ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento

Cláudio Ângelo da Silva Neto¹, Cynthia Romariz Duarte², Michael Vandesteen Silva Souto³, Eduardo Viana Freires⁴, Willamys Rangel Nunes de Sousa⁴, Maykon Targino da Silva⁴

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. claudioasn@gmail.com (autor correspondente); ² Docente do Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará. cynthia.romariz@ufc.br; ³ Docente do Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. michael.souto@geologia.ufrn.br; ⁴ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. eduardovgeo@gmail.com, rangelnunes@gmail.com, maykontargino@gmail.com.

Artigo recebido em 12/09/2019 e aceito em 18/12/2019

RESUMO

A importância das zonas costeiras implica na necessidade de contínuos estudos relacionados ao monitoramento de seus processos. Neste contexto, a linha de costa representa uma das feições mais dinâmicas, e sua variabilidade é um indicador da erosão ou deposição costeira. A fim de avaliar as tendências de mudança da linha de costa do município de Icapuí, localizado no extremo leste do estado do Ceará, este trabalho envolveu a utilização de imagens orbitais do satélite Landsat, compondo uma série temporal de 30 anos com intervalos de cinco anos entre cada cena. Foram aplicados o Método de Mudança do Polígono e o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) na caracterização da linha de costa, quantificando suas taxas de variação e balanço em área. A área total foi setorizada em quatro porções, utilizando a morfologia costeira como critério de segmentação. Os resultados indicaram a existência de três hotspots de erosão e deposição, relacionados à desembocadura do riacho Arrombado, no setor leste; à desembocadura do estuário Barra Grande, que separa os setores centrais leste e oeste; e ao promontório de Ponta Grossa, que condiciona uma inflexão da linha de costa no setor oeste. Cada um destes setores apresenta dinâmica de deposição a barlar e erosão a sotamar, com destaque para os processos acentuados de retrogradação entre as praias de Barreiras de Baixo e Barrinhas, no setor central oeste, e a forte dinâmica deposicional da praia de Ponta Grossa, no setor oeste.

Palavras-chave: erosão costeira; variação da linha de costa; análise temporal.

Identification of the erosive and depositional sectors of the Icapuí (CE) shoreline based on remote sensing products and geoprocessing techniques

ABSTRACT

The importance of coastal zones implies the need for continuous studies related to the monitoring of their processes. In this context, the shoreline represents one of the most dynamic features, and its variability is an indicator of erosion or coastal deposition. In order to evaluate the changing trends of the coast of the Icapuí city, located in the far east of the state of Ceará, this work involved the use of Landsat satellite orbital images, composing a 30-year time series with five-year intervals between each scene. The Polygon Change Method and the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) were applied to characterize the shoreline, quantifying its variation rates and sedimentary balance in area. The total area was divided into four portions, using coastal morphology as a segmentation criterion. The results indicated the existence of three erosion and deposition hotspots, related to the Arrombado stream inlet, in the eastern sector; the Barra Grande estuary inlet, which separates the central east and west sectors; and the Ponta Grossa promontory, which conditions a shoreline inflection in the western sector. Each of these sectors has a deposition dynamic to updrift and erosion to downdrift, with prominence to the accentuated processes of retrogradation between the Barreiras de Baixo and Barrinhas beaches, in the central west sector, and the strong depositional dynamics of Ponta Grossa beach, in the west sector.

Keywords: coastal erosion; shoreline change; temporal analysis.

Introdução

As zonas costeiras apresentam grande importância para a sociedade pois, embora

compreendam menos de 0,1% das massas continentais combinadas, concentram mais da metade da população mundial, muito devido aos

inúmeros benefícios à população como acesso facilitado à navegação, pesca, turismo e atividades de lazer. Tratam-se de áreas com uma grande diversidade de feições, como falésias, praias, dunas, estuários lagunas e deltas (Davis Jr e FitzGerald, 2004; Bird, 2008). Tais ambientes são muito dinâmicos e sensíveis às interferências e variações provocadas por inúmeros agentes naturais e antrópicos, alterando suas feições em diferentes escalas temporais, desde eventos episódicos – como tempestades – a processos cíclicos e tendências em longo prazo (Trenhaile, 1997).

