuticas mar a dentro.

El paisaje costero en la región puede ser interpretado como una serie de franjas paralelas a línea de costa. La primera, formada por playas, casi siempre protegidas por arrecifes, alternándose con pequeñas ensenadas. La segunda está formada por unos pocos remanentes de vegetación de restinga en medio de una matriz de plantaciones de cocoteros, alternados con manglares y marismas. La tercera franja está formada por escasos remanentes de bosques naturales en medio de una vasta matriz de plantaciones de caña de azúcar.

El ensayo fue desarrollado en una de las ensenadas que forman parte de este paisaje. La bahía de Tamandaré, situada en el extremo norte del APACC, en el estado de Pernambuco (Lat. 8° 46' S, Long. 35° 06' W).

3. Material y Métodos

Se realizó la fusión con una fotografía aérea pancromática y las bandas 1, 2, 3 y 4 de una imagen TM. La fotografía fue obtenida a las 13:52h (horario local) del 5 de diciembre de 1970, cuando el nivel de la marea estaba a +0,5 m. La imagen orbital fue obtenida a las 9:08h

del 21 de septiembre de 1998, con la marea a +0,9 m. Los cálculos del nivel de la marea se hicieron con el programa de dominio público *JTides* (<http://vps.arachnoid.com/JTides>), a partir de los componentes armónicos válidos para el puerto de Recife (Lat. 8° 3' S, Long. 34° 52' W).

Se restauraron radiométrica y geoméricamente las imágenes antes del proceso de fusión. La imagen TM se procesó por medio de los siguientes pasos: (1) corrección atmosférica con el modelo 6S (Green et al., 2000); (2) elaboración y aplicación de una máscara sobre el continente pelo método NDWI (McFeeters, 1996); (3) suavización del ruido por transformación de *Fourier* y aplicación del filtro *Butterworth* de paso bajo (Jensen, 1996); (4) linealización de la absorción de la luz en el agua del mar, por transformación logarítmica de los valores de brillo; (5) ajuste del contraste por estiramiento del histograma. La fotografía aérea pasó solamente por las tres últimas etapas del proceso, además de la aplicación de una máscara sobre el continente elaborada por edición vectorial. Las imágenes se corrigieron geoméricamente por transformación polinómica de primera orden, a una resolución espacial de 2 m. Las coordenadas geográficas de los puntos de control se obtuvieron *in situ* por GPS. Los errores medios cuadráticos fueron de 2,3 m para la imagen TM y 7,4 m para la foto aérea.

El proceso de fusión empleado se basa en el Análisis de Componentes Principales (ACP), el cual se aplicó mediante los procedimientos a seguir: (1) transformación de las 4 primeras bandas espectrales de la imagen TM en sus componentes principales; (2) sustitución de la primera componente por la fotografía pancromática; y (3) reconstitución de las bandas originales conforme la ecuación: $F_i = c_{1i}Pan + c_{2i}CP2 + c_{3i}CP3 + \dots c_{Ni}CPN$; donde: F_i es el brillo de la banda i reconstituida, Pan es la fotografía aérea pancromática, c_{1i} c_{2i} c_{3i} ... c_{Ni} son los coeficientes de ordenación de cada componente principal para la banda i , CP son las componentes principales (imágenes), N es el número de componentes extraídas (Genderen y Pohl, 1994).

La verificación en campo se realizó en el año de 2001 por medio de: (1) buceos autónomos a lo largo de transectos de 200 m demarcados por GPS; y (2) buceos libres en puntos demarcados por GPS. Se buscó identificar en la imagen fusionada manchas en función del color, textura, posición y contexto (Sheppard et al., 1995). Éstas, con base en las informaciones obtenidas en campo, fueron visualmente clasificadas como arrecifes emergidos o sumergidos y transformadas en formato vectorial sobre la pantalla del computador.

4. Resultados y Discusión

El resultado del realce y fusión de las imágenes mejoró considerablemente la visualización de las estructuras no detectadas en la imagen TM original, permitiendo el cartografiado de los arrecifes hasta una profundidad aproximada de 6 m (**Figura 1**).

La superficie cartografiada fue de 34,9 ha para los arrecifes intermareales y 144 ha para los inframareales. Estos resultados indican una proporción poco superior a 1:4 entre arrecifes emergidos y sumergidos. Renó et al. (2003), en la cartografía realizada para toda el APACC, llegaron a una proporción de casi 7:1 entre arrecifes emergidos y sumergidos. La discrepancia entre estas proporciones revela que el método de cartografiado de los arrecifes, basado únicamente en imágenes orbitales de media resolución espacial, subestima la presencia de los arrecifes inframareales desde los primeros metros de profundidad.

