

Erosão costeira e faixas de proteção no delta do rio São Francisco

Coastal erosion and setback lines in the São Francisco river delta

Iaggo Oliveira Correia^{ac}, Ana Cláudia da Silva Andrade^{bd}, Paulo Sérgio de Rezende Nascimento^{be}

^aPrograma de Pós-graduação em Geociências e Análise de Bacias, Universidade Federal de Sergipe, ^bPrograma de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias – PGAB da Universidade Federal de Sergipe
^ciaggocorreia@gmail.com, ^dacsaa@academico.ufs.br, ^epsrn.geologia@gmail.com

Resumo

A erosão costeira destruiu o povoado do Cabeço, no lado sergipano do delta do rio São Francisco. Para evitar danos similares no futuro, recomenda-se implementar as faixas de proteção costeira, que delimitam distâncias seguras para a ocupação humana entre a linha de costa e o continente. Este trabalho objetivou determinar tais faixas para o delta do rio São Francisco. Foram utilizados registros da vazão fluvial e imagens de satélites de 1986 a 2017 para compreender e quantificar as taxas de variação da linha de costa. As taxas mais extremas de recuo foram utilizadas para calcular as larguras das faixas de proteção costeira a partir da linha de costa de 2017 para o ano de 2037, junto ao critério de que toda faixa localizada sobre unidades de conservação ou ecossistêmicas fosse recuada aos limites internos das unidades. De 1986 a 2017, a vazão fluvial média diminuiu em 24% e contribuiu para o aumento de 32% de trechos em recuo na linha de costa. A taxa mais extrema de recuo do lado alagoano do delta foi de $-55,23 \pm 4,7$ m/ano, enquanto no lado sergipano foi de $-153,13 \pm 0,11$ m/ano. As faixas para 2037 utilizaram o cálculo numérico (largura de 3.062 m no lado sergipano) e o critério de recuo ao limite interno da APA de Piaçabuçu (lado alagoano), visando minimizar ou evitar riscos socioeconômicos ao recuo costeiro e incentivar a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Balanço sedimentar; Vazão fluvial; Sustentabilidade ambiental.

Abstract

Coastal erosion destroyed the village of Cabeço, on the Sergipe side of the São Francisco river delta. To avoid similar damage in the future, it is recommended to implement setback lines, which delimit safe distances for human occupation between the coastline and the mainland. This work aimed to determine the setback lines for the São Francisco river delta. Records of river flow and satellite images from 1986 to 2017 were used to understand and quantify the rates of variation of the coastline. The most erosive values were used to calculate the widths of setback lines from the 2017 coastline to the year 2037, along with the criterion that any strip located on conservation of ecosystem units should be retreated to the internal limits of the units. From 1986 to 2017, the average river flow decreased by 24% and contributed to the 32% increase in stretches of the coastline in coastal erosion. The most erosive rate on the Alagoas side of the delta was -55.23 ± 4.7 m/year, while on the Sergipe side it was -153.13 ± 0.11 m/year. The setback lines for 2037 used the numerical calculation (width of 3,062 m on the Sergipe side) and the criterion of retreat to the internal limit of the Piaçabuçu APA (Alagoas side), aiming to minimize or avoid socioeconomic risks to coastal erosion and encourage environmental sustainability.

Keywords: Remote sensing; Sedimentary budget; River flow; Environmental sustainability.

1. Introdução

A zona costeira consiste na transição entre o ar, a terra e o mar, e se estende até onde os processos oceânicos são influentes nas porções terrestre e marinha adjacentes (Garrison 2010). A linha de costa, limite entre o continente e o oceano, está sujeita à modificação no seu posicionamento. A variabilidade se deve aos fatores naturais, como elevação do nível do mar e eventos de tempestades, e/ou antrópicos, a exemplo da construção de barragens ao longo dos rios (Bird 2008, IPCC 2018). Os fatores naturais e antrópicos interferem no resultado final entre o volume de entrada e saída de sedimentos do sistema (balanço sedimentar). Dessa forma, a linha de costa pode progradar (acrecção), recuar/retrogradar (erosão) ou manter-se estável (Esteves & Finkl 1998; Muehe 2004; Bird 2008; Luijendijk et al. 2018).

Apesar da alta variabilidade, as atividades econômicas, recursos naturais e beleza cênica tornam a zona costeira atrativa à ocupação humana que, quando desordenada, expõe-se aos riscos socioeconômicos e ambientais causados pela erosão costeira (Muehe 2004; Coelho 2005; Sanchez-Arcilla et al. 1998). Para conter os processos erosivos e reduzir os riscos, as estruturas rígidas de engenharia (e.g. espigões, *bagwalls*, quebra-mares, etc.) nem sempre são adequadas, pois interferem na morfodinâmica das ondas, alteram a dispersão de sedimentos e transferem a erosão costeira para áreas adjacentes (Hegde 2010; Dominguez et al. 2018). Já os métodos ecológicos ou soluções brandas (*soft solutions*), como a alimentação artificial de praias, podem reduzir ou evitar o recuo da linha de costa (Hegde 2010). Porém, a aparente solução dos problemas erosivos pode estimular a ocupação humana, com a construção de casas, edifícios e a instalação de

infraestruturas de recreação e lazer (Nordstrom 2010), fatores inadequados à redução de riscos.

O planejamento da ocupação do espaço a partir da realocação de pessoas e/ou infraestruturas é a maneira mais eficaz de minimizar os riscos socioeconômicos e ambientais causados pela erosão (Muehe 2004; Hegde 2010; Dominguez et al. 2018; Muehe 2018b). Para isso, métodos preventivos, a exemplo de faixas de proteção costeira (*setback lines*), são recomendados em todo o planeta por delimitarem até onde é seguro ocupar por um determinado tempo e impedirem a ocupação humana até certa distância da linha de costa, evitando danos socioeconômicos e reduzindo os impactos ambientais em áreas sob erosão costeira (Muehe 2004; Ferreira et al. 2006; Sabatier et al. 2009; Hegde 2010).

Luijendijk et al. (2018) mostraram a ocorrência da erosão costeira em todo o planeta. Silva et al. (2014) destacaram que os riscos aos processos erosivos são amplificados em zonas costeiras de baixa elevação, com menos de 10 m acima do nível do mar, a exemplo de regiões deltaicas. No Brasil, a erosão costeira foi registrada em todos os Estados litorâneos. As causas podem ser naturais, como pela ação de marés astronômicas, marés meteorológicas e/ou das ondas, e por ações antrópicas, como a ocupação humana próxima à linha de costa (Muehe 2018b). No nordeste brasileiro, a erosão costeira é mais frequente em áreas próximas às desembocaduras fluviais, com destaque para os deltas de maré e deltas fluviais (Muehe 2018b), ambos estão presentes no delta do rio São Francisco (Dominguez et al. 2018).

No delta do rio São Francisco, Dominguez & Bittencourt (1996), Fontes (2001), Oliveira et al. (2003), Bittencourt et al. (2007), Guimarães & Dominguez (2008) e Medeiros et al. (2007, 2014) relacionaram a predominância de trechos costeiros erosivos ao balanço sedimentar negativo induzido por ações antrópicas, com destaque para a construção de barragens que reduziram a descarga de sedimentos no curso inferior do rio. Segundo Fontes (2001), este processo causou perda aproximada de 80.000 m² a partir da linha de costa, de 1971 a 1987, ocasionando a destruição do povoado do Cabeço, localizado na margem da foz, no Município de Brejo Grande, em Sergipe. Oliveira et al. (2003) destacaram que em função do avanço do mar, o povoado do Cabeço teve de ser deslocado para o interior.

Apesar das perdas econômicas, outras ocupações e usos, como estruturas de viveiros de peixes, de carcinicultura, criação de gado e/ou plantações, ocorrem na zona costeira do delta, inclusive na Reserva Biológica de Santa Isabel e na área de proteção ambiental (APA) de Piaçabuçu (Vieira et al. 2010; Barreto & Rodrigues 2016; Santos et al. 2017). Dessa forma, a ocupação humana justifica a necessidade de planejamento do uso e ocupação da linha de costa do delta do rio São Francisco para redução dos riscos causados pela erosão costeira.

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou analisar o comportamento e determinar a largura de faixas de proteção costeiras para a linha de costa do delta do rio São Francisco, entre a Reserva Biológica de Santa Isabel (Sergipe) e a praia do Toco, no município de Feliz Deserto (Alagoas), no nordeste do Brasil.

2. Faixas de proteção costeira

Visando a prevenção aos riscos e prejuízos causados pelos processos erosivos, as faixas de proteção costeira (*setback lines*) são determinadas por diferentes características e metodologias em todo o planeta, com critérios relacionados ou não à erosão costeira (Muehe 2004, Ferreira et al. 2006, Sabatier et al. 2009, Murray et al. 2012, CIRM 2018). As determinações das suas larguras podem ser legisladas por governos federais que utilizam critérios não relacionados à erosão costeira, como a largura de 20 metros a partir da linha de preamar máxima (Belize 2003), mas também utilizam critérios de proteção que incorporam aspectos ambientais, como a extensão total de unidades ecossistêmicas (manguezais e dunas) e/ou consideram aspectos culturais e sociais, como vistos em Cuba (Houck 2018).

Seguindo uma vertente diferente, Ferreira et al. (2006) e Sabatier et al. (2009) sugeriram as larguras de faixas de proteção para áreas das costas portuguesa e francesa baseadas em cálculos numéricos desenvolvidos a partir de importantes características da dinâmica e erosão costeira local, como as taxas históricas de recuo da linha de costa, elevação do nível do mar e ocorrência de tempestades. Para a linha de costa brasileira, a partir desses aspectos ambientais costeiros, Muehe (2004) indicou que, em média, as faixas devem ter largura mínima de 50 m, em áreas urbanizadas, e até 200m, em áreas não urbanizadas. Em uma análise local, Freitas et al. (2010) formularam faixas de proteção com até 109 m de largura na enseada do Itapocorói - SC, em um dos primeiros trabalhos de determinação de faixas de proteção costeira nacionais.

3. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende a linha de costa do delta do rio São Francisco, com aproximadamente 80 km de extensão, distante cerca de 34 km de Aracaju (capital de Sergipe) e 117 km de Maceió (capital de Alagoas). A linha de costa é constituída por praias arenosas expostas à ação de ondas, com exceção das praias ao norte de Pontal do Peba, Alagoas, protegidas da ação direta das ondas de sudeste e de sul-sudeste (Bittencourt et al. 2006).

Segundo Pianca et al. (2010), as ondas mais frequentes são do quadrante leste (E), sudeste (SE) e sul (S) com alturas entre 1 e 4,3 m e períodos de 1 a 21 s. A deriva longitudinal é orientada de nordeste (NE) para sudoeste (SW), com exceção das divergências orientadas de SW-NE no Pontal do Peba (Alagoas) e trechos próximos à foz do rio São Francisco, em Brejo

Grande (Sergipe), de acordo com Dominguez (1996), Oliveira (2003) e Guimarães (2010). As marés são semidiurnas, no regime de mesomarés, com altura máxima de 2,5 m (CPSE 2018). O clima é quente, semiúmido, com temperatura de 24 a 26°C, seis ou mais meses secos durante o ano e períodos chuvosos no outono e inverno. A pluviosidade média anual é de 1.500 mm (Nimer 1989).

A parte emersa do delta, na retaguarda da linha de costa, apresenta sedimentos arenosos e lamosos em uma planície costeira quaternária baixa com presença das seguintes unidades geológico-geomorfológicas:

dunas ativas e inativas, terraços marinhos, terras úmidas, manguezais e praias atuais (Bittencourt et al. 1983; Dominguez et al. 1992). Os sedimentos lamosos predominam por cerca de 3 km da foz do rio São Francisco no lado sergipano ao canal de Parapuça (Bittencourt et al. 1983). Um pontal arenoso, em torno de 0,3 a 0,6 km de largura, separa o manguezal do oceano e migra no sentido SW (Guimarães & Dominguez 2008; Dominguez et al. 2018). Do canal de Parapuça até o limite sul da área de estudo, a linha de costa é bordejada por areias de dunas eólicas (Bittencourt et al. 1983).