Devido às profundas consequências sociais e econômicas que a dinâmica costeira – em especial os seus efeitos erosivos – pode causar, estudos relacionados a seus processos têm se intensificado. Neste contexto, a linha de costa é uma das feições que mudam mais rapidamente em áreas costeiras. Ao longo de um período de 100 anos, sua posição tem o potencial de variar centenas de metros ou mais (Komar, 1998). Portanto, a determinação dos padrões de modificação na largura e volume de praias, além da quantificação de taxas de variação da linha de costa, são importantes para formular políticas de gerenciamento costeiro (Moore, 2000; Araujo, 2008).

A erosão costeira é um problema global, principalmente quando se trata dos efeitos lesivos sobre as atividades antrópicas instaladas na zona costeira (Souto, 2009; Boori e Amaro, 2010; Boori e Amaro, 2011). Muehe (2006) destaca que, no Brasil, os segmentos de linha de costa sob efeito de erosão predominam em relação aos trechos em processo de progradação.

O aumento do nível do mar e os impactos ambientais negativos causados pelas atividades humanas agravam a problemática. Conforme relatado por IPCC (2018), a elevação do nível do mar tem sido considerado um dos principais fatores condicionantes da erosão costeira. Projeções baseadas em modelos de variação do nível relativo do mar sugerem um aumento entre 0,26 m e 0,77 m até 2100. Neste contexto, instituições de pesquisa, organizações de gestão da zona costeira e departamentos locais em áreas costeiras têm focado suas atenções na erosão costeira e prevenção de desastres (Cai et al., 2009). Para dar suporte a estudos que visam monitorar os processos de erosão costeira, faz-se necessário o emprego de bases de dados eficientes, que possibilitem a criação de modelos matemáticos precisos, permitindo quantificar e calcular a taxa de erosão em um dado período de tempo, de forma mais eficiente e rápida (Sousa et al., 2017).

Estudos relacionados ao mapeamento e monitoramento de zonas costeiras com base em

dados de sensoriamento remoto multitemporais têm sido amplamente realizados em várias partes do mundo (Green et al., 2000; Guo et al., 2016). Em complemento, Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) têm tido sucesso em analisar mudanças na linha de costa, utilizando desde simples até complexas ferramentas de modelagem e análise. Para avaliação e monitoramento da erosão costeira, imagens de satélites são úteis na extração de linhas de costa, e SIGs têm sido usados exaustivamente para criar mapas temporais de sobreposição de linhas de costa para detectar e visualizar mudanças ao longo do tempo (Chowdhury e Tripathi, 2013).

No Brasil, o sensoriamento remoto, em conjunto com SIGs, têm sido sistematicamente utilizados em estudos relacionados ao ambiente costeiro, em especial na porção setentrional do litoral nordestino, vide os trabalhos de Souto et al. (2006), Souto (2009), Santos et al. (2011), Santos e Amaro (2013), Castro et al., (2016) e Maia (2017). O uso dessas geotecnologias, associado à variedade de imagens de sensores orbitais disponíveis, tem sido essencial aos estudos de ambientes costeiros devido à sua capacidade de registrar as suas mudanças ao longo do tempo recente, promovendo uma maior compreensão dos processos que envolvem a sua dinâmica.

A demarcação acurada e o monitoramento da linha de costa ao longo de tempo curto e longo é necessário para entender processos costeiros (Chowdhury e Tripathi, 2013). Técnicas de sensoriamento remoto são usadas para investigar mudanças nas regiões costeiras devido às suas propriedades favoráveis, como baixo custo e alta eficiência. Além disso, a aquisição repetitiva de imagens de sensores remotos, gerando séries temporais, pode ser explorada para fornecer dados espaciais, compondo um banco de dados adequado para modelagem de cenários e prognósticos (Liu, 2011; Guimarães et al., 2014).

Diante do exposto, o presente trabalho visa caracterizar os setores mais dinâmicos da linha de costa do município de Icapuí (CE) através de séries temporais de imagens orbitais e técnicas de geoprocessamento, identificando seus *hotspots* erosivos e deposicionais.

Caracterização da área de estudo

A área de estudo é o litoral do município de Icapuí, localizado no extremo leste do estado do Ceará (Figura 1), distante cerca de 190 km da sua capital, Fortaleza, fazendo fronteira com os municípios de Aracati (CE) e Tibau (RN).

