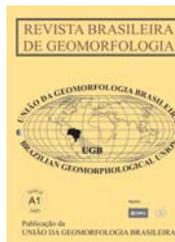




www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, n° 3 (2013)



IMAGENS DO AQUA-MODIS APLICADAS À ESTIMATIVA E MONITORAMENTO DOS VALORES DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

AQUA-MODIS IMAGES APPLIED TO ESTIMATION AND MONITORING OF SUSPENDED PARTICULATE MATTER ON THE CONTINENTAL SHELF OF RIO GRANDE DO NORTE, NORTHEAST BRAZIL

Anderson Targino da Silva Ferreira

Laboratório de Geoprocessamento - GEOPRO, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário Lagoa Nova – CEP 59078-970 – Natal, RN – Brasil – Caixa-Postal: 1584; Telefone: (84) 3213212; Fax: (84) 32153807 (234). E-mail: andersontsferreira@gmail.com

Venerando Eustáquio Amaro

Centro de Ciências Exatas e da Terra. Campus Universitário Lagoa Nova – CEP 59078-970 – Natal, RN - Brasil - Caixa-Postal: 1596. E-mail: amaro@geologia.ufrn.br

Marcelo Soares Teles Santos

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC). Rua Rui Barbosa, 710 Centro – CEP 44380-000 – Cruz das Almas, BA – Brasil; Telefone: (075) 36212350. E-mail: mstsantos@yahoo.com.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
21/08/2013

Data de Aprovação:
17/10/2013

Palavras-chave:

AQUA-MODIS; material particulado em suspensão; principais componentes.

Keywords:

AQUA-MODIS; total suspended matter; principal components.

Resumo

Este trabalho trata de medições das concentrações de Material Particulado em Suspensão (MPS) na plataforma continental do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, entre os anos de 2003 a 2010, baseado em dados in situ comparados em tempo quase síncrono com imagens do sensor AQUA-MODIS. Após as correções geométrica e atmosférica aplicadas às imagens AQUA-MODIS foi encontrado um coeficiente de determinação superior a 75% entre 99 amostras in situ e as bandas de reflectância 645 nm e 667 nm das imagens de satélite. As amostras foram validadas com 7 estações in situ independentes da amostragem total que exibiram desvio padrão médio de 0,35 mg/L com as imagens calibradas. A partir desse resultado, as imagens das concentrações de MPS foram geradas para toda a extensão da plataforma continental do RN (setores Oriental e Setentrional) para análise da distribuição geográfica e variação temporal do MPS. Mapas sinópticos com as séries climatológicas do modelo estimado de MPS para os anos de 2009 a 2012 mostraram as mudanças geográficas e sazonais com a influência dos fenômenos climáticos

globais El Niño e La Niña. As Análises por Principais Componentes (PC) aplicadas às imagens apontaram de modo qualitativo as regiões com maior ou menor grau de variância e disponibilidade de MPS, assim como a correlação com trechos de hotspots de erosão costeira ao longo do litoral do RN.

Abstract

This work deals with measurements of the concentrations of Total Suspended Particulate Matter (TSM) on the continental shelf of Rio Grande do Norte (RN), northeast Brazil, from year 2003 to 2010, based on in situ data samples compared with almost synchronous AQUA-MODIS sensor images. **After** the geometric and **atmospheric** correction were performed on the AQUA-MODIS **images it** was found a coefficient of determination greater than 75% between 99 in situ samples and reflectance bands 645nm and 667 nm from satellite images. The samples were validated with 7 in situ stations independent of total sampling and exhibited mean standard deviation of 0.35 mg/L through the calibrated images. From this result, the images of concentrations of TSM were generated for the full extent of the continental shelf of RN (Eastern and northern sectors) for analysis of the geographical distribution and temporal variation of TSM. Synoptic maps with climatological estimated series of MPS models for year 2009 to 2012 showed geographical and seasonal changes due to El Niño and La Niña global climate phenomena influence. The analysis by principal components (PC) on images showed qualitatively regions with a greater or lesser degree of variance and availability of TSM, as well as the correlation with segments marked with erosional hotspots along the coastline of RN.

Introdução

A qualidade das águas costeiras e plataformais são altamente influenciadas pelas flutuações climáticas sazonais, em escalas regionais e globais, e pelas atividades antrópicas que cada vez mais se ampliam na zona costeira, apesar da alta sensibilidade ambiental dos ecossistemas marinhos e costeiros (ROMM, 2007; TRONDALEN, 2009). A quantificação da concentração total de Material Particulado em Suspensão (MPS) é um importante indicador da qualidade da água nas atividades de monitoramento ambiental e igualmente na avaliação de poluentes presentes na coluna d'água nos diferentes setores plataformais, pois os poluentes podem se incorporar às partículas orgânicas que participam do ecossistema marinho. Quantidades excessivas de MPS podem ainda influenciar na degradação dos ecossistemas costeiros devido à dificuldade de penetração da luz na coluna d'água turva, inibindo a produção primária e influenciando a transferência de calor. Portanto, as propriedades do MPS em águas plataformais definem a taxa de sedimentação no substrato marinho, as transferências biogeoquímicas entre a coluna d'água e o fundo, interferindo na produtividade de bentos e, por vezes, condicionam o destino de contaminantes.

Outro desafio aos estudos oceanográficos, em tempos de acirradas discussões sobre mudanças climáticas globais, tem sido a relevância na documentação de séries temporais contínuas e longas sobre as variações temporais e espaciais da distribuição e abundância de parâmetros físicos, químicos e de organismos marinhos em grande escala, uma vez que as campanhas oceanográficas convencionais são restritivas por serem dispendiosas, sobretudo na cobertura simultânea de amplas áreas (PATTIARATCHI *et al.*, 1994; MONTRES-HUGO *et al.*, 2008). Da mesma maneira, nos planos de gestão integrada da costa brasileira há a cobrança por mais empenho

na obtenção de informações de modo mais representativo dos ambientes costeiros, em quantidades estatisticamente aceitáveis, especialmente sobre os processos litorâneos, as interações entre clima de ondas e linha de costa, o fluxo de energia e transporte de sedimentos ao longo das praias, as profundidades de fechamento e as cotas de inundação no contexto das mudanças sazonais e sob as condições de eventos climáticos extremos (por exemplo, tempestades).

Os métodos indiretos de obtenção de parâmetros de avaliação da qualidade de água, cada vez mais aperfeiçoados, fornecem dados adicionais sobre os sedimentos em suspensão na coluna d'água, que permitem o monitoramento das águas costeiras para a qualidade ambiental por meio de medidas de turbidez. O emprego de imagens de sensoriamento remoto para análise da cor do oceano fornecem séries temporais apropriadas ao estudo da variabilidade de MPS, do tipo de pigmentos de fitoplâncton e de material dissolvido na coluna d'água. As imagens do sensor AQUA-MODIS têm sido amplamente utilizadas na medição de parâmetros de qualidade de água, incluindo medidas da cor da superfície do mar, fitoplâncton (clorofila-*a*), material particulado em suspensão, matéria orgânica dissolvida (MOD), turbidez e temperatura da superfície do mar (HU *et al.*, 2004; MILLER & MCKEE, 2004; MIRONGA, 2004; DALL'OLMO *et al.*, 2005; KIAGE & WALKER, 2008; PAPASTERGIADOU *et al.*, 2008; WANG & SHI, 2008; MUHAIRI *et al.*, 2009; AMARO & FERREIRA, 2012).

Os principais algoritmos utilizados na obtenção dos valores de MPS são: (1) os modelos empíricos (TASSAN 1993; O'REILLY *et al.* 1998; DENG & LI 2003; HAN *et al.* 2006; ZHANG *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2012); (2) os modelos físicos (DOERFFER & FISCHER 1994); e (3) os modelos semi-analíticos (DEKKER *et al.* 2001; DOXARAN

et al. 2002; CARDER et al. 2004; MOREL et al. 2007). Segundo WANG et al. (2012), os dois últimos modelos possuem fundamentação física, que no entanto necessitam de observações *in situ*, dificultando seu emprego. Contudo, os modelos empíricos e físicos são mais simples e operacionalmente mais aplicáveis, necessitando apenas de dados de MPS e valores de Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{sr}).

Nesse contexto, esse trabalho foi apoiado pelas campanhas oceanográficas de coletas de parâmetros bióticos e abióticos que ocorreram nos anos de 2003, 2004, 2009 e 2010, conduzidas pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) no âmbito do Projeto de Monitoramento Ambiental Regional da Baía Potiguar, que também financiou

as análises laboratoriais, o apoio técnico e operacional em todas as etapas de processamento dos dados.

Área de estudo

A plataforma continental do Rio Grande do Norte (PCRN) está inserida aproximadamente entre os paralelos 04,50°-06,50° Sul e os meridianos 34,50°-37,50° Oeste. É subdividida em dois setores: O Setentrional (oeste do Cabo do Calcanhar) de direção Este-Oeste, e o Oriental (sul do Cabo do Calcanhar) de direção Norte-Sul, ambos possuindo profundidades menores que 60 m e largura média entre 20-40 km, chegando a cerca de 50 km na porção mais larga a nordeste.

