

Um modelo numérico para a detecção da pluma sedimentar na Costa do Cacau, Ilhéus - Bahia, Brasil, em uma imagem Landsat TM.

Cezar Augusto Teixeira Falcão Filho ¹
Gil Marcelo Reuss Strenzel ¹
Francisco Carlos Fernandes de Paula ¹

¹ Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC
Endereço: BR-415, Rodovia Ilhéus/Itabuna, km 16, Ilhéus - Bahia - Brasil
CEP: 45662-000
cezarfalcaof@gmail.com
gmreuss@gmail.com
depaula@uesc.br

Abstract. An empirical model calibrated to map sedimentary plums of the coastal zone located on the region known as the “Cocoa Coast”, southern Bahia, in the city of Ilhéus. The Model was developed by linear regression between the values of TSS (Total Suspended Solids) collected in 8 points *in situ* in Case 2 waters, and physical data of reflectance centralized at specific wavelength of the band λ_3 (0,63 - 0,69 μm), gathered by the gravimetric method and remote sensing techniques applied to the Ocean Color, respectively. The oceanographic campaign for collection of surface water was performed on the same day of the passage of satellite Landsat 5. TM image of the 215th orbit of the day 08-25-09 was acquired with favorable conditions of visibility. The R^2 (0.75) showed a positive and significant relationship between the two variables. The Analysis of residues showed a low variation of TSS values generated by the model in points 1, 2, 3 e 8. TSS values followed the expected trend for the distribution of the concentration of particulate matter in continental shelf. We conclude that suspension sediment mapping, through the construction of an empirical model, is a viable option from a practical point of view, if data input complying with the specific site condition of the site is provided.

Palavras-chave: remote sensing, ocean color, mapping, TSS, sensoriamento remoto, cor do oceano, mapeamento, TSS.

1. Introdução

A cor do oceano está diretamente ligada às suas propriedades ópticas inerentes (absorção e espalhamento). Estas propriedades variam conforme a concentração, natureza e tipos de materiais dissolvidos e particulados presentes na água (Moller et al. 2008). Estes materiais, denominados de Componentes Ópticamente Ativos (COA) influenciam a propriedades ópticas dos corpos hídricos (Kirk 1983). A interação entre a luz solar e a água depende, de maneira específica, das proporções em que estes materiais estão presentes na mistura. A presença dos COA na coluna d'água é responsável pelas modificações em sua cor, pois estes absorvem ou espalham seletivamente a luz incidente. Isto torna a cor do oceano uma fonte de informações referentes às suas propriedades químicas, físicas e biológicas. (Kampel e Novo. 2005).

A partir da regressão linear entre dados de reflectância TM e do parâmetro TSS (Total de Sólidos em Suspensão) foi possível criar um algoritmo empírico regional capaz de simular a distribuição de material particulado em suspensão em águas costeiras do Caso 2. Águas ricas em sedimento suspenso são consideradas águas do Caso 2 (Morel e Prieur. 1977; Gordon e Morel 1983; Tassan 1998). Essas partículas possuem a capacidade de inibir ou enriquecer os ecossistemas costeiros, fixar ou adsorver poluentes de metal, produtos químicos ou de origem orgânica além da elevação da turbidez, da sedimentação e a diminuição de oxigênio dissolvido na água.

A dinâmica costeira nessa região costeira é fortemente influenciada pela variabilidade sazonal da Corrente Sul Equatorial. Quando alcança a margem continental brasileira, a corrente diverge e forma duas novas correntes: a Corrente Norte do Brasil (NBC – *North Brazil Current*) (Silveira et al. 1994) que flui em direção Norte e a Corrente do Brasil (BC –