O município possui uma linha de costa com aproximadamente 45 km de extensão,

representando um dos mais complexos sistemas ambientais da zona costeira do Ceará. Seu litoral sofre influência do transporte eólico e da dinâmica costeira, que são responsáveis por variações na taxa de erosão e deposição sedimentar, promovendo mudanças no fluxo de canais de marés e variações

de balanço sedimentar da linha de costa pela interação entre aporte sedimentar e espaço de acomodação, dando origem a processos de progradação e retrogradação da linha de costa (Santos et al., 2011; Amaro et al., 2012; Damasceno et al., 2014).

Figura 1. Mapa de localização do município de Icapuí (CE).

Meireles (2012) e Souza (2016) citam a ocupação desordenada de zonas de berma e *by-pass* de sedimentos como sendo os principais agentes responsáveis por potencializar os efeitos da erosão costeira nas áreas citadas. Além dos fatores e processos naturais já citados, variações nos comportamentos climáticos, os processos oceanográficos e costeiros, a fisiografia da linha de costa e feições como estuários e promontórios podem contribuir para as variações da linha de costa de Icapuí (Souza, 2016).

Meireles et al. (2006) apontam a existência de um delta de maré vazante defronte a

desembocadura do estuário Barra Grande, no setor central do litoral de Icapuí. Este sistema constitui uma extensa planície de até dois quilômetros de distância da linha de costa, expondo bancos de areia e canais de maré durante a baixa-mar. Segundo Souza (2016), esta estrutura regula localmente a dinâmica das ondas e balanço de sedimentos entre a planície de maré, faixa de praia e plataforma continental, sendo um possível contribuinte para o balanço sedimentar negativo das praias a sotamar, pois causaria a retenção de sedimentos em deriva provenientes de barlamar e do estuário Barra Grande.

A fim de minimizar os impactos causados pela erosão costeira, em especial nas praias de Barreiras de Baixo e Barrinha – localizadas a sotamar da desembocadura estuarina – em 2011 foi instalado um muro de contenção, do tipo enrocamento. Esta obra favoreceu localmente os

efeitos erosivos imediatamente a sotamar (Figura 2), pois apesar da proteção que passou a exercer ela também teve um efeito de captura e retenção de sedimentos, aumentando ainda mais o déficit nas praias adjacentes (Barros, 2018).

Figura 2. Erosão concentrada a sotamar da estrutura de contenção construída.

Material e métodos

A metodologia proposta se baseou na identificação dos setores mais dinâmicos do litoral do município de Icapuí através da utilização de

produtos multitemporais de sensores remotos óticos, sobretudo os que sofrem influência da erosão costeira. O fluxograma da Figura 3 sintetiza as etapas desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 3. Fluxograma com resumo da metodologia executada.

Aquisição de dados

A fim de avaliar a tendência erosiva ou deposicional ao longo da linha de costa da área de estudo e quantificar em área o balanço sedimentar foi realizada uma análise temporal utilizando imagens orbitais da série Landsat com resolução espacial de 30 metros (órbita/ponto 216/063), compondo intervalos de cinco anos entre cada cena (Tabela 1).

Tabela 1. Imagens orbitais utilizadas na caracterização da linha de costa.

Data	Satélite	Sensor
23/09/1988	Landsat 5	TM
04/08/1993	Landsat 5	TM
19/09/1998	Landsat 5	TM
01/09/2003	Landsat 5	TM
14/09/2008	Landsat 5	TM
12/09/2013	Landsat 8	OLI
10/09/2018	Landsat 8	OLI

Processamento

As imagens orbitais passaram por etapa de pré-processamento para correções atmosférica e geométrica. Posteriormente, técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) – como o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) e realces no histograma – foram aplicadas a fim de ressaltar o contraste terra-água, facilitando a identificação da linha de costa e sua vetorização.

Posteriormente, técnicas de quantificação foram utilizadas para avaliar a mobilidade na linha de costa. Neste contexto, foram empregados o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) e o Método de Mudança do Polígono na caracterização da modificação da linha de costa.