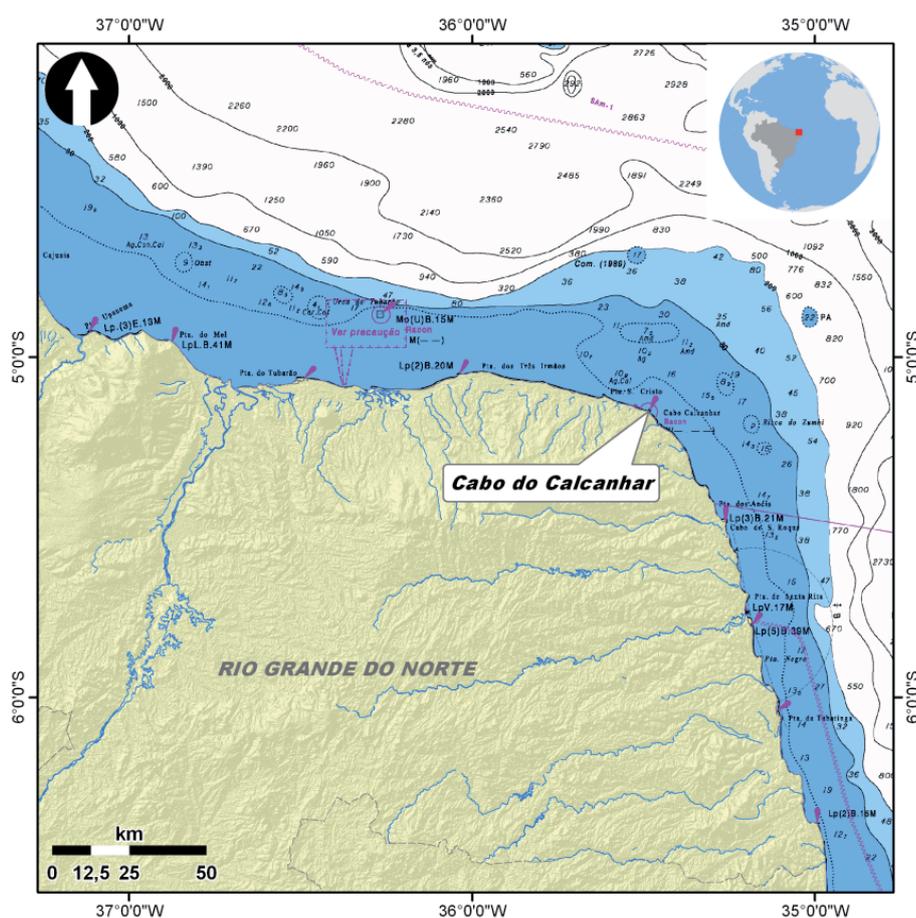


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. As cores em tons de azul, na Carta Náutica nº 50: Do Rio Parnaíba ao Recife, da Marinha do Brasil, delimita a Plataforma continental do Rio Grande do Norte, Brasil.

No contexto geomorfológico, a Plataforma Continental Setentrional (PCS) é dominada por feições como paleocanais, dunas submersas (*sand waves*), recifes algálicos, arenitos de praia (*beachrocks*) submersos, corpos arenosos isolados em sua porção central e oeste (VITAL et al., 2008). Bancos e feixes arenosos alongados (*sand ribbons*) e dunas submersas (*sand waves*) são observadas na porção a leste desse setor (VIANNA & SOLEWICZ, 1988). Os sedimentos predominantes são de origem terrígena na plataforma interna até cerca de 20 m e carbonáticos a

partir daí até a quebra do talude continental (VITAL et al., 2005; VITAL et al., 2008). Os principais rios que deságuam nesse setor, contribuintes com sedimentos inorgânicos e matéria orgânica, são os rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu. Em decorrência do clima Tropical quente e seco ou semiárido (NIMER, 1989), aliadas aos diversos barramentos à montante, os rios revelam descargas intermitentes e reduzido aporte sedimentar nesta porção da plataforma, o que coopera com a amplificação do processo erosivo nas linhas de costa.

Os processos hidrodinâmicos ocorrem sob a influência dos ventos alísios de nordeste e sudeste, de velocidades médias de 6,2 m/s e variando entre 4,0-9,0 m/s e alcançando 18,0 m/s (TABOSA *et al.*, 2001; CHAVES *et al.*, 2006) e pela Corrente Norte do Brasil (CNB) que se desloca no sentido de L para NO (SILVA, 1991), paralela à quebra da plataforma continental com velocidades da ordem de 30-40 cm/s (KNOPPERS *et al.* 1999). Quanto à direção dos vetores da corrente predominante na plataforma continental, os vetores apontam para SO no estágio de maré enchente, enquanto que em marés de vazante para sentidos N-NE, como também NO, frequentemente observadas durante os períodos de transição Sízigia→Quadratura e Quadratura→Sízigia, respectivamente. Sendo que medições realizadas próximas a quebra da plataforma continental as variações de velocidades apresentaram médias em torno de 1,84-40 cm/s (VITAL *et al.*, 2008). O clima de ondas observado *in situ* indicou altura significativa média de 1,14 metros com período de médio de 7,1s (MATOS *et al.*, 2011). No diagrama Temperatura-Salinidade, que permite a determinação das massas de água, identificou-se que na área de estudo entre as profundidade de 0-70 m se encontra Água Tropical Superficial, caracterizada por valores de $\sigma\text{-t}$ (σ) inferiores a 24,500 kg/m³, sotoposta pela Água Central do Atlântico Sul, caracterizada por valores de σ entre 24,500-27,125 kg/m³ em profundidades entre 70-150 m (STRAMMA & SCHOTT, 1999; BARNIER *et al.*, 2001). Água de máxima salinidade e

temperaturas variando entre 18-26°C e salinidade próxima ou superior a 37,0 ups também foram observadas nesse mesmo intervalo (SCHOTT *et al.*, 1998).

A Plataforma Continental Oriental (PCO) possui um relevo plano em sua maior parte, mas, inflexões das isóbatas de 20 e 40 metros na altura de Maxaranguape/RN, a norte de Natal, são indicativas da presença de um paleocanal submerso (FRANÇA, 1979). Os sedimentos que recobrem essa porção da PCO são de origem terrígena até cerca 20 m e partir de então são carbonáticos até a quebra do talude continental (FRANÇA *et al.*, 1976; KOWSMANN & COSTA, 1979; VITAL *et al.*, 2005; VITAL *et al.*, 2008). O principal rio que deságua nesse litoral é o rio Potengi, que corta a cidade de Natal. O clima predominante na região é o Tropical quente, úmido e subúmido (NIMER, 1989). Os ventos possuem direção de sudeste, variando sazonalmente entre ESE e SSE, com velocidades de 3,8 e 9,0 m/s, gerando deriva litorânea quase contínua ao longo do ano transportando sedimentos de S para N. Este litoral é dominado por ondas de energia mista e correntes costeiras longitudinais. As ondas observadas nessa parte do litoral apresentaram alturas significativas com valores médios de 1,21 m e direções preferenciais de E-ESE com período médio de 6,2 s (HIDROCONSULT, 1979; TAVARES JUNIOR, 1979). As últimas, associadas aos ventos de ESSE, geram correntes costeiras de 0,1 a 0,8 m/s no sentido de S para N.

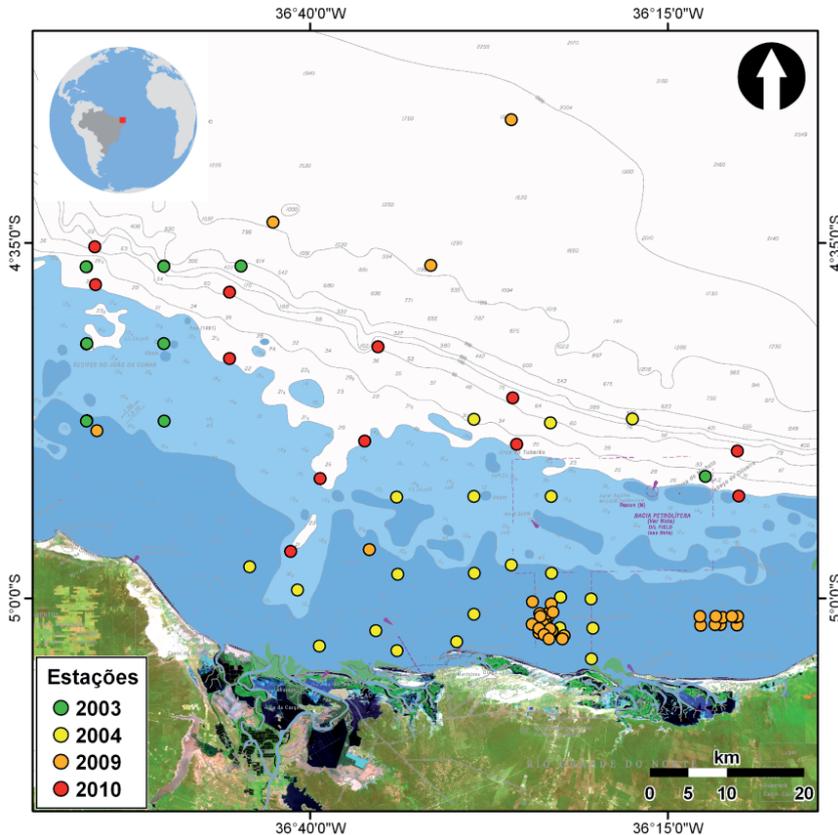


Figura 2 – Mapa de localização da área das estações oceanográficas sobrepostas a Carta náutica nº 21900: Da Ponta Maceio ao Cabo Calcanhar, da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

De acordo com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (VELLOZO & ALVES, 2006) a região litorânea do Rio Grande do Norte encontra-se em regime de mesomare semidiurna, com nível de maré médio da ordem de 1,3 m, nível médio de maré alta de sizígia de aproximadamente 2,8 m e a amplitude de maré de quadratura em torno de 1,3 m.

Materiais e métodos

Campanhas oceanográficas

As campanhas oceanográficas de coleta de dados *in situ* para calibração do modelo aconteceram nos períodos de maio de 2003 e 2004, outubro e novembro de 2009 e maio de 2010, totalizando noventa e nove (99) estações, sendo que as sete (7) amostras adquiridas em maio de 2003 foram utilizadas para validar o algoritmo e não entraram na análise estatística do modelo.