Brazil Current), cujo fluxo acompanha plataforma continental brasileira em direção Sul (Peterson e Stramma 1991). Segundo Rodrigues et al. (2007), a latitude da bifurcação varia com a profundidade, sendo entre $\pm 10^\circ$ S e $\pm 14^\circ$ S próximo a superfície. A Margem da plataforma do município de Ilhéus é localizada nesta zona de divergência, tornando-se sujeita a variabilidade na dinâmica de macro e meso-escala, já que as reduzidas dimensões da plataforma (15km de largura) a tornam adjacente ao oceano aberto. Em função disso existe uma variação sazonal do transporte (Rezende 2010). Na camada superficial, há um sinal bimodal sazonal ocorrendo uma alternância do domínio da circulação, com a Sub-Corrente Norte do Brasil (NBUC – North Brazil Under Current) fluindo para norte e dominando nos meses de abril a setembro e a Corrente do Brasil (BC) dominando o transporte de outubro a março (Rezende, 2010).

A partir desse modelo regional será possível processar uma série de imagens TM disponíveis na base de dados do DGI/INPE, para essa mesma região iniciando em 1985, e com imagens MSS iniciando em 1976. Com isso será possível obter informações sobre o clima oceanográfico na zona costeira, dispersão de sedimentos (transporte e destino) e seu balanço no ambiente costeiro.

2. Materiais e Métodos

2.1. Campanha Oceanográfica

A data da coleta de água para obtenção dos dados de TSS *in situ* foi definida utilizando-se inicialmente o calendário da órbita 215 com as previsões de passagem do satélite Landsat 5. Outro critério utilizado foi a previsão de cobertura de nuvens para o dia da passagem do satélite, efetuada pelo CEPTEC-INPE (<http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/>). Por meio desse procedimento, foi possível realizar a campanha para a coleta de água no dia 25/08/2009, quando houve a passagem do Landsat 5, pela órbita 215 às 9:26:42h no horário local.

2.1.1. Coleta de Água

Foram coletados um total de 8 amostras de água superficial (Figura 3). No dia da coleta, a baixa mar ocorreu às 00:00h (0,07 m) e às 12:30h (0,32 m), enquanto a preamar foi às 06:20 h (1,75 m) e às 18:40 h (1,59 m), caracterizando uma maré de quadratura.

Foram coletadas 3 amostras (1,2,e 3) na zona costeira adjacente ao rio Almada e 2 amostras próximas ao porto. Em seguida foram coletadas mais 3 amostras (6,7 e 8) na zona costeira influenciada pela descarga do Rio Cachoeira (Figura 1), cada amostra continha 1.5L. Foram utilizados uma garrafa de Van Dorn para coletar as amostras superficiais de água do mar e um receptor de GPS de navegação para demarcar as coordenadas dos pontos amostrais.

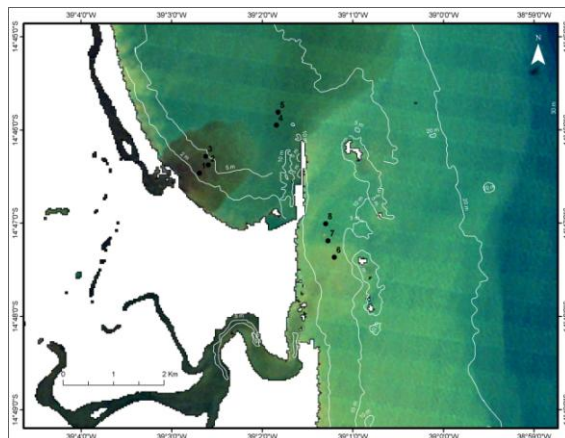


Figura 1: Localização dos pontos amostrais com sua respectiva ordem de coleta.

2.1.2. Determinação do Total de Sólidos em Suspensão (TSS)

A análise do TSS foi efetuada pelo Método gravimétrico. As amostras foram filtradas em filtros Macherey-Nagel (Rundfilter) de 47mm, com porosidade 1,2 μ m e capacidade de retenção de partículas de diâmetro superior a 0,6 μ m. Os filtros foram previamente calcinados a 450°C por 4 horas e mantidos em dessecador até o momento de pesagem prévia. Após filtragem de todo o conteúdo os filtros foram secos em estufa a 60°C por 4 horas e novamente pesados em uma balança analítica. Com a diferença do peso final e do peso prévio dos filtros foram obtidos os valores de TSS.