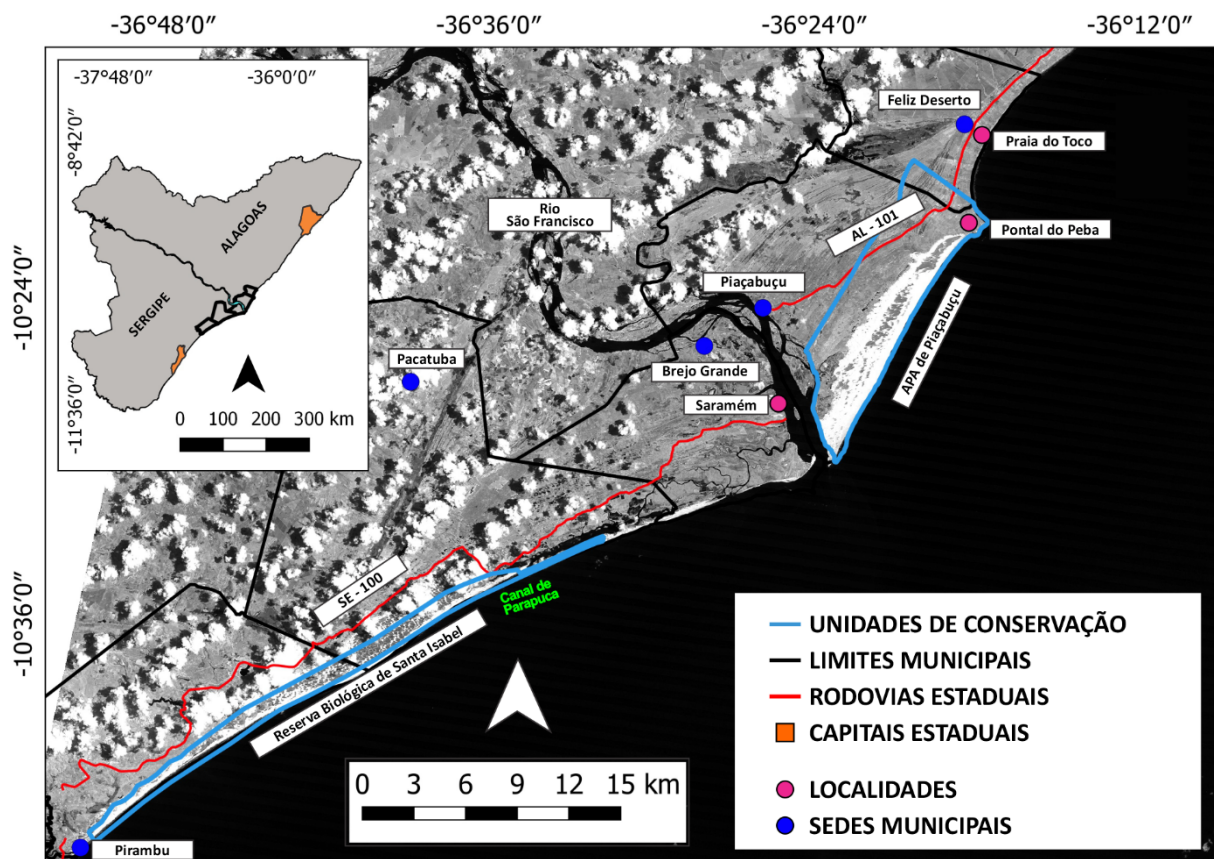


Figura 1. Localização e acesso do delta do rio São Francisco. Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017).

No lado alagoano, desde a foz do rio São Francisco ao Pontal do Peba predominam os sedimentos arenosos de dunas eólicas com altitude de poucos metros até cerca de 30-40 m acima do nível do mar. No Pontal do Peba ocorre um banco recifal submerso, bordejando a praia, dando origem a uma feição morfológica em forma de cúspide (Barbosa et al. 2003). Do pontal do Peba até o limite norte da área de estudo predominam os terraços marinhos (Bittencourt et al. 1983).

O delta engloba municípios rurais, com praias ocupadas por populações tradicionais, inclusive na Reserva Biológica de Santa Isabel e na APA de Piaçabuçu (Vieira et al. 2010; Barreto & Rodrigues 2016; Santos et al. 2017). Uma das populações tradicionais é povoado do Cabeço que, em 1974,

situava-se a menos de 2 km da linha de costa próxima à foz do rio São Francisco, no município de Brejo Grande. Porém, nos últimos sessenta anos, esta condição começou a ser alterada devido às ações antrópicas que reduziram significativamente a descarga de sedimentos no curso inferior do rio.

No período de 1938 a 1973, a vazão fluvial e o fluxo de material particulado em suspensão próximo à foz foram de 3.010 m³/s e 69 x 10⁵ t/ano, respectivamente. Porém, após a construção de 33 barragens, com nove no curso do rio, esses valores foram reduzidos a cerca de 1.760 m³/s e 2,3 x 10⁵ t/ano, respectivamente. Com isso, ocorreu erosão costeira que destruiu o povoado do Cabeço e induziu o realojamento da população na área continental interna (Dominguez

& Bittencourt 1996; Fontes 2001, Oliveira 2003; Bittencourt et al. 2007; Medeiros et al. 2007; Medeiros et al. 2014) para o povoado de Saramém (Figura 1).

4. Materiais e métodos

4.1 Aquisição e processamento digital de imagens (PDI)

Para as análises do período de 1986 a 2017, 13 conjuntos de imagens dos satélites Landsat-5 e Landsat-8 dos sensores TM (*Thematic Mapper*) e OLI (*Operational Land Imager*), respectivamente, das cenas incompletas da órbita 214 e pontos 67 e 68, foram obtidas gratuitamente no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Quadro 1). É importante Quadro 1 – Imagens de satélites adquiridas para a série temporal de 1986 a 2017.

Data	Satélite	Resolução espacial (m/pixel)
31/05/1986	Landsat-5	30
20/12/1990	Landsat-5	30
04/10/1991	Landsat-5	30
22/08/1993	Landsat-5	30
23/03/1996	Landsat-5	30
21/09/1998	Landsat-5	30
24/07/2000	Landsat-5	30
21/10/2003	Landsat-5	30
22/02/2005	Landsat-5	30
25/05/2007	Landsat-5	30
27/12/2010	Landsat-5	30
15/05/2015	Landsat-8	15
18/04/2017	Landsat-8	15

O georreferenciamento das demais imagens foi realizado a partir da imagem de 2017 do Landsat-8, previamente corrigida geometricamente pela USGS/NASA (Duarte et al. 2015), utilizando o sistema de referência geodésico WGS 84, com, no mínimo, 10 pontos de controle, como cruzamentos de estradas, contornos geométricos de cidades, etc. Os desvios dos valores calculados nos pontos de georreferenciamento em relação aos pontos originais de referência da imagem de 2017 foram indicados através dos erros quadráticos médios (RMS), abaixo de 1 pixel, representando a acurácia do procedimento (Melo & Pacheco 2004).

Devido à falta de dados quantificados de incertezas como digitalização da linha de costa, incertezas de viés de proxy-datum, etc., para a área de estudo, o desvio-padrão e o intervalo de confiança não foram calculados por transecto, e sim, por períodos, que continham incertezas quantificadas, como os erros quadráticos médios (RMS) associados aos georreferenciamentos e a correção geométrica. Dessa forma, o desvio-padrão e o intervalo de confiança foram determinados a partir das Eqs. (1 e 2):

ressaltar que a seleção das imagens foi determinada pela menor presença e/ou ausência de cobertura de nuvem na área de estudo, visando identificar a totalidade dos alvos terrestres.

No *software* SPRING 5.5.5 (Camara et al. 1996), as imagens do Landsat-5 foram submetidas à técnica de restauração de imagem para alterar suas resoluções espaciais de 30 m para 15 m, igualando-as às imagens pancromáticas do Landsat-8. Todas as imagens (Landsat – 5 e 8) passaram pelo procedimento de realce por contraste linear para aumentar a discriminação visual da linha de costa.

$$\sigma = \sqrt{(Er_1 - \bar{e})^2 + (Er_2 - \bar{e})^2 \dots / Q} \quad (1)$$

onde σ é desvio-padrão, Er é o erro quadrático médio (metros) do georreferenciamento de cada imagem de satélite, \bar{e} é a média dos erros quadráticos e Q é a quantidade de erros quadráticos médios.

$$In = Z^2_{\alpha} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

onde In é o intervalo de confiança, Z é o coeficiente de confiança, α é o nível de confiança, σ é o desvio-padrão e n é a quantidade de imagens para o período.

4.2 Definição do indicador da linha de costa

A escolha do indicador de linha de costa (linha de preamar máxima, linha da vegetação, limite entre a água e a areia molhada etc.) é quase sempre determinada pela disponibilidade de dados. Em função

da resolução das imagens (15 m) e da presença de dunas bordejando as praias da área investigada, não foram possíveis os mapeamentos da linha de preamar máxima ou da linha de vegetação, dois dos indicadores de linha de costa mais utilizados (Boak & Turner 2005).

Por isso, a linha d'água instantânea (Boak & Turner 2005), indicada pela variação de tons de cinza entre a areia e a água (Stafford & Langfelder 1971), foi escolhida como o indicador de linha de costa. Sua utilização, como visto em Stafford & Langfelder (1971) e Morton & McKenna (1999), tem como fator negativo a incerteza do posicionamento da linha de costa devido à variação do nível das marés. Porém, devido à resolução espacial das imagens de satélites (15 m), a pequena variação da maré na área de estudo (mesomarés) tornou-se irrelevante para este estudo. O indicador de linha de costa referente a cada imagem de satélite foi digitalizado manualmente.

4.3 Cálculo das taxas de variação da linha de costa

Na extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) do ArcGis® 10.2 (Thieler et al. 2009) foi traçada a linha de base (*baseline*) no continente, paralela à linha de costa. Com isso, foram gerados transectos ortogonais à linha de costa, espaçados em 2 km entre si, distância que se enquadra com as dimensões adequadas para estudos regionais (Krause & Soares 2004; Anfuso & Garcia 2005). A extensão litorânea do delta do rio São Francisco (80 km), de dimensões regionais, é maior quando comparada à países como a Bélgica, Eslovênia e Bósnia, por exemplo.

Após a geração dos transectos, o DSAS determinou a variação da posição da linha de costa calculando a distância linear entre os pontos de interseção de duas linhas de costa em um determinado transecto (Thieler et al. 2009; Albuquerque et al. 2013). Com isso, foi possível calcular as taxas de variação da linha de costa através da regressão linear (*linear regression rate*, LRR), com intervalo de 95% de confiança, obtida pela linha de tendência determinada pelo ajuste da linha de regressão de mínimos quadrados a todos os pontos da linha de costa para um transecto em particular (Thieler et al. 2009).

A regressão linear é associada ao coeficiente de determinação (R^2), um índice adimensional que mostra a parte do conjunto de dados total que tem sua variância explicada pelo modelo de regressão. O valor alto ou baixo não garante o melhor ou pior ajuste dos dados e também não indica a qualidade do modelo final, como erroneamente são relacionados em diversos trabalhos (Achen 1977; Figueiredo Filho et al. 2011). O R^2 varia de 0 a 1 de forma que, valores próximos de 1 demonstram maior correlação entre os dados e indicam uma tendência do comportamento, enquanto valores próximos à zero demonstram menor correlação entre os dados e indicam uma alternância de comportamentos da linha de costa (Thieler et al. 2009). Os valores da

regressão linear (taxas de variação da linha de costa), associados ao R^2 , representaram os períodos de: (i) 1986 a 1996 (curto prazo, interanual), (ii) 1998 a 2007 (curto prazo, interanual), (iii) 2010 a 2017 (curto prazo, interanual) e o período de (iv) 1986 a 2017 (médio prazo, interdecadal). Tais períodos foram classificados em curtos ou médio prazos de acordo com Cowell & Thom (1994) e Larson & Kraus (1995).

4.4 Comportamento da linha de costa

O comportamento da linha de costa foi obtido utilizando as taxas de variação da linha de costa na adaptação da classificação proposta por Esteves & Finkl (1998) e ampliada por Luijendijk et al. (2018), na qual: acreção ($> +0,5$ m/ano); estabilidade ($+0,5$ m/ano a $-0,5$ m/ano); recuo (-1 a $-0,5$ m/ano); recuo intenso (-3 a -1 m/ano); recuo severo (-5 a -3 m/ano) e recuo extremo (< -5 m/ano). Os percentuais de linha de costa em erosão foram comparados aos registros da vazão média próxima à foz do rio São Francisco, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) para os períodos de curto prazo de 1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017.