O DSAS é uma extensão do *software* ArcGIS que quantifica e analisa a evolução do processo de erosão ou deposição costeira (Figura 4). O método consiste na geração de transectos ao longo da linha de costa, calculando taxas anuais de variação expressas de acordo com diferentes métodos estatísticos de análise (Himmelstoss et al., 2018). O método foi aplicado por Farias e Maia (2010) em vários segmentos do litoral do Ceará, identificando modificações na linha de costa e taxas de erosão e progradação associadas. A técnica já é amplamente difundida para estudos desta natureza no Brasil, cabendo citar os trabalhos de Araujo (2008), Marino e Freire (2013), Santos e Amaro (2013), além de Souza (2016) e Barros (2018). Estes dois últimos também aplicaram o DSAS em setores da linha de costa de Icapuí.

Figura 4. Representação dos dados necessários para calcular a variação temporal da linha de costa no DSAS (adaptado de Himmelstoss et al., 2018).

Neste trabalho, dentre os métodos estatísticos disponibilizados pela ferramenta, foi adotado o *End Point Rate* (EPR), cuja taxa de variação anual é calculada dividindo a distância entre as linhas de costa mais antiga e mais recente pelo tempo total decorrido entre esta movimentação em cada transecto. Trata-se de um método simples e que pode fornecer indícios à interpretação dos processos costeiros existentes na área e servir como parâmetros para prognósticos.

Levando em conta a precisão gráfica da vetorização a partir de uma imagem da série Landsat, um erro mínimo de um pixel resultaria em

uma escala apropriada para vetorização de até 1:150.000. Como o referencial de linha de costa adotado neste trabalho é uma feição de alta frequência, ela acaba sendo visível nas imagens. Porém, variações de maré em relação ao horário de imageamento, em particular em uma planície de maré tão extensa e heterogênea em determinadas porções, pode tornar esta identificação mais difícil, podendo acarretar em interpretações errôneas da linha de costa. Deste modo, neste trabalho foi adotada como referencial de equilíbrio da linha de costa uma variação anual entre -1 e +1 metro, minimizando estas problemáticas. Este intervalo de

dois metros foi replicado para determinar as seguintes classes aos transectos: deposição severa (maior que +3 m/ano); deposição (entre +3 e +1 m/ano); erosão (entre -1 e -3 m/ano); e erosão severa (menor que -3 m/ano).

A fim de promover uma melhor visualização destas porções, a aplicação do DSAS envolveu a geração de transectos com espaçamento de 10 metros – gerando um adensamento das informações da variação da linha de costa – cuja posterior simbologia em mapas temáticos facilitou a identificação dos setores mais dinâmicos.

Outra técnica aplicada neste trabalho para medir as variações da linha de costa é o Método de Mudança de Polígonos (Smith e Cromley, 2012), que considera as áreas, em vez de valores pontuais, para calcular os percentuais de erosão ou deposição. Este método usa duas linhas de costa de períodos diferentes para a avaliação e quantificação das áreas de erosão e deposição.

Integração e análise

Todos os dados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho foram consolidados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para fins de análise e geração de mapas temáticos. Estes produtos possibilitaram a identificação dos setores críticos em termos de erosão ou deposição ao longo da linha de costa de Icapuí.

A geração de todos estes produtos possibilitou a discussão acerca dos processos que atuam ao longo da linha de costa de Icapuí, além dos fatores que influenciam uma maior dinâmica nos trechos críticos, em especial em relação aos canais de maré existentes na área.

Estado da arte

Trabalhos recentes efetuados na área de estudo (e.g. Ximenes et al., 2013; Damasceno et al., 2014; Portela et al., 2014; Fernandes et al., 2015; Souza, 2016; e Barros, 2018) indicam que a área passa por fortes modificações da linha de costa em curtos intervalos de tempos, promovidos por uma série de variáveis naturais e antrópicas. Em geral, os estudos op. cit. aplicaram o DSAS ou o Método de Mudança de Polígono na avaliação da variação da linha de costa de Icapuí em setores restritos, com exceção de Souza (2016).

Ximenes et al. (2013), Portela et al. (2014) e Fernandes et al. (2015) focaram seus estudos na porção da linha de costa entre as praias de Retiro Grande e Redonda, em setor mais a noroeste do

município. Já Damasceno et al. (2014) analisaram o setor de linha de costa a leste da desembocadura do estuário Barra Grande. Tais estudos se concentraram em áreas onde ocorre predominância dos processos deposicionais, não permitindo uma análise integrada de toda a linha de costa.