Dados de material particulado em suspensão

Em campo, o MPS das amostras de água foi extraído gravimetricamente através da retenção em papel de filtro de fibra de vidro GF/F, previamente seco (105°C) e pesado. Em seguida foi filtrado em volume de água entre 1500 e 2000 mL sob o vácuo. Os papéis de filtro foram então lavados adequadamente com água ultrapura para a retirada do cloreto de sódio, comum às amostras. Os papéis de filtro foram acondicionados em recipientes próprios (placas de Petri) e mantidos refrigerados até a chegada em laboratório onde foram secos a 60°C por 2 horas e pesados até peso constante a cada 2 horas em balança analítica. Para os cálculos foram utilizados o peso do papel de filtro seco, contendo o material particulado em suspensão, o peso do papel de filtro seco vazio e o volume de amostra de água filtrado.

Dados de satélite

o sensor MODIS é parte do programa integrado da *National Aeronautics and Space Administration - Earth Observing System* (NASA-EOS) consistindo em satélites projetados para inventários de terra, água e atmosfera. A bordo das plataformas AQUA e TERRA possui 36 bandas espectrais entre 459-1.390 nm e produz imagens com 250 m, 500 m, e 1 km de resolução espacial. As imagens do sensor AQUA-MODIS no Nível 0 assinaladas na região espectral do visível foram adquiridas diariamente entre os meses de maio/2003 e maio/2004, outubro e novembro/2009 e maio/2010 e Nível 3 (4 x 4 km²) de 2009 a 2012 do *Ocean Color Web* da *National Aeronautics*

and Space Administration (NASA) pelo website <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. O processamento digital das imagens obtidas diariamente com o Nível 2 de correção foi realizado no ambiente *SeaWIFS Data Analysis System* (SeaDAS, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) em sistema Linux. Os dados brutos foram calibrados para gerar valores de R_{sr} nos comprimentos de onda $R_{sr,645}$ nm e $R_{sr,667}$ nm de 1 km de resolução espacial, referentes à superfície marinha da PCRN.

Cada imagem diária foi submetida aos algoritmos de correção geométrica (pelo modelo matemático WGS84, em sistema de coordenadas UTM) e correção atmosférica disponíveis no *SeaDAS* (GORDON & WANG, 1994). A partir da análise por regressão não linear entre os dados de MPS *in situ* e os valores de reflectância ($R_{sr,645}$ e $R_{sr,667}$) observados pelo satélite, para a mesma localização geográfica e data de imageamento/coleta (+1 dia), de acordo com a disponibilidade de imagens e, sobretudo, devido à ausência de nuvens, foram gerados dois algoritmos empíricos regionais de concentração de MPS.

Resultados e discussão

Estatísticas e desempenho dos modelos

Para a avaliação do desempenho do algoritmo foi aplicado dois tipos de índices estatísticos: o erro médio quadrático (RMSE) e o erro relativo (ER%). Esses índices são descritos da seguinte forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mod,i} - x_{obs,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$ER = \left| \frac{x_{mod,i} - x_{obs,i}}{x_{obs,i}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

Onde, $x_{mod,i}$ é o valor modelado no *i*-ésimo elemento, $x_{obs,i}$ é o observado (*in situ*) no *i*-ésimo elemento, e *n* é o número de elementos.

Modelo local de mps

os valores de reflectância em sensoriamento remoto possuem um incremento diretamente proporcional à concentração de MPS, principalmente na região do azul e do verde. Vários trabalhos já detectaram esse tipo de comportamento para diversos tipos de sensores (TASSAN 1993; DOXARAN *et al.* 2002; MILLER & MCKEE, 2004; WANG, 2012; TANG *et al.* 2004; HAN *et al.* 2006; AMARO & FERREIRA, 2012; WANG, *et al.*, 2012).

Nesse estudo, devido principalmente à baixa turbidez da água na PCRN, as bandas espectrais mais sensíveis à variação do MPS foram as bandas na faixa do visível R_{sr} 645 e R_{sr} 667, condizente com a descrição de BINDING *et al.* (2005). Estas bandas foram comparadas e se verificou as correlações geradas pela concentração de MPS para cada banda através de modelos exponenciais (Figura 3). O R^2 encontrado foi de 0,77 para o modelo exponencial derivado da banda 645 e 0,75 para o modelo obtido através da banda 667. Ou seja, respectivamente 77% e 75% das variações desses dados são explicadas pela variação dos dados *in situ*.

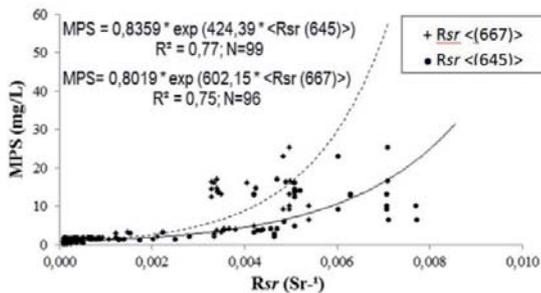


Figura 3 – Concentração de material particulado em suspensão (MPS) versus bandas de reflectância R_{sr} 645 (linha contínua) e R_{sr} 667 (linha tracejada).

Validação do modelo

A validação do algoritmo desenvolvido foi realizada com base nas sete (7) amostras obtidas na campanha oceanográfica de maio de 2003. Os modelos de MPS foram comparados com as amostras *in situ* independentes, que não entraram na estatística do modelo, e os erros (RMSE e ER) avaliados para cada modelo e estão indicados na Tabela 3.1. Deste modo foi possível destacar que apesar do R^2 do modelo utilizando a banda R_{sr} 645 ser melhor que o do modelo derivado da banda R_{sr} 667, o RMSE e o ER deste último foram menores (Tabela 3.2), indicando ainda que o ER do Modelo Exponencial <math>R_{sr}(667)> pode ser controlado dentro de um intervalo de $\pm 30\%$ (Figura 4). Isso aponta para uma melhor desempenho do Modelo Exponencial <math>R_{sr}(667)> e justifica o uso do algoritmo centrado nesse comprimento de onda.

Tabela 1: Avaliação estatística do desempenho dos modelos de MPS para Plataforma Continental do RN.

Modelo	RMSE (mg/L)	Méd. ER (%)	R^2
Modelo Exponencial <math>R_{sr}(645)>	0,355	30,7	0,77
Modelo Exponencial <math>R_{sr}(667)>	0,349	28,5	0,75

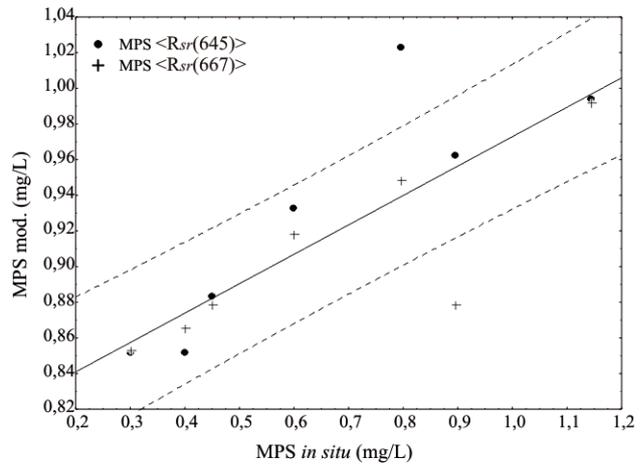


Figura 4 – Concentração de MPS *in situ* versus os dois modelos. As linhas tracejadas indicam +30% de erro, em relação à linha média.

Tabela 2: Resultado da validação para os diferentes modelos de MPS.

Modelo	Min. ER (%)	Max. ER (%)	Méd. ER (%)
Modelo Exponencial <math>R_{sr}(645)>	6,4	64,8	30,7
Modelo Exponencial <math>R_{sr}(667)>	2,4	64,8	28,5

Séries temporais de imagens de MPS

Com base no algoritmo regional desenvolvido para a PCRN, utilizando o modelo exponencial <math>R_{sr}(667)> de 1 km, foram criadas séries temporais com imagens mensais do AQUA-MODIS para MPS entre os anos de 2009-2012 e foram analisadas em detalhe quanto à distribuição temporal e espacial características do MPS, como também sua relação com fenômenos climáticos globais, feições morfológicas de fundo marinho e parâmetros meteorológicos característicos para a PCRN.

A Figura 5 mostra a variação espacial e temporal do MPS derivada das imagens AQUA-MODIS entre 2009-2012 para as duas regiões da PCRN: A plataforma continental adjacente ao Litoral Setentrional (LS) e a plataforma continental adjacente ao Litoral Oriental (LO). Para ambas as regiões foi possível identificar a sazonalidade do MPS, em que o período com as maiores concentrações de MPS ocorrem principalmente entre os meses de maio-setembro, com picos em julho, que define o período chuvoso corroborado pelos dados pluviométricos para o RN (INMET, 2012).

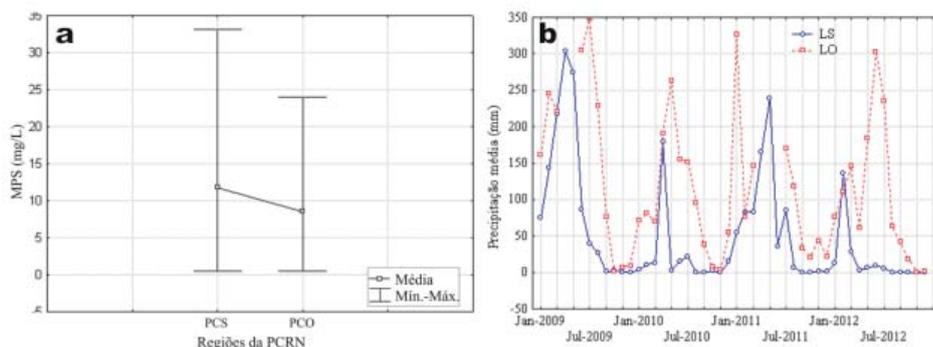


Figura 5 – (a) A variação espacial 2009-2012 do MPS para os setores da plataforma continental adjacente ao Litoral Setentrional (LS) e ao Litoral Oriental (LO); (b) A variação temporal do MPS entre os anos de 2009-2012 para cada setor da PCRN.

