

ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL E MODELAGEM PREDITIVA DA LINHA DE COSTA DO ESTADO DO CEARÁ

SPATIAL-TEMPORAL ANALYSIS AND PREDICTIVE MODELING OF THE COASTAL ZONE OF THE STATE OF CEARÁ

Luiz Henrique Joca LEITE, Narelle MAIA de ALMEIDA

Universidade Federal do Ceará. Departamento de Geologia. Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA). Campus do Pici – Bloco 912 – Fortaleza – CE. E-mail: luizhjoca@gmail.com; narelle@ufc.br

Introdução
Área de estudo
Materiais e métodos
 Análise de linhas de costa utilizando DSAS
 Análise exploratória
 Modelagem preditiva das linhas de costa
Resultados e discussões
 Litoral Leste
 Litoral Metropolitano
 Litoral Oeste
 Litoral Extremo-Oeste
 Modelagem preditiva para os anos 2030 e 2040
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A zona costeira do estado do Ceará, Brasil, é uma região caracterizada pela sua elevada densidade populacional e relevância econômica. Nas últimas décadas, esta região tem apresentado diversos indicadores de desequilíbrio, com destaque para processos erosivos cada vez mais intensos. O presente estudo, tem como objetivo realizar uma análise espaço-temporal da zona costeira do estado do Ceará para os últimos 35 anos (1984-2020), analisando dados de sensores remotos (LANDSAT) através das variáveis estatísticas presentes no *Digital Shoreline Analysis System*. Identificou-se através dos valores de *net shoreline movement*, que 28% da linha de costa do estado apresenta tendências deposicionais, ao passo que 56% apresentam tendências erosivas. Os valores de *linear regression rate* e *end point rate* apontam para 13% da costa submetida a tendências deposicionais e 38% a tendências erosivas. Os valores preditivos, utilizando o modelo de Filtro de Kalman, apontam para um percentual de 34% do litoral submetido a tendências deposicionais e 49% submetidos a tendências erosivas, até 2040. Os resultados da presente pesquisa apontam para necessidade de realização de estudos mais aprofundados de modelagem e, principalmente, predição da linha de costa do estado do Ceará, a fim de subsidiar de forma adequada o planejamento costeiro e marinho do estado.

Palavras-chave: Zona Costeira. Sensoriamento Remoto. Erosão Costeira. DSAS. Landsat.

ABSTRACT - The coastal zone of the state of Ceará, Brazil, is a region characterized by its high population density and economic relevance. In recent decades, this region has presented several indicators of disequilibrium, with emphasis on increasingly intense erosive processes. This study performs a spatial-temporal analysis of the coastal zone of the state of Ceará for the last 35 years (1984–2020), analyzing remote sensing data (LANDSAT) through the statistical variables present in the Digital Shoreline Analysis System. The net shoreline movement values show that 28% of the state coastline presents depositional tendencies, while 56% presents erosive tendencies. The linear regression rate and end point rate values indicate that 13% of the coastline is subject to depositional tendencies and 38% to erosive tendencies. The predicted values, using the Kalman Filter model, point to a percentage of 34% of the coast subject to depositional tendencies and 49% subject to erosive tendencies, until 2040. The results of this research point to the need for further studies of modeling and, especially, prediction of the coastline of the state of Ceará, to adequately support the coastal and marine planning of the state.

Keywords: Coastline. Remote Sensing. Coastal Erosion. DSAS. Landsat.

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras estão classificadas como um dos ambientes mais dinâmicos da superfície terrestre. Dentre os elementos que compõem as zonas costeiras, as linhas de costa podem ser classificadas como a unidade mais dinâmica desses ambientes. O dinamismo destas regiões é afetado por uma série de fatores, sejam estes naturais, como o regime de ventos e marés, correntes, relevo e composição dos sedimentos

presentes na costa; ou de origem antrópica, como a construção de estruturas portuárias, urbanização e industrialização das zonas costeiras (Kannan et al., 2013; Hakkou et al., 2018). Os efeitos relacionados às mudanças climáticas, como o aumento acelerado do nível do mar e o crescimento no número de tempestades nessas regiões, também se têm mostrado como agravantes de alto impacto nas mudanças de compor-

tamento das linhas de costa globais, principalmente no que tange ao agravamento da erosão costeira (Pedrozo-Acuña et al., 2015; Hossain et al., 2021).

O estudo do comportamento das linhas de costa se dá a partir da análise do balanço sedimentar, ou seja, a análise da variação de ganho e perda de sedimento ao longo de um período determinado (Rosati, 2005). Estas variações podem caracterizar processos de acreção, quando há avanço em direção ao mar, erosão, quando há recuo em direção ao continente, ou equilíbrio, quando não existem variações significativas (Salghuna & Bharathvaj, 2015) e a continuidade ou ciclicidade destes processos tende a variar a depender do intervalo de tempo analisado. Os diferentes comportamentos apresentados pelas linhas de costa, em geral, estão relacionados à variação do aporte sedimentar presente na zona costeira, entretanto outros fatores como variações do nível do mar, processos de elevação continental, eventos climáticos extremos ou distúrbios antropogênicos também podem condicionar essas variações de perda e ganho de sedimentos. Com isso, a depender das circunstâncias e da forma como esses agentes se combinam e interagem, o comportamento da linha de costa de determinada região pode ser avaliado como um processo cíclico inerente da região ou um indicador claro de desequilíbrio ambiental (Mahapatra et al., 2014; Komar, 2018; Natarajan et al., 2021).

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem-se mostrado como ferramentas mais apropriadas na avaliação do comportamento das linhas de costa em comparação aos métodos tradicionais. O aperfeiçoamento na resolução espacial, espectral e temporal dos sensores tem fornecido resultados promissores para a detecção, extração e monitoramento das linhas de costa (Parthasarathy & Deka, 2021). Nesse sentido, a combinação entre dados extraídos de sensores remotos e modelos matemáticos tem se destacado na avaliação e predição do comportamento das linhas de costa, apresentando bons índices de acurácia e precisão (Ekercin, 2007; Cui & Li, 2011; Louati et al., 2015; Zed et al., 2018; Ferreira et al., 2021). Segundo Apostolopoulos & Nikolakopoulos (2021), as imagens dos satélites da série Landsat, a partir dos sensores *Multi Spectral Scanner* (MSS), *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)

e *Operation Land Imager* (OLI) caracterizam a principal fonte de extração de dados em estudos relacionados ao comportamento de linhas de costa, atualmente. Junto a isso, os métodos estatísticos *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR), *Net Shoreline Movement* (NSM) e *Shoreline Change Envelope* (SCE) tem sido os mais amplamente utilizados para calcular e prever o movimento de linhas de costa (Deepika et al., 2014; Hegde & Akshaya, 2015; Jonah et al., 2016; Ataol et al., 2019). Nesse sentido, atualmente, o cálculo destas variáveis estatísticas vem sendo comumente realizado a partir da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), desenvolvida pelo *United States Geological Service* (USGS), que permite o cálculo dos valores de EPR, LRR, NSM e SCE a partir de dados derivados de séries temporais de imagens de satélite, possibilitando a elaboração de diagnósticos e possíveis prognósticos (Himmelstoss et al., 2018; Lemos & Sopchaki, 2020).

O Brasil possui, aproximadamente, 8698 km de linha de costa, no qual, 573 km deste total pertencem a zona costeira do estado do Ceará, na porção nordeste do país (Zamboni & Nicolodi, 2008; Morais et al., 2018). Essa faixa do litoral brasileiro se destaca pela sua grande diversidade de ecossistemas, como campos de dunas, áreas de manguezais e cursos fluviais, que caracterizam elementos centrais em algumas das principais atividades econômicas da região, como o turismo e a pesca.

Esta unidade, entretanto, também se destaca pelo acelerado crescimento de seus núcleos urbanos, que junto ao cenário de mudanças climáticas globais, tem apontado para uma fragilidade crescente do sistema litorâneo (Brandão & Freitas, 2014; Morais et al., 2018). Por conta disso, a morfodinâmica da linha de costa do Estado do Ceará vem sendo analisada por diversos autores nos últimos anos. Silva et al. (2019) analisaram a evolução da linha de costa do Ceará, utilizando imagens Landsat TM e OLI, nos intervalos entre 1984-1991, 1991-2000, 2000-2008 e 2008-2018, avaliando as porções de acreção e erosão através da interseção geométrica de polígonos em datas distintas. Ao passo que trabalhos como os de Perote (2019), Souza (2016), Teixeira et al. (2021) e Chacanza et al. (2022) estimam as taxas de acreção e erosão ao longo de frações do litoral cearense através de variáveis como SCE, NSM, EPR e LRR, por meio da utilização do DSAS. No entanto,

análises integradas da linha de costa de todo o estado são escassas e análises preditivas, inexistentes.

Nesse sentido, o presente estudo avaliou a variação espacial e temporal da linha de costa de todo o estado do Ceará utilizando técnicas de sensoriamento remoto e SIG a fim de compreender os aspectos presentes nas mudanças ocorridas nessa região. A partir disso utilizou-se o DSAS a fim de calcular as taxas de erosão e acresção nas

últimas quatro décadas (1984–2020) para a linha de costa do Ceará, bem como a modelagem preditiva utilizando o Filtro de Kalman, para predição da evolução dessa porção do litoral para as próximas duas décadas. Sendo assim, o presente trabalho visa contribuir para uma melhor compreensão na dinâmica costeira de todo o estado, visando analisar toda a linha de costa de forma integrada e com isso servir de subsídio ao planejamento costeiro do estado do Ceará.

ÁREA DE ESTUDO

A linha de costa do estado do Ceará se caracteriza como uma porção do litoral brasileiro de alta importância socioambiental.

Localizada entre os paralelos 2.5° – 5° S, e os meridianos 37° – 42° W, a zona costeira cearense é limitada a leste pelos campos de dunas da praia de Manibú e a oeste pelo sistema estuarino Timonha/Ubatuba (Morais et al., 2018). A orientação da linha de costa se mostra predominante no sentido SE-NW entre os municípios de Icapuí e Acaraú, e E-W entre os municípios de Acaraú e Barroquinha (Figura 1).

A costa do Ceará é composta predominantemente por coberturas sedimentares arenosas de idades que variam do Neógeno ao Quaternário, contendo diversas gerações de dunas transgressivas pleistocênicas, junto a praias, planícies estuarinas e falésias. Também é possível encontrar em algumas praias desta região, porções do embasamento cristalino pré-cambriano ocorrendo principalmente na forma de promontórios (Pinheiro et al., 2016).

Os solos predominantes são os Argissolos, profundos e moderadamente profundos, com textura variando de média (arenosa) a argilosa (Morais et al., 2006).