Utilizando imagens de satélite e perfis praias, Barros (2018) realizou o monitoramento de alguns setores de Icapuí com conhecida tendência erosiva, aplicando o DSAS no trecho de linha de costa compreendido entre as praias de Barrinha e Barreiras de Baixo, limitando-se a avaliar a variação deste setor entre os anos de 2002 e 2016. Seu estudo utilizou imagens orbitais multifonte de diferentes resoluções espaciais e com intervalos irregulares.

Embora tenha aplicado o DSAS ao longo de toda a linha de costa de Icapuí, Souza (2016) também utilizou uma série temporal irregular – entre os anos de 1987 e 2014 – com intervalos de até 14 anos entre imagens. Além disso, utilizou produtos oriundos de diversas fontes e resoluções espaciais, justificando sua escolha na necessidade de grande nível de detalhe para destacar a evolução de uma linha de costa. A ausência de um intervalo regular entre as imagens analisadas pode influenciar em conclusões menos acuradas, pois a sazonalidade da influência dos processos costeiros pode ser mascarada nos resultados, além de prejudicar eventuais prognósticos de posição da linha de costa. Outro aspecto metodológico da aplicação feita por esta autora foi o estabelecimento de intervalos de 500 metros entre os transectos. Tal espaçamento pode gerar na perda de importantes dados contínuos da linha de costa em análise.

Percebendo a necessidade de um estudo que permita o resgate histórico da mobilidade da linha de costa em toda a extensão da linha de costa de Icapuí com intervalos fixos e com menor variação temporal entre as imagens orbitais analisadas, este trabalho buscou evidenciar os setores da linha de costa com maiores taxas anuais de erosão e deposição em um espectro temporal maior – entre os anos de 1988 e 2018 – utilizando intervalos fixos de cinco anos, conforme previamente apresentado na Tabela 1.

Resultados e discussão

Para este trabalho foi considerada a setorização da área de estudo, a fim de promover uma melhor interpretação dos processos de erosão e deposição ao longo da costa de Icapuí. Deste modo, é possível entender de forma isolada cada

setor e fazer correlações entre eles, avaliando os eventuais efeitos que uma porção a barlamar pode exercer em outra a sotamar.

A morfologia costeira foi utilizada como critério de segmentação da área de estudo em quatro setores, levando em consideração a

orientação da linha de costa e a existência da desembocadura estuarina relacionada ao delta de maré vazante na porção central do litoral de Icapuí (Figura 5).

Figura 5. Localização dos quatro setores propostos para avaliação dos métodos quantitativos e qualitativos.

Aplicação do DSAS

Ao gerar transectos com 10 metros de espaçamento e utilizar recursos de simbologia do ArcGIS foi possível gerar gráficos (Figura 6) e

mapas (Figura 7) temáticos classificando as taxas de variação anual da linha de costa de cada setor analisando, subsidiando a caracterização da dinâmica atuante na área.

Figura 6. Visualização das taxas de variação da linha da costa, de oeste para leste, evidenciando as três porções mais dinâmicas da área.

Através do gráfico em questão foi possível avaliar que a maior parte da linha de costa está em equilíbrio, levando em consideração os critérios adotados para estabelecer esta qualificação, com algumas porções mais destacadas em termos de condições mais erosivas ou deposicionais. De modo geral, tais regiões estão localizadas nas proximidades em que a linha de costa apresenta

importantes variações morfológicas, a destacar três feições em particular, de leste para oeste: (1) a desembocadura do riacho Arrombado, no setor leste; (2) a desembocadura estuarina que separa os setores centrais leste e oeste; e (3) o promontório de Ponta Grossa, que condiciona uma inflexão da linha de costa no setor oeste.

Figura 7. Espacialização dos transectos gerados ao longo da linha de costa e suas taxas anuais de variação, classificando-as em função do EPR.

Iniciando pelo setor leste, ele apresenta uma relativa estabilidade em praticamente toda a

área, excetuando a dinâmica condicionada pela desembocadura do Riacho Arrombado.

Visivelmente, percebe-se no mapa temático a acreção lateral da barra adjacente a barlar da desembocadura e erosão da porção a sotamar ao longo do período de análise, migrando o canal da desembocadura conforme o sentido da deriva litorânea. Esta dinâmica parece não influenciar diretamente os processos erosivos mais proeminentes em Icapuí, sendo a relativa estabilidade da área relacionada ao baixo ângulo de incidência das ondas na linha de costa, além do menor desenvolvimento de planície de maré.