4.5 Cálculo das faixas de proteção costeira (*setback lines*)

Para a determinação das faixas de proteção costeira, o delta foi dividido em dois setores de acordo com a influência da vazão fluvial no aporte de sedimentos e no efeito molhe hidráulico e, na deriva litorânea de sedimentos: Setor 1 (lado alagoano - transectos 1 a 13) e Setor 2 (lado sergipano - transectos 14 a 41).

A Eq. (3), descrita por Sabatier et al. (2009), fundamentou o cálculo da largura das faixas.

$$F_x = r_{LT} \times A + r_{ST} \quad (3)$$

onde Δr_{LT} foram as taxas mais extremas de recuo da linha de costa (m/ano) em cada transecto (curto e médio prazo), A foi número de anos de projeção da faixa de proteção e Δr_{ST} foi recuo episódico da linha de costa (curto prazo) relacionado aos eventos de tempestades.

Para a área de estudo, apenas a taxa mais extrema de recuo em cada setor foi utilizada na variável Δr_{LT} . A falta de registros de eventos de tempestade (marés meteorológicas) tornou a variável Δr_{ST} nula (zero).

Para comprovar a eficiência do método, as faixas foram projetadas a partir da linha de costa de 1986 e comparadas ao posicionamento da linha de costa de 2017. O procedimento visou avaliar se, apesar da tendência de recuo nos 31 anos anteriores, a linha de costa de 2017 manteve-se dentro da faixa prevista, de acordo com a Eq. (4):

$$F_x = r_{LT} \times 31 \quad (4)$$

Após a comprovação do método, as faixas de proteção foram projetadas de 2017 para o ano de 2037 (20 anos), a partir do método numérico de formulação de faixas de proteção indicado pela Eq. (5):

$$F_x = rLT \times 20 \quad (5)$$

As faixas localizadas sobre unidades de conservação e/ou ecossistêmicas foram recuadas aos limites mais internos das unidades, critério necessário no setor 1 (Alagoas). As faixas sem e com a utilização deste critério foram plotadas na imagem de 2017 com a finalidade de comparação.

5. Resultados

5.1 Taxas de variação da linha de costa de 1986 a 2017

A figura 2 representa graficamente as taxas de variação da linha de costa obtidas pela regressão linear (m/ano) para toda a extensão do delta do rio São Francisco. As maiores taxas estiveram nos trechos à barlamar do canal de Parapuça (setor 2), enquanto as menores taxas estiveram nos trechos próximos à foz, nos lados alagoano e sergipano.

No período de 1986 a 1996, os erros quadráticos médios (RMS) foram de 0,47m; 0,62m; 0,48m; 0,46m; 0,81m; desvio padrão de 0,13m; intervalo de confiança de $\pm 0,11$ m e os valores do R^2 , em geral, estiveram próximos do valor nulo (zero). No setor 1, a maior taxa foi de $+12,00 \pm 0,11$ m/ano e a menor foi de $-6,68 \pm 0,11$ m/ano. No setor 2, a maior taxa foi de $+22,93 \pm 0,11$ m/ano e a menor foi de $-153,13 \pm 0,11$ m/ano (Figura 2 e Tabelas 1 e 2).

No período de 1998 a 2007, os erros quadráticos médios (RMS) foram de 0,81m; 0,41m; 0,56m; 0,46m; 0,78m; desvio padrão de 0,16m; intervalo de confiança de $\pm 0,14$ m e os valores de R^2 , em geral, estiveram mais próximos do valor nulo (zero). No setor 1, a maior taxa foi de $+32,00 \pm 0,14$ m/ano e a menor foi de $-1,39 \pm 0,14$ m/ano. No setor 2, a maior taxa foi de $+44,28 \pm 0,14$ m/ano e a menor foi de $-40,81 \pm 0,14$ m/ano (Figura 2 e Tabelas 1 e 2).

No período de 2010 a 2017, os erros quadráticos médios (RMS) foram de 0,66m e 0,59m; o erro de correção geométrica foi de 9,455m da imagem de 2017, desvio padrão de 4,16m; intervalo de confiança de $\pm 4,7$ m e os valores de R^2 , em geral, estiveram mais próximos do valor 1. No setor 1, a maior taxa foi de $+3,61 \pm 4,7$ m/ano e a menor foi de $-55,23 \pm 4,7$ m/ano. No setor 2, a maior taxa foi de $+35,61 \pm 4,7$ m/ano e a menor foi de $-29,69 \pm 4,7$ m/ano (Figura 2 e Tabelas 1 e 2).

No período integral de 1986 a 2017, os erros quadráticos médios (RMS) de todas as imagens foram utilizados, além do erro de correção geométrica da imagem de 2017, resultando no desvio padrão de 2,36m; intervalo de confiança de $\pm 1,28$ m e valores de R^2 bastante oscilantes. No setor 1, a maior taxa foi de $+12,30 \pm 1,28$ m/ano e a menor foi de $-0,19 \pm 1,28$ m/ano. No setor 2, a maior taxa foi de $+16,50 \pm 1,28$ m/ano e a menor foi de $-52,80 \pm 1,28$ m/ano (Figura 2 e Tabelas 1 e 2).

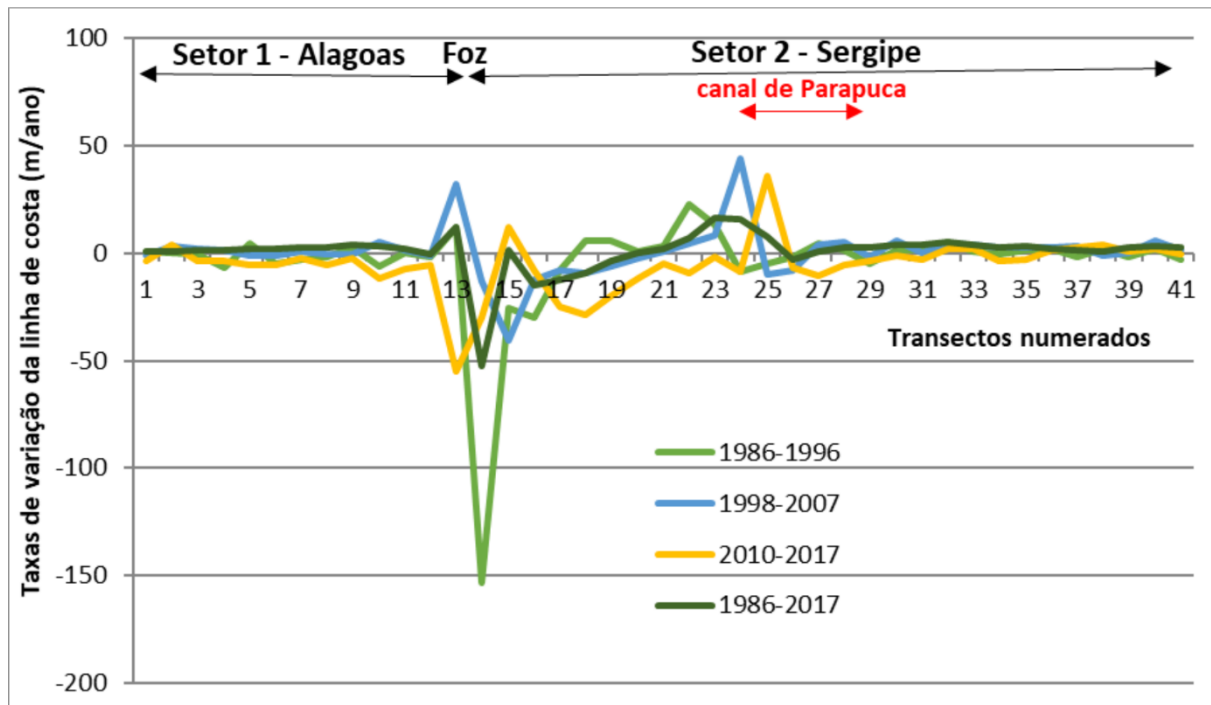


Figura 2 – Taxas de variação da linha de costa de 1986 a 2017. Representação gráfica das taxas obtidas pelos valores da regressão linear em cada transecto para o setor 1 (transectos 1 a 13) e 2 (transectos 14 a 41), incluindo os trechos de migração do canal de Parapuça (transectos 24 a 28), para as análises em 4 períodos distintos. O transecto 14 indica a antiga posição do Cabeço.

Tabela 1 – Taxas de variação da linha de costa (LRR em m/ano) e coeficiente de determinação (R^2) por transecto.

Transecto	1986-1996		1998-2007		2010-2017		1986-2017	
	LRR	R^2	LRR	R^2	LRR	R^2	LRR	R^2
1	0,68	0,01	-0,91	0,01	-3,34	0,99	0,84	0,1
2	0,19	0	3	0,1	3,61	0,69	0,72	0,05
3	-0,36	0	1,86	0,05	-3,79	0,98	1,21	0,17
4	-6,68	0,3	1,61	0,01	-3,94	0,55	1,48	0,08
5	4,48	0,1	-1,39	0,01	-5,64	0,99	2,21	0,2
6	-4,84	0,24	-1,14	0,01	-5,57	0,99	2,22	0,24
7	-2,7	0,09	0,53	0	-2,66	0,71	2,81	0,35
8	-1,59	0,02	-0,69	0	-5,78	1	2,65	0,24
9	2,75	0,09	-0,3	0	-2,6	0,6	4,11	0,49
10	-6,3	0,18	4,92	0,07	-11,67	0,99	3,5	0,25
11	0,32	0	1,14	0,01	-7,48	0,98	1,83	0,1
12	-1,54	0,1	-0,85	0	-5,77	0,62	-0,19	0
13	12	0,04	32	0,86	-55,23	0,21	12,3	0,18
14	-153,13	0,72	-13,27	0,17	-29,69	0,68	-52,8	0,64
15	-25,81	0,39	-40,81	0,64	12,02	0,57	1,54	0,01
16	-30,2	0,7	-12,67	0,32	-8,31	1	-14,96	0,82
17	-8,19	0,35	-7,97	0,28	-25,2	1	-12,16	0,87
18	5,64	0,1	-9,45	0,48	-28,93	0,98	-9,26	0,64
19	6,01	0,23	-5,91	0,39	-20,19	1	-3,52	0,28
20	1,02	0	-2,21	0,05	-11,51	0,96	0,23	0
21	3,26	0,04	0,63	0,01	-5,11	0,93	1,82	0,1
22	22,93	0,58	4,29	0,1	-9,44	0,9	6,78	0,48
23	13,44	0,16	7,97	0,79	-1,74	0,27	16,5	0,74
24	-8,82	0,63	44,28	0,98	-8,65	0,96	15,69	0,74
25	-4,91	0,37	-10,19	0,59	35,61	0,9	7,54	0,41
26	-1,49	0,06	-8,05	0,26	-6,74	0,43	-2,88	0,21
27	4,57	0,34	3,59	0,13	-10,24	0,94	0,51	0,02
28	1,5	0,06	5	0,23	-5,57	0,98	2,49	0,38
29	-4,57	0,48	-1,94	0,09	-3,89	0,77	2,55	0,44
30	1,43	0,13	5,58	0,48	-0,83	0,15	3,59	0,77
31	1,38	0,13	-0,1	0	-2,92	0,99	3,82	0,52
32	5,27	0,57	4,49	0,38	2,23	0,49	5,15	0,79
33	0,52	0,01	3,59	0,07	2,29	0,99	3,86	0,57
34	-0,26	0	2,7	0,06	-3,42	0,98	2,9	0,52
35	1,58	0,02	2,73	0,05	-3,28	0,97	2,97	0,38
36	2,2	0,08	2,9	0,08	1,27	0,2	1,97	0,33
37	-1,67	0,05	3,33	0,1	2,87	0,83	1,67	0,25
38	1,73	0,09	-1,11	0,01	3,76	0,79	1,01	0,09
39	-1,73	0,03	0,17	0	0,98	0,1	2,38	0,33
40	1,84	0,03	5,6	0,25	2,08	0,79	3,41	0,51
41	-2,93	0,06	1,29	0,02	-0,24	0,17	2,83	0,4

Tabela 2 – Taxas mais extremas de avanço (+) e recuo (-) da linha de costa por períodos e setores.

