

ABORDAGEM ESPACIAL MULTIVARIADA APLICADA AO ESTUDO DA VARIAÇÃO DE MÉDIO PRAZO DA LINHA DE COSTA

Filipe Maciel de Moura

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