Souza (2016) reforça que a orientação da linha de costa neste setor e sua relação com a incidência das ondas promove a fixação de dunas frontais, o que manteria a relativa estabilidade desta porção.

O setor central-leste está localizado a barlar da desembocadura estuarina da planície costeira de Icapuí. Conforme aumenta a proximidade com esta feição morfológica e seus canais de maré, ocorre um *hotspot* deposicional relacionado à acreção lateral de uma sequência de barras arenosas, limitadas a oeste pelo canal de maré principal.

O setor central-oeste está localizado a sotamar dos canais de maré da planície costeira. Em geral, trata-se de um setor em equilíbrio, com exceção de um *hotspot* erosivo situado entre as praias de Barreiras de Cima e Barrinhas. Estes resultados reforçam as avaliações recentes de Souza (2016) e Barros (2018), que também aplicaram o método do DSAS caracterizaram fortes tendências erosivas nestas posições da linha de costa de Icapuí.

O último setor analisado é a porção oeste da linha de costa de Icapuí, limitada a oeste pelo promontório de Ponta Grossa. É nesta região que estão concentradas as maiores taxas de variação da linha de costa no município, especialmente com uma dinâmica deposicional adjacente às falésias da praia de Ponta Grossa. Barlar a esta porção, está a praia de Retiro Grande, cujas taxas de variação da linha de costa indicaram tendências fortemente erosivas, possivelmente em função da severa deposição em Ponta Grossa, gerando um déficit de sedimentos a sotamar e, consequentemente, promovendo a erosão até o alcance de uma nova condição de equilíbrio do ambiente.

Aplicação do Método de Mudança do Polígono

Ao quantificar em área o balanço sedimentar de cada um dos setores é possível

avaliar a possível influência entre eles. Em uma visão geral, percebe-se que os mesmos *hotspots* erosivos e deposicionais previamente caracterizados com o DSAS também foram identificados visualmente com esta aplicação (Figura 8). Como forma de análise, novamente cada setor foi analisado individualmente, apresentando gráficos de balanço sedimentar em área para os intervalos de anos em conjunto com uma linha de tendência polinomial de segunda ordem. Posteriormente, seguirá discussão integrando e interpretando todos as áreas e processos identificados.

O setor leste apresenta uma certa sazonalidade na variação nos últimos anos, com intercalação periódica entre perdas e incrementos em área na costa. De modo geral, o balanço sedimentar em área é levemente positivo, em função da dinâmica de acreção e erosão lateral condicionada pela migração lateral da desembocadura do Riacho Arrombado de sudeste para noroeste, coincidindo com o sentido da deriva litorânea.

O setor central-leste também apresenta uma certa sazonalidade na predominância de processos erosivos e deposicionais. Porém, o balanço sedimentar que prevalece é fortemente positivo, influenciado pela grande acreção lateral de barras arenosas a barlar dos canais de maré da planície costeira.

A sotamar dos canais de maré está o setor central oeste, cujos resultados também foram bem similares aos da aplicação do DSAS, reforçando o caráter de erosão costeira mais expressiva nas praias mais próximas a este trecho, com destaque para Barrinhas de Cima e Barreiras, como previamente citado.

Em geral, a dinâmica é predominantemente erosiva neste setor, com exceção de um dos períodos quantificados. Como este método trabalha com números absolutos, eventuais porções que apresentaram dificuldades na interpretação da linha de costa – como variação de maré em uma praia de baixo gradiente batimétrico, ou ainda baixo contraste entre as porções seca e úmida no ambiente praial – podem gerar discrepâncias como essas nos resultados, podendo ser uma explicação deste comportamento anômalo no período entre 1998 e 2003).

Figura 8. Aplicação do Método de Mudança do Polígono ao longo da linha de costa de Icapuí e balanço sedimentar intervalar e acumulado para cada setor analisado.

Por fim, o setor oeste é o que apresenta as maiores variações em erosão e deposição, sendo que os processos acrecionários se concentram na forma de crescimentos de barras arenosas anexadas ao promontório de Ponta Grossa e, a sotamar, predomina o processo erosivo da linha de costa,

possivelmente condicionado pela intensa captura de sedimentos a barlar, afetando a praia de Retiro Grande. De modo geral, o balanço sedimentar é fortemente positivo, e apresenta tendência de continuidade até o futuro alcance de um novo estado de equilíbrio deste setor.