Período	Setor 1 – Lado alagoano		Setor 2 – Lado sergipano	
1986-1996	+12,00 ± 0,11	-6,68 ± 0,11	+22,93 ± 0,11	-153,13 ± 0,11
1998-2007	+32,00 ± 0,14	-1,39 ± 0,14	+44,28 ± 0,14	-40,81 ± 0,14
2010-2017	+3,61 ± 4,7	-55,23 ± 4,7	+35,61 ± 4,7	-29,69 ± 4,7
1986-2017	+12,30 ± 1,28	-0,19 ± 1,28	+16,50 ± 1,28	-52,80 ± 1,28

5.2 Taxas de variação da linha de costa de 1986 a 2017

No período de 1986 a 1996, o delta apresentou 49% da extensão da linha de costa em acreção, 10% em estabilidade e 41% em estágio de recuo (Figura 3). Já no período de 1998 a 2007, 54% da extensão da linha de costa esteve em acreção, 7% em estabilidade e 39% em estágio de recuo, com o predomínio do recuo extremo nessa categoria (Figura 4). Porém, no período de 2010 a 2017, o delta apresentou 24% da extensão da linha de costa em acreção, 3% em estabilidade e 73% em estágio de recuo, com o predomínio do recuo extremo nessa categoria (Figura 5).

A vazão fluvial média na foz do rio São Francisco foi de 2.273 m³/s, 1.876 m³/s e 1.725 m³/s nos períodos de 1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017, respectivamente, representando diminuição de 24% de 1986 a 2017. Ao longo desses períodos, houve um aumento de 32% de trechos em estágio de recuo na linha de costa (Figura 6).

No período integral de 1986 a 2017, 80% da extensão da linha de costa esteve em acreção, 5% em estabilidade e 15% em recuo. O recuo extremo se concentrou próximo à foz do rio São Francisco, no lado sergipano do delta (Figura 7).

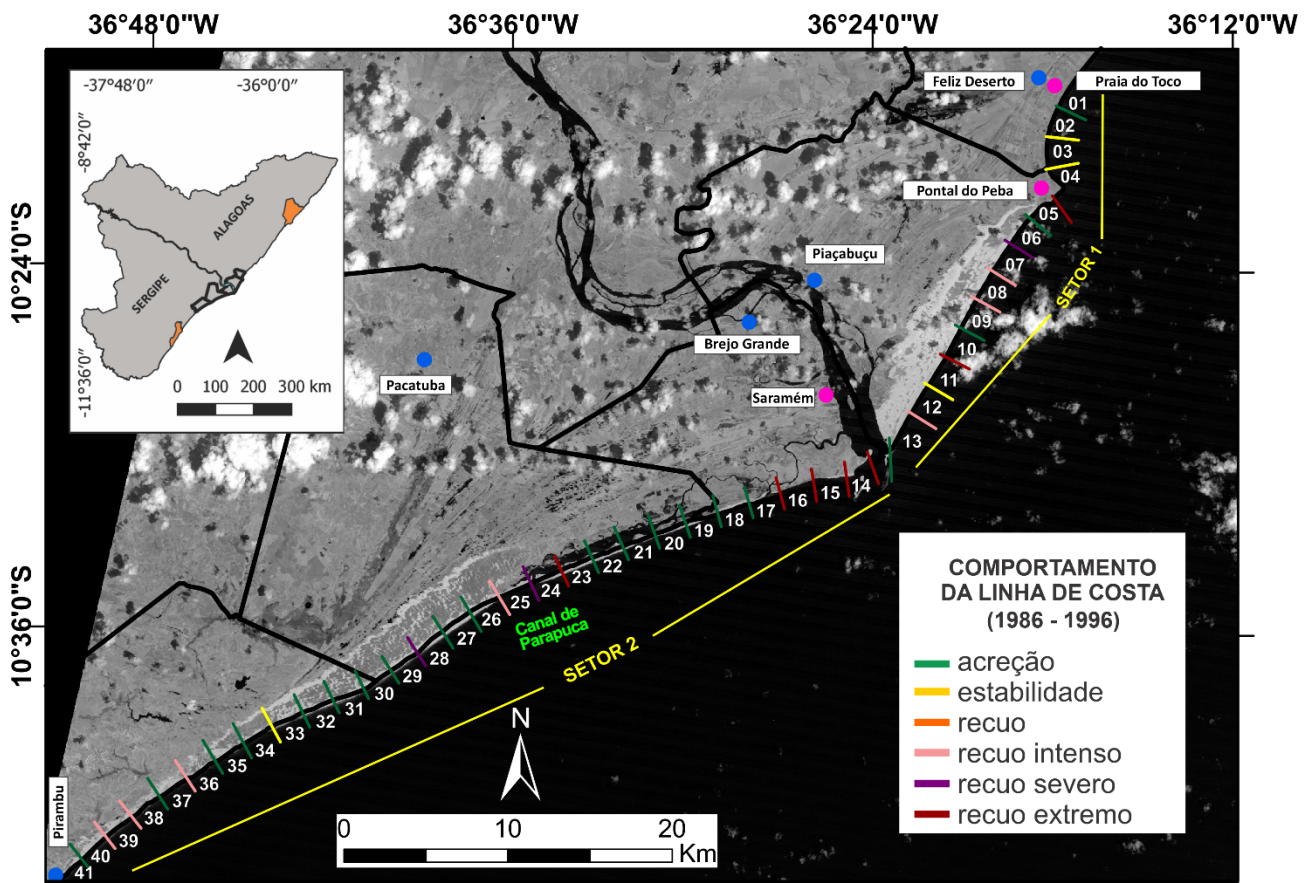


Figura 3 – Comportamento da linha de costa de 1986 a 1996 para o setor 1 (Alagoas) e 2 (Sergipe). Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017).

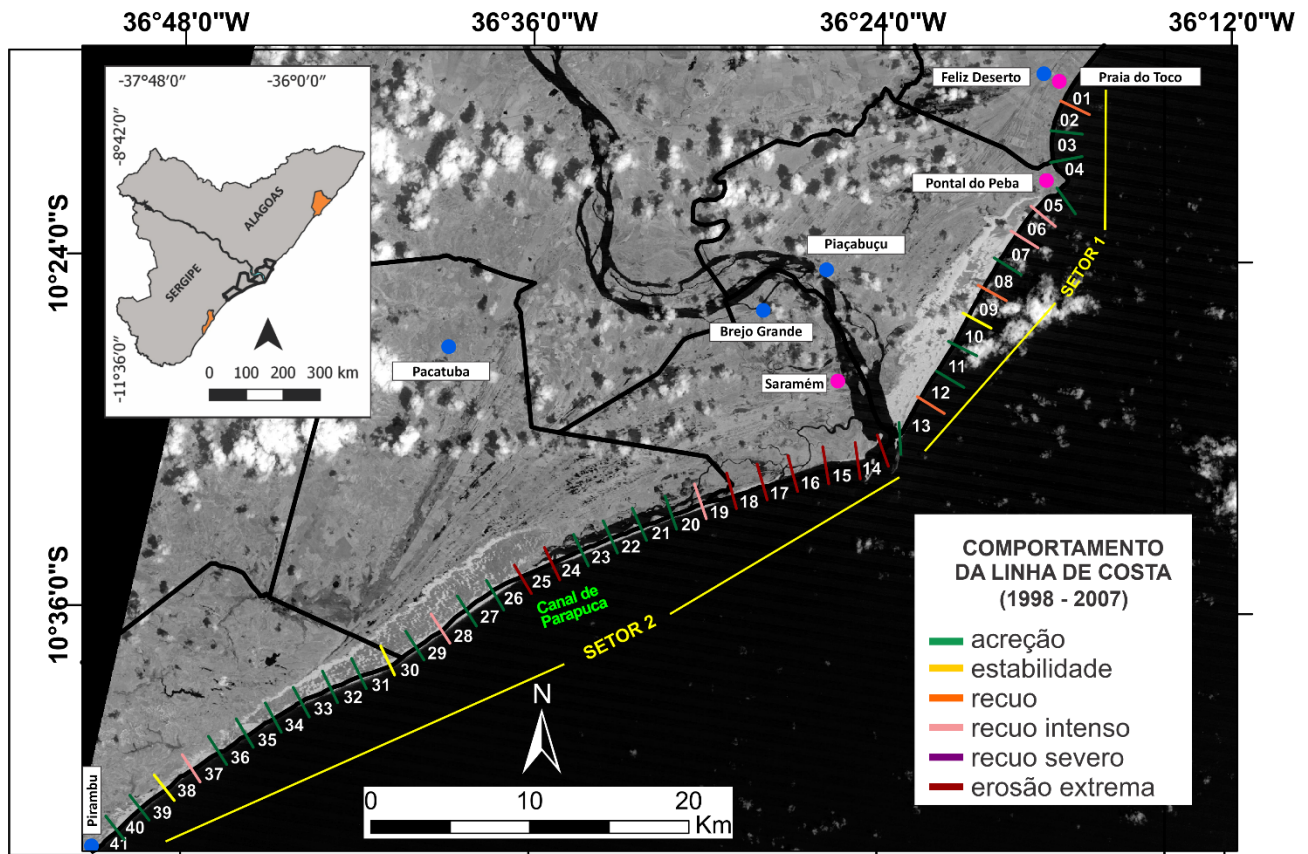


Figura 4 – Comportamento da linha de costa de 1998 a 2007 para o setor 1 (Alagoas) e 2 (Sergipe). Carta-imagem da banda.

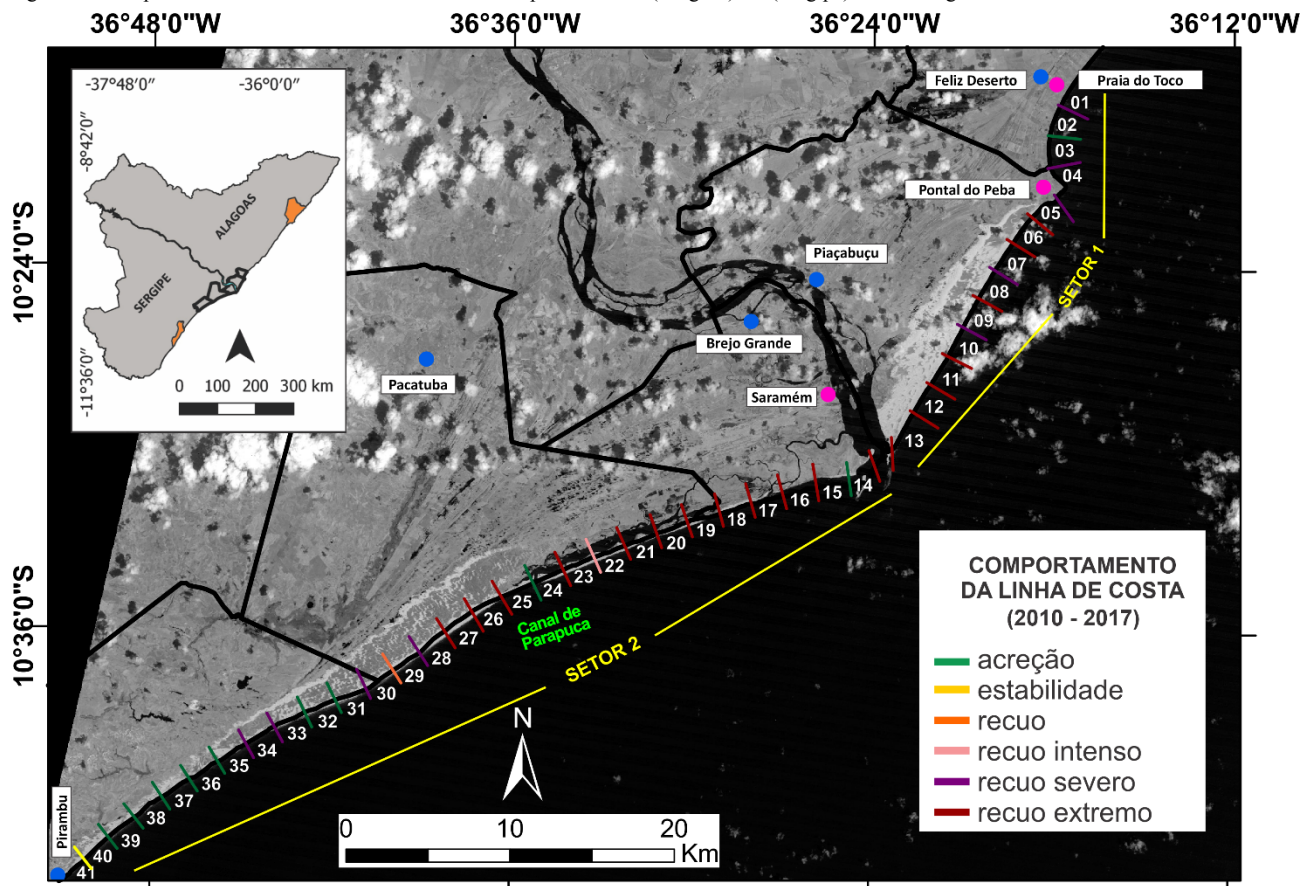


Figura 5 – Comportamento da linha de costa de 2010 a 2017 para o setor 1 (Alagoas) e 2 (Sergipe). Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017).