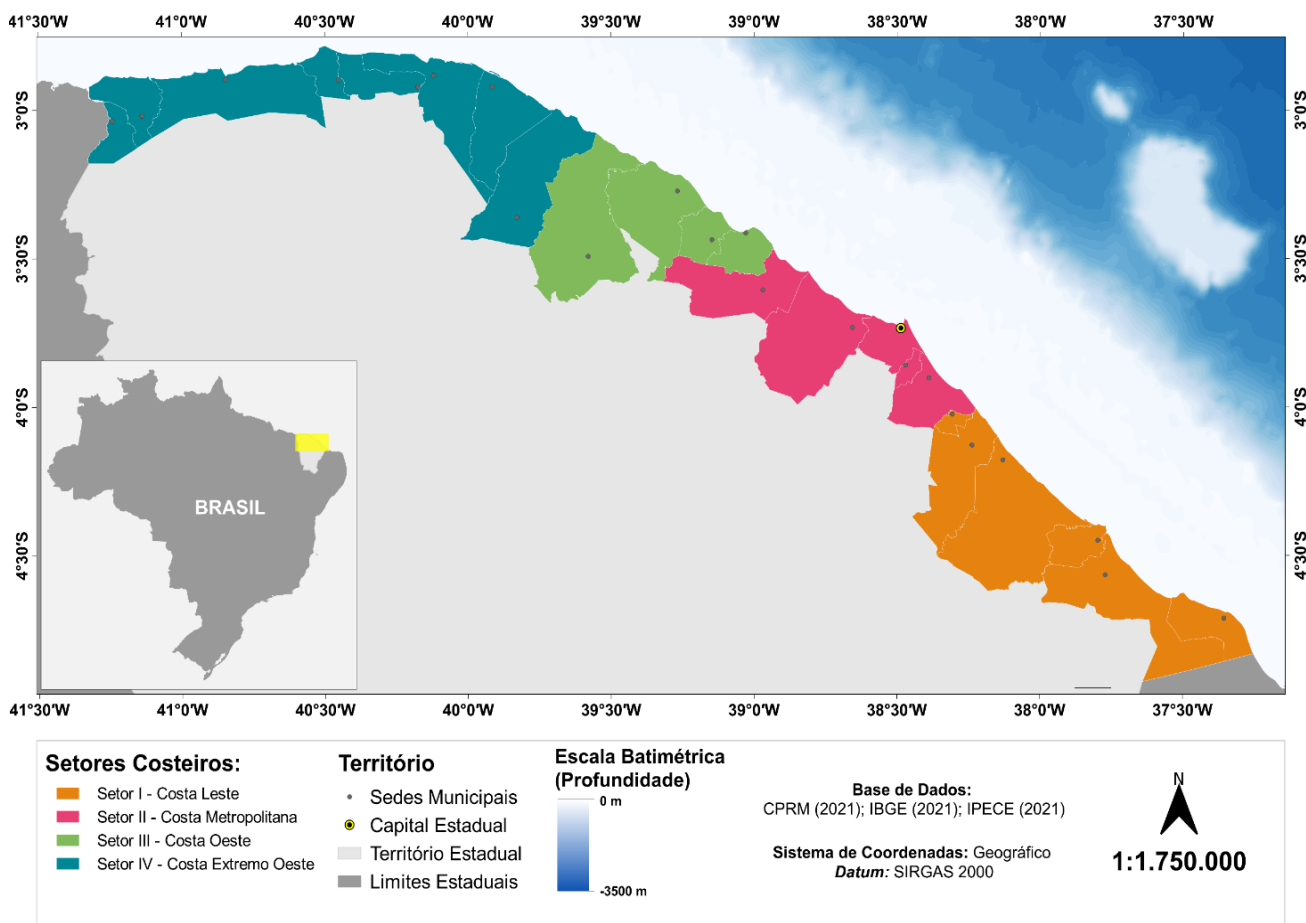


Figura 1 – Carta de localização da zona costeira do estado do Ceará, Brasil, destacando os setores costeiros extremo oeste, oeste, metropolitano e leste, segundo o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC).

O clima tropical semiárido brando constitui uma das mais importantes variáveis controladoras dos processos costeiros dessa porção do litoral, principalmente devido a variação anual dos totais pluviométricos e o regime dos ventos, característicos desse tipo de clima (Morais et al., 2018). Conforme descrito por Campos & Studart (2003), a distribuição irregular das precipitações concentra-se, principalmente, no primeiro semestre do ano, no qual cerca de 62% do total anual precipita-se em apenas três meses do ano. Junto a isso, observa-se também que os altos valores do regime de ventos ocorrem no período de estiagem, durante o segundo semestre do ano, com direções principais de ESE (Neto et al., 2003).

Segundo o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), a zona costeira do Ceará é setorizada por: Costa Leste (Aracati, Beberibe, Cascavel, Fortim, Icapuí e Pindoretama); Costa Metropolitana (Aquiraz, Caucaia, Eusébio,

Fortaleza e São Gonçalo do Amarante); Costa Oeste (Itapipoca, Paracuru, Paraipaba e Trairi); Costa Extremo Oeste (Acará, Amontada, Barroquinha, Camocim, Chaval, Itarema e Jijoca de Jericoacoara) (MORAIS et al., 2018). Embora a área dos municípios da zona costeira corresponda apenas a 10% do território do estado, residem nessa área cerca de 43% da população do Ceará (IBGE, 2020). Além disso 58% do Produto Interno Bruto (PIB) é gerado apenas pelos municípios da zona costeira do estado (IPECE, 2019). Tais dados, entretanto, tem resultado na ocupação desordenada dos centros urbanos, desencadeando uma série de impactos socioambientais como processos crônicos de erosão costeira e ameaça a biodiversidade, resultando em perda de infraestrutura urbana, aumento do risco geológico e depreciação econômica de setores ligados diretamente à zona costeira (Pinheiro et al., 2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

A interpretação da evolução das linhas de costa foi realizada a partir da análise de uma série temporal de imagens do satélite Landsat, através dos sensores TM, ETM+ e OLI da série de satélites Landsat adquiridas no período entre 1984 e 2020 (Tabela 1). Toda a base de dados foi obtida através do repositório *EarthExplorer* disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Dado a longa extensão da linha de costa cearense, se faz necessária a aquisição de três cenas para um imageamento total da área de estudo. O critério de seleção das imagens baseou-se no critério único de possibilitar a realização do mosaico da linha de costa completa, sem cobertura de nuvem significativa.

Todas as imagens de satélite foram pré-processadas digitalmente no *software* ENVI 5.1 a fim de remover distorções e realçar a interface entre terra e água. As imagens pré-processadas foram utilizadas para operacionalização do Índice de Diferença Normalizada da Água Modificado MNDWI; (XU, 2006). A escolha do MNDWI (Equação 1) se dá devido a sua

simplicidade e a alta acurácia mostrada pelo índice espectral no realce da interface entre terra e água (Kelly & Gontz, 2018). O resultado dessa operação é um novo arquivo *raster* com valores de pixel que variam dentro do intervalo de -1 a +1, no qual valores positivos correspondem aos corpos hídricos e valores negativos correspondem aos demais elementos da paisagem, como solo, vegetação e sedimentos.

O banco de dados construído com o MNDWI, para cada ano, foi utilizado para extração semiautomática das linhas de costa a partir do método de binarização de Otsu (Otsu, 1975). O método de Otsu permite determinar o valor ideal de *threshold* que separe os elementos de fundo e de frente da imagem em dois *clusters* principais, nesse caso é possível determinar o limiar de separação ideal entre os valores correspondentes a terra e água (Altinuc et al., 2014; Yang et al., 2014; Ghorai & Mahapatra, 2020). Como resultado tem-se uma imagem binarizada, que pode ser convertida para um arquivo vetorial de polígono ou linha de forma automática utilizando o ArcGIS 10.5.

Equação 1 – *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), considerando os valores de comprimento de onda das bandas do verde e do infravermelho de ondas curtas (SWIR)

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR 1}{Green + SWIR 1}$$

Tabela 1 – Imagens utilizadas na interpretação de evolução das linhas de costa do estado do Ceará, para as últimas 4 décadas, organizadas a partir da órbita/ponto de cada imagem.

Órbita/Ponto					
216/63		217/62		218/62	
Satélite/Sensor	Data de Aquisição	Satélite/Sensor	Data de Aquisição	Satélite/Sensor	Data de Aquisição
Landsat 5 TM	12/09/1984	Landsat 5 TM	15/06/1984	Landsat 5 TM	08/07/1984
Landsat 5 TM	20/08/1987	Landsat 5 TM	12/09/1987	Landsat 5 TM	01/07/1987
Landsat 5 TM	10/09/1989	Landsat 5 TM	01/09/1989	Landsat 5 TM	23/08/1989
Landsat 5 TM	15/08/1991	Landsat 5 TM	19/06/1991	Landsat 5 TM	10/06/1991
Landsat 5 TM	14/06/1992	Landsat 5 TM	24/08/1992	Landsat 5 TM	31/08/1992
Landsat 5 TM	04/08/1993	Landsat 5 TM	30/10/1993	Landsat 5 TM	02/08/1993
Landsat 5 TM	02/06/1999	Landsat 5 TM	11/07/1999	Landsat 5 TM	07/11/1999
Landsat 5 TM	23/08/2000	Landsat 7 ETM+	03/06/2000	Landsat 5 TM	21/08/2000
Landsat 5 TM	25/07/2001	Landsat 5 TM	01/08/2001	Landsat 7 ETM+	16/08/2001
Landsat 5 TM	21/08/2005	Landsat 5 TM	27/07/2005	Landsat 5 TM	06/10/2005
Landsat 5 TM	08/08/2006	Landsat 5 TM	14/07/2006	Landsat 5 TM	06/08/2006
Landsat 5 TM	27/08/2007	Landsat 5 TM	15/06/2007	Landsat 5 TM	10/09/2007
Landsat 5 TM	26/06/2008	Landsat 5 TM	05/09/2008	Landsat 5 TM	11/08/2008
Landsat 8 OLI	08/06/2013	Landsat 8 OLI	02/08/2013	Landsat 8 OLI	25/08/2013
Landsat 8 OLI	11/06/2014	Landsat 8 OLI	18/06/2014	Landsat 8 OLI	27/07/2014
Landsat 8 OLI	01/08/2015	Landsat 8 OLI	08/08/2015	Landsat 8 OLI	14/07/2015
Landsat 8 OLI	03/08/2016	Landsat 8 OLI	26/08/2016	Landsat 8 OLI	01/08/2016
Landsat 8 OLI	06/08/2017	Landsat 8 OLI	13/08/2017	Landsat 8 OLI	05/09/2017
Landsat 8 OLI	06/06/2018	Landsat 8 OLI	13/06/2018	Landsat 8 OLI	08/09/2018
Landsat 8 OLI	12/08/2019	Landsat 8 OLI	22/10/2019	Landsat 8 OLI	10/08/2019
Landsat 8 OLI	13/07/2020	Landsat 8 OLI	05/08/2020	Landsat 8 OLI	27/07/2020

Análise de linhas de costa utilizando DSAS

A análise das taxas de variação da linha foi realizada a partir da utilização do DSAS 5.1. O DSAS permite o calcular estatísticas relacionadas às taxas de variação de séries temporais de arquivos vetoriais de linhas de costa. Esse cálculo é baseado no posicionamento de três componentes vetoriais: A linha de base, a linha de costa e os transectos perpendiculares, que interceptam ambas as linhas (Himmelstoss et al., 2018). Sendo assim, a análise das linhas de costa utilizando o DSAS se baseia em quatro procedimentos: preparação da linha de costa, criação da linha de base, geração dos transectos e cálculo das taxas de variação (Raj et al., 2020).

Para as linhas de costa adicionadas ao *input* do programa, adotou-se um intervalo de incerteza (*uncertainty*) de 30 m, que corresponde a resolução espacial das imagens de satélite utilizadas como base para aquisição das linhas de costa. Junto a isso, construiu-se uma linha de base *offshore* posicionada a 10000 m da costa, com transectos de comprimento de 15000 m posicionados de forma perpendicular a linha de costa e com espaçamento de 1000 m entre si. Ao todo,

foram traçados 552 transectos, que tiveram seus dados utilizados para análise da variação das linhas de costa.

Neste trabalho quatro métodos estatísticos foram utilizados: *Shoreline Change Envelope* (SCE); *Net Shoreline Moviment* (NSM); *End Point Rate* (EPR); *Linear Regression Rate* (LRR) com R^2 , no qual para o SCE são apresentados apenas valores totais de variação, ao passo que NSM, EPR e LRR apresentam valores positivos para taxas de acresção e valores negativos para taxas de erosão. As variações totais de NSM e taxas de variação anual (EPR e LRR) da linha de costa do estado do Ceará foram classificadas em sete classes (Tabela 2).

Análise exploratória

O SCE calcula a distância máxima entre as linhas de costa no período analisado, ou seja, considera somente duas linhas de costa, extremas espacialmente, resultando em um valor sempre positivo (Himmelstoss et al., 2018). Dessa forma, o SCE fornece um dado inicial sobre a instabilidade total no período de análise, porém não permite identificar se a variação analisada se refere a erosão ou deposição.

Tabela 2 – Classificação da linha de costa baseada em tendências erosivas (valores negativos) e acrescionárias (valores positivos), estimados a partir dos valores de *Net Shoreline Moviment* (NSM), *End Point Rate* (EPR) e *Linear Regression Rate* (LRR).