Considerações finais

O baixo custo e alta eficiência da aquisição repetitiva de imagens de sensores remotos possibilita o monitoramento contínuo da dinâmica costeira. Dessa maneira, com base no resgate histórico de 30 anos da posição da linha de costa de Icapuí, foi possível determinar taxas de variação e quantificar em área o balanço sedimentar na região, identificando os hotspots erosivos e deposicionais. Cabe enfatizar que, para a área em estudo, até o presente momento esta é a série temporal mais extensa existente. Além disso, o intervalo fixo de cinco anos pode subsidiar a geração de prognósticos de posições futuras da linha de costa a partir das taxas de variação obtidas.

Este trabalho reforçou o conhecimento a respeito dos focos erosivos no município, em especial no setor central oeste, onde foi possível detectar retrogradação contínua entre as praias de Barreiras de Baixo e Barrinha, localizadas a sotamar da desembocadura do estuário Barra Grande, que possivelmente exerce influência na retenção de sedimentos e gerando déficit nestas porções da linha de costa, assim como o delta de maré vazante. Neste contexto, a fim de promover um melhor entendimento sobre a dinâmica existente nestas áreas, sugere-se o modelamento hidrodinâmico ao longo de toda sua superfície, além da geração de um modelo digital de terreno mais acurado e identificação de vetores prevaletentes de transporte sedimentar.

As técnicas aqui apresentadas foram satisfatórias para geração dos dados que subsidiaram as posteriores interpretações, apesar da média resolução espacial dos produtos oriundos da série Landsat. O advento de novos sensores, com maiores resoluções espaciais e temporais, pode aprimorar o contínuo monitoramento costeiro na área em estudo ou demais contextos litorâneos, aplicando a metodologia executada e obtendo um melhor entendimento dos processos atuantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Geologia, o Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará pela estrutura fornecida para a realização deste trabalho, além da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq) pela concessão de bolsa de pesquisa sob o processo nº 134165/2019-5.

Referências

- Amaro, V.E., Santos, M.S.T., Souto, M.V.S., 2012. Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão. 1 ed., Natal.
- Araujo, R.S., 2008. Morfologia do Perfil Praia, Sedimentologia e Evolução Histórica da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói – SC. Dissertação (Mestrado). Itajaí, UNIVALI.
- Barros, E.L., 2018. Erosão costeira no litoral do município de Icapuí-Ce na última década: causas, consequências e perspectivas futuras. Tese (Doutorado). Fortaleza, UFC.
- Bird, E.C.F., 2008. Coastal Geomorphology: an Introduction. Wiley, West Sussex.
- Boori, M.S., Amaro, V.E., 2010. Detecting and Understanding Drivers of Natural and Ecoenvironmental Vulnerability Due to Hydro Geophysical Parameters, Ecosystem and Land Use Change Through Multispectral Satellite Data Sets in Apodi estuarine, Northeast Brazil. International Journal of Environmental Sciences 2, 125-139.
- Boori, M.S., Amaro, V.E., 2011. Natural and Ecoenvironmental Vulnerability Assessment Through multi-temporal Satellite Data Sets in Apodi Valley Region, Northeast Brazil. Journal of Geography and Regional Planning 4, 4, 216-230.
- Cai, F., Su, X., Liu, J., Li, B., Lei, G., 2009. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. Progress in Natural Science, 19, 4, 415-426.
- Castro, A.F., Souto, M.V.S., Amaro, V.E., Vital, H., 2016. Desenvolvimento e aplicação de um banco de dados geográficos na elaboração de mapas da morfodinâmica costeira e sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo em áreas costeiras localizadas no estado do Rio Grande do Norte. Revista Brasileira de Geociências 33, 2, 53-64.
- Chowdhury, S.R., Tripathi, N.K., 2013. Coastal erosion and accretion in Pak Phanang, Thailand by GIS analysis of maps and satellite imagery. Songklanakarin Journal of Science & Technology 35, 6, 739-748.
- Damasceno, A.M., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., 2014. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na análise multitemporal da linha de costa região de Icapuí (CE), entre 1984 e 2013. Revista Geonorte 10, 1, 52-58.