2.2. Sensoriamento Remoto

Todo processamento digital das imagens foi realizado no *software* Idrisi Andes, exceto a correção atmosférica.

2.2.1. Aquisição e Seleção da Imagem

A imagem TM empregada na construção do modelo foi adquirida gratuitamente através da página de Divisão de Geração de Imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>.

2.2.2. Processamento e Correção Atmosférica

As contribuições atmosféricas devem ser corrigidas, pois na faixa do visível, grande parte da radiação coletada pelo satélite sobre cenas oceânicas é luz espalhada na atmosfera (Lorenzetti et al. 2007). A correção radiométrica envolveu três passos: 1) conversão dos valores digitais para radiância espectral no sensor (calibração do sensor); 2) conversão da radiância espectral para reflectância aparente; e 3) remoção dos efeitos da atmosfera devido à absorção e dispersão da luz (correção atmosférica). As 3 etapas do processo foram realizadas automaticamente através do módulo ATCOR do *software* Erdas Imagine 9.1[®] a partir de dados referentes ao sensor e às condições atmosféricas no momento da aquisição da imagem.

2.2.3. Correção Geométrica das Imagens

O georreferenciamento da imagem foi efetuado de forma interativa através de pontos conhecidos ou pontos controle em uma base cartográfica e na imagem. A relação entre os dois sistemas de coordenadas (mapa e imagem) foi calculada por equações polinomiais através do módulo “*Resample*” do *Software* Idrisi 15.0 *The Andes Edition*.

2.2.4. Criação de uma Máscara Booleana

Os dados de reflectância da superfície marinha foram isolados do continente por meio de uma máscara booleana. Segundo Reuss-Strenzel (2004), os níveis de reflectância sobre o mar são muito inferiores aos níveis de reflectância sobre a terra, apresentando um padrão de reflectância bi-modal. Este padrão prejudica a visualização clara da água do mar e do continente ao mesmo tempo. Para minimizar este efeito optou-se pela eliminação do continente, atribuindo a esse um valor igual a zero.

A máscara foi elaborada através do coeficiente normalizado entre as bandas λ_2 e λ_4 . O coeficiente foi proposto por McFeeters (1996) que o denominou de *Normalized Difference Water Index (NDWI)* (Equação 1). Seu resultado é uma imagem cujos “pixels” oscilam entre -1 a 1 (-1 a 0 para a terra e de 0 a 1 para a água). Isso permite que a imagem seja reclassificada gerando uma nova imagem na qual os valores negativos são transformados em 0 e valores positivos em 1.

$$NDWI = (\lambda_2 - \lambda_4) / (\lambda_2 + \lambda_4) \quad \text{Equação 1.}$$

Onde λ_2 e λ_4 representam as bandas 2 e 4 do sensor TM.

As nuvens também provocam um padrão de reflectância bi-modal. Para a eliminação do sinal emitido pelas nuvens utilizou-se a banda λ_4 , (0.78 – 0.90 μm) Nesse comprimento de onda os valores de reflectância são baixos, pois absorvem muita energia tornando os corpos d'água escuros. Com isso o contraste entre a superfície marinha e as nuvens torna-se alto.

A banda λ_4 da imagem foi multiplicada pela máscara booleana e em seguida foi reclassificada com valor 1 para a reflectância da água, que nesta imagem variou de 0 a 6%, e 0 para a reflectância das nuvens que variou de 6.25 a 63.75%. O resultado é uma nova máscara booleana, com valor 0 para as nuvens e 1 para a superfície marinha e continente. A partir da multiplicação entre as duas máscaras (continente e nuvem), foi elaborada uma única máscara, apenas com a informação espectral da superfície marinha (Figura 2).