Em média é possível verificar que a região da plataforma continental adjacente ao LS possui as maiores variações de MPS, provavelmente devido à baixa declividade e maior largura média desse setor, conforme avaliação feita nas Cartas Náuticas n° 21.900 - da Ponta Maceio ao Cabo Calcanhar e n° 22.100 - do Cabo Calcanhar a Cabedelo, da Marinha do Brasil, fatores que facilitam a ação das ondas na ressuspensão de sedimentos de fundo, devido ao contato com porções mais rasas do assoalho marinho, e dos ventos intensos que impulsionam a corrente de deriva no sentido de E para W. No entanto, no setor LO foram observados os picos mais elevados de MPS. Tal condição sugere que devido à área LO estar inserida numa região de clima úmido com maiores valores de precipitação pluviométrica, o que resulta no maior aporte de sedimentos à plataforma continental devido ao escoamento superficial dos rios adjacentes.

A Figura 6 mostra a série climatológica e a distribuição espacial do MPS derivada das imagens AQUA-MODIS para toda a plataforma continental do RN entre 2009-2012. Assim como na Figura 5 (b) as imagens multitemporais de MPS indicam que é no mês de julho que ocorrem as maiores concentrações de MPS em toda a PCRN. No entanto, os maiores valores são observados principalmente na foz do rio Mossoró (RM), na região adjacente ao Cabo do Calcanhar e, em menores proporções, próximo à foz do rio Açu (RA) e a sul do rio Potengi (RP).

Análise espacial através de principais componentes

A análise por Principais Componentes (PC) é um método baseado nas definições paramétricas de análise por autovetores e matrizes de variância e covariância (SWAIN & DAVIS, 1978), onde, entre as principais características está a redução do número de variáveis correlacionadas para determinado conjunto de dados, preservando a variância total

dos mesmos. No entanto, as interpretações dos resultados são complexas, uma vez que os valores de ponderação dos vetores podem ter mais de um significado, constatando ainda a necessidade de se combinar métodos não-paramétricos qualitativos, como o processo de interpretação visual para a avaliação de conjuntos de bandas (SKIDMORE & TUMER 1988; CONESE & MASELLI, 1993). Sendo assim, através da análise por PC é possível identificar padrões de distribuição e processos físicos associados à variabilidade espacial e temporal do MPS, possibilitando a interpretação desses dados em relação ao contexto regional que os abrange.

O gráfico da PC1 (Figura 7a) respondeu com valores de variância negativos nos autovetores aos altos índices pluviométricos (ou sob a influência de *La Niña*) observados tanto no litoral setentrional quanto oriental (Figura 7b), assim como valores positivos em época de estiagem (ou sob a influência de *El Niño*). Tal fato aponta para uma correlação inversa entre alta pluviosidade e os valores negativos dos autovetores na PC1. Do mesmo modo, para a PC2 o mesmo gráfico apontou para altos valores positivos dos autovetores nos primeiros meses de 2011, considerados secos e sob a influência de *El Niño* e valores negativos desses autovetores nos primeiros meses de 2012, período chuvoso e sob a influência de *La Niña*. Para o LO as variações positivas em períodos de estiagem sugerem que os agentes ambientais causadores da ressuspensão e transporte da pluma de MPS seja a ação das ondas, correntes de maré e/ou de deriva litorânea. De maneira contrária as observações anteriores, o gráfico da PC3 na Figura 7(a) acompanhou de forma diretamente proporcional às oscilações dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*, onde nos períodos de estiagem (Figura 7b) os autovetores mostram valores positivos, enquanto que para o período chuvoso foram negativos. Portanto, na PC3 observam-se as maiores variações do MPS relacionadas às forçantes hidrodinâmicas: ondas, correntes costeiras e de maré.

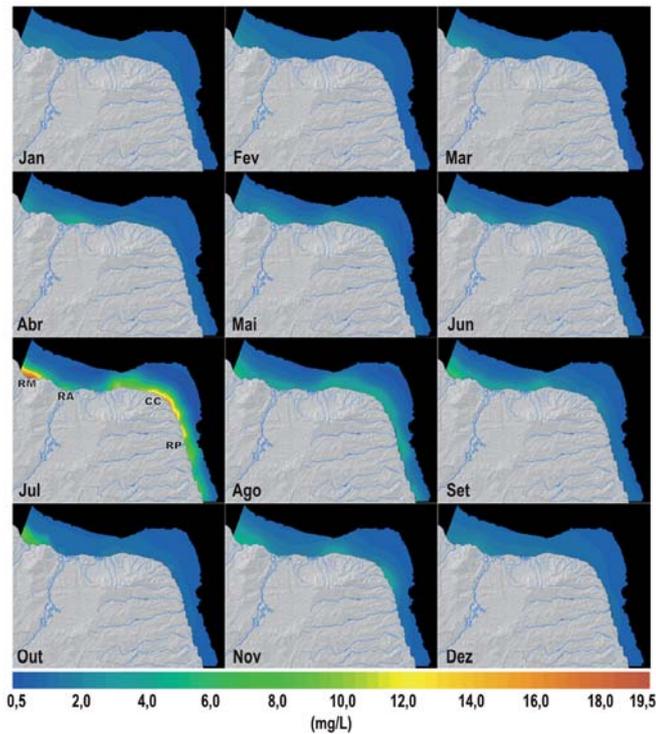


Figura 6 – Série climatológica da MPS no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2012 para a região da PCRN. As siglas RM, RA, CC e RP referem-se aos rios Mossoró e Açú, o Cabo do Calcanhar e o rio Potengi, respectivamente.

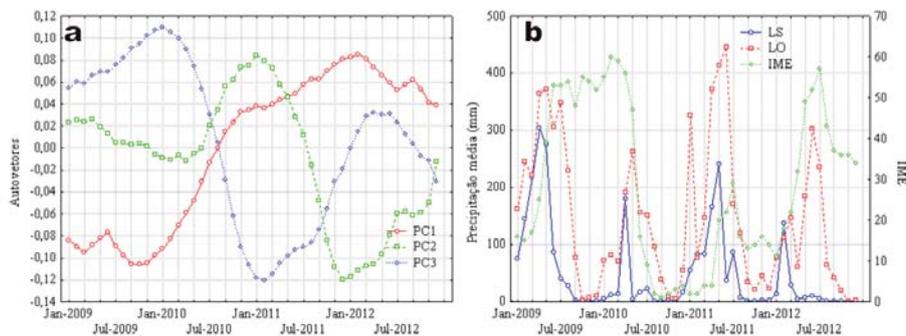


Figura 7 – (a) Série temporal de autovetores referentes aos 3 primeiros modos espaciais da análise de Principais Componentes, para os anos de 2009 a 2012; (b) Série temporal do Índice Multivariado El Niño Oscilação Sul (IME), onde valores de 1-19 denotam fortes eventos de La Niña, enquanto de 45-63 (46-64) denotam fortes eventos de El Niño; precipitação mensal acumulada para as estações de Macau e Natal, respectivamente situadas nos litorais adjacentes as plataformas continental do litoral setentrional (LS) e do litoral oriental (LO), para os anos de 2009 a 2012.

A PC2 aponta para os valores de variância do MPS não compreendidos na PC1, observados nas regiões próximas a Praia de Ponta Negra e o Alto de Touros (cores em tons de verde claro na Figura 8a). Como essas duas regiões não sofrem influência de rios, sugere-se que as plumas sejam condicionadas por forçantes hidrodinâmicas, como correntes marinhas, ondas e ventos (VIANNA & SOLEWICZ, 1988; VIANNA *et al.*, 1989; SOLEWICZ, 1989; TESTA & BO-

Tendo como base a interação observada entre a variância dos autovetores de MPS e a pluviosidade, assim como os fenômenos atmosférico-oceânicos globais *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) e *La Niña*, aqui compreendida através do Índice Multivariado *El Niño* Oscilação Sul (IME, ALLAN & ANSELL, 2006; RAYNER *et al.*, 2006; WOLTER & TIMLIN, 1993, 2011), pode-se verificar que, de modo geral, a análise por PC aplicada às séries temporais de MPS das imagens AQUA-MODIS (Figura 8a) indicaram que o comportamento da variância do MPS para esse período, na PC1, esteve sempre condicionado aos períodos de maiores valores de precipitação. Nas imagens, a área com cores em tons de vermelho adjacente à foz do rio Mossoró foi a região com a maior variância desse parâmetro. Na região do LO, as cores em laranja amarelado indicam a pluma de sedimentos oriunda principalmente da descarga da foz do rio Potengi, que se estende para norte devido à corrente de deriva litorânea até a região do Cabo do Calcanhar. De maneira menos intensa observa-se pluma próxima à foz do rio Açú, onde a baixa variância aponta para o ineficiente aporte de sedimentos desse rio, consequência de represamentos e da ocupação densa e desordenada das margens e do estuário (por exemplo, por salinas e fazendas de camarão), acarretando numa baixa competência do mesmo.

SENCE, 1999). A baixa variância de MPS descrita na PC3 aparece restrita a região entre os estuários do rio Piranhas-Açú e Galinhos (cores em tons de azul na Figura 8a). Tal condição aponta para uma área sujeita a processos erosivos relacionados à dinâmica da circulação costeira, aliado ao suprimento sedimentar deficiente. Sendo assim, podemos inferir que as regiões marcadas pelas PC2 e PC3 são respectivamente regiões com menor e maior déficit de MPS, vulneráveis a erosão

(TABOSA & VITAL, 2006; SANTOS *et al.*, 2012; AMARO *et al.*, 2012) e dominadas principalmente por forçantes ambientais meteorológicas como ondas, correntes de maré e de deriva litorânea.