Con relación al uso de la cartografía para el apoyo a gestión de los hábitats costeros, es importante considerar que en aguas turbias, como las de Tamandaré, los corales suelen estar restringidos a los primeros 10 m de profundidad (4 m en casos extremos), llegando a los 40 m en aguas oceánicas (Fabricius, 2005). En Brasil, los topos de arrecifes son áreas que se quedarán expuestas en la bajamar con la regresión marina registrada durante el Holoceno para

la costa brasileña (Leão y Kikuchi, 2005). La presencia de colonias de corales en estas áreas está restringida a las piscinas de marea. Así, una cartografía precisa de los arrecifes en los primeros 10 m de profundidad es esencial para el éxito de la gestión de la biodiversidad marina en estos hábitats.

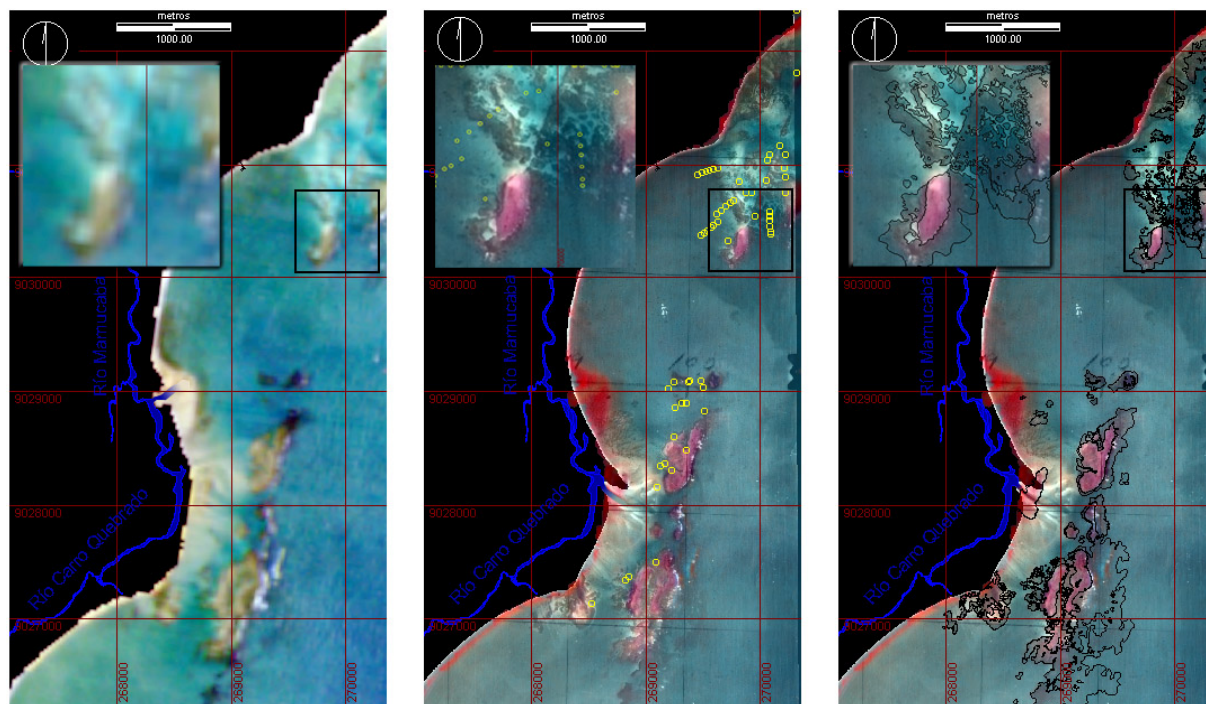


Figura 1: A la izquierda una composición en color (bandas 1, 2 y 3) de la imagen TM restaurada. En el centro una composición en color (bandas 1, 2 y 3) de la imagen TM fusionada con la fotografía aérea. Los círculos amarillos demarcan los puntos de buceo realizados como verificación de campo. A la derecha los arrecifes vectorizados por interpretación visual sobre la imagen fusionada e informaciones levantadas en las inmersiones. La migración del delta del río Mamucaba queda evidenciada en el resultado de la fusión (WGS84; UTM, Huso 25).