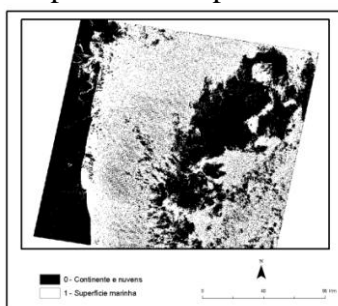


Figura 12: Máscara booleana para continente e nuvem.

2.2.5. Escolha do Comprimento de Onda λ

Alguns parâmetros definiram a escolha da banda λ_3 para elaboração do modelo, segundo o método de calibração direta (Acker et al. 2005). A banda λ_3 é sensível à reflectância na região do espectro eletromagnético compreendido entre 0,63 - 0,69 μm . Este intervalo capta a luz refletida por pigmentos vermelhos, característicos das partículas inorgânicas em suspensão típicas de águas do Caso 2 (Nichol 1993). Além de apresentar uma menor penetração na coluna d'água, até 5m (Green et al. 2000) em águas com pouca concentração de COA. Porém, em águas do Caso 2, o efeito de reflexão do fundo é reduzido e pode ser negligenciado (Tassan 1998).

2.2.6. Elaboração de um SIG

Um SIG foi elaborado incluindo a banda λ_3 (reflectância), e os pontos com os respectivos valores de TSS. Isso possibilitou a visualização dos pontos de coleta, seus valores de TSS e sua relação espacial com a reflectância marinha na banda λ_3 (Tabela 1). O ponto mais extremo (ponto 9) foi adicionado ao SIG por representar uma água tipicamente marinha e limpa, com baixa concentração de COA. Esse valor, segundo Tassan (1997), é necessário para calibração do modelo e um melhor ajuste da reta da regressão. O valor de TSS típico dessa água foi adquirido a partir de dados pretéritos do Laboratório de Oceanografia Química da Universidade Estadual de Santa Cruz, sendo igual a 0.025mg/l. O ponto 9 está localizado em uma água tipicamente oceânica com baixa concentração de COA.

2.2.7. Regressão entre Reflectância e TSS

Para extrair os dados de reflectância da banda λ_3 coincidentes com os pontos amostrais, foram criados polígonos com a dimensão de 6x6 pixels, através da rotina “*buffer*”, de maneira a estabelecer um valor médio de reflectância para o local, minimizando distorções causadas pelo ruído na imagem. O resultado é um arquivo “*vetorial*” cobrindo uma área de 8100 m² da superfície marinha para cada ponto.

Uma nova imagem foi criada através do módulo “*INITIAL*” com valores constantes e com os parâmetros espaciais copiados da banda λ_3 com formato “*real*”, e o valor inicial zero.

Em seguida o arquivo vetorial foi transformado no formato matricial através do módulo “*RASTERVECTOR*” utilizando a imagem de valores constantes. Com isso a imagem inicializada adquiriu a mesma localização dos pixels correspondentes à localização de cada ponto. Com esse arquivo foi possível extrair os valores médios de reflectância nas mesmas localizações na banda λ_3 usando o módulo “*EXTRACT*”. A imagem inicializada foi especificada como o recurso de definição e a banda λ_3 como a imagem a ser processada. Em “*Summary type*” foi escolhido o valor médio “*Avarage*” e no arquivo de saída (*output*) foi escolhido o formato AVL - *Attribute Values File* (arquivo de valores). O arquivo de valores contendo os dados de reflectância foi editado excluindo-se a primeira linha, já que o arquivo incluiu a média da reflectância para as áreas não amostradas.

Os dados de TSS coletados in situ também foram convertidos para o formato AVL. Com os dados de reflectância e TSS no formato de texto, aplicou-se o logaritmo natural a ambos e em seguida foi feita a regressão linear por meio do módulo “*REGRESS*”. O logaritmo natural da reflectância foi a variável independente e o logaritmo natural de TSS foi a variável dependente.