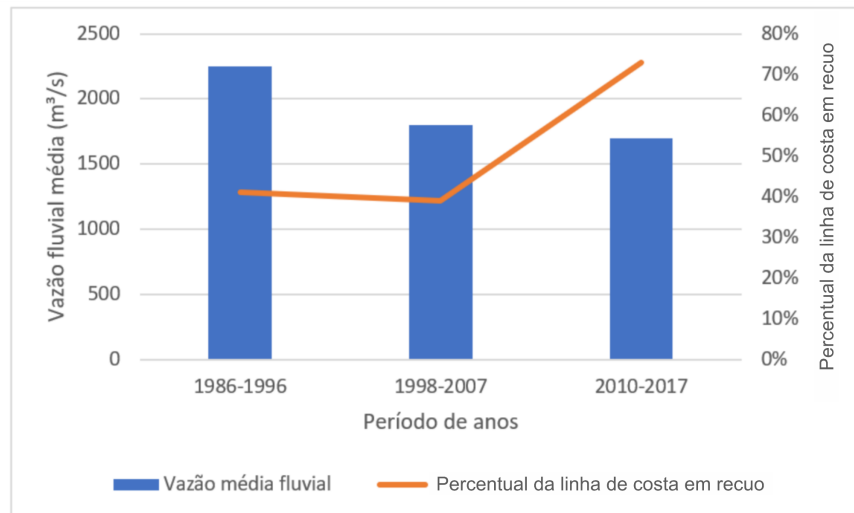


Figura 6 – Vazão fluvial média e percentual de trechos em recuo no delta do rio São Francisco

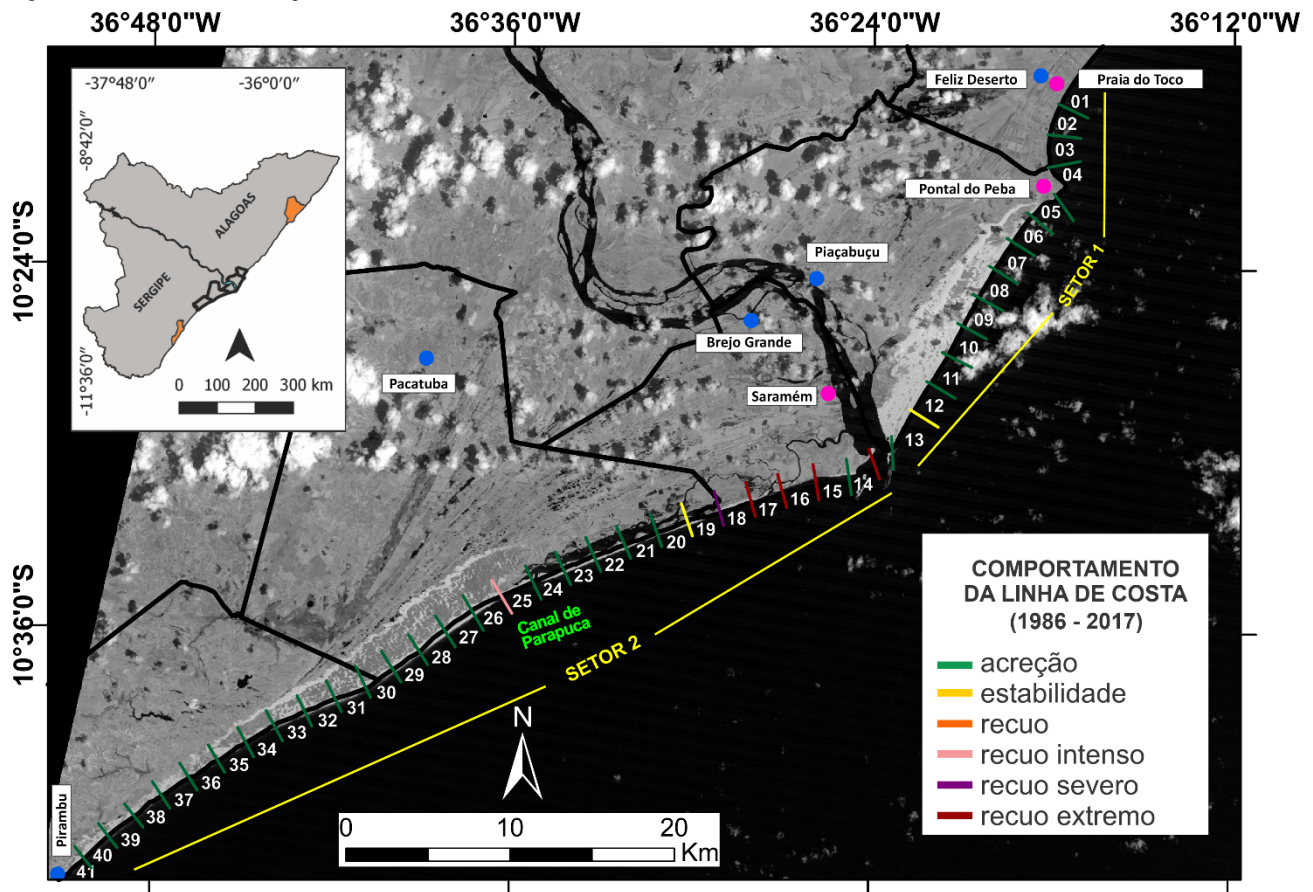


Figura 7 – Comportamento da linha de costa para todo o período investigado, de 1986 a 2017, para o setor 1 (Alagoas) e 2 (Sergipe). Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017).

5.3 Faixas de proteção costeira

Para determinação da largura da faixa de proteção costeira do setor 1, a taxa mais extrema de recuo ($-55,23 \pm 4,7$ m/ano) foi utilizada para indicar a variável Δr_{LT} . Essa taxa apresentou valor de 0,21 para o R^2 , considerado baixo. Para a largura da faixa do setor 2, a taxa mais extrema de recuo ($-153,13 \pm 0,11$ m/ano), encontrada na área onde se localizava o Cabeço, foi utilizada para indicar a variável Δr_{LT} , com

valor de 0,72 para o R^2 , considerado alto (Figura 2 e Tabelas 1 e 2).

A comprovação do método numérico adaptado de formulação das faixas de proteção apresentou larguras de 1.712 e 4.747 m, para os setores 1 (Alagoas) e 2 (Sergipe) do delta, respectivamente (Figura 8). Por toda extensão do delta, as faixas se mantiveram recuadas em relação à linha de costa de 2017, garantindo a segurança das ocupações humanas localizadas até as

faixas em relação ao recuo costeiro, caso fossem implementadas em 1986.

A faixa de proteção costeira projetada a partir da linha de costa de 2017 para 20 anos, ou seja, para 2037, apresentou largura de 1.104 m para o setor 1 (lado alagoano). Porém, por estar localizada sobre a unidade

de conservação (APA de Piaçabuçu) e dunas, a faixa foi recuada ao limite mais interno da unidade de conservação. Para o setor 2 (lado sergipano), a faixa apresentou largura de 3.062 m sem a necessidade da utilização de qualquer critério de recuo adicional (Figura 9).

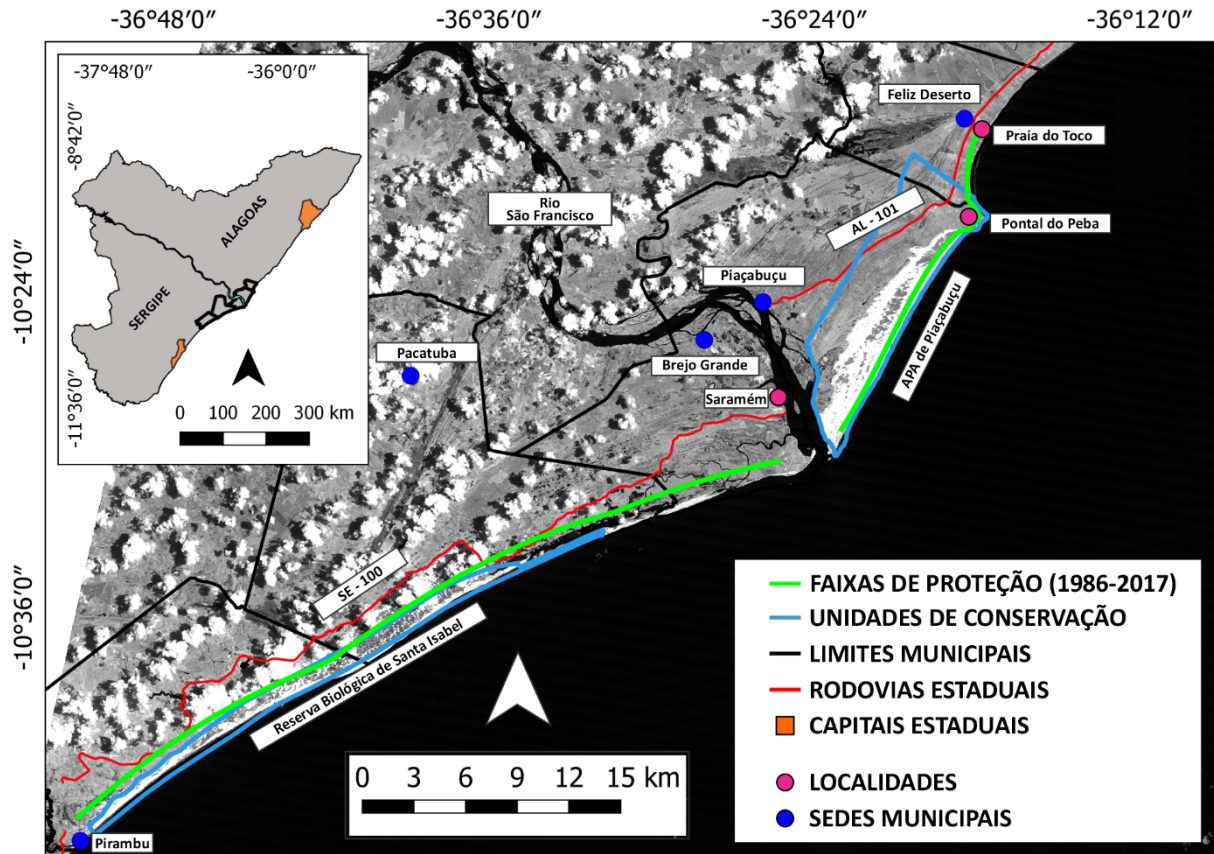


Figura 8 – Faixas de proteção costeira projetadas pelo método numérico a partir da linha de costa de 1986 para o ano de 2017 (31 anos). Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017)

6. Discussão

A análise detalhada de fatores da dinâmica costeira local, como as taxas de variação da linha de costa, fator extremamente importante para projeções de cenários futuros (Muehe 2004, 2018a), e variação do nível do mar, é essencial para delimitar as larguras das faixas de proteção (*setback lines*). Dessa forma, a padronização dos dados obtida na utilização exclusiva de imagens de satélite da série Landsat, o georreferenciamento imagem Landsat-8 *versus* imagem Landsat-5, a restauração das imagens TM para 15 m, o realce de todas as imagens por contraste linear e a digitalização manual do indicador de linha de costa aumentaram a acurácia das análises das taxas de variação da linha de costa, quando comparadas aos trabalhos que utilizaram mapas históricos e/ou fotografias aéreas nas análises de variação das linhas de costa, como visto em Morton et al. (2004), Morton & Miller (2005), Hapke et al. (2006) e Hapke & Reid (2007). A metodologia adotada influencia diretamente na segurança das ocupações humanas, como será visto a seguir.