Classificação	Variações Totais (m)	Taxas de Variação (m/ano)
Erosão severa	NSM \leq -70m	LRR \leq -3 m/ano
Erosão moderada	-70 m < NSM \leq -40 m	-3 < LRR \leq -2 m/ano
Erosão incipiente	-40 m < NSM \leq -10 m	-2 < LRR \leq -1 m/ano
Equilíbrio estável	-10 m < NSM \leq 10 m	-1 < LRR \leq 1 m/ano
Acresção incipiente	+10 m < NSM \leq 40 m	-2 < LRR \leq 1 m/ano
Acresção moderada	+40 m < NSM \leq 70 m	-3 < LRR \leq 2 m/ano
Acresção severa	NSM > 70 m	LRR > 3 m/ano

O NSM calcula a distância entre a linha de costa mais antiga e mais recente para cada transecto, permitindo analisar a variação total em metros no período de análise (Himmelstoss et al., 2018). Por utilizar apenas duas linhas de costa, extremas temporalmente, o NSM pode mascarar ciclos ou tendências erosivas ou deposicionais ao longo do período.

Já o EPR caracteriza outro parâmetro estatístico, resultado da divisão do NSM pelo período da análise (m/ano), apresentando uma média da variação anual em metros (Himmelstoss et al., 2018). Muito embora o EPR permita observar a taxa de variação por ano, ao longo do período analisado, é preciso observar que este também utiliza apenas duas linhas de costa, extremas temporalmente, podendo mascarar ciclos ou tendências erosivas ou deposicionais, bem com o NSM.

A LRR estima as taxas de variação a partir do ajuste da linha de regressão dos mínimos quadrados para todos os pontos interceptados pelo transecto (Himmelstoss et al., 2018). Esse método considera todas as linhas de costa identificadas, permitindo visualizar ciclos e tendências erosivas ou deposicionais. Os conceitos estatísticos relacionados aos cálculos do LRR já foram amplamente demonstrados e aceitos, conforme discutido nos trabalhos de Dolan et al. (1991) e Crowell et al. (1997), no qual ressalta-se o LRR como método mais confiável para realização de

modelagens preditivas de posicionamento de linhas de costa e seu intervalo de confiança (Natarajan et al., 2021).

Modelagem preditiva das linhas de costa

O DSAS a partir de sua versão 5.0 oferece uma ferramenta de predição de linhas de costa, que utiliza como base de dados, o histórico de posições da linha de costa estudada. O cálculo das linhas de costa futuras é feito utilizando o Filtro de Kalman (Kalman, 1960), que combina o posicionamento das linhas de costa observadas com uma série de posicionamentos gerados através do modelo, resultando no posicionamento das linhas de costa futuras, conforme desenvolvido por Long & Plant (2012). A metodologia do Filtro de Kalman requer o cálculo das taxas de regressão linear das linhas de costa, para alimentação do modelo e preparação mais precisa dos posicionamentos das linhas de costa futuras (Himmelstoss et al., 2018).

A ferramenta de predição do DSAS fornece ao final do processo a estimativa da linha de costa futura (para 10 ou 20 anos) e uma estimativa de incertezas em relação ao posicionamento da linha de costa gerada, para cada porção do transecto. Nesse contexto, portanto, haja vista o satisfatório embasamento teórico no qual o método está relacionado e a sua facilidade de aplicação, realizou-se a modelagem preditiva da posição da linha de costa do estado do Ceará para os anos de 2030 e 2040.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise e discussão dos resultados optou-se por utilizar a setorização proposta pelo PNGC (Costa Leste, Costa Metropolitana, Costa Oeste, Costa Extremo Oeste) para melhor interpretação dos índices calculados entre os anos de 1984 e 2020, conforme trabalho também por Silva et al. (2019).

Baseado nos valores de SCE, o que se observa

é que as variações totais ao longo da linha de costa ocorrem predominantemente no intervalo entre 70m e 140m, com variação máxima de 1390m ocorrendo na costa extremo oeste, na zona costeira do município de Acaraú. Analisando os valores de NSM, nota-se que o maior recuo da linha de costa ocorre também na costa extremo oeste, com recuo de -844m no município

de Itarema, ao passo que o maior avanço da linha de costa ocorre na costa leste, com avanço de 1166m no município de Icapuí. Quando observadas as taxas de variação estimadas via EPR, observa-se que os maiores valores de erosão (-23.42 m/ano) e deposição (32.8 m/ano) coincidem com os pontos destacados pelo NSM.

Analisando, por outro lado, as taxas de variação estimadas via LRR o que se observa é uma concordância ao ponto de maior deposição (37.6 m/ano) com o ponto anteriormente identificado pelo NSM e EPR, porém com o valor máximo na taxa de erosão ocorrendo na Costa Oeste, com recuo de -13.34 m/ano no município de Paracuru. Ainda assim, baseando-se nas taxas calculadas via EPR e LRR, o que se observa é que embora ambas as taxas apresentem elevadas amplitudes entre máximos e mínimos, a

maior parte dos valores calculados se concentra nas classes de tendência ao equilíbrio (variações entre -1.0 m/ano a 1.0 m/ano), com 48% dos transectos indicando valores referentes a essa classificação.

Litoral Leste

A costa leste do estado do Ceará compreende a faixa costeira localizada entre os municípios de Icapuí e Cascavel, englobando um total de 142 transectos. Nesse setor chama a atenção a presença de grandes variações da linha de costa próximas principalmente aos ambientes estuarinos. Segundo os valores de NSM (Figura 2), 62.4% dos transectos apontam para tendências erosivas em maior ou menor nível (NSM \leq -10 m), no qual o ponto de maior erosão do setor é calculado em -419.9 m, na porção a sotamar do estuário do rio Pirangi (município de Beberibe).

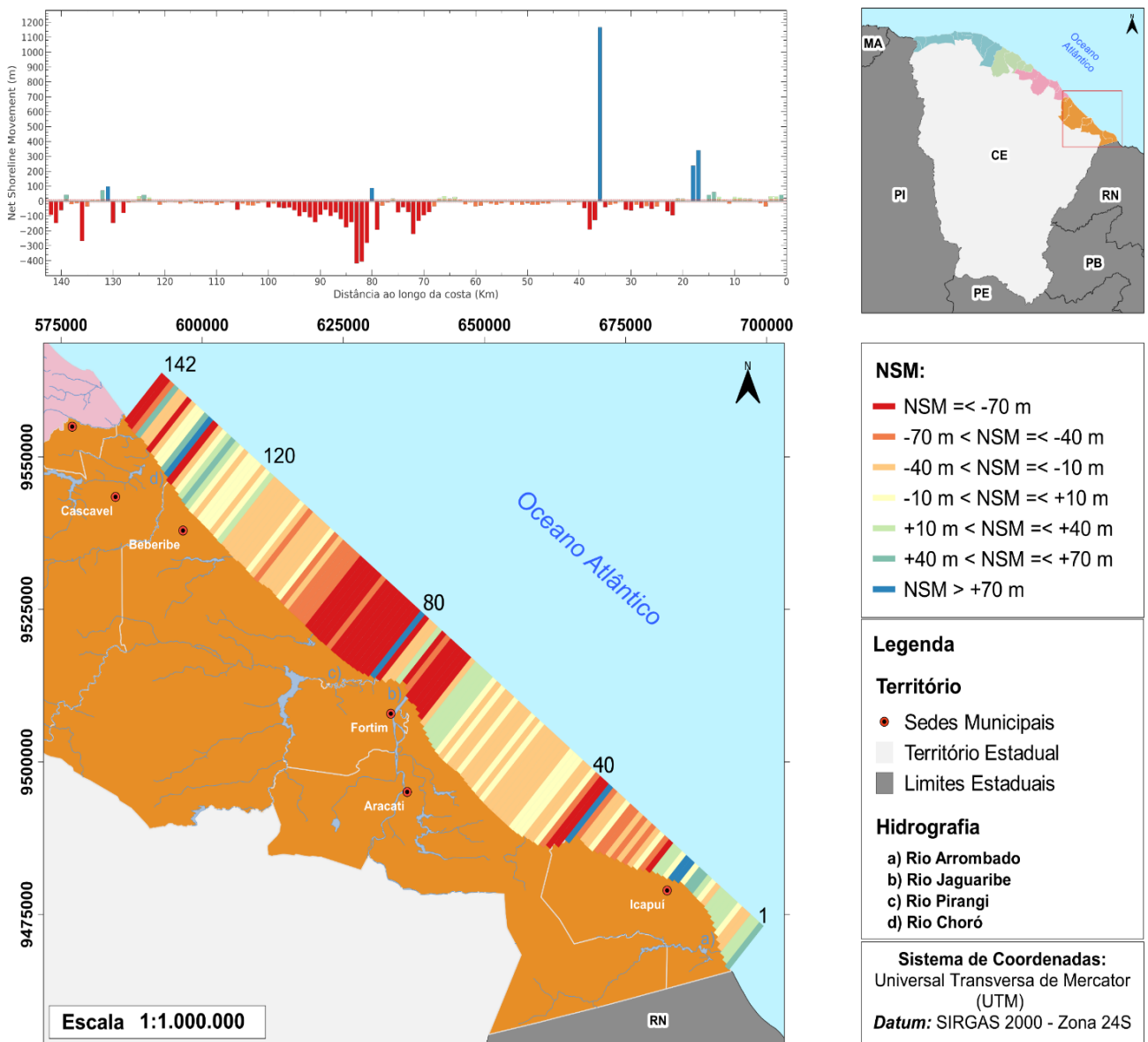


Figura 2 – Distribuição dos valores de NSM para a costa Leste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

O estuário do rio Pirangi também apresenta as taxas máximas de erosão em EPR e LRR (Figura 3), calculadas em -11.9 m/ano, com valores de R² próximos a 1, indicando tendências erosivas bem definidas.

Tais valores, entretanto, podem ser justificados devido à presença de uma flecha arenosa de pequeno porte logo acima a desembocadura do rio Pirangi. Sendo assim a movimentação lateral dessa estrutura, ao ser interceptada pelos transectos de forma não perpendicular em certas porções indicaria para um *déficit* de sedimentos nas praias a sotamar do estuário do rio.

Os valores de EPR e LRR também apontaram para cenários de erosão nos estuários dos rios Arrombado (Icapuí), com taxas de -1,03 m/ano (EPR) e -4.81 m/ano (LRR), e Jaguaribe (Fortim), com taxas de -1.04 m/ano (EPR) e -10.77 m/ano (LRR).

A presença de altas taxas de erosão também é

observada em duas localidades do município de Icapuí, a praia de Barrinhas com taxas de -2.72 m/ano (EPR) e -6.51 m/ano (LRR) e a sotamar do promontório de Ponta Grossa, com taxas de -5.36 m/ano (EPR) e -5.04 m/ano (LRR). A presença dessas altas taxas erosivas, entretanto, pode estar relacionada aos altos valores de acreção encontrados nos transectos anteriores correspondentes ao estuário da Barra Grande, caracterizado por um delta de maré junto a uma sequência de barras arenosas, e pelo promontório de Ponta Grossa. Nestas porções é possível encontrar tendências de deposição severa, no qual o estuário da Barra Grande apresenta taxas de EPR e LRR de 6.6 m/ano e o promontório de Ponta Grossa apresenta taxas de 32.8 m/ano (EPR) e 37.6 m/ano (LRR).

Os elevados valores de deposição encontrados na praia de Ponta Grossa podem ser observados também nos valores de NSM em que o valor máximo de deposição é de 1166.59 m.