- Davis Jr, R. Fitzgerald, D., 2004. *Beaches and Coasts*. Blackwell Publishing, Malden.
- Farias, E.G.G., Maia, L.P., 2010. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para a Análise da Evolução da Linha de Costa em Ambientes Litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 10, 4, 521-544.
- Fernandes, L.R., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., Amaro, V.E. 2015. Análise temporal em curto tempo das barras arenosas na praia de Ponta Grossa, região costeira de Icapuí/CE. *In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Anais*, 5356-5362.
- Green, E., Mumby, P., Edwards, A., Clark, C., 2000. *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. UNESCO.
- Guimarães, U.S., Rodrigues, T.W.P., Galo, M.D.L.B.T., Pamplona, V.M.S., 2014. Change Detection Applied on Shorelines in the Mouth of Amazon River. *In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anais*, 2146-2149.
- Guo, Q., Ruiliang P., Bing Z., Lianru G., 2016. A Comparative Study of Coastline Changes at Tampa Bay and Xiangshan Harbor During the Last 30 years. *In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anais*, 5185-5188.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S., 2018. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report*.
- IPCC, 2018. Summary for Policymakers. *In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland*.
- Komar, P., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. 2 ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Liu, X., 2011. The coastal erosion of the abandoned Yellow River Delta in northern Jiangsu province, China: Based on analysis of remote sensing images. *In: 19th International Conference on IEEE. Anais*, 1-5.
- Maia, A.O., 2017. *Reconstrução ambiental e evolução sedimentar da região costeira de Icapuí/CE por meio de processamento digital de imagens e análise de fácies. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC*.
- Marino, M.T.R.D., Freire, G.S.S., 2013. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 13, 1, 113-129.
- Meireles, A.J.A., 2012. *Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais. Edições UFC, Fortaleza*.
- Meireles, A.J.A., Raventos, J.S., Thiers, P.R.L., 2006. Aspectos geodinâmicos do delta de maré da planície costeira de Icapuí/CE. *In: Silva, J.B., Dantas, E.W.C., Zanella, M.E., Meireles, A.J.A. (Org.). Litoral e Sertão: natureza e sociedade no nordeste brasileiro. Expressão Gráfica, Fortaleza*.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline Mapping Techniques. *Journal of Coastal Research* 16, 1, 111-124.
- Muehe, D., 2006. *Erosão e progradação no litoral brasileiro. MMA, Brasília*.
- Portela, J.P., Freire, G.S.S., Moraes, M.V.A.R., Silva, C.A., 2014. Evolução da morfologia costeira do litoral oeste de Icapuí – CE. *Revista Geonorte* 5, 15, 89-93.
- Santos, M.S.T., Amaro, V.E., Souto, M.V.S., 2011. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. *Revista Brasileira de Cartografia (Impresso)* 63, 663-681.
- Santos, M.S.T., Amaro, V.E., 2013. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 14, 2, 151-162.
- Smith, M.J., Cromley, R.G., 2012. Measuring historical coastal change using GIS and the change polygon approach. *Transactions in GIS* 16, 1, 3-15.
- Sousa, W.R.N, Souto, M.V.S., Matos, S.S., Silva Neto, C.A., Duarte, C.R., 2017. Extração automática de linhas de costa aplicada a o monitoramento de processos de erosão costeira. *In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais*, 6423-6429.
- Souza, W.F., 2016. *Sensoriamento remoto e SIG aplicados à análise da evolução espaço-temporal da linha de costa do município de Icapuí, Ceará - Brasil. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC*.
- Souto, M.V.S., Castro, A.F., Grigio, A.M., Amaro, V.E., Vital, H., 2006. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão,

- city of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. *Journal of Coastal Research, Special Issue 39*, 3, 1618-1621.
- Souto, M.V.S., 2009. *Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera*. Tese (Doutorado). Natal, UFRN.
- Trenhaile, A., 1997. *Coastal dynamics and landforms*. Clarendon Press, Oxford.
- Ximenes, D.R.B., Souto, M.V.S., Duarte, C.R., 2013. Análise multitemporal da linha de costa para avaliação da evolução costeira na região de Icapuí/CE, Nordeste brasileiro, no período de 1984 a 2011. *In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Anais*, 1618-1625.