2.3. Análise de Resíduos

Foi calculada a diferença entre o valor observado de y (no caso o parâmetro TSS) e o que foi previsto pelo modelo de regressão (Equação 2). Sendo y corresponde aos valores reais de TSS e \hat{y} corresponde aos valores gerados pela regressão.

$$r = y - \hat{y} \quad \text{Equação 2.}$$

Tabela 1: Valores de TSS e respectivos valores de Reflectância em números absolutos e em logaritmo natural para cada ponto amostral e sua respectiva hora de coleta.

Pontos	TSS (mg/l)	LN (TSS)	Reflectância (%)	LN (reflectância)	Hora
1	33	3.49	1.78	1.02	08:40
2	32	3.47	2.03	1.1	09:00
3	38.7	3.65	1.96	1.08	09:08
4	42.5	3.75	0.99	0.68	09:25
5	41.8	3.73	1.14	0.76	09:33
6	33.7	3.51	4	1.61	10:55
7	29.7	3.39	2.7	1.3	11:02
8	32.8	3.49	2	1.09	11:05
9	0.025	0	0	0	

3. Resultados e Discussão

A regressão examina e explora as relações físicas e espaciais entre $R(\lambda)$ e o parâmetro TSS (Figura 4), gerando o modelo empírico regional abaixo (Equação 3).

$$\text{Ln(TSS)} = 1.258760 + 1.980676 * (\text{Ln(Banda } 3\lambda) + 1) \quad \text{Equação 3.}$$

Onde 1.258760 é o intercepto no eixo Y e 1.980676 é o coeficiente angular da reta. O R^2 mostrou uma relação positiva e significativa de 0.75 entre as duas variáveis (Figura 3). A análise de resíduos evidenciou um ótimo ajuste dos valores de TSS gerados na imagem localizados nos pontos 1,2,3 e 8, apresentando uma baixa variação no valor de TSS (Tabela 2). Os pontos 4 e 5 apresentaram os maiores valores de TSS *in situ* e a menor reflectância entre os 8 pontos. É provável que diferenças na composição e concentração de COA nos pontos 4 e 5 apresentem uma alta de algum material não detectado no comprimento de onda

centralizado na banda λ_3 . Um aspecto importante foi a logística disponível aplicada ao esforço de campo que tornou muito difícil a aquisição de um número suficiente de medidas de TSS próximas ao momento da passagem do sensor (Chen et al. 1991) (Tabela 1).

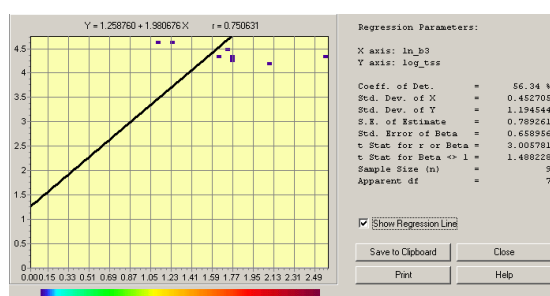


Figura 3: Regressão entre os valores da reflectância (eixo x) com os respectivos valores de TSS *in situ* (eixo Y), ambos em escala Logaritmo natural.

Outra fonte de erro está relacionada a origem do material detectado, o tamanho da partícula, sua concentração e proporção, já que esses parâmetros influenciam na reflectância e conseqüentemente na calibração do modelo, principalmente se há uma extensa área costeira e aporte de água fluvial, como é o caso da área de estudo (HILTON 1991). Chen et al. (1991) afirmam que a relação entre S e $R(\lambda)$ depende das propriedades refletivas de cada tipo de sedimento e que, muitas vezes, a variação do tamanho do sedimento pode provocar respostas que comprometam a estimativa de S a partir de seu brilho. Isso ocorre porque o número de partículas por determinado volume varia conforme for seu tamanho médio predominante. Além do mais o modelo foi criado a partir de valores de TSS, sem considerar a proporção real dos valores de cada COA, ou ainda o tipo e granulometria do sedimento.