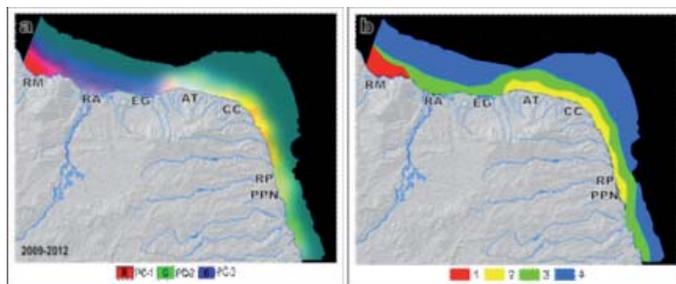


Figura 8 - (a) Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicadas à série temporal mensal de MPS obtida por satélite, para os anos de 2009 a 2012. (b) Zonas de variância e disponibilidade de MPS. As siglas: RM, RA, EG, AT, CC, RP e PPN representam os rios Mossoró e Açú, estuário de Galinhos, Alto de Touros, Cabo do Calcanhar, rio Potengi e praia de Ponta Negra, respectivamente.

De acordo com a Figura 8(b) pode-se classificar na PCRN quatro zonas de acordo com a variância e a disponibilidade relativa de MPS: Zona 1 de alta variância com elevada

disponibilidade de sedimentos, região vermelha ao largo do estuário do RM; zona 2 de média variância e disponibilidade de sedimentos, região amarela desde a Praia de Ponta Negra até o Alto de Touros; zona 3 de baixa variância e com pouca disponibilidade de sedimentos, marcada em verde entre a área adjacente ao rio Piranhas-Açu e Estuário de Galinhos, e a sul da Praia de Ponta Negra; zona 4 com baixa à nula variância e com fraco ou nulo aporte de sedimentos, região em azul em toda a imagem.

A Figura 9 (a, b, c, d) marca os modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicados à série temporal de MPS das imagens AQUA-MODIS separadamente para os meses dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012. A Figura 9(a) mostra que para o ano de 2009 ocorreram altos valores de precipitação pluviométrica para a região decorrente da atuação do fenômeno *La Niña*. Assim, foi possível observar na imagem que durante esse período o comportamento do MPS apontou na PC1 as maiores variâncias e que as disponibilidades de MPS estiveram presentes nas fozes dos rios Mossoró e Potengi. Nessas zonas foi possível observar que as plumas de MPS derivadas das descargas dessas drenagens mantiveram a tendência de deslocamento para oeste (rio Mossoró) e para norte (rio Potengi), acompanhando a corrente de deriva litorânea.

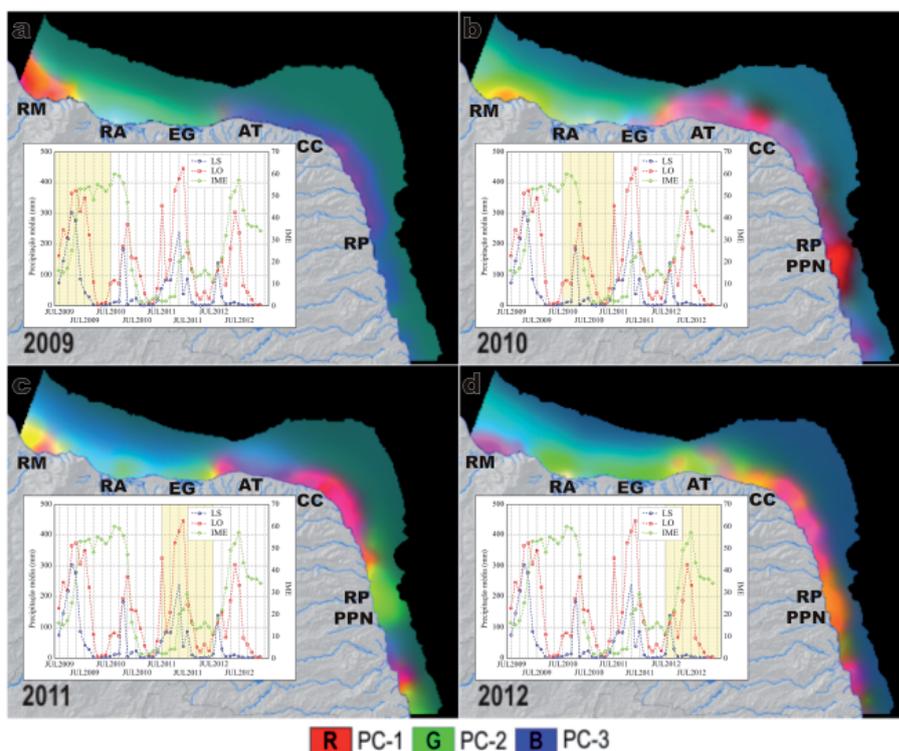


Figura 9 - Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicada à série temporal mensal de MPS obtida por satélite, para os anos de (a) 2009, (b) 2010, (c) 2011 e (d) 2012. Para cada imagem trata-se da série temporal da IME (Índice Multivariado El Niño Oscilação Sul), onde valores de 1-19 denotam fortes eventos de *La Niña*, enquanto de 45-63 (46-64) denotam fortes eventos de *El Niño*; Precipitação mensal acumulada para as estações de Macau e Natal, respectivamente situadas nos litorais adjacente às plataformas setentrional (PCS) e oriental (PCO), para os anos de 2009 a 2012. As siglas: RM, RA, EG, AT, CC, RP e PPN representam os rios Mossoró, Açú, estuário de Galinhos, Alto de Touros, Cabo do Calcanhar, rio Potengi e praia de Ponta Negra, respectivamente.

Na Figura 9(a), a PC3 definiu ainda que a pluma de MPS originada da foz do rio Potengi se estende para norte alcançando a costa do Cabo do Calcanhar e prossegue atingindo o LS. Por outro lado, na Figura 9(b) foi possível identificar que devido à influência do evento *El Niño*, o baixo índice pluviométrico desse ano mostrou que as áreas com as principais concentrações e variância de MPS estiveram localizadas em regiões ausentes de desembocaduras de rios, sem influência de suas descargas, como na zona marcada em cores avermelhadas ao largo da Praia de Ponta Negra e na região entre o Cabo do Calcanhar e o Alto de Touros. Na Figura 9 (b e c) pode-se perceber que na foz do rio Mossoró, devido ao reduzido aporte de sedimentos, a variância da pluma de MPS é dividida entre a PC1 e PC2, respectivamente, predominando em cores laranja avermelhado e amarelo com tendência de deslocamento para NNE, sugerindo que o padrão de dispersão e direção de deslocamento esteja relacionado ao efeito da corrente de maré vazante. A Figura 9(c) mostra que para o ano de 2011 as plumas de MPS mais expressivas, marcadas pela PC2 e PC1 com cores de verde e vermelho, predominaram no LO da PCRN, desde o rio Potengi até o Cabo do Calcanhar, provavelmente condicionadas pelas chuvas mais expressivas nesse setor do RN. A área a sul da foz do rio Potengi e ao largo de Praia de Ponta Negra aparece como uma área de *hotspot* erosional, com fortes padrões de dispersões tanto para a PC1 (Figura 9b e 9d) quanto para a PC2 (Figura 9c). Tal fato indica que o sedimento dessa zona costeira seja erodido da linha de costa e retrabalhado pela ação das ondas e correntes de maré e, conseqüentemente, transportado em suspensão pelas correntes costeiras.

Em todas as imagens da Figura 9(a, b, c, d), a região compreendida entre o rio Piranhas-Açu e Estuário de Galinhos esteve, para todo o período analisado, com baixa variância e disponibilidade de MPS marcadas pelas PC2 e PC3 (em tons de verde e azul, respectivamente). A análise feita nas imagens AQUA-MODIS para a temperatura da superfície do mar (TSM) do dia 18/08/2009 (Figura 10a) sugere um padrão hidrodinâmico em que águas mais frias com cerca de 26°C (tons azulados na Figura 10a) encontram-se a partir do Alto de Touros, estendendo-se para oeste e se bifurcando na altura do limite entre a plataforma e o talude continental, com parte dessa massa d'água seguindo para noroeste (setas azuis na Figura 10a) sob influência da Corrente Norte do Brasil, que flui paralela à geometria de quebra do talude continental (KNOPPERS *et al.*, 1999). Enquanto isso, a outra parte dessa massa d'água adentra e avança pela plataforma continental estacionando-se na área compreendida entre região do Alto de Touros e Estuário de Galinhos (Figura 10a), avançando até a foz do rio Piranhas-Açu (a seqüência de setas azuis na Figura 3.10a indicam a direção provável do fluxo hidrodinâmico). Tal fenômeno sugere uma barreira hidrodinâmica intermitente que pode estar condicionando por correntes principalmente de maré (Figura 10a) regulando a passagem de MPS de leste para oeste e trapeando o MPS na região compreendida entre o Alto de Touros

e o Estuário de Guamaré (Figura 10b). Dados de velocidade de corrente (Figura 10d) apontam para esse comportamento das correntes nessa região (VITAL *et al.*, 2008).

Nesta mesma porção, a imagem de MPS para o dia 17/06/2009 (Figura 10b) indica uma feição em forma de vórtice anti-horário com concentrações de MPS em torno de 4,0-0,3 mg/L, ocorrendo para além do talude continental a partir da região do Alto de Touros, prolongando-se por aproximadamente 40 km para além da quebra da plataforma continental (setas pretas na Figura 10b). Essa feição sugere que o MPS retido nessa porção da plataforma é retirado e transportado para fora desse setor, lançado para além da plataforma continental e acarretando na reposição deficiente na porção a oeste, compreendida entre o rio Piranhas-Açu e o Estuário de Galinhos, onde se observa intensa taxa de erosão da linha de costa (Figura 10c).