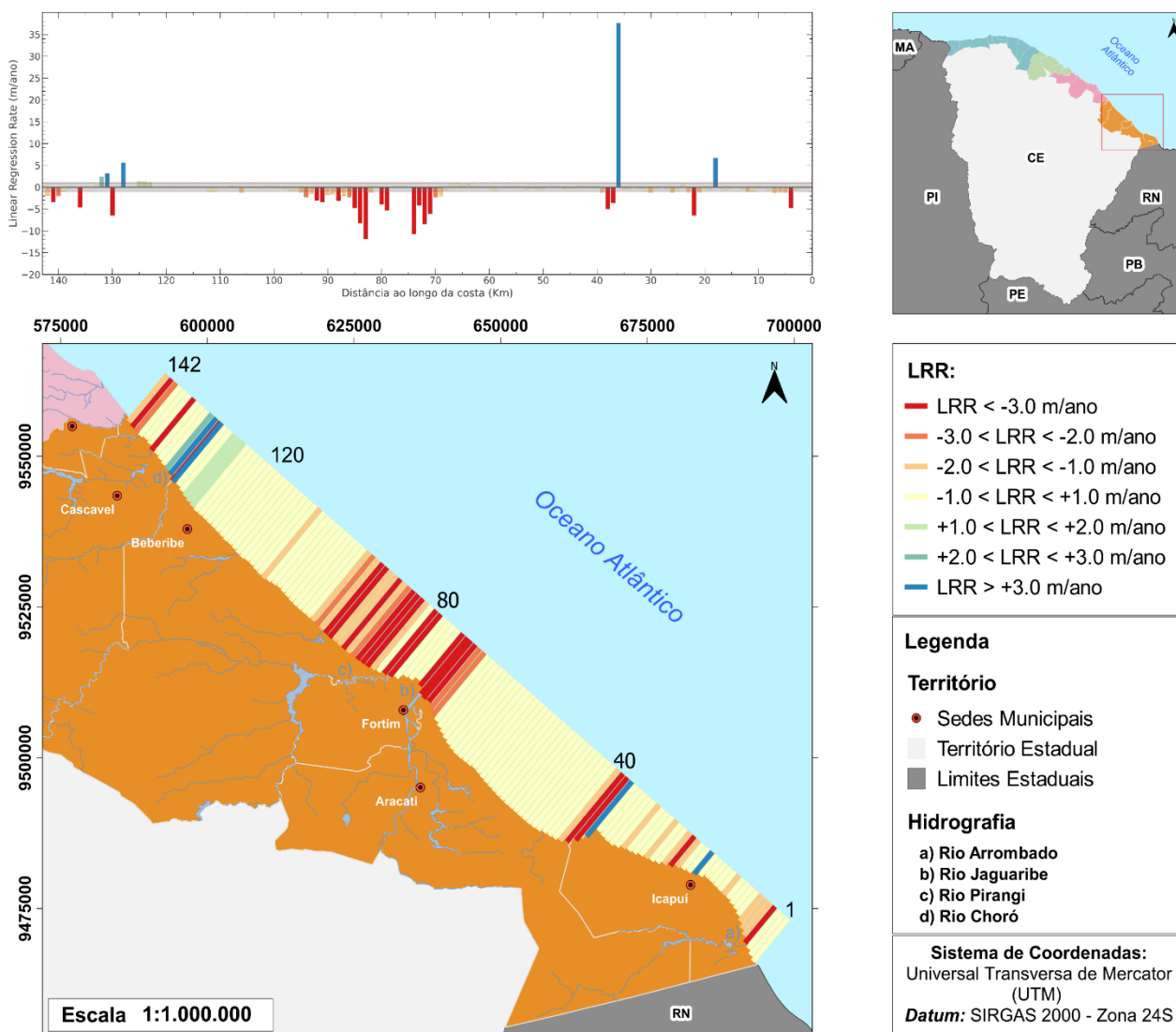


Figura 3 - Distribuição dos valores de LRR para a costa Leste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

Segundo Souza (2016) e Silva Neto (2019), o processo deposicional que ocorre no Promontório de Ponta Grossa pode ser caracterizado como o ponto de maior variação da linha de costa dentro do município de Icapuí. O que se observa, entretanto, a partir dos dados analisados, é que este ponto caracteriza uma das maiores taxas de deposição ao longo da linha de costa de todo o estado do Ceará, com uma tendência evolutiva bem definida, apresentando valores de R^2 superiores a 0.7 no período analisado.

Litoral Metropolitano

A costa metropolitana do estado do Ceará

compreende a faixa costeira localizada entre os municípios de Aquiraz e São Gonçalo do Amarante, englobando um total de 101 transectos. Nesse setor, os promontórios e as estruturas antropogênicas aparentam ser os principais agentes responsáveis pela variação da linha de costa. Segundo os valores de NSM (Figura 4), 46% do setor está submetido a algum nível de erosão ($NSM \leq -10$ m) no período analisado. O valor máximo de erosão observado para o setor, calculado em -109.73 m, ocorre na praia do Icaraí (Caucaia), após o estuário do rio Ceará, no qual é possível identificar uma série de transectos indicativos de erosão.

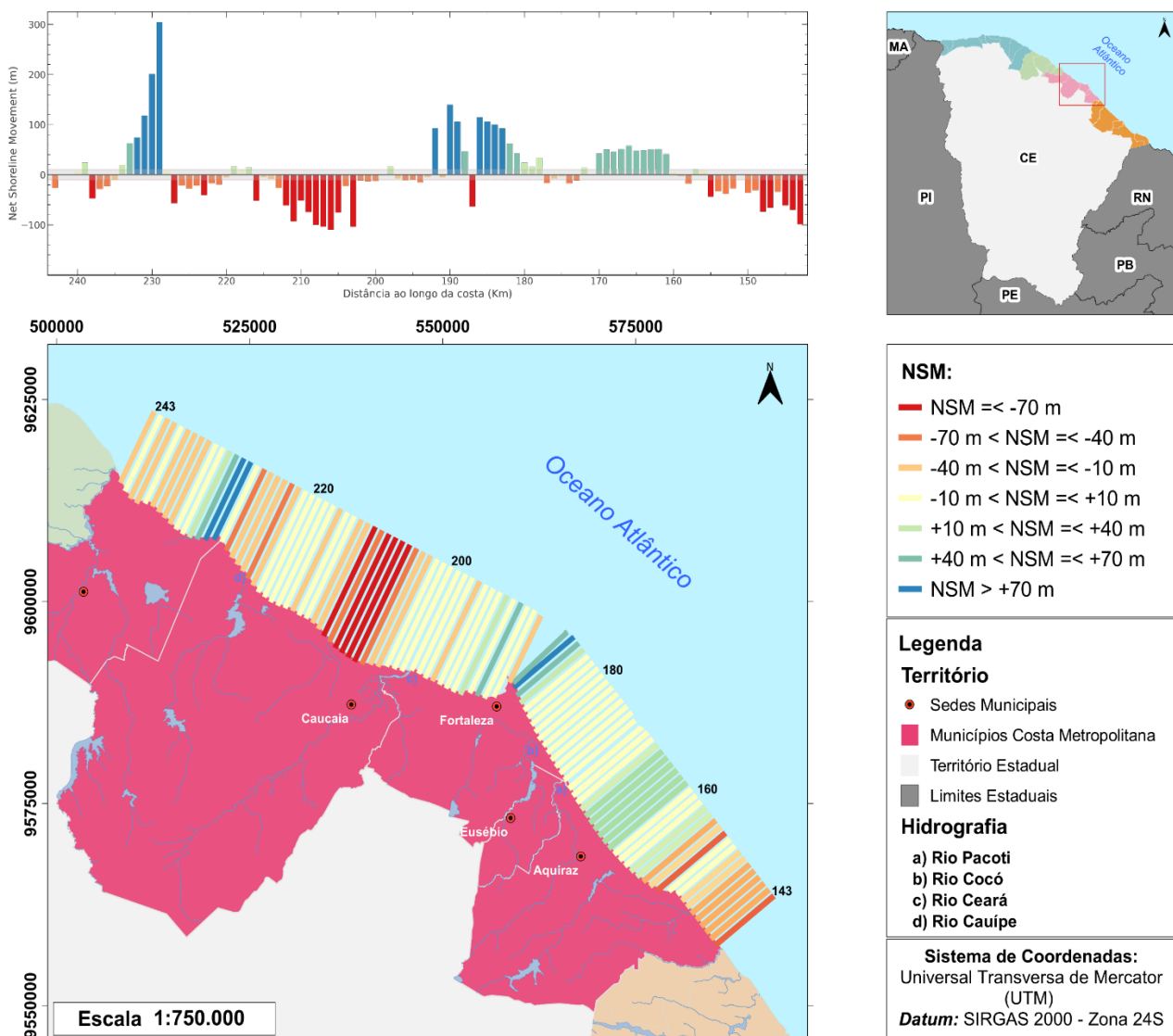


Figura 4 - Distribuição dos valores de NSM para a costa Metropolitana do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

Nesta porção do setor, identifica-se também as taxas máximas de erosão (Figura 5) de -3.04 m/ano (EPR) e -4.42 m/ano (LRR), ambas com valores de R^2 próximos a 1, caracterizando um processo de erosão acentuada bem definida. O grande déficit sedimentar, apresentando nessa

região aparenta estar relacionado a acentuada deposição presente no município de Fortaleza em decorrência dos molhes do Porto do Mucuripe (Façanha et al., 2017). Ao redor das estruturas portuárias presentes em Fortaleza, observa-se taxas de deposição de 3.87 m/ano (EPR) e 2.78

m/ano (LRR), a sotamar, bem como taxas de 2.93 m/ano (EPR) e 3.85 m/ano (LRR), a barlamar, apontando para cenários de deposição moderada a severa, com valores de R^2 próximos a 1, caracterizando tendências de acreção bem definidas.

Ainda assim, os maiores valores de deposição não se concentram nessa porção do setor, mas sim no promontório do Pecém (São Gonçalo do Amarante), estrutura que abriga o Complexo Portuário do Pecém. Nessa porção calcula-se um valor de deposição máxima, segundo o NSM, de

304.71 m. As taxas de deposição máxima também correspondem a essa região, calculadas em 8.43 m/ano (EPR) e 14.59 m/ano (LRR) a sotamar da estrutura litorânea, no qual ambas apresentam valores de R^2 superiores a 0.5, sugerindo um processo de sedimentação contínuo.

A barlamar do promontório observa-se taxas de erosão de -1.58 m/ano (EPR) e -2.08 (LRR), sugerindo uma continuidade do processo erosivo identificado na porção anterior, correspondente à praia do Icaraí (Caucaia).