Tabela 2: Valores de TSS e seus respectivos resíduos.

Pontos	TSS (situ)	TSS (img)	Resíduo (img)
1	33	28	5
2	32	37	-5
3	38	47	-8
4	42	9	34
5	41	14	28
6	33	149	-115
7	29	47	-17
8	32	37	-4
9	0.025	1.2	-1.2

A aplicação desse modelo empírico sobre a banda λ_3 da imagem TM gerou um mapa com os valores físicos de reflectância convertidos em valores em valores físicos de TSS (Figura 4). As maiores concentrações encontram-se localizadas até a profundidade de 5m, e distribuem-se ao sul da imagem com valores superiores a 400mg/l. Essa maior concentração pode ser explicada através de dois mecanismos de transporte, a célula de circulação litorânea e corrente longitudinal, ambas resultado da incidência de ondas do sistema sul-sudeste (*swell*) no fundo raso (Inman & Brush 1973; Martin et al. 1998). Este sistema de correntes induzido por ondas do sistema sul-sudeste, possui significativa importância na deriva litorânea e podem introduzir quantidades significativas de sedimentos nas planícies costeiras aqui consideradas (Martin et al. 1983). Nos locais com profundidades de 5m até 20m as concentrações de sedimento variaram de 230mg/l para 34mg/l no sul da imagem até as imediações do porto. A concentração de sedimento suspenso diminuiu em função do aumento da profundidade, pois

as ondas tendem a conter boa parte do sedimento suspenso contra a praia em lugares rasos (Inman & Frautschy 1966). Outro aspecto evidente na imagem é o transporte de sedimento sentido norte, realizado pelo vento sudeste, tanto quanto pela deriva litorânea de sentido norte potencializado pela maré vazante e pela Sub-Corrente Norte do Brasil, freqüente no mês em que a imagem foi gerada.

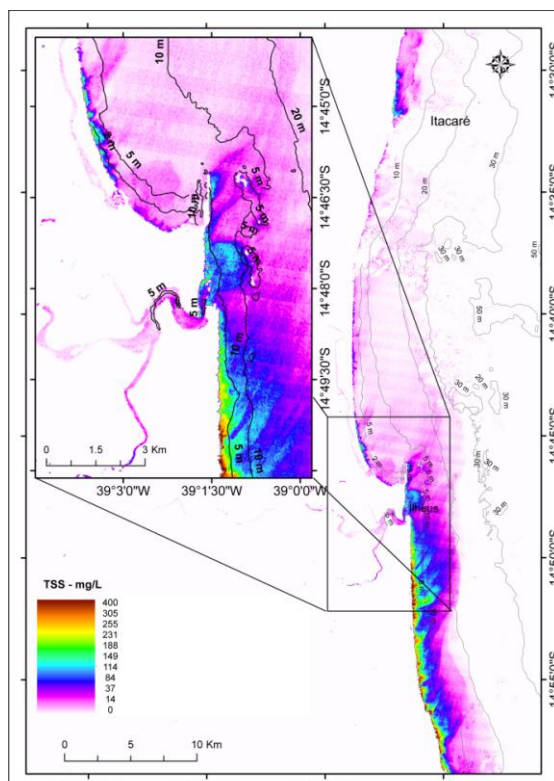


Figura 4: Mapa de TSS superficial em 2 escalas elaborado a partir da aplicação do modelo empírico proposto.

4. Conclusão

O mapeamento do sedimento em suspensão, por meio do modelo empírico mostrou-se viável do ponto de vista prático desde que haja a entrada de dados que corresponda a situação específica do local.