Otro resultado importante es la posibilidad de materializarse en una misma imagen los cambios observables en el paisaje durante el periodo de tiempo transcurrido entre la toma de las imágenes fusionadas. Algunas alteraciones, como el desplazamiento en más de 100 m hacía norte del delta del río Mamucaba, ocurrido durante los 28 años pasados entre la fotografía aérea y la imagen TM, se han quedado evidentes.

No obstante, hay mudanzas más sutiles, reveladas por las informaciones obtenidas en campo y cuidadosa observación del resultado de la fusión. En el sector norte de la bahía (**Figura 2**), se verificó en los transectos realizados por buceo autónomo, que algunos arrecifes perfectamente visibles en 1970, se encuentran actualmente soterrados por fango. En el sector sur de la bahía (**Figura 2**), una pradera de fanerógamas marinas y pequeños arrecifes también han sido soterrados durante la migración del delta del Mamucaba.

Hay disponible un gran *stock* de fotografías aéreas de zonas costeras en todo el mundo, constituyendo registros históricos únicos de la evolución reciente del paisaje (Sheppard et al., 1995). El uso potencial de la fusión de imágenes en la visualización de cambios a escala del paisaje, abre un abanico de nuevas posibilidades para aplicación de estas técnicas en la gestión y seguimiento AMPs, incluyendo la identificación y delimitación de impactos

positivos o negativos causados por el manejo, uso público, factores externos o cambios climáticos.

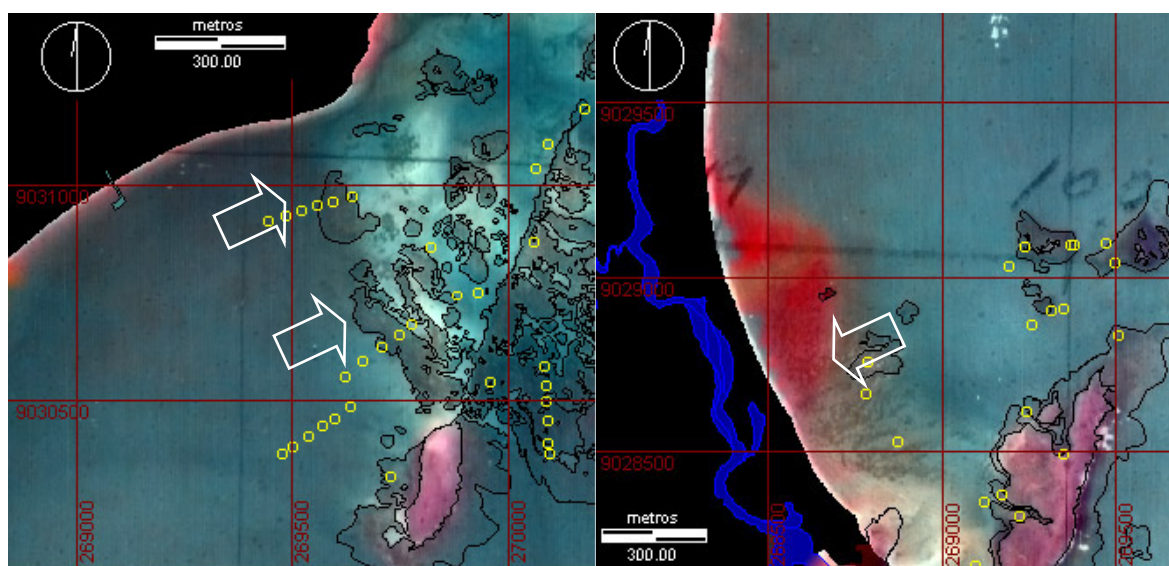


Figura 2: Detalles de la imagen fusionada evidenciando alteraciones en el paisaje entre 1970 y 1998. Las flechas apuntan hábitats existentes en 1970 y soterrados en 2001: arrecifes en el sector norte de la bahía (izquierda); fanerógamas y arrecifes en el sector sur (derecha) (WGS84; UTM, Huso 25).

5. Conclusión

El método propuesto es efectivo en el cartografiado de ambientes de arrecife en aguas someras con turbidez variable, donde la aplicación de técnicas de detección hidroacústica no es posible, debido al bajo calado y al embate de las olas. La posibilidad de visualizar cambios en el paisaje costero mediante la fusión de imágenes tomadas en diferentes épocas, posee un gran potencial de aplicación en la gestión y seguimiento de AMPs.