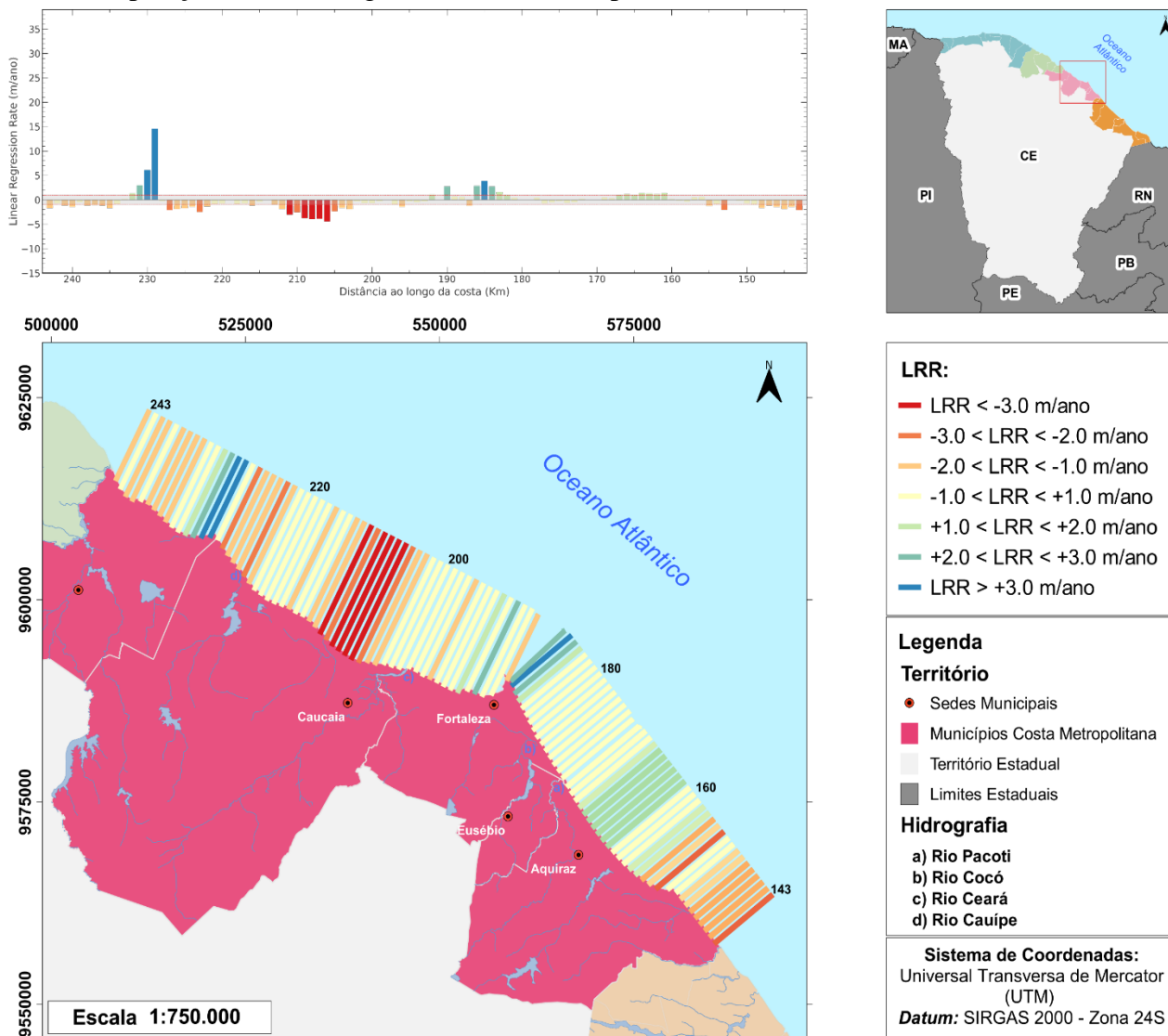


Figura 5 - Distribuição dos valores de LRR para a costa Metropolitana do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

Litoral Oeste

A Costa Oeste do estado do Ceará compreende a faixa costeira localizada entre os municípios de Paracuru e Itapipoca, englobando um total de 85 transectos. Neste setor a dinâmica costeira parece ter como principais agentes controladores a grande quantidade de promontórios distribuídos ao longo da costa, sobretudo junto aos estuários dos rios Curú e Mundaú. Diferentes

das Costas Leste e Metropolitana, nota-se na Costa Oeste uma concentração maior de transectos indicativos de acreção que, segundo valores de NSM (Figura 6), 50.58% do setor estaria submetido a tendências deposicionais em maior ou menor nível ($NSM > 10m$). O valor máximo de deposição encontrado no setor, calculado em 197.85 m, ocorre na margem noroeste do estuário do rio Curú.

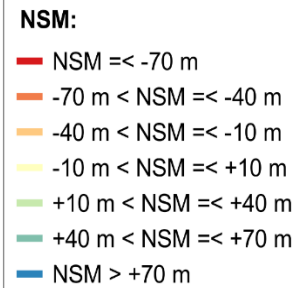
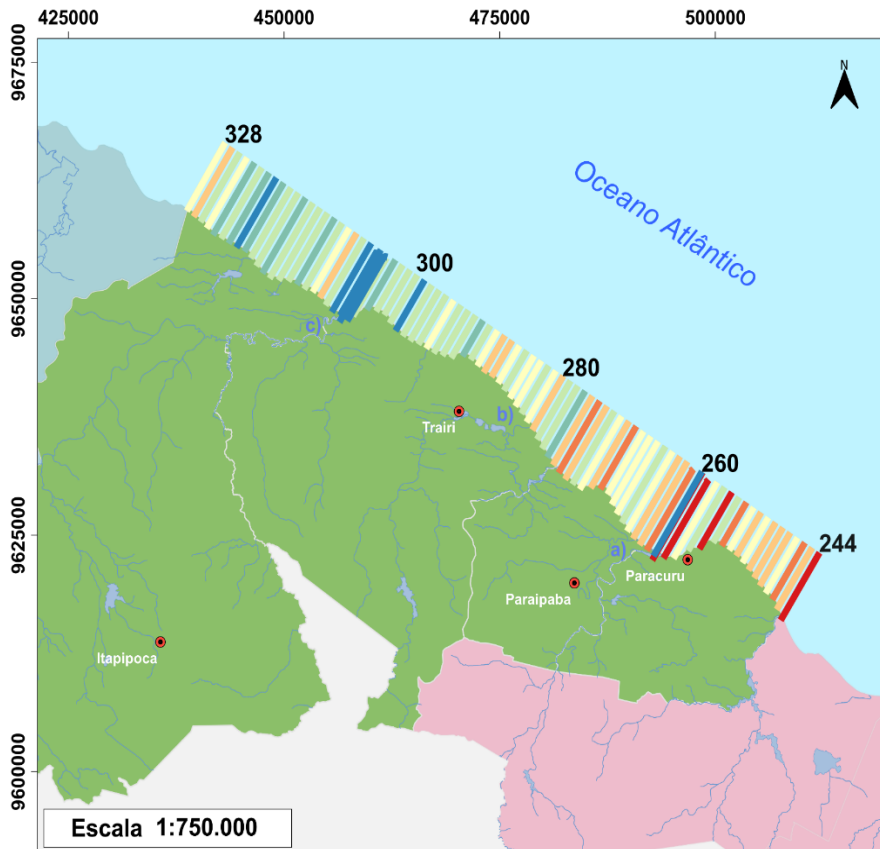
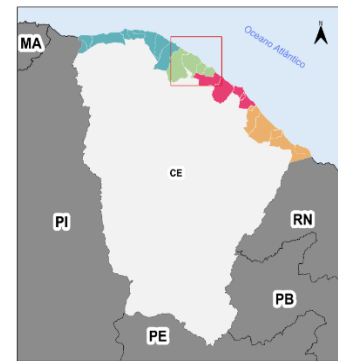
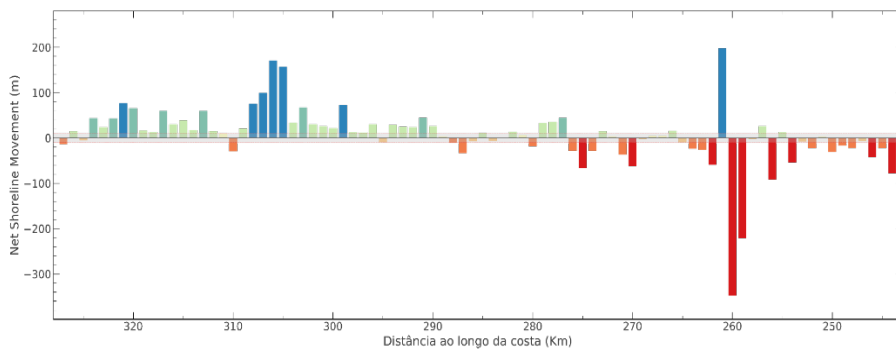


Figura 6 - Distribuição dos valores de NSM para a costa Oeste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

É nesse ponto onde estão localizados também as taxas máximas de deposição (Figura 7) de 16.6 m/ano (EPR) e 19 m/ano (LRR), com valores de R^2 de 0.9, indicando para tendências deposicionais contínuas. Nessa porção da costa nota-se a presença de um cordão litorâneo, caracterizado pela alternância entre aumento e redução de sua forma e tamanho ao longo do período analisado.

Além disso, nota-se que na margem sudeste do estuário, ao sopé do promontório de Paracuru ocorre o valor máximo de erosão encontrado no setor, calculado em -348.03 m, bem como as taxas máximas de erosão de -9.63 m/ano (EPR) e -13.34 m/ano (LRR). A partir disso, devido ao grande espaçamento dos transectos e a pequena escala das estruturas apresentadas em ambas as margens, recomenda-se a realização de um estudo em escala menor a fim de descrever

melhor os processos atuantes sobre as margens do estuário.

Além do estuário do rio Curú também é possível observar taxas de deposição expressivas no estuário do rio Mundaú, no qual também se observa a formação de um cordão litorâneo a sotamar do estuário, junto a presença de um promontório a barlar. Nesta porção do setor, tem-se um valor máximo de deposição calculado em 170.94 m, junto a taxas de deposição de 4.73 m/ano (EPR) e 3.72 m/ano (LRR).

Diferente das porções estuarinas, os promontórios de Paracuru (Paracuru), Lagoinha (Paraipaba), Flecheiras (Trairi) e Marinheiros (Itaipoca) presentes no setor apresentam taxas de erosão incipiente em diversos transectos a barlar dessas estruturas, ou seja, com taxas de EPR e LRR variando de -1.0 m/ano a -2.0 m/ano.

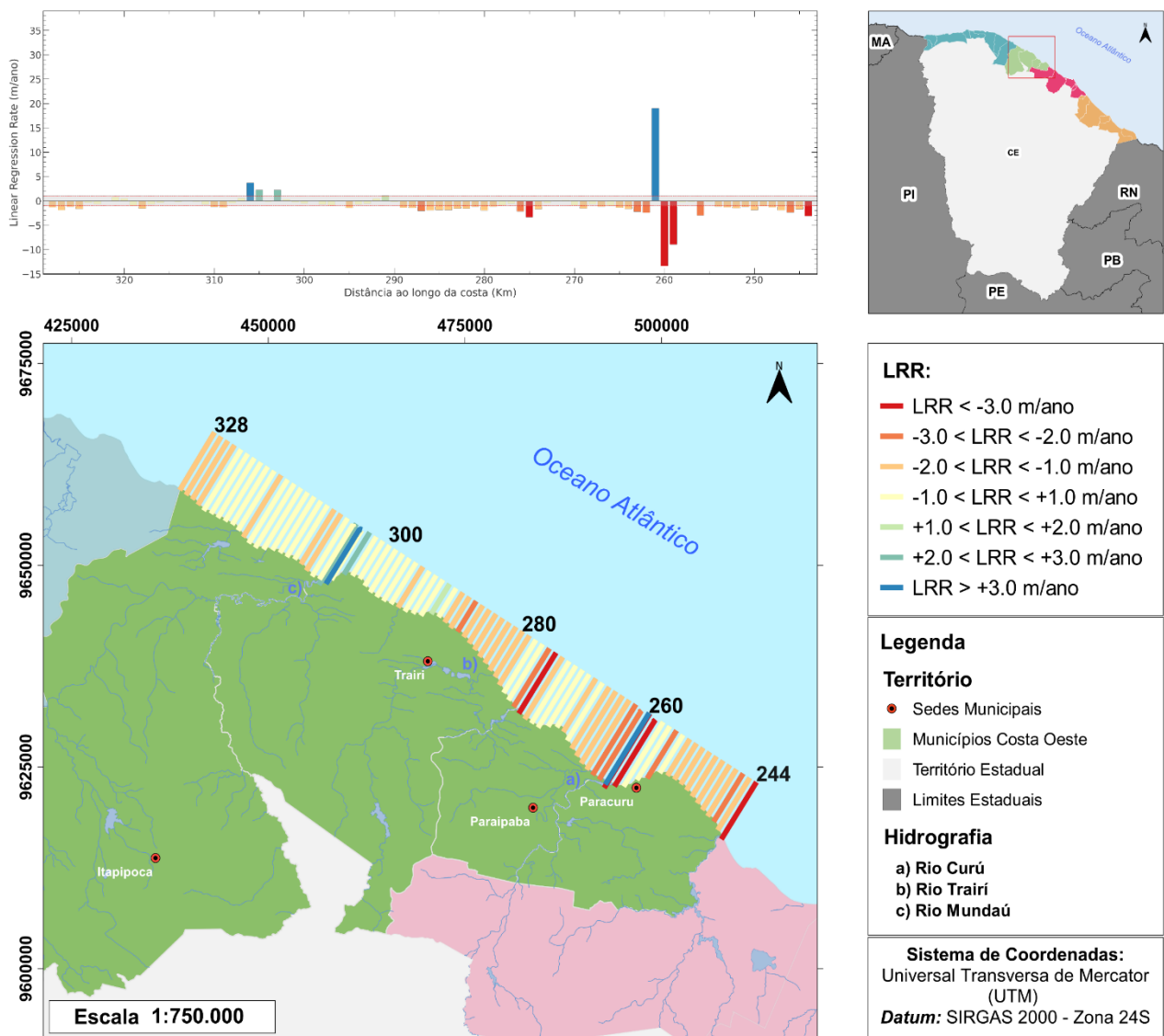


Figura 7 - Distribuição dos valores de LRR para a costa Oeste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

Chama atenção, que este comportamento dos valores de EPR e LRR se mostra diferente das variações totais observadas a partir dos valores de NSM no qual é possível observar tendências deposicionais a barlamar dos promontórios. Esse comportamento das taxas de sedimentação anual (EPR e LRR) pode estar relacionado a alterações locais do mecanismo de *by-pass* que controla a transferência de sedimentos das pontas litorâneas, de barlamar para sotamar.