Imagens do satélite LANDSAT de 2002 a 2010 foram processadas para destaque do MPS através do algoritmo de TASSAN (1993), já utilizado por alguns autores em outras porções da plataforma continental nordeste e sudeste do Brasil (LORENZETTI *et al.* 2007; TEXEIRA, 2012). Através da análise por PC dessas imagens foi observada a área com as maiores variâncias de MPS compreendida entre a linha de costa e a isóbata de 5 metros (Figura 11a). As maiores variâncias de MPS marcadas em vermelho pela PC1 na Figura 3.11(a) aparecem desde a região do Alto de Touros até a foz do rio Açu. A partir da área em frente ao estuário do rio Piranhas-Açu predominaram feições correspondentes às PC2 e PC3 (em tons de verde e azul na Figura 11a), provavelmente sob a influência dos sedimentos aportados por esse rio, que tomam a direção da corrente de deriva litorânea para oeste indicada pelas setas verdes na Figura 11(a). Tendo em vista que o paleocanal submerso do rio Açu encontra-se imediatamente a frente da desembocadura atual (Figura 11a), observa-se que o sedimento trazido de leste pela corrente costeira, indicada pelas setas vermelhas na Figura 11(a), tem seu caminho interrompido aparentemente por uma barreira hidrodinâmica formada pela massa d'água desse rio conduzindo o MPS, em sua maior parte, para o interior desse vale submerso. Os sedimentos encontrados nos primeiros 10 metros de profundidade no interior do paleocanal submerso são de origem essencialmente terrígena (Figura 11c, VITAL *et al.*, 2005; 2008). Vale ressaltar que as feições marcadas pelas PC1, PC2 e PC3 nas imagens LANDSAT compreendem a zona onde ocorrem as maiores variâncias de MPS, ou seja, a área de maior remobilização e ressuspensão de sedimentos nessa região da LS, provavelmente devido à ação de forçantes como ondas e correntes marinhas. Dessa maneira, tais feições podem indicar a posição onde se localiza a profundidade de fechamento, que corresponde ao limite em mar da movimentação significativa de sedimentos (HALLERMEIER, 1978, 1981), que para o período analisado variou em torno da isóbata de 5 metros.

IMAGENS DO AQUA-MODIS APLICADAS À ESTIMATIVA E MONITORAMENTO DOS VALORES DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

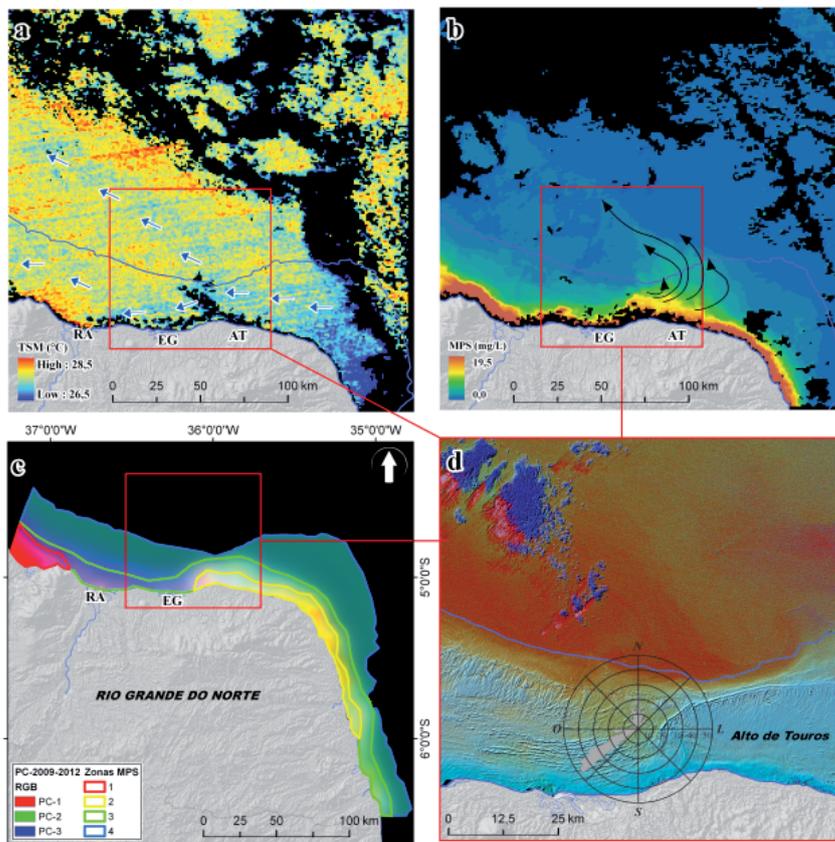


Figura 10 – (a) Imagem do sensor AQUA-MODIS para TSM dia 18/08/2009. (b) Imagem do sensor AQUA-MODIS para MPS para o dia 17/06/2009, destacando um vórtice de sentido anti-horário como mostram as setas pretas. (c) Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicadas à série temporal mensal de MPS obtida por satélite, para os anos de 2009 a 2012, sobreposta pelas zonas de variância e disponibilidade de MPS. (d) Estação oceanográfica mostrando o diagrama de círculo dos vetores velocidade de corrente, coletados por VITAL et al. (2008) integrado a imagem Landsat 7-ETM+ para destaque da morfologia do substrato marinho. As setas indicam feições descritas no corpo do texto. A linha azul demarca o limite da plataforma continental desde a costa até a isóbata de 60 metros. As siglas: RA, EG e AT representam o rio Açu, estuário de Galinhos e região do Alto de Touros, respectivamente.

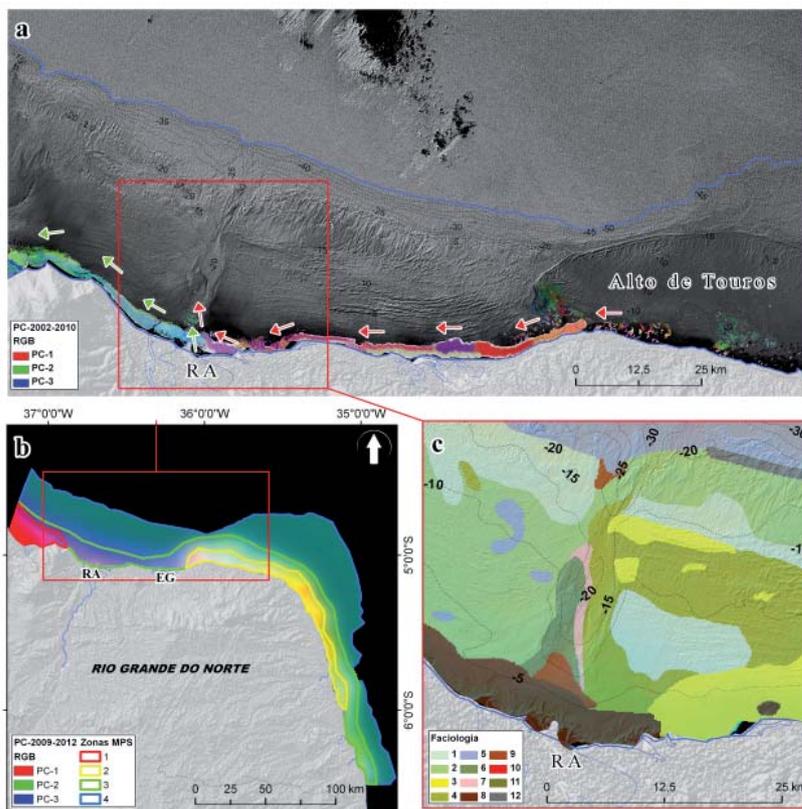


Figura 11 – (a) Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicadas à série temporal de MPS obtida por satélite, para os anos de 2002 a 2010, sobreposta à imagem LANDSAT 7-ETM+ de 2002 que define a morfologia do substrato marinho encontradas na porção submersa da PCS. (b) Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicadas à série temporal mensal de MPS obtida por satélite, para os anos de 2009 a 2012, adicionada pelas zonas de variância e disponibilidade de MPS. (c) Mapa faciológico onde: 1 - Areia biosiliciclástica; 2 - Areia bioclástica; 3 - Areia siliciclástica; 4 - Areia Silicibioclástica; 5 - Cascalho bioclástico; 6 - Marga carbonática; 7 - Lama carbonática; 8 - Lama terrígena; 9 - Marga arenosa; 10 - Cascalho siliciclástico; 11 - Sedimentos finos de talude; 12 - Recifes, (VITAL et al., 2005; 2008). As setas indicam feições descritas no corpo do texto. A linha azul demarca o limite da plataforma continental desde a costa até a isóbata de 60 metros. As siglas: RA e EG representam o rio Açu e o estuário de Galinhos, respectivamente.

Correlações com erosão costeira

Alguns monitoramentos utilizando geotecnologias de alta precisão foram realizados nas zonas 2 e 3 (Figura 12a, c), respectivamente de média e baixa variância e disponibilidade de sedimentos, e apontaram altas taxas de recuo da linha de costa (GRIGIO *et al.*, 2005; SOUTO, 2009; NASCIMENTO, 2009; FRANCO *et al.* 2012; SANTOS & AMARO, 2011, AMARO *et al.*, 2012). Souto (2009) e Nascimento (2009), através de imagens de satélites e fotografias aéreas, observaram em escala decadal que a área destacada em vermelho entre os estuários dos rios Açú e Galinhos na Figura 12(a) sofreu alterações significativas na linha de costa com balanço sedimentar indicando intenso processo erosivo, revelando o deslocamento das ilhas barreiras de leste para oeste com abertura e fechamento de canais de maré e formação de ilhas barreiras. Santos, (2011) e Santos *et al.*, (2012), através de levantamentos geodésicos de precisão, constataram para a mesma região em escala interanual sob a ação do fenômeno *El Niño*, o balanço sedimentar volumétrico para as praias arenosas expostas que se mostrou negativo, sendo constatados ciclos destrutivos intensos e construtivos deficientes devido

baixa resiliência ou capacidade de regeneração sedimentar das praias arenosas.