Agradecimentos: Agradecemos o apoio financeiro ao *INCT – TMC Ocean*” (Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia de Transferência de materiais Continente Oceano).

Referências Bibliográficas

Acker J. Ouillon S. Gould R. Arnone R. Measuring marine suspended sediment concentrations from space: History and Potential. In: 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Halifax, NS, Canada, May 17-19, 2005.

Chen, Z. Hanson J. D. Curran P. J. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus 1268 data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 12, no. 1. p. 215 – 222, 1991.

Gordon, H. R. Morel, A. Remote assessment of ocean colour for interpretation of satellite visible imagery: a review. In: *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, edited by M. Bowman. Berlin, p 1 – 114, 1983.

Green E.P, Mumby, P.J., Edwards, A.J.; Clark, C.D. *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Paris: Coastal Management Sourcebooks UNESCO, 316 p, 2000.

Hilton J. C. Application of eigenvector analysis to remote sensing of coastal water quality. *Int. J. of Remote Sensing*. vol. 12. N°. 7. p. 1441 – 1460, 1991.

Inman D. L. & Frautschy J. D. in: *Coastal Engineering (Santa Barbara Specialty Conference): American Society of Civil Engineers*, New York, p. 511-536, 1966.

Inman D. L. & Brush B. M. The coastal challenge. *Science*, vol. 1816, p. 20-22, 1973.

Kampel, M. Novo, E. M. L. M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: *Oceanografia por Satélites*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 179-196, 2005.

Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, p. 436, 1983.

Lorenzetti, J. A. Negri E. Knopers B. Medeiros P. R. P. Uso de imagens LANDSAT como subsidio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento*, Florianópolis. Anais Florianópolis: INPE, p. 3429-3436, 2007.

Martin L. et al. O Papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas as desembocaduras dos Rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista brasileira de Geociências*. São Paulo. Vol 13(2), p. 98 – 105, 1983.

Martin L, Dominguez J. M. L. Climatic control of coastal erosion during a sea-level fall episode. *An Acad. Brasil. Ciênc.* p. 249–266, 1998.

McFeeters, S. K. The Use of the Normalized Water Index (NDWI) in delimitation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. p. 1425 – 1432, 1996.

Moller, G. S. F. Novo, E. M. L. M. Kampel, M. Aplicação da técnica de modelo linear de mistura espectral para o mapeamento da pluma do Rio Amazonas. *Geografia*, Rio Claro, v.33, n.2, p. 331-349 2008.

Morel, A. Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology Oceanography*, v. 22, p. 709-722, 1977.

Nichol J. E. Remote Sensing of Water Quality in the Singapore-Johor-Riau Growth Triangle. *Remote Sensing of Environment*. p. 139-148, 1993.

Peterson R. G. and Stramma L. Upper - level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*. vol. 26. p. 1 – 73, 1991.

Rezende, L. F. Dinâmica em múltiplas escalas na margem continental leste brasileira. 2010. 146 f. Tese de doutorado. Universidade de Aveiro. Departamento de física. 2010.

Rodrigues, R. R., Rothstein, L. M., Wimbush, M. Seasonal variability of the South Equatorial Current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. *J.Phys. Oceanogr.* 37, 16 - 30. p. 1 – 50, 2007.

Silveira, I. C. A., Miranda, L. B., Brown, W. S. On the origin of the North Brazil Current. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 99. N°. 11. p. 2205 – 22512, 1994.

Strenzel, G. M. R. Caracterização da paisagem submersa costeira para a gestão de áreas marinhas protegidas. 2004. 185 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Departamento de Biologia, Universidade de Las Palmas de Gran Canária, 2004.

Tassan S. A numerical model for the detection of sediment concentration in stratified river plumes using Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 18, no. 12. p. 2699 – 2705, 1997

Tassan S. A procedure to determine the particulate content of shallow water from Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 19, no. 3. p. 557 – 562, 1998.