Conforme discutido por Claudino-Sales e Carvalho (2014), interferências sociais na linha de costa destas regiões podem provocar profundas alterações no padrão de transporte dos sedimentos, nesse sentido recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados sobre as taxas de sedimentação anual, submetida aos promontórios da costa oeste buscando compreender se a ocupação das praias da região e a instalação de estruturas na faixa litorânea são, de fato, responsáveis pelas taxas de erosão incipiente.

Litoral Extremo-Oeste

A costa extremo oeste do estado do Ceará compreende a faixa costeira localizada entre os municípios de Amontada e Barroquinha, englobando um total de 224 transectos. Este setor é caracterizado pela presença de estuários, deltas de maré e *spits* arenosos ocorrendo de forma conjunta ao longo da linha de costa. Segundo os valores de NSM (Figura 8), 69% dos transectos apontam para tendências erosivas em maior ou menor nível ($NSM \leq -10$ m), no qual o ponto de maior erosão do setor é calculado em -844.17 m, na porção do *spit* arenoso da Praia do Porto (Itarema).

Cabe ressaltar ainda, que este caracteriza o maior ponto de erosão do setor, mas também o valor máximo de erosão de toda a zona costeira do estado do Ceará (Figura 9). Quando analisadas as taxas de erosão sobre o *spit* arenoso tem-se os valores de -23.42 m/ano (EPR) e -6.43 m/ano (LRR).

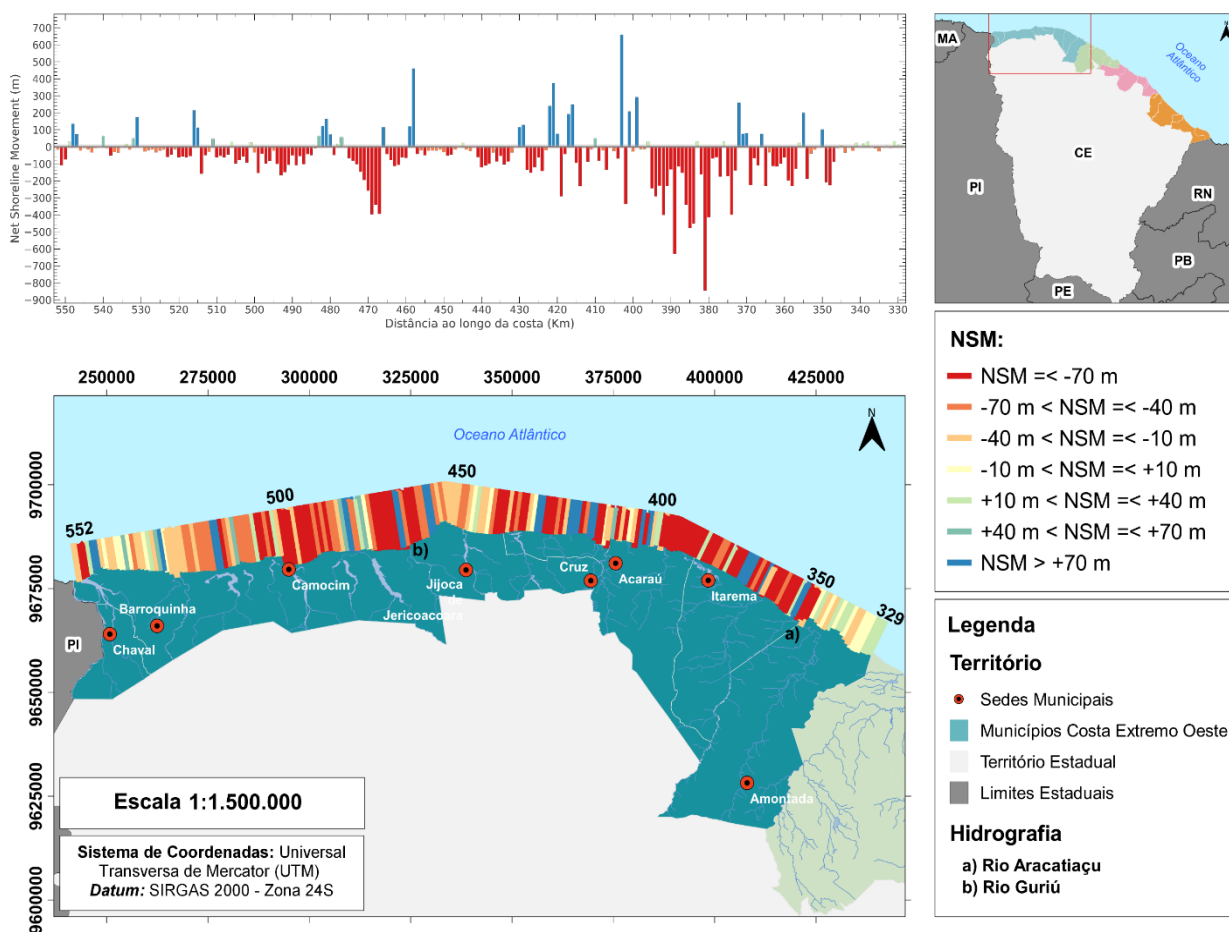


Figura 8 - Distribuição dos valores de NSM para a costa Extremo Oeste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

Estas taxas, entretanto, não representam os valores máximos de erosão do setor para ambas as taxas, visto que as maiores taxas de erosão de LRR, calculadas em -13.29 m/ano, ocorrem na margem oeste do rio Guriú (Jijoca de Jericoacoara).

Analisando o valor de R^2 para a taxa máxima de erosão encontrada no *spit* arenoso da Praia do Porto, observa-se um valor de R^2 abaixo de 0.5 para o transecto, apontando uma intensa oscilação entre os processos de acreção e erosão. Souza et al. (2017), ao analisar o balanço sedimentar dos cordões arenosos do município de Itarema entre os anos de 1984 e 2013 utilizando imagens Landsat, apontam para o predomínio de áreas de erosão nesta porção da costa a partir do ano de 1994. Nesse caso, o que se observa aparentemente é um ambiente que embora possua oscilações no balanço sedimentar, apresenta uma tendência erosiva em evolução. Interessante observar que o valor máximo de deposição do setor ocorre a sudeste da flecha arenosa, que se desenvolve na margem a sotamar do rio Aracatiaçu (limite entre os municípios de Amontada e Itarema), ao sopé do promontório de

Patos (Amontada). Nesse caso o processo erosivo observado na Praia de Porto pode ser algo relacionado tanto ao surgimento do promontório de Patos, com alterações no mecanismo de *bypass*, na porção local da costa, ou um processo de escala regional relacionado a alterações na dinâmica costeira como observado no setor anterior, da costa Oeste.

Na margem oeste do rio Guriú (Jijoca de Jericoacoara), por outro lado, tem-se valores de R^2 calculados em 0.96, indicando um processo de erosão contínua. Aparentemente o processo é resultado de um *deficit* sedimentar causado pela porção a sotamar do Promontório de Jericoacoara (Jijoca de Jericoacoara). Conforme descrito por Claudino-Sales & Carvalho (2014), a ponta litorânea de Jericoacoara seria responsável pela acreção da faixa de areia por até 30km e pela formação do esporão arenoso observado na margem leste do rio Guriú. Esse processo isolaria a margem oeste do rio, sendo um dos principais agentes atuantes no processo erosivo do local.

Tal fato se confirma observando os valores dos transectos que ocorrem a sotamar do promontório, nos quais são encontrados transectos com

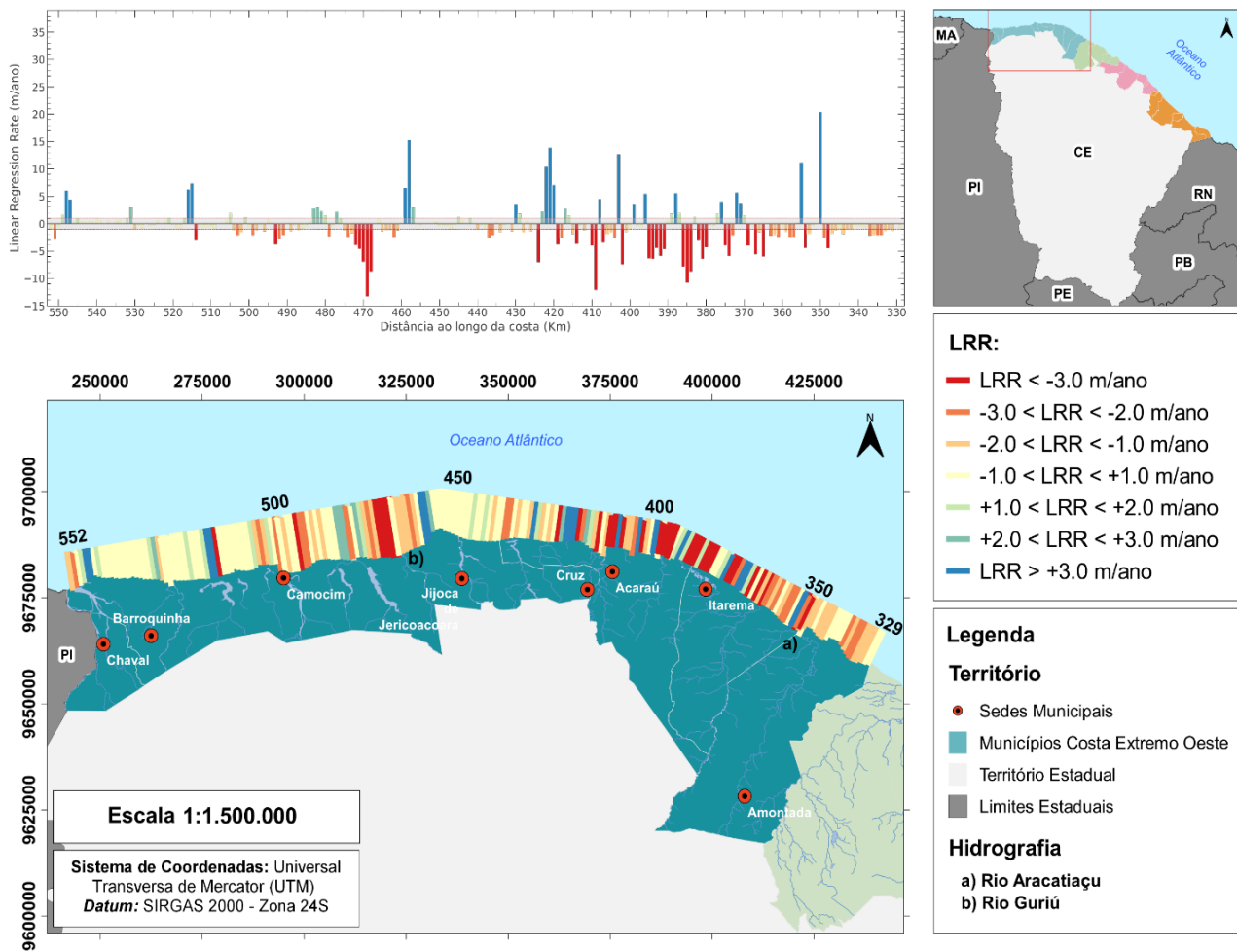


Figura 9 - Distribuição dos valores de LRR para a costa Extremo Oeste do estado do Ceará, no período de 1984-2020.

taxas de variação anual indicando para condições de equilíbrio e deposição até o fim da margem leste do rio Guriú. Nos transectos que ocorrem mais próximos da porção a sotamar do promontório são calculadas taxas de deposição de até 12.77 m/ano (EPR) e 15.27 m/ano (LRR), apontando para uma alta retenção de sedimento nas proximidades do promontório.