Tendo em vista que as zonas mapeadas como sendo de baixa disponibilidade de MPS na Figura 12(a) apontam para áreas com intensa erosão no LS da PCRN, Ferreira *et al.*, (a, submetido), de maneira análoga aos trabalhos com esse cunho realizados anteriormente, encontrou resultados semelhantes para o LO, especificamente na área ao largo da Praia de Ponta Negra (Figura 12c). Nessa área, os levantamentos geodésicos de precisão integrando todo o perfil praiial desde a sua porção emersa até a profundidade de fechamento revelou intensa erosão entre os meses de julho a novembro de 2012, com a linha de costa recuando mais de 30 metros em alguns trechos dessa praia, com perdas em área de aproximadamente 2,76 ha. O balanço sedimentar foi negativo para esse mesmo período em cerca de -215.381,70 m³ em todo o perfil praiial, sendo -38.754,16 m³ na parte emersa e -176.627,54 m³ na porção submersa. Dessa maneira, pode-se inferir que na costa do RN as zonas mapeadas como de média e baixa variância e disponibilidade de sedimentos são indicativas de setores de *hotspot* erosional, ou seja, áreas que sofrem com intensos processos erosivos.

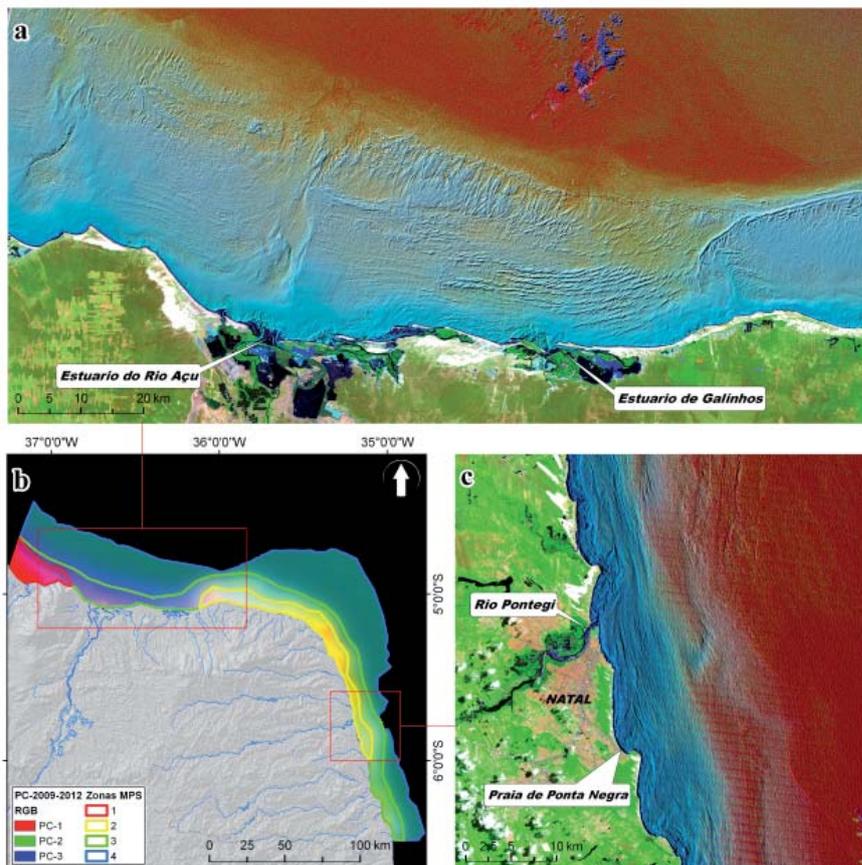


Figura 12 – (a) Imagem Landsat 7-ETM+ de 2002 mostrando as morfologias de fundo encontradas na porção submersa da PCS. (b) Modos espaciais da análise por Principais Componentes aplicadas à série temporal mensal de MPS obtida por satélite, para os anos de 2009 a 2012, acrescentadas pelas zonas de variância e disponibilidade de MPS. (c) Imagem Landsat 5-TM indicando a pluma de MPS em azul e as feições de fundo como bancos submersos paralelos a linha de costa ao largo da área adjacente à Praia de Ponta Negra, sul do estuário do rio Pontengi.

Conclusões

Neste estudo, as concentrações de MPS na PCRN obtidas em estações *in situ* foram comparadas em tempo quase síncrono com imagens do sensor AQUA-MODIS entre os anos de 2003 a 2010. Para isso, o modelo empírico exponencial derivado da relação entre a banda de reflectância espectral centrada em $R_{sr,667}$ e dados *in situ* explicou cerca de 75% das variações de MPS na PCRN, com um erro médio quadrático de 0,349 mg/L e erro médio relativo de 28,5%. Através da série climatológica de imagens mensais de MPS entre os anos de 2009-2012, foi possível identificar uma sazonalidade de MPS, e com as maiores concentrações desse parâmetro ocorreram entre os meses de maio-setembro com picos máximos em julho. A região do LS da PCRN possui em média as maiores variações de MPS; contudo, é no LO que se encontram os maiores picos de MPS. A análise por PC apontou para toda a PCRN que as variâncias dos autovetores acompanharam períodos de seca e chuva, relacionados aos fenômenos climáticos globais *El Niño* e *La Niña*. As PC aplicadas à mesma série temporal indicaram quatro (4) zonas de alta, média, baixa e sem nenhuma variância e disponibilidade de MPS distribuídas por toda a PCRN.

Nessas zonas, monitoramentos de detalhe utilizando geotecnologias de alta precisão, realizados nas zonas de média e baixa variância e disponibilidade de sedimentos, apontaram altas taxas de erosão e recuo da linha de costa, bem como o balanço sedimentar indicando intenso processo erosivo, principalmente na porção submersa do perfil praiado. Portanto, fica evidente que a análise multitemporal das imagens de MPS por PC é um importante método sinóptico de avaliação da disponibilidade e distribuição de sedimentos em suspensão numa escala regional, além de ser uma ferramenta indicadora de regiões sujeitas ou não a intensos processos erosivos.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido através da bolsa de Doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica & Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG-UFRN) e ao Laboratório de Geoprocessamento da UFRN (GEOPRO) pelo suporte ao desenvolvimento deste estudo.

Referências bibliográficas

ALLAN, R.J., & T. ANSELL. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2004. *Journal of Climate*, v. 19, p. 5816-5842. 2006.
AMARO, V.E., & FERREIRA, A.T.S. **Imagens do AQUA-MODIS aplicadas à estimativa dos valores de clorofila-a e da temperatura da superfície do mar na zona offshore da**

Bacia Potiguar no Rio Grande do Norte. Revista de Geologia, UFC, Edição Especial HIDROSEMA, v. 25: p.128 - 142. ISSN-0103-2410. 2012.

BARNIER, B.; REYNAUD, T.; BECKMANN, A.; BÖNING, C.; MOLINES, J. M.; BARNARD, S. & JIA, Y. On the seasonal variability and eddies in the North Brazil Current: insights from model intercomparison experiments. *Progress in Oceanography*, v. 48, p. 195-230. 2001.

BINDING, C.E.; BOWERS, D.G.; & MITCHELSON-JACOB, E.G. Estimating suspended sediment concentration from ocean color measurements in moderately turbid waters: The impact of variable particle scattering properties. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, p. 373-383. 2005.

CARDER, K.L.; CHEN, F.R.; CANNIZZARO, J.P.; CAMPBELL, J.W. & MITCHELL, B.G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, v. 33, p. 1152-1159. 2004.

CHAVES, M.S.; VITAL, H. & SILVEIRA, I.M. Beach morphodynamics of the Serra oil field, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI v. 39, p. 594-597. 2006.

CONESE, C. & MASELLI, F. Selection of optimum bands from TM scenes through mutual information analysis. ISPRS 1 Photogram. *Remote Sensing* v. 48, n. 3, p. 2-11. 1993.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A.A.; RUNDQUIST, D.C.; LEAVITT, B.; BARROWB, T. & HOLZ, J.C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, v. 96, p. 176-187. 2005.

DEKKER, A.G.; VOS, R.J. & PETERS, S.W.M. Comparison of remote sensing data, model results and *in situ* data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes. *Science of the Total Environment*, v. 268, p. 197-214. 2001.

DENG, M. & LI, Y. Use of SeaWiFS imagery to detect three-dimensional distribution of suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, p. 519-534. 2003.

DOERFFER, R. & FISCHER, J. Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case 2 waters derived from satellite Coastal Zone Color Scanner data with inverse modeling methods. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 7457-7466. 1994.

DOXARAN, D.; FROIDEFOND, J.M.; LAVENDER, S. & CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, v. 81, p. 149-161. 2002.

FERREIRA, A.T.S.; AMARO, V.A.; SANTOS, M.S.T. (submetido - a). Levantamentos geodésicos de precisão para integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. *Revista Brasileira de Cartografia*.

FRANÇA, A.M.C.; COUTINHO, P.N.; & SUMMERHAYERS, C.P. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 6, n. 2, p. 71-88. 1976.

FRANÇA, A.M.C. Geomorfologia da margem continental leste brasileira e da bacia oceânica adjacente. In: GEOMORFOLOGIA DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA E DA BACIA OCEÂNICA ADJACENTES. Rio de Janeiro. PETROBRAS. CENPES. DINTEP, 1979. 177p. (Série Projeto REMAC, n.7), p. 89-127.