6.1. Taxas de variação e comportamento da linha de costa

O processamento dos dados permitiu a atribuição igual de significância às linhas de costa mapeadas. Devido à quantidade de dados e mesma atribuição de peso aos mesmos, a regressão linear representou o método mais indicado para as análises de variação da linha de costa, quando comparada à taxa de ponto final (*end point rate* – EPR) e à regressão linear ponderada (*weighted linear regression* – WLR), de acordo com Crowell et al. (1993), Mazzer & Dillenburg (2009) e Jonah et al. (2016). Esta última pode superestimar a erosão quando as linhas de costa de menor incerteza forem associadas aos eventos extremos (Quadrado et al. 2021). A categorização das taxas em comportamentos da linha de costa possibilitou uma padronização global de análises quantitativas para a área investigada.

As maiores taxas de acreção estiveram associadas à morfodinâmica da extremidade móvel (canal de Parapuça) do pontal arenoso de Ponta dos Mangues,

que também alternou comportamentos de erosão costeira (Figura 2). Os trechos à barlamar do canal de Parapuça apresentaram um acúmulo de sedimentos (acrecção), fornecidos pelo transporte longitudinal da deriva litorânea (NE-SW), como visto no transecto 23 (Figura 3), transecto 24 (Figura 4) e transecto 25 (Figura 5). Posteriormente, o acúmulo de sedimentos foi remanejado pelo próprio transporte longitudinal da

deriva litorânea para sudoeste, obstruindo a desembocadura fluvial e induzindo a contínua migração do canal no sentido de sotamar (Suguio et al. 1985, Bird 2008, Guimarães & Dominguez 2008). A migração retirou sedimentos dos trechos de movimentação do canal, resultando no deslocamento progressivo do comportamento de erosão extrema para sudoeste.

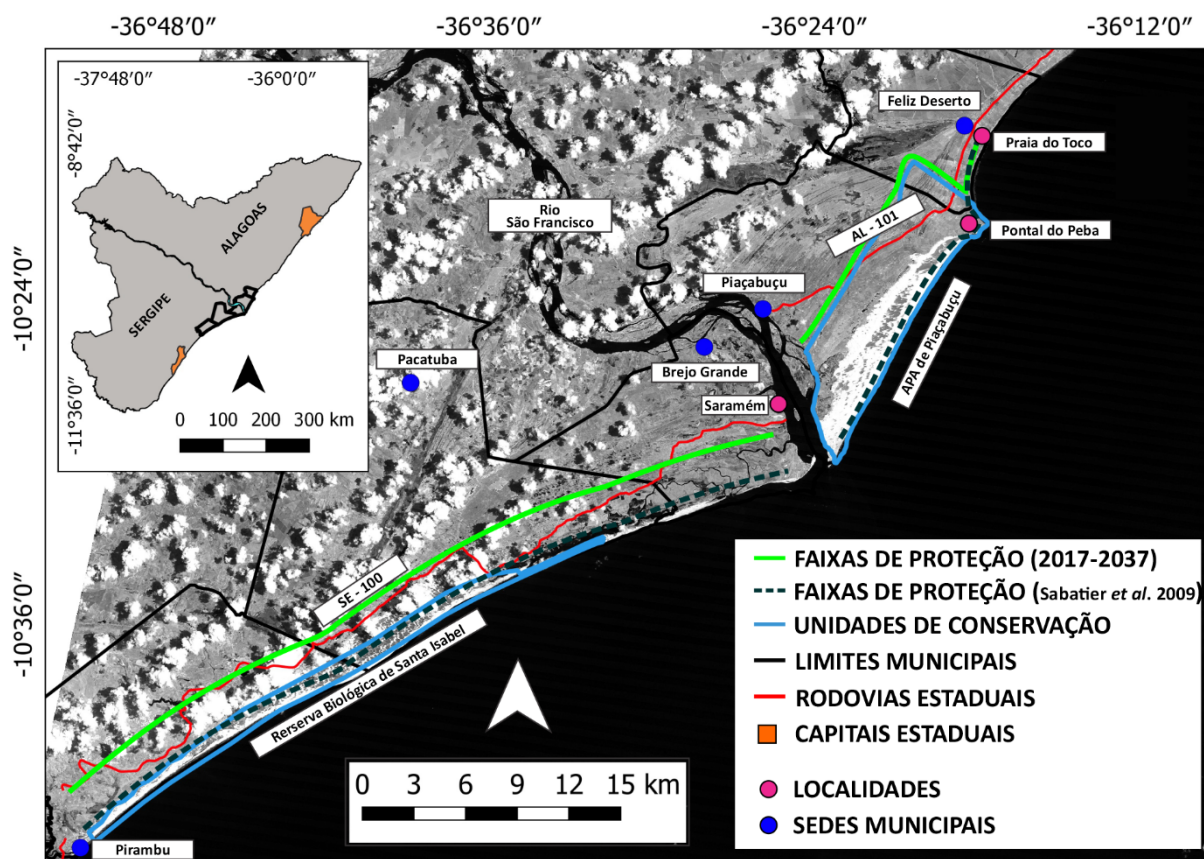


Figura 9 – Faixas de proteção costeira projetadas a partir de 2017 para o ano de 2037 (20 anos). O método numérico projetou a faixa final (verde) do lado sergipano e tracejada (parcial) em preto no lado alagoano. Por estar sobre as dunas e dentro da APA de Piaçabuçu, a faixa tracejada foi recuada ao limite interno das unidades de conservação e/ou ecossistêmicas, faixa final verde. Carta-imagem da banda pancromática do satélite Landsat-8 (18/04/2017).

As maiores taxas de acreção da linha de costa eram esperadas nos trechos próximos à desembocadura do rio São Francisco de ambos os setores, pois essas são as áreas de anexação de sedimentos provenientes da deriva longitudinal, barras fluviais e do “efeito molhe” (Dominguez et al. 1983; Dominguez 1996; Bittencourt et al. 2007; Weiguo et al. 2011). Além disso, a maior velocidade do fluxo fluvial, quando comparada ao canal de Parapuça, está associada à maior magnitude do transporte de sedimentos (Stevaux & Latrubesse 2017). Nesse caso, para a foz e áreas adjacentes. Porém, a redução da vazão fluvial (Figura 6) diminuiu a carga sedimentar transportada pelo rio São Francisco e reduziu o acúmulo de sedimentos próximo à foz, favorecendo o recuo da linha de costa. Por isso, nos trechos próximos à foz do rio São Francisco estiveram a taxa mais extrema de recuo do setor 1 (transecto 13 - período de 2010 a 2017) e do setor 2 (transecto 14 -

período de 1986 a 1996), como visto na figura 2 e tabelas 1 e 2. No caso do transecto 14 (setor 2), a taxa mais extrema (1986 a 1996) representou o recuo que, posteriormente, culminou na destruição do povoado do Cabeço, em 1998 (Bittencourt et al. 2007).

Essas taxas foram superiores às utilizadas em faixas de proteção costeiras observadas na literatura, que variaram de -0,3 a -2,5 m/ano (Ferreira et al. 2006; Sabatier et al. 2009; Globe & Mackay 2013; Jongejan et al. 2016; Abdalla et al. 2017), e a outras áreas de desembocaduras e embocaduras fluviais ou canais de maré (Sabatier et al. 2009, Hoang et al. 2015). No entanto, os valores são comparáveis à taxa de erosão de -132 m/ano encontrada no delta do Nilo (Hereher 2011). Porém, ainda assim a taxa mais extrema do lado sergipano foi superior. Dessa forma, a análise quantitativa de tais taxas expôs a gravidade do processo erosivo no delta do rio São Francisco.

O valor menos acentuado da taxa mais extrema do lado alagoano quando comparada ao lado sergipano (Tabela 2) se deve ao fato da principal fonte sedimentar do setor 1 ser a ação episódica de retenção de sedimentos transportados pela deriva litorânea pela vazão fluvial, através do “efeito molhe”. Além disso, é importante destacar a participação do banco recifal submerso e dunas (77% da extensão da linha de costa do lado alagoano do delta) na dinâmica costeira, que contribuiu para taxas de recuo mais suaves no setor 1. A divergência no sentido da deriva litorânea na região do Pontal do Peba (Guimarães 2010) tende a gerar um déficit sedimentar, tornando a área favorável às taxas de erosão mais acentuadas. Nesse contexto, o banco recifal submerso (transectos 4 e 5) resistiu à tendência erosiva apresentando comportamento de acreção em ao menos um dos transectos nos períodos de 1986 a 1996 e 1998 a 2007 (Figuras 3 e 4) e de 1986 a 2017 (Figura 7). Além disso, as dunas representam uma defesa natural contra a erosão costeira por constituírem uma reserva de areia para a praia em um eventual déficit de sedimentos (Pranzini et al. 2015). Por isso, a presença das dunas contribuiu para taxas de recuo mais brandas no lado alagoano (setor 1), principalmente nos trechos próximos à foz, o que não ocorre no lado sergipano (setor 2), com trechos próximos à foz bordejados por manguezais.

Essa dinâmica costeira do lado alagoano é essencial para entender a variabilidade da taxa mais extrema de recuo de 1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017 para o setor 1 (Tabela 2). Com a redução da vazão fluvial média (Figura 6), e, consequentemente, diminuição do aporte sedimentar pelo “efeito molhe”, eram esperadas taxas gradualmente mais erosivas no lado alagoano ao longo dos três períodos. Porém, essa tendência não ocorreu, devido às eventuais contribuições sedimentares das dunas, barras fluviais e da deriva litorânea. Por vezes, esse aporte sedimentar suavizou o déficit sedimentar, principalmente nos trechos alagoanos próximos à foz, sendo responsável pela oscilação entre valores maiores e menores das taxas mais extremas de recuo do setor 1 (Tabela 2). Isso foi evidenciado pelo baixo valor de R^2 (Tabela 1) da taxa mais extrema de recuo do setor 1 (transecto 13 - período de 2010 a 2017), que representou a alta variabilidade de posições da linha de costa indicada pela alternância de comportamentos da linha de costa nesses trechos (Figuras 3, 4, 5 e 7).

O valor mais acentuado da taxa mais extrema de recuo do lado sergipano quando comparada ao lado alagoano (Tabela 2) se deve às interferências antrópicas de redução da descarga sedimentar fluvial pela construção de barragens no curso fluvial, mas também aos fatores naturais, como a divergência do sentido da deriva litorânea (Oliveira 2003) e a ausência de dunas nos trechos sergipanos próximos à foz do rio São Francisco. O principal fator controlador da posição da linha de costa no delta do rio São Francisco é a descarga sedimentar fluvial (Dominguez et al. 2018),

gradualmente reduzida após as construções das barragens no rio São Francisco (Dominguez & Bittencourt 1996; Fontes 2001; Oliveira 2003; Bittencourt et al. 2007; Medeiros et al. 2007; Medeiros et al. 2014). Esse fato representou um déficit sedimentar considerável para a linha de costa.

É importante ressaltar que em períodos de baixa descarga fluvial, os sedimentos trazidos pelo transporte longitudinal não ficam retidos no lado alagoano e são carregados para o lado sergipano do delta, através do bypass sedimentar, que, por vezes, deposita-se na linha de costa (Dominguez et al. 1983; Dominguez 1996; Bittencourt et al. 2007). Além disso, os sedimentos de barras fluviais submersas e/ou emersas na foz são anexados aos trechos sergipanos pela ação das ondas (Dominguez 1996). Essa dinâmica costeira é essencial para entender a elevada variabilidade morfológica dos trechos próximos à foz do lado sergipano (Oliveira 2003; Bittencourt et al. 2007), representada pela diferença de valores entre a taxa mais extrema de 1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017 para o setor 2 (Tabela 2). Com a redução do aporte sedimentar fluvial, induzida pela diminuição da vazão fluvial média (Figura 6), eram esperadas taxas gradualmente mais extremas no lado sergipano ao longo dos três períodos. Porém, essa tendência não ocorreu, devido aos eventuais *bypass* sedimentares e anexações de barras fluviais que foram responsáveis pelo gradual abrandamento dos valores das taxas mais extremas de recuo do setor (Tabela 2). Entretanto, apesar de suavizar as taxas de recuo da linha de costa, o aporte sedimentar não conteve a tendência erosiva nos trechos sergipanos próximos à foz, área da antiga posição do Cabeço, representada pelo alto valor do R^2 da taxa mais extrema do setor 2 (transecto 14 - período de 1986 a 1996). Essa tendência de continuidade do processo erosivo foi confirmada através da presença de grandes taxas de recuo em todos os períodos de análise nos trechos sergipanos próximos à foz do rio São Francisco (Figuras 2, 3, 4, 5 e 7).