Modelagem Preditiva para os anos de 2030 e 2040

A modelagem preditiva do posicionamento das linhas de costa foi realizada utilizando o filtro de Kalman, disponível dentro do próprio DSAS, que calcula o posicionamento futuro das linhas de costa a partir das taxas de regressão linear (LRR) previamente calculadas. A partir disso foram obtidos os posicionamentos para as linhas de costa de todo o estado do Ceará para os anos de 2030 e 2040. A análise e discussão dos resultados foram realizadas a partir do cálculo dos valores de NSM para as linhas preditas, tendo como base a linha de costa de 2020, para melhor interpretação dos índices calculados.

Para o ano de 2030 (Figura 10), nota-se a partir dos valores de NSM calculados que 42.9%

da costa do Ceará estará submetida a tendências erosivas em maior ou menor nível ($NSM \leq -10$ m), com o valor máximo de erosão de -318m ocorrendo na margem noroeste do rio Jaguaribe (Fortim).

Já os transectos que apontam para tendências deposicionais em maior ou menor nível ($NSM > 10$ m) totalizam 38.42%, com o valor máximo de deposição de 692m no Promontório de Ponta Grossa (Icapuí).

No modelo preditivo para ano de 2030 (Figura 10), destacam-se ainda *hot spots* de erosão nos municípios de Icapuí, Fortim, Cascavel, Caucaia, Paracuru, Paraipaba, Trairi, Amontada, Itarema, Acaraú e Camocim.

No caso das linhas preditas para o ano de 2040 (Figura 11), nota-se que os pontos máximos de erosão e deposição se mantem nos mesmos locais das linhas preditas para 2030. Nesse caso, o valor máximo de deposição é calculado em 1062m, no Promontório de Ponta Grossa (Icapuí), e o valor máximo de erosão é calculado em -436m, na margem noroeste do rio Jaguaribe (Fortim). Os valores preditos para 2040, entretanto, projetam um aumento nas tendências

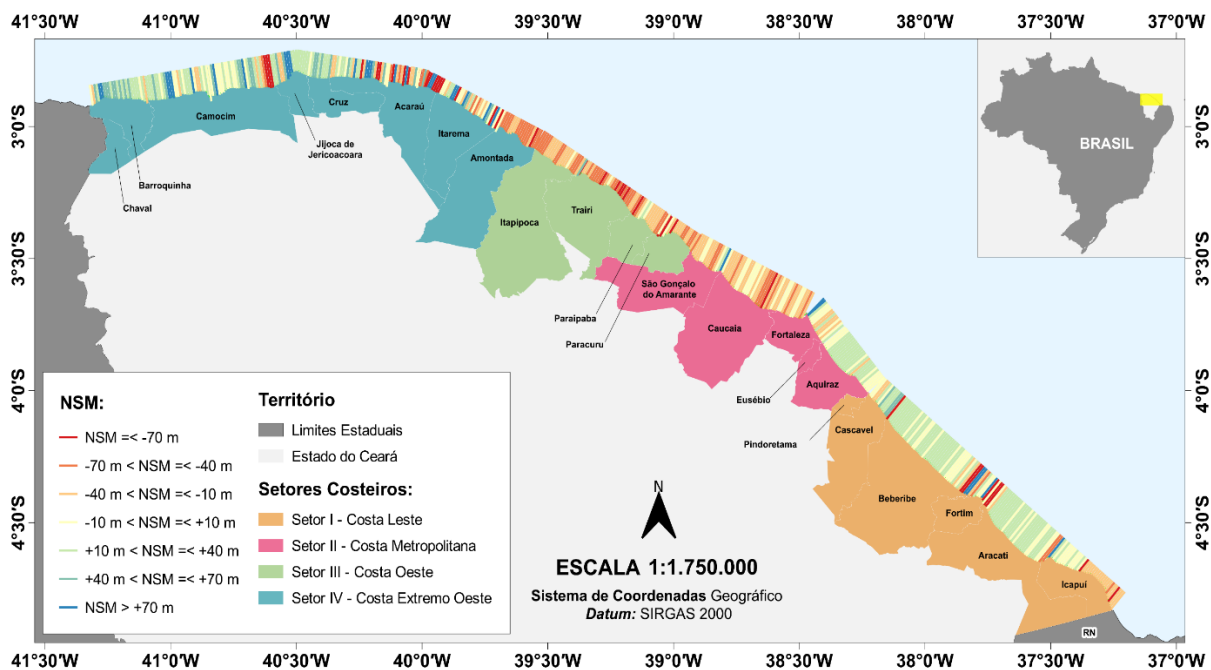


Figura 10 - Distribuição dos valores de NSM predito para a costa do estado do Ceará, no período de 2020-2030.

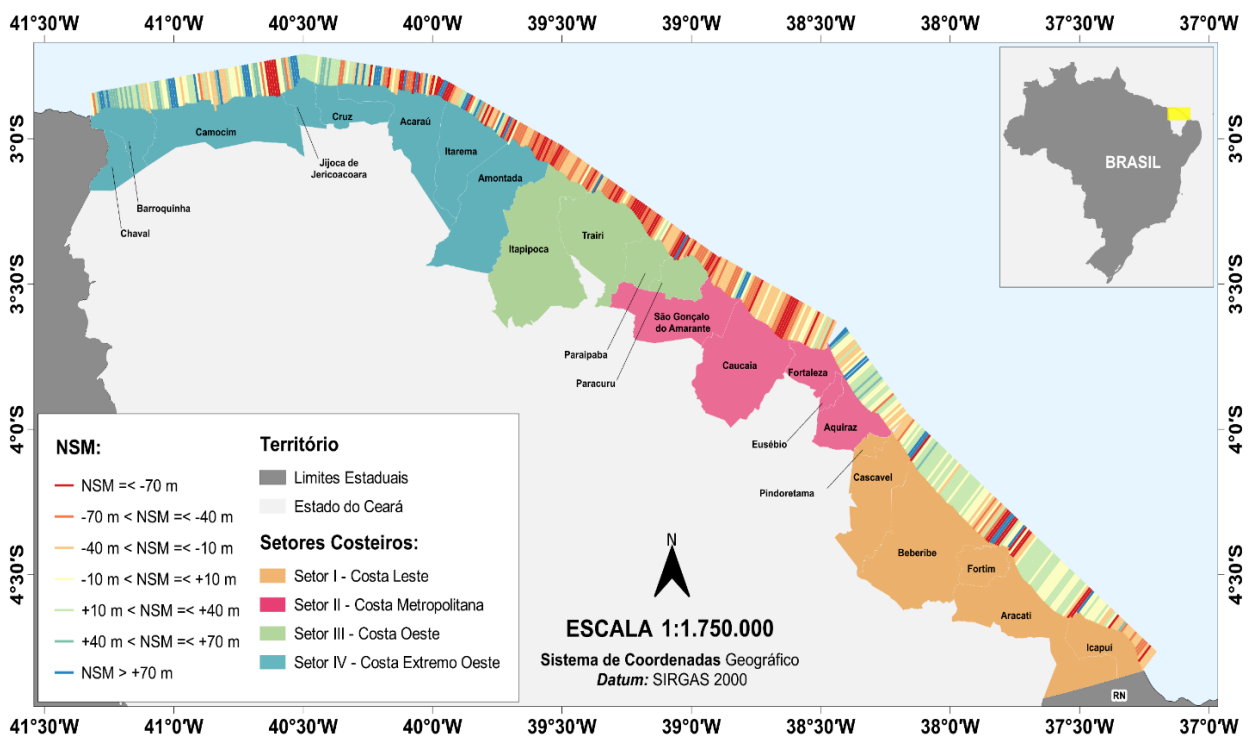


Figura 11 - Distribuição dos valores de NSM predito para a costa do estado do Ceará, no período de 2020-2040.

erosivas, com 49.16% dos transectos indicando valores de $NSM \leq -10\text{ m}$, e uma queda nos valores que indicam tendências deposicionais, no qual apenas 34.44% dos transectos apresentam valores de $NSM > 10\text{ m}$.

No modelo preditivo para o ano de 2040 (Figura 11) ressalta-se, ainda mais, a tendência erosiva de grande parte da zona costeira cearense localizada a oeste de Fortaleza, abrangendo a porção oeste do setor de Fortaleza e Região

Metropolitana e os setores da Costa Oeste e Extremo Oeste. Diferentemente, a porção leste do setor de Fortaleza e Região Metropolitana e o setor Leste apresentam, de uma forma geral, um modelo preditivo com tendências a acreção e pontos bem localizados de erosão (Cascavel, Fortim e Icapuí).

Além disso, muitas das estruturas destacadas na análise das linhas de costa obtidas no intervalo entre 1984 – 2020 são relacionadas aos estuários,

spits arenosos e pontas litorâneas. Isso pode ser explicado devido à complexa morfologia e dinâmica sedimentar acentuada destes ambientes que podem valorizar algumas tendências de erosão e deposição, ajudando a explicar a grande amplitude de valores máximos e mínimos observados nos modelos preditivos. Tal fato pode ser decorrente da escala de trabalho analisada em comparação à escala das estruturas.

Sob uma análise geral dos dados apresentados nesta pesquisa, quando comparados os valores percentuais de NSM calculados no período entre 1984 e 2020 aos preditos para os anos de 2030 e 2040, observa-se uma tendência de aumento nos transectos indicativos de estabilidade e deposição, ao passo que os transectos indicativos de erosão apresentam uma leve redução. No entanto, quando se leva em consideração as taxas de LRR, que foram utilizadas para geração das linhas preditas, o que se tem na verdade é uma redução brusca do percentual da linha de costa

CONCLUSÕES

A partir do uso integrado entre técnicas de sensoriamento remoto e análises estatísticas foi possível obter um entendimento satisfatório acerca da evolução da linha de costa do Estado do Ceará, compreendendo de forma mais clara os processos de progradação e retrogradação relacionados a esta, em escalas temporais de média duração.

A partir da análise exploratória dos dados para escala intermediária de tempo (1984 a 2020), foi possível observar que, em termos das variações totais, apenas 14.75 % da linha de costa do Estado se mostra em equilíbrio, com variações de NSM entre -10 m e +10 m, ao passo que as porções que apresentam deposição, em maior ou menor nível, totalizam 28.4% e as porções que apresentam erosão, totalizam 56.65%. Quando analisadas, entretanto, as taxas de variação (EPR e LRR), nota-se um percentual de 47.98% da linha de costa sobre condições de equilíbrio, acompanhada de uma redução nas taxas de deposição, agora totalizando apenas 13.73%, e de erosão, que nesse contexto totalizam 38.28%.

Apesar disso, observa-se em ambas as variáveis estatísticas, que os principais pontos de acresção da linha de costa estão relacionados a sotamar dos promontórios, sendo o maior *hotspot* deposicional a parte a sotamar da ponta litorânea de Ponta Grossa, sendo possível destacar também os Promontórios do Pecém e de Jericoacoara. Já em relação aos maiores pontos de erosão, nota-se

em condições de equilíbrio, acompanhado de um aumento considerável nas porções que apresentam deposição em maior ou menor nível, e um aumento expressivo nas porções que apresentam erosão, até o ano de 2040. Desta forma, estes pontos de *hot spots* erosivos precisam ser cuidadosamente monitorados e avaliados em escala de detalhe e medidas e soluções baseadas na natureza podem e devem ser tomadas sob a atuação de um efetivo gerenciamento costeiro na tentativa de que esta predição não venha a se tornar a realidade do ambiente costeiro do estado do Ceará.