- FRANCO, C.G.M. Prognóstico da erosão costeira no litoral setentrional do rio grande do norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. *Revista de Geologia, UFC, Edição Especial HIDROSEMA*, v. 25, p. 37-54. ISSN-0103-2410. 2012.
- GORDON, H.R. & WANG, M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical Thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, v. 33, p. 443-452. 1994.
- GRIGIO, A.M.; SOUTO, M.V.S.; CASTRO, A.F.; AMARO, V.E.; VITAL, H. & DIODATO, M.A. Method of analysis of the coastline evolution based in remote sensing and geographical information system products: Guimarães District Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 42, n.2, p. 412- 421. 2005.
- HALLERMEIER, R.J. Uses for a calculated limit depth of beach erosion. In: PROCEEDINGS 16TH COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, Chapter 88: p. 1493-1512. 1978.
- HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, v. 4, p. 253-277, 1981.
- HAN, Z.; JIN, Y.Q. & YUN, C.X. Suspended sediment concentrations in the Yangtze River estuary retrieved from the MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, p. 4329-4336. 2006.
- HIDROCONSULT. Consultoria, Estudos e Projetos. ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DO ESTUÁRIO E LITORAL ADJACENTE À FOZ DO RIO POTENGI, NATAL - ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. NATAL: Relatórios Finais, v.1-2. 1979.
- HU, C.; CHEN, Z.; CLAYTON, T.D.; SWARZENSKI, P.; BROCK J.C. & MULLER-KARGER, F.E. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, n. 3, p. 423-441. 2004.
- INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). Informações obtidas da página do INMET na internet: Disponível em < www.inmet.gov.br > Acesso: 05 dezembro 2012.
- KIAGE, L.M. & WALKER, N.D. Using NDVI from MODIS to Monitor Duckweed Bloom in Lake Maracaibo, Venezuela. *Water Resource Management*, v. 23, p. 1125-1135. 2008.
- KNOPPERS, B.; EKAU, W. & FIGUEIREDO, A.G. The coast and Shelf of east and northeast Brazil and material transport. *Geo-Mar. Lett.*, v. 19, n. 3, p. 171-178. 1999.
- KOWSMANN, R.O. & COSTA, M.A. Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. PETROBRAS. CENPES. Dintep, 1979. 55 p. (Série Projeto REMAC, n.8).
- LORENZETTI, J. A.; NEGRI, E.; KNOPPERS, B. & MEDEIROS, P.R.P. Uso de imagens landsat como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 2007, 8: 3429-3436.
- MATOS, M.F.A.; FORTES, C.J.; AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F. Análise de Dados a partir de Medições in situ no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte - Brasil. In: CONGRESSO SOBRE PLANEAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, VI 2011, Boa Vista, Cabo Verde. As Zonas Costeiras em Risco. *Anais...* Lisboa: APRH, 2011, p. 73.
- MILLER, R.L.; MCKEE, B.A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 259-266. 2004.
- MIRONGA, J.M. Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing in the management of shallow tropical lakes. *Applied Ecology and Environment Research*, v. 2, p. 83-103. 2004.
- MONTRES-HUGO, M.A.; VERNET, M.; SMITH, R.; CARDERS, K. Phytoplankton size-Structure on the Western Shelf of the Antarctic Peninsula: A Remote Sensing Approach. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 3-4, p. 801-829. 2008.
- MOREL, A.; HUOT, Y.; GENTILI, B.; WERDELL, P.J.; HOOKER, S.B. & FRANZ, B.A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, v. 111, p. 69-88. 2007.
- MUHAIRI, A.A.; GHEDIRA, H.; AL-AHMAD, H.; ALI DAWOOD, A. & AL-MUALLA. M. Exploring the potential of MODIS visible and thermal channels in monitoring and assessing the impact of desalination plant discharges in the Arabian Gulf. *IEEE, IGARSS III*, p. 357-360. 2009.
- NASCIMENTO, M.C. *A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais*. 2009. 229 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. *Secretaria de Planejamento e Coordenação da Presidência da República e IBGE*, Rio de Janeiro, 421p. 1989.
- O'REILLY, J.E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B.G.; SIEGEL, D.A.; CARDER, K.L.; GARVER, S.A.; KAHRU, M. & MCCLAIN, C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 24937-24953. 1998.
- PAPASTERGIADOU, E.S.; RETALIS, A.; APOSTOLAKIS, A. & GEORGIADIS, T.H. Environmental monitoring of spatio-temporal changes using remote sensing and GIS in a Mediterranean Wetland of Northern Greece. *Water Resource Management*, v. 22, p. 579-594. 2008.
- PATTIARATCHI, C.; LAVERY, P.; WYLLIE, A. & HICK, P. Estimates of water quality in coastal waters using multi date Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, p. 1571-1584. 1994.
- RAYNER, N.A.; BROHAN, P.; PARKER, D.E.; FOLLAND, C.K.; KENNEDY, J.J.; VANICEK, M.; ANSELL, T.J. & TETT, S.F.B. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadsST2 dataset. *Journal of Climate*, v. 19, p. 446-469. 2006.
- ROMM, J. Hell and High Waters – Global Warning – The Solutions and the Politics and What We Should Do. New York, William Morrow. 2007. 292 p.
- SANTOS, M.S.T. *Contribuição da Geodésia ao Monitoramento Costeiro do Litoral Setentrional do RN, área da Indústria petrolífera*. 2011. 154 f. Tese de Doutorado, Centro de Ciências

- Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2011.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 17, n. 4, p. 571-585. 2011.
- SANTOS, M.S.T; AMARO, V.A.; FERREIRA, A.T.S; SANTOS, A.L.S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil. *Revista de Geologia*, HIDROSEMA-UFRN, v. 25, p. 7- 19. 2012.
- SCHOTT, F.A.; STRAMMA, L. & FISCHER, J. Transports and pathways of the upper layer circulation in the western tropical Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, p. 1904-1928. 1998.
- SILVA, C.G. *Holocene Stratigraphy and Evolution of the Açu River Delta, Rio Grande do Norte State, Northeastern Brazil*: 1991. 400 f, Unpublished Ph.D. Thesis, Duke University. 1991.
- SKIDMORE, A.K. & TURNER, B.J. Forest mapping accuracies are improved using a supervised nonparametric classifier with Spot data. *Photogram. Engineering & Remote Sensing*, v. 52, p. 397-399. 1988.
- SOLEWICZ, R. *Feições fisiográficas submarinas da Plataforma Continental do Rio Grande do Norte visíveis por imagens de satélite*. 1989. 163 f. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SP. 1989.
- SOUTO, M. V. S. *Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera*. 2009. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.
- STRAMMA, L. & SCHOTT, F.A. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research II*, v. 46, p. 279-303. 1999.
- SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. New York: McGraw-Hill. 1978. 396 p.
- TABOSA, W.F., LIMA, Z.M.C., VITAL, H.; GUEDES, I.M.G. Monitoramento Costeiro das Praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte—NE Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 28, p. 383–392. 2001.
- TABOSA, W.F. & VITAL, H. Hydrodynamic forcings and environmental impacts on the coast and shelf of Sao Bento do Norte—NE Brazil, In: Brebbia, C.A., (Ed), *Environmental Problems in Coastal Regions VI Including Oil Spill Studies*. Wessex Institute of Technology, Cambridge Printing, Great Britain, 2006. p. 165–174.
- TANG, J.; WANG, X.; SONG, Q.; LI, T.; CHEN, J.; HUANG, H. & REN, J. The statistic inversion algorithms of water constituents for the Huanghai Sea and the East Chian Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, v. 23, p. 617–626. 2004.
- TASSAN, S. An improved in-water algorithm for the determination of chlorophyll and suspended sediment concentration from Thematic Mapper data in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, p. 1221–1229. 1993.
- TAVARES JUNIOR, W. *Pesquisa de modelo matemático, para simulação do espectro de energia unidimensional, de ondas de superfície geradas pelo vento (Natal, RN, 05° 45' 02 E 035° 11' 01 W)*. 1979. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1979.
- 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, p. 279-302. 1999.
- TEXEIRA, G.L.G. *Distribuição da temperatura da superfície do mar e dos sedimentos suspensos na plataforma continental capixaba utilizando imagens Landsat5/TM*. 2012. 87 f. Tese de Doutorado, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2012.
- TRONDALEN, M. Climate Changes, Water Security and Possible Remedies for the Middle East. *The United Nations World Water Assessment Programme*, UNESCO, Paris, Report 3, 34p. 2009.
- VELLOZO, T.G. & ALVES, A.R. Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. *Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação*, Tomo LXI, 2006.
- VIANNA, M. L.; SOLEWICZ, R. Feições fisiográficas submarinas da plataforma continental do RN visíveis por imagens de satélite. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, V, 1988, Natal. *Anais...* Natal, 1988. [s.n.], 3: 581-587.
- VIANNA, M. L., SOLEWICZ, R., CABRAL, A. P. Early Holocene stillstands in the Brazilian northeast mapped by satellite. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGES IN SOUTH AMERICA DURING THE QUATERNARY: PAST-PRESENT-FUTURE, 1989, São Paulo. *Annals...* São Paulo, 1989. [s.n.], p. 250-254.
- VITAL, H.; SILVEIRA, M.; AMARO V.E. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira – Área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*. SBGF. V. 23, n. 3, p. 233-241. 2005.
- VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V.E.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E.P.; TABOSA, W.F. Inner continental shelf off Northern Rio Grande do Norte, NE Brazil: A Modern high-energy siliciclastic-carbonate platform. In: Hampson G, Dalrymple R (Eds). *Recent Advances in Shoreline – shelf Stratigraphy. SEPM Special Issue 90*. 2008.
- WANG, M. & SHI, W. Satellite-observed algae blooms in China's Lake Taihu. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, v. 89, p.201–202. 2008.
- WANG, L.; ZHAO, D.; YANG, J. & CHEN, Y. Retrieval of total suspended matter from MODIS 250 m imagery in the Bohai Sea of China. *Journal of Oceanography*, v. 68, p. 719–725. 2012.
- WOLTER, K. & TIMLIN, M.S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. In: PROCEEDINGS OF THE 17TH CLIMATE DIAGNOSTICS WORKSHOP, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, p. 52-57. 1993.
- WOLTER, K. & TIMLIN, M.S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology*, v. 31, p. 1074-1087. 2011.
- ZHANG, Y.; LIN, S.; JIANPING, L.; QIAN, X. & GE, Y. Time-series MODIS Image-based Retrieval and Distribution Analysis of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 7, p. 3545-3560. 2010.