Portanto, a redução das vazões fluviais médias não acentuou o valor das taxas mais extremas de recuo ao longo dos períodos curtos de análise (Tabela 2), mas esteve associada à estabilidade e/ou aumento do percentual de trechos em recuo no delta do rio São Francisco (Figura 6). De 2010 a 2017, a redução da vazão fluvial média e, consequentemente, o fluxo de material particulado na foz atingiram valores críticos que alteraram a dinâmica costeira, causando um déficit sedimentar que provavelmente não foi compensado por outras fontes sedimentares. Dessa forma, no período de vazão fluvial média mínima, houve intensificação generalizada de trechos em recuo costeiro (Figura 6), que pode indicar uma tendência para os próximos anos pelo fato do período de 2010 a 2017 apresentar, em geral, valores altos de R^2 (Tabela 1).

A partir das taxas mais extremas de recuo do delta do rio São Francisco (Tabela 2) foi possível inferir o grau de influência do balanço sedimentar e da elevação

do nível do mar no recuo da linha de costa. Haja visto que as taxas representaram o balanço sedimentar de determinado setor, ou seja, a interação entre todos os agentes fornecedores e retirantes de sedimentos atuantes na dinâmica costeira (descarga sedimentar fluvial, variação do nível relativo do mar, ação de ondas, deriva litorânea, etc.), não foi necessário quantificar a ação de todos os agentes separadamente. Dessa forma, as taxas de variação da linha de costa consideraram também variações do nível relativo do mar de 1986 a 2017. Cazenave et al. (2019) propuseram a elevação média do nível global do mar de $3,15 \pm 0,3$ mm/ano de 1993 a 2019. Dessa forma, eram esperadas taxas gradualmente mais extremas, porém este registro não ocorreu (Tabela 2). Portanto, o balanço sedimentar negativo induzido pela menor disponibilidade de sedimentos das fontes foi mais atuante para ocorrência das taxas mais extremas de recuo encontradas nos lados alagoano e sergipano do delta de 1986 a 2017, quando comparado à elevação do nível do mar global.

Em todo o período investigado, de 1986 a 2017, predominou o comportamento de acreção na linha de costa (Figura 7). Além disso, o promontório de Pontal do Peba e o trecho mais próximo à foz no lado alagoano apresentaram constante acreção. Porém, esses comportamentos nem sempre foram representados nos períodos de 1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017 (Figuras 3, 4 e 5). Este fato mostrou que análises de períodos médios (1986 a 2017) podem não apresentar o detalhamento da evolução do comportamento da linha de costa vista nas análises em períodos curtos (1986 a 1996, 1998 a 2007 e 2010 a 2017), sendo fundamental para determinação das faixas de proteção para o delta do rio São Francisco.

6.2 Faixas de proteção costeira (*setback lines*)

As faixas de proteção costeira projetadas através de análises de variação da linha de costa de períodos médios não representariam a segurança ideal às ocupações humanas, pois não considerariam a possibilidade real de recuo da linha de costa vista em análises de curto prazo. Por isso, a determinação das faixas pelo método numérico utilizou as taxas mais extremas de recuo dos lados alagoano e sergipano do delta, evidenciadas em curtos períodos de análise. Essas taxas foram consideradas pontuais, por representarem um comportamento de recuo presente apenas nos trechos próximos à foz do rio São Francisco.

Estas abordagens foram importantes por dois motivos. O primeiro foi devido à oscilação dos valores das taxas de recuo (Tabela 2). Dessa forma, utilizando as taxas mais extremas de recuo (independentemente do valor do R^2), foi considerado o cenário de recuo de pior caso e a possibilidade de recuo máximo da linha de costa, resultando em faixas extremamente protecionistas. O segundo foi a possibilidade de transferência das taxas de recuo entre os transectos,

como visto através da migração do canal de Parapuça (Guimarães & Dominguez 2008). Dessa forma, através de faixas lineares (formuladas por taxas consideradas pontuais), este método considerou a possibilidade máxima de recuo da linha de costa para todos os transectos do delta. Portanto, essas abordagens garantem a redução dos riscos socioeconômicos às ocupações humanas.

Segundo Wainwright et al. (2014), os métodos utilizados para determinar as faixas de proteção costeiras diferem de acordo com as características de cada região. Dessa forma, devido à pouca disponibilidade de dados da área de estudo, o método numérico proposto por Sabatier et al. (2009) foi considerado o mais adequado para o delta do rio São Francisco neste trabalho.

O método numérico adaptado a partir de Sabatier et al. (2009) teve sua eficiência comprovada pelo fato de após 31 anos não haver recuo costeiro sobrepondo as larguras das faixas (Figura 8). A sugestão de tais faixas minimizaria os danos socioeconômicos ao recuo costeiro de 1986 a 2017, mas o posicionamento da faixa do lado alagoano permitiria ocupações humanas sobre as dunas e a APA de Piaçabuçu. Essa conduta foi evitada com o objetivo de preservar as dunas, importantes no balanço sedimentar da linha de costa (Pranzini et al. 2015), além de proteção da biodiversidade, função da APA de Piaçabuçu (Vieira et al. 2010). Nesse último caso, a faixa do lado alagoano poderia estar localizada sobre a APA de Piaçabuçu (no limite interno das dunas), haja visto que uma área de proteção ambiental pública permite certo grau de ocupação humana (Vieira et al. 2010). Porém, localizando a faixa no limite interno da unidade de conservação, a proteção da diversidade biológica local atingirá níveis máximos. Dessa forma, para o lado alagoano (setor 1) existiu a necessidade do uso do critério de recuo de faixas de acordo com as características geomorfológicas e/ou socioambientais locais.

No delta do rio São Francisco, os lados alagoano e sergipano do delta apresentaram intensidades de recuo diferentes devido às dinâmicas costeiras distintas, exigindo faixas de proteção costeiras que atendessem às necessidades locais. Portanto, houve a junção do método numérico adaptado, para as faixas de proteção do lado sergipano, e o critério de recuo ao limite interno da APA de Piaçabuçu, para as faixas de proteção do lado alagoano (Figura 9). Esse modelo visou incentivar a sustentabilidade ambiental ao aliar o desenvolvimento econômico à responsabilidade ambiental. Além de mostrar que as características geomorfológicas e/ou socioambientais locais podem promover mudanças na largura das faixas, facilitando sua viabilidade. Este método poderá ser reproduzido em áreas similares.

A projeção de 20 anos foi considerada ideal por não ser tão curta para um planejamento ocupacional e nem

tão longa para a desatualização dos dados. A largura das faixas se adequa às condições ambientais da linha de costa. Portanto, mesmo sendo projetadas para 20 anos, recomenda-se que as faixas de proteção devem ser revistas e atualizadas a cada 5 a 10 anos (Ferreira et al. 2006). Para o refinamento de futuras análises é necessária a aquisição e interpretação de dados de sensoriamento remoto, meteorológicos, oceanográficos e socioeconômicos para aumentar a precisão da projeção das faixas de proteção costeiras através de análises de variação da linha de costa em períodos mais curtos.

Devido à alta variabilidade do posicionamento da linha de costa nas áreas próximas às desembocaduras fluviais (Oliveira 2003; Bittencourt et al. 2007), as faixas de proteção costeiras projetadas para 2037 (Figura 9) se mostraram ideais, evitando e/ou impedindo a ocupação humana nessas áreas consideradas extremamente dinâmicas, como sugerido por Muehe (2004) e Dominguez et al. (2018). Além disso, o fato de ser uma região pouco povoada possibilita que a implementação das faixas seja mais facilmente viável, pois, não teriam tanta resistência pela ainda baixa especulação imobiliária local.

Apesar da maior parte da linha de costa do delta ser delimitada por unidades de conservação, trechos de alta variabilidade próximos à foz não fazem parte da Reserva Biológica de Santa Isabel, em Sergipe (Figura 1). Visando evitar novos danos socioeconômicos, Dominguez et al. (2018) sugeriram que áreas de grande dinamicidade se tornem unidades de conservação, evitando ocupações humanas. Após o deslocamento para o interior, a atual localização do antigo povoado do Cabeço, atual povoado de Saramém (6 km da linha de costa) se mostrou adequada à faixa de proteção, não sendo necessário um recuo da ocupação humana local até 2037 (Figura 9).

5. Conclusões

Aspectos naturais e antrópicos da morfodinâmica costeira influenciaram na ocorrência erosiva no delta do rio São Francisco. A quantificação do recuo costeiro, em curtos períodos, constatou que a ação isolada da redução da vazão no baixo curso do rio São Francisco não tornou as taxas numericamente mais extremas. Porém, contribuiu para o aumento do percentual de trechos em recuo na linha de costa, de 2010 a 2017.

As faixas de proteção costeira para 2037 utilizaram o método numérico no lado sergipano e o critério de recuo aos limites da unidade de conservação no lado alagoano. A implantação das faixas permite o planejamento ambiental através da realocação de pessoas e/ou infraestruturas e novos usos do espaço físico em médio prazo. Dessa forma, é possível evitar futuras ocupações nestes locais, reduzir os riscos socioeconômicos e ambientais ao recuo costeiro e favorecer a preservação de dunas e manguezais. Essa conduta visa aliar o desenvolvimento econômico à

responsabilidade ambiental no delta do rio São Francisco

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA) por disponibilizar a licença do programa ArcGIS 10.2, ao editor da revista, Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes, e aos revisores anônimos.

Referências

- ABDALLA D.S., MOOTY M.E., SOLIMAN M. 2017. Coastal setback line considering the effect of run-up for the Nile delta zone. XX International Water Technology Conference, 512-522.
- ACHEN C.H. 1977. Measuring representation: Perils of the correlation coefficient. *American Journal of Political Science*, 21:805-815.
- ALBUQUERQUE M., ESPINOZA J., TEIXEIRA P., OLIVEIRA A., CORRÊA, I., CALLIARI L. 2013. Erosion or coastal variability: An evaluation of the DSAS and the change polygon methods for the determination of erosive processes on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 65:1710-1714.
- ANFUSO G., GARCIA F.J. 2005. Morphodynamics characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: Implications for coastal erosion management. *Journal of Coastal Research*, 21:6:1139-1153.
- BARBOSA L. M., LIMA C.C.U., SANTOS R.C.L., CARVALHO J.B., SANTOS C.F., ALBUQUERQUE A.L.S. 2003. As variações morfológicas do campo de dunas ativas entre Pontal do Pebi e a foz do rio São Francisco (AL). II Congresso sobre planejamento e gestão das zonas costeiras dos países de expressão portuguesa, IX Congresso da associação brasileira de estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário dos países de línguas ibéricas, 1-3.
- BARRETO S.A., RODRIGUES T.K. 2016. Usos e conflitos na Reserva Biológica de Santa Isabel no trecho da zona costeira do Grupo de Bacias Costeiras 01 – Sergipe. III Seminário nacional espaços costeiros, 1-12.
- BELIZE. 2003. Law Revision Act. National lands act: Chapter 191 (revised edition 2003). 40p.
- BIRD E. 2008. Coastal geomorphology: An introduction - Second ed. Wiley, Inglaterra, 412p.
- BITTENCOURT A.C.S.P., DOMINGUEZ J.M.L., FONTES L.C.S., SOUSA D.L., SILVA I.R., DA SILVA F.R. 2007. Wave refraction, river damming and episodes of severe shoreline erosion: The São Francisco river mouth, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 23:04:930-938. DOI: 10.2112/05-0600.1.
- BITTENCOURT A.C.S.P., DOMINGUEZ J.M.L., OLIVEIRA M.B. 2006. Erosão e progradação do litoral brasileiro - Sergipe. In: MUEHE D. (Ed.) Erosão e progradação do litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 213-218p.
- BITTENCOURT A.C.S.P., MARTIN L., DOMINGUEZ J.M.L., FERREIRA A.Y. 1983. Evolução paleogeográfica quaternária da costa do estado de Sergipe e da costa sul do estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 13:02:93-97.
- BOAK E.H., TURNER I.L. 2005. Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21:04:688-703. DOI: 10.2112/03-0071.1.
- CAMARA G., SOUZA R.C.M., FREITAS U.M., GARRIDO J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20:03:395-403.
- CAZENAIVE A., HAMLINGTON B., HORWATH M., BARLETTA V.R., BENVENISTE J., CHAMBERS D., DOLL P., HOGG A.E., LEGEAIS J.F., MERRIFIELD M., MEYSSIGNAC B., MITCHUM G., NEREM S., PAIL R., PALANISAMY H., PAUL F., VON SCHUCKMANN K., THOMPSON P. 2019. Observational requirements for long-term monitoring of the global mean sea level and its components over the Altimetry Era. *Frontiers in Marine Science*, 06:582:1-14. DOI: 10.3389/fmars.2019.00582.
- CIRM - COMISSÃO INTERMINISTERIAL PARA RECURSOS DO MAR. 2018. Guia de diretrizes de prevenção e proteção à