Sendo assim, recomenda-se a realização de estudos em escalas maiores a fim de aumentar o nível de detalhamento na interceptação dos transectos sobre estes ambientes de natureza complexa a fim de elucidar se fatores como escala e geometria dos transectos tendem a supervalorizar, ou não, os valores preditos de erosão e deposição destas regiões.

que estes estão relacionados às regiões de desembocaduras fluviais, com destaque principalmente para os estuários dos rios Jaguaribe e Acaraú, porém com grandes variações observadas também nos rios Arrombado, Curú, Mundaú e Guriú.

Por fim, quando comparadas as taxas de LRR para o período entre 1984-2020 aos preditos, observa-se uma redução brusca do percentual da linha de costa em condições de equilíbrio, acompanhado de um aumento considerável nas porções que apresentam deposição em maior ou menor nível, e um aumento expressivo nas porções que apresentam erosão, até o ano de 2040. Sugere-se estudos mais aprofundados e em escala de detalhe voltados aos ambientes costeiros de natureza complexa (estuários, *spits* arenosos e pontas litorâneas) e o uso de medidas e soluções baseadas na natureza de forma que a predição apresentada nesta pesquisa não venha a se tornar a realidade do ambiente costeiro do estado do Ceará. Sugere-se ainda a consideração de mais variáveis na modelagem preditiva que interferem na dinâmica costeira, tais como velocidade dos ventos, pluviosidade, ação das ondas, marés, correntes, eventos de tempestades, elevação do nível do mar e ação antrópica. Nesse sentido, ressalta-se a necessidade de monitoramento contínuo da zona costeira do estado do Ceará, a fim de fornecer embasamento para as políticas de estado que visem a melhor gestão do real uso compartilhado do ambiente costeiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Núcleo de Planejamento Costeiro e Marinho do Programa Cientista Chefe (SEMA/CE), à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro com manutenção das bolsas de iniciação científica e tecnológica. Agradecem também ao Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

- ALTINUC, S.O.; KECELI, A.S.; SEZER, E.A. Semi-automated shoreline extraction in satellite imagery and usage of fractals as performance evaluator. **International Journal of Computer Theory and Engineering**, v. 6, n. 2, p. 102, 2014.
- APOSTOLOPOULOS, D. & NIKOLAKOPOULOS, K. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. **European Journal of Remote Sensing**, v. 54, n. 1, p. 240-265, 2021.
- ATAOL, M.; KALE, M.; TEKKANAT, İ.S. Assessment of the changes in shoreline using digital shoreline analysis system: a case study of Kızılırmak Delta in northern Turkey from 1951 to 2017. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 19, p. 1-9, 2019.
- BRANDÃO, R.L. & FREITAS, L.C.B. (Org.). **Geodiversidade do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 174 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. 2014.
- CAMPOS, J.N. & STUDART, T.M.C. Climatologia. In: CAMPOS, A.A.; MONTEIRO, A.Q.; MONTEIRO NETO, C.; POLETTE, M. (Org.). **A zona costeira do Ceará: diagnóstico para a gestão integrada**. Fortaleza: Associação de Pesquisa de Preservação e Ecossistemas, 2003. cap. 2, p. 51-53.
- CHACANZA, M.S.; MAIA DE ALMEIDA, N.; FREIRE, G.S.S.; SILVA NETO, C.A.; ABREU NETO, J.C.; JALANE, O.I. Análise da Variação da Linha de Costa no Trecho entre as Praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí-Ceará, Brasil, a partir de Imagens de Satélite aplicando DSAS. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 41, n. 4, p. 887 – 903, 2022.
- CROWELL, M.; DOUGLAS, B. C.; LEATHERMAN, S. P. On forecasting future US shoreline positions: a test of algorithms. **Journal of Coastal Research**, p. 1245-1255, 1997.
- CUI, BU-LI & LI, XIAO-YAN. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976–2005). **Geomorphology**, v. 127, n. 1-2, p. 32-40, 2011.
- DEEPIKA, B.; AVINASH, K.; JAYAPPA, K. S. Shoreline change rate estimation and its forecast: remote sensing, geographical information system and statistics-based approach. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 2, p. 395-416, 2014.
- DOLAN, R.; FENSTER, M. S.; HOLME, S. J. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. **Journal of coastal research**, p. 723-744, 1991.
- EKERCIN, S. Coastline change assessment at the Aegean Sea coasts in Turkey using multitemporal Landsat imagery. **Journal of Coastal Research**, v. 23, n. 3, p. 691-698, 2007.
- FAÇANHA, M.C.; D'ÁVILA DI CIERO, C.; SOUZA, L.A.; MARINO, T.R.D. Erosão costeira da praia do Icaraiá (Caucaia/CE). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2946-2952, 2017.
- FERREIRA, T.A.B.; SILVA, A.G.A.; PEREZ, Y.A.R.; STATTEGGER, K.; VITAL, H. Evaluation of decadal shoreline changes along the Parnaíba Delta (NE Brazil) using satellite images and statistical methods. **Ocean and Coastal Management**, v. 202, n. January, p.105513, 2021.
- GHORAI, D. & MAHAPATRA, M. Correction to: Extracting Shoreline from Satellite Imagery for GIS Analysis. **Remote Sensing in Earth Systems Sciences**, v. 3, n. 1–2, p. 23–23, 2020.
- HAKKOU, M.; MAANAN, M.; BELRHABA, T.; EL OUAI, D.; BENMOHAMMADI, A. Multi-decadal assessment of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation in Kenitra coast, Morocco. **Ocean & Coastal Management**, v. 163, p. 232-239, 2018.
- HEGDE, A.V. & AKSHAYA, B.J. Shoreline transformation study of Karnataka coast: geospatial approach. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 151-156, 2015.
- HIMMELSTOSS, E.; HENDERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S.A. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. US Geological Survey, 2018.
- HOSSAIN, M.S.; YASIR, M.; WANG, P.; ULLAH, S., JAHAN, M.; HUI, S.; ZHAO, Z. Automatic shoreline extraction and change detection: A study on the southeast coast of Bangladesh. **Marine Geology**, v. 441, p. 106628, 2021.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disp. em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-depopulacao.html?edicao=28674>. Acesso em: 01 dez. 2021.
- IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Produto Interno Bruto a Preços Corretos**. Fortaleza: IPECE, 2019. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-database/module/anoario.xhtml?cid=1>. Acesso em: 01 dez 2021.
- JONAH, F.E.; BOATENG, I.; OSMAN, A.; SHIMBA, M. J.; MENSAH, E. A.; ADU-BOAHEN, K.; EFFAH, E. 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**, v. 7, p. 19-31, 2016.
- KALMAN, R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. **Journal of basic Engineering**, v. 82, n. 1, p. 35-45, 1960.
- KANNAN, R.; ANAND, K.V.; SUNDAR, V.; SANNASIRAJ, S. A.; RANGARAO, V. Shoreline changes along the Northern coast of Chennai port, from field measurements. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 20, n. 1, p. 24-31, 2014.
- KELLY, J.T. & GONTZ, A.M. Using GPS-surveyed intertidal zones to determine the validity of shorelines automatically mapped by Landsat water indices. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 65, p. 92-104, 2018.
- KOMAR, P.D. **Handbook of coastal processes and erosion**. CRC Press, 2018.
- LEMOS, A.L.B. & SOPCHAKI, C.H. Contribuição da Ferramenta Digital Shoreline Analysis System nos Estudos de Dinâmica Costeira no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Equador (UFPI)**, v. 9, n. 3, p. 61–81, 2020.
- LONG, J.W. & PLANT, N.G. Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 13, 2012.
- LOUATI, M.; SAÏDI, H.; ZARGOUNI, F. Shoreline change assessment using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Medjerda delta coast, Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 4239-4255, 2015.
- MAHAPATRA, M.; RATHEESH, R.; RAJAWAT, A. S. Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using digital shoreline analysis system. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 42, n. 4, p. 869-876, 2014.

- MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S.; PESSOA, P.R.S.; SÁ FREIRE, G.S.; DE CARVALHO, A.M.; GUERRA, R.G.P.; BARROS, E.B.; MOURA, F.J.M. Ceará. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. 154 ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.
- NATARAJAN, L. SIVAGNANAM, N.; USHA, T.; CHOKKALINGAM, L.; SUNDAR, S.; GOWRAPPAN, M.; DEBAJYOTI ROY, P. Shoreline changes over last five decades and predictions for 2030 and 2040: a case study from Cuddalore, southeast coast of India. **Earth Science Informatics**, v. 14, n. 3, p. 1315-1325, 2021.
- NETO, C.M.; MEIRELES, A.J.A.; MAIA, L.P. Oceanografia e Dinâmica Costeira. In: CAMPOS, A. A.; MONTEIRO, A. Q.; MONTEIRO NETO, C.; POLETTE, M. (Org.). **A zona costeira do Ceará: diagnóstico para a gestão integrada**. Fortaleza: Associação de Pesquisa de Preservação e Ecossistemas, 2003. cap. 2, p. 70-80.
- OTSU, N.A. Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **Automatica** v. 11, p. 23-27, 1975
- PARTHASARATHY, K.S.S. & DEKA, P. C. Remote sensing and GIS application in assessment of coastal vulnerability and shoreline changes: a review. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 27, p. 588-600, 2019.
- PEDROZO-ACUÑA, A.; DAMANIA, R.; LAVERDE-BARAJAS, M.A.; MIRA-SALAMA, D. Assessing the consequences of sea-level rise in the coastal zone of Quintana Roo, México: the costs of inaction. **Journal of coastal conservation**, v. 19, n. 2, p. 227-240, 2015.
- PEROTE, D.R.N. **Evolução temporal da linha de costa segundo uma análise geoespacial de dados de satélite nas adjacências da desembocadura do Rio Jaguaribe - Fortim - Ceará**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O.; MAIA, L P. The beaches of Ceará. **Brazilian Beach Systems**. Springer, Cham. p. 175-199. 2016
- RAJ, N.; REJIN NISHKALANK, R.A.; CHRISBEN SAM, S. Coastal Shoreline Changes in Chennai: Environment Impacts and Control Strategies of Southeast Coast, Tamil Nadu. **Handbook of Environmental Materials Management**, 1-14, 2020
- ROSATI, J.D. Concepts in sediment budgets. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 2, p. 307-322, 2005.
- SALGHUNA, N.N. & BHARATHVAJ, S. Aravind. Shoreline change analysis for northern part of the Coromandel coast. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 317-324, 2015.
- SILVA NETO, C.A. **Avaliação da influência de canais de maré na dinâmica costeira em Icapuí (CE) através de sensores remotos óticos**. 2019. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- SILVA, M.T.D.; LOPES, D.N.; REBOUÇAS, I.S.; FREIRES, E.V.; SILVA NETO, C.Â.D.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. Variação da linha de costa no litoral cearense (1984-2018). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n. 7, p. 2551-2579, 2019.
- SOUZA, C.D.; SILVA, R.M.N.; RODRIGUES, L.I.C.; MORORÓ, E.A.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; SABADIA, J.A.B. Emprego de imagens landsat na análise temporal da linha de costa da porção oeste do estado do Ceará. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 29, nº 2, p. 181-194, 2017.
- SOUZA, W.F. **Sensoriamento remoto e SIG aplicados à análise da evolução espaçotemporal da linha de costa do município de Icapuí, Ceará - Brasil**. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2016.
- TEIXEIRA, C.P.B.; Souto, M.V.S.; Pinheiro, L.R.D.S.G.; MATOS, M.D.F.A.; GOMES, D.D.M. Análise da evolução costeira no município de Beberibe, estado do Ceará, entre os anos de 1979 a 2019. São Paulo, Unesp - **Geociências**, v. 40, n. 04, p. 1005-1031, 2021.
- XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International journal of remote sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.
- YANG, K.; Li, M.; Liu, Y.; Cheng, L.; Duan, Y.; Zhou, M. River delineation from remotely sensed imagery using a multi-scale classification approach. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 4726-4737, 2014
- ZAMBONI, A. & NICOLODI, J.L. **Macro diagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Brasília. DF, Brasil, 2008.
- ZED, A.A.; SOLIMAN, M.R.; YASSIN, A.A. Evaluation of using satellite image in detecting long term shoreline change along El-Arish coastal zone, Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 2687-2702, 2018.

Submetido em 13 de julho de 2023

Aceito para publicação em 24 de outubro de 2023