Agradecimientos

La consecución de este ensayo fue posible por el apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), Instituto Recifes Costeros, CEPENE/IBAMA y Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Referencias

- Aguena, M.L.S., Mascarenhas, N.D.A. Multispectral image data fusion using POCS and super-resolution. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 102, n. 2, p. 178-187, 2006.
- Armstrong R.A. Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n.3, p. 621-627, 1993.
- Braga, C.Z.F., Gherardi, D.F.M. Mapeamento de recifes costeiros utilizando imagens orbitais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBRs), 10., 2001 Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos, p. 759-767, Sessão Técnica Oral. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.19.12.05/doc/0759.767.267.pdf>>. Acesso em 30 de out. 2006.
- Clark J.R. **Coastal zone handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1996. 720 p.
- Diersen H.M., Ziemmerma, C., Leathers R.A., Downes T.V., Davis C.O. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne imagery. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 1 (part 2), p. 444-455. 2003.

- Fabricius, K.E. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, n. 2. p. 119-235, 2005.
- Green E.P., Mumby P.J., Edwards A.J., Clark C.D. **Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management**. Coastal Management Sourcebooks 3. Paris, UNESCO, 2000. 316 p.
- Green E.P., Mumby P.J., Edwards A.J., Clark, C.D. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. **Coastal Management**, v. 24, n. 1, p. 1-40. 1996.
- Jensen J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1996. 316 p.
- Khan M.A., Fadlallah, Y.H., Al-Hinai K.G. Thematic mapping of subtidal coastal habitats in the western Arabian Gulf using Landsat TM data - Abu Ali Bay, Saudi Arabia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 605-614, 1992.
- Laborel J. **Les peuplements de Madréporaires de côtes tropicales du Brésil**. 1967. 313p. Tese (Doctorat Es-Sciences Naturelles) - Faculté des Sciences de L'Université D'Aix-Marseille. Marseille. 1967.
- Leão, Z.M.A.N., Kikuchi, R.K.P. A relic coral threatened by global changes and human activities, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 51, n. 5-7, 599-611.
- Louchard M.E., Reid R.P., Stephens F.C. Davis, C.O. Leathers R.A., Downes T.V. Optical remote sensing of benthic habitats and bathymetry in coastal environments at Lee Stocking Islands, Bahamas: a comparative spectral classification approach. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 1 (part 2), p. 511-521, 2003.
- Lyzenga D.R. Passive remote sense techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, v. 17, n. 3, p. 379-383, 1978.
- Lyzenga, D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 71-82.
- McFeeters S.K. The use of the normalized Water Index (NDWI) in delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425 -1432, 1996.
- Mumby P.J., Clark C.D., Green E.P., Edwards A.J. Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 1, p. 203-210, 1998.
- Renó, V.F., Gherardi, D.F.M, Braga, C.Z.F. Utilização de imagens TM Landsat-5 para o mapeamento dos recifes da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (AL/PE). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBRS), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1637-1640. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.16.15.48.09/doc/13_269.pdf>.
- Rudorff, F.M., Guerardi, D.F.M. Mapeamento de recifes na APA Costa dos Corais, PE/AL através de imagens SAR do RADARSAT-1. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBRS), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1641-1647. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.18.17.15/doc/13_413.pdf>. Acesso em 30 de out. 2006.
- Sala E., Aburto-Oropeza O., Paredes G., Parra I., Barrera J.C., Dayton P.K. A general model for designing networks of marine reserves. **Science** v. 298, p. 1991-1993, 2002.
- Salm R.V., Clark, J. **Marine and coastal protected areas. a guide for planners and managers**. Gland: IUCN, 2000. 371 p.
- Sandidge J.C., Holyer R.J. Coastal bathymetry from hyperspectral observation of water radiance. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 341-352, 1998.
- Sheppard C.R.C., Matheson K., Bythell P., Murphy P., Blair Miers C., Blake B. Habitat mapping in the Caribbean for management and conservation: use and assessment of aerial photography. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 5, n. 4, p. 277-298, 1995
- Tassan, S. Modified Lyzenga's method for macroalgae detection in water with non-uniform composition. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 8, p. 1601-1607, 1996.
- Testa V., Bosence D.W.J. Physical and biological controls on the formation of carbonate and siliciclastic bedforms on the north-east Brazilian shelf. **Sedimentology**, v. 46, n. 2, p. 279-301, 1999.
- Werdell P.J. y Roesler C.S. Remote assessment of benthic substrate composition in shallow waters using multispectral reflectance. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 1 (part 2), p. 557-567. 2003.