- erosão costeira - Edição 2018. Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro (GI-GERCO), Brasília, 112p. Disponível em: <<https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/patrimonio-da-uniao/destinacao-de-imoveis/arquivos/2018/guia-de-diretrizes-de-prevencao-e-protecao-a-erosao-costeira.pdf/view>>. Acesso em: 29 de abril de 2021.
- COELHO C.D.B. 2005. Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Seção Autônoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 404p.
- COWELL P.J., THOM B.G. 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: R.W.G. Carter, & C.D. Woodroffe, (Eds), Coastal evolution, late quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge University. 540p
- CPSE - CAPITANIA DOS PORTOS DE SERGIPE – MARINHA DO BRASIL. 2018. Tábuas de Maré. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabas-de-mare>>. Acesso em: 09 fev. 2018.
- CROWELL M., LEATHERMAN S.P., BUCKEY M.K. 1993. Shoreline change rate analysis: long term versus short-term data. *Shore and Beach*, 61:01:13-20.
- DOMINGUEZ J.M.L., BITTENCOURT A.C.S.P., MARTIN L. 1992. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: Roles of sea-level history, trade winds and climate. *Sedimentary Geology*, 80:213-232.
- DOMINGUEZ J.M.L., BITTENCOURT A.C.S.P., MARTIN L. 1983. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, 13:02:98-105.
- DOMINGUEZ J.M.L., BITTENCOURT A.C.S.P. 1996. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 355-371.
- DOMINGUEZ J.M.L., GUIMARÃES J.K., BITTENCOURT A.C.S.P. 2018. Alagoas, Sergipe e Bahia. In: MUEHE D. (Ed.) *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 341-432p.
- DOMINGUEZ J.M.L. 1996. The São Francisco strandplain: A paradigm for wave-dominated deltas. *Geological Society Special Publication*, 117:217-231.
- DUARTE G.S., COSTA G.E., OLIVEIRA A.P., BARROS R.S., CRUZ C.B.M. 2015. O uso da geometria do Landsat 8 como base para georreferenciamento semiautomático visando estudos espaço-temporais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5216-5223.
- ESTEVEZ L.S., FINKL C.W. 1998. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 26:11-18.
- FERREIRA O., GARCIA T., MATIAS A., TABORDA R., DIAS J.A. 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, 26:1030-1044. DOI:10.1016/j.csr.2005.12.016.
- FIGUEIREDO FILHO D.B., SILVA J.A., ROCHA E. 2011. What is R² all about? *Leviathan – Cadernos de Pesquisa Política*, 3:60-68.
- FONTES A.L. 2001. Processos erosivos na desembocadura do Rio São Francisco. VIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 66-67p.
- FREITAS D., ARAÚJO R.S., KLEIN A.H.F., MENEZES J.T. 2010. Quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras para a enseada do Itapocorói – SC. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 14:01:39 – 49.
- GARRISON T. 2010. *Fundamentos de Oceanografia - Quarta Ed.* Cengage Learning, São Paulo, 426p.
- GLOBE B.J., MACKAY C.F. 2013. Developing risk set-back lines for coastal protection using shoreline change and climate variability factors. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 65:2125-2130. DOI: 10.2112/S165-359.1.
- GUIMARÃES J.K., DOMINGUEZ J.M.L. 2008. A influência da refração de ondas e da deriva litorânea na dinâmica do pontal arenoso de Ponta dos Mangues. XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1-4p.
- GUIMARÃES J.K. 2010. Evolução do delta do rio São Francisco - estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 128p.
- HAPKE C.J., REID D. 2007. National assessment of shoreline change, part 4: historical coastal cliff retreat along the California Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1133, Reston, 51p.
- HAPKE C.J., REID D., BRUCE M.R., RUGGIERO P., LIST J. 2006. National assessment of shoreline change part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1219, Reston, 72p.
- HEGDE A.V. 2010. Coastal erosion and mitigation methods – Global State of art. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 39:04:521-530.
- HEREHER M.E. 2011. Mapping coastal erosion at the Nile delta western promontory using Landsat imagery. *Environmental Earth Sciences*, 64:04:1117-1125. DOI 10.1007/s12665-011-0928-9.
- HOANG V.C., THANH T.M., VIET T.N., TANAKA H. 2015. Shoreline change at the Da Rang river mouth, Vietnam. V International Conference on Estuaries and Coasts, 312-318p.
- HOUCK O.A. 2018. *Environmental law in Cuba*. Florida State University Journal of Land Use and Environmental Law, 16:01:1-81.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2018. Climate change 2018: the physical science basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel. Cambridge University Press, Inglaterra, 243p.
- JONGEJAN R., RANASINGHE R., WAINWRIGHT D., CALLAGHAN D.P., REYNIS J. 2016. Drawing the line on coastline recession risk. *Ocean & Coastal Management*, 122:87-94.
- JONAH F.E., BOATENG I., OSMAN A., SHIMBA M.J., MENSAH E.A., ADU-BOAHEN K., CHUKU E.O., EFFAH E. 2016. Shoreline change analysis using end point rate and net shoreline movement statistics: An application to Elmina. Cape Coast and Moree section of Ghana's coast. *Regional Studies in Marine Science*, 07:19-31. DOI 10.1016/j.rsma.2016.05.003.
- KRAUSE G., SOARES C. 2004. Analysis of beach morphodynamics on the Bragantian mangrove peninsula (Pará, north Brazil) as prerequisite for coastal zone management recommendations. *Geomorphology*, 60:225-239.
- LARSON M., KRAUS N.C. 1995. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine Geology*, 126:111-127.
- LUIJENDIJK A., HAGENAARS G., RANASINGHE R., BAART F., GENNADII D., ARNINKHOF S. 2018. The state of the world's beaches. *Scientific Reports-Nature*, 08:6641:1-11. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6.
- MAZZER A.M., DILLENBURG S. 2009. Variações temporais da linha de costa em praias arenosas dominadas por ondas do sudeste da ilha de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 36:01:117-135. DOI: 10.22456/1807-9806.17880.
- MEDEIROS P.R.P., KNOPPERS B.A., DOS SANTOS JUNIOR R.C., DE SOUZA W.F.L. 2007. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). *Geochimica Brasiliensis*, 21:02:212-231.
- MEDEIROS P.R.P., DOS SANTOS M.M., CAVALCANTE G.H., DE SOUZA W.F.L., DA SILVA W.F. 2014. Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): Efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. *Geochimica Brasiliensis*, 28:01:65-78. DOI: 10.5327/Z0102-9800201400010007.
- MELO I.D.F., PACHECO A.P. 2004. Aspectos da correção geométrica das imagens orbitais. I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
- MORTON R.A., MCKENNA K.K. 1999. Analysis and projection of erosion hazard areas in Brazoria and Galveston counties, Texas. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 28:106-120.
- MORTON R.A., MILLER T.L., MOORE L.J. 2004. National Assessment of shoreline change: part 1 historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of

- Mexico. U. S. Geological Survey Open-File Report 2004-1043, Reston, 42p.
- MORTON R.A., MILLER T.L. 2005. National Assessment of shoreline change: part 2 historical shoreline changes and associated coastal land loss along The U.S. Southeast Atlantic Coast. U. S. Geological Survey Open-File Report 2005-1401, Reston, 35p.
- MUEHE D. 2004. Projeto orla: subsídios para um projeto de gestão. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 101p.
- MUEHE D. 2018a. Panorama da erosão costeira no Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 761p.
- MUEHE D. 2018b. Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa – PROCOSTA. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 36p.
- MURRAY C.S., CLARKE C.S.L.M., CLARKE J.D., SCOTT D., CLARKE A.J. 2012. Coastal setbacks in Latin America and the Caribbean: A study of emerging issues and trends that inform guidelines for coastal planning and development. IDB - TN – 476, Estados Unidos, 175p.
- NIMER E. 1989. Climatologia do Brasil - 2ª Edição. IBGE, Rio de Janeiro, 421p.
- NORDSTROM K.F. 2010. Recuperação de praias e dunas. Oficina de Textos, Cubatão, 264p.
- OLIVEIRA A.M., JUNIOR R.C.S., HERNANDEZ A.O., SEGUNDO G.H.C., ARAÚJO A.E.M. 2003. A morte do delta do rio São Francisco. II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário dos Países de Línguas Ibéricas, 1-4p.
- OLIVEIRA M.B. 2003. Caracterização integrada da linha de costa do Estado de Sergipe - Brasil. Tese de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 102p.
- PIANCA C., MAZZINI P.L., SIEGLE E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NNM3 Reanalyses. Brazilian Journal of Oceanography, 58:01:53-70.
- PRANZINI E., WETZEL L., WILLIAMS A.T. 2015. Aspects of coastal erosion and protection in Europe. Journal of Coastal Conservation, 19:445-459. DOI 10.1007/s11852-015-0399-3.
- QUADRADO G.P., DILLENBURG S.R., GOULART E.S., BARBOZA E.G. 2021. Historical and geological assessment of shoreline at a urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. Regional Studies in Marine Sciences, 42:1-19.
- SABATIER F., SAMAT O., BRUNEL C., HEURTEFEUX H., DELANGHE-SABATIER D. 2009. Determination of set-back lines on eroding coasts. Example of the beaches of the Gulf of Lions (French Mediterranean Coast). Journal of Coastal Conservation, 13:57-64. DOI 10.1007/s11852-009-0062-y.
- SANCHEZ-ARCILLA A., JIMENEZ J.A., VALDEMORO H.I. 1998. The Ebro delta: morphodynamics and vulnerability. Journal of Coastal Research, 14:03:754-772.
- SANTOS E.A.P., LANDIM M.F., OLIVEIRA E.V.S., SILVA A.C.D. 2017. Conservação da zona costeira e áreas protegidas: a Reserva Biológica de Santa Isabel (Sergipe) como estudo de caso. Natureza Online, 15:03:41-57. ISSN 1806-7409.
- SILVA R., MARTÍNEZ M.L., HESP P.A., CATALAN P., OSORIO A.F., MARTELL R., FOSSATI M., SILVA G.M., MARIÑO-TAPIA I., PEREIRA P., CIENGUEGOS R., KLEIN A., GOVAERE G. 2014. Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. Journal of Coastal Research, Special Issue, 71:1-16. DOI: 10.2112/SI71-001.1.
- STAFFORD D.B., LANGFELDER J. 1971. Air photo survey of coastal erosion. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 37:06:565-575.
- STEVAUX J.C., LATRUBESSE E.M. 2017. Geomorfologia Fluvial. Oficina de Textos, São Paulo, 320p.
- SUGUIO K., MARTIN L., BITTENCOURT A.C.S.P., DOMINGUEZ J.M.L., FLEXOR J., AZEVEDO A.E.G. 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. Revista Brasileira de Geociências, 15:04:273-286.
- THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., ERGUL A. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey, Reston, 79p.
- VIEIRA C.L., GONÇALVES V., VIEIRA R.C., BESERRA M.L. 2010. Plano de manejo para Área de Proteção Ambiental de Piaçabuçu. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 497p.
- WAINWRIGHT D.J., RANASINGHE R., CALLAGHAN D.P., WOODROFFE C.D., COWELL P.J., ROGERS K. 2014. An argument for probabilistic coastal hazard assessment: Retrospective examination of practice in New South Wales, Australia. Ocean & Coastal Management, 95:147-155.
- WEIGUO L., BHATTACHARYA J.P., YINGMIN W. 2011. Delta asymmetry: Concepts, characteristics, and depositional models. Petroleum Science, 08:03:278-289. DOI 10.1007/s12182-011-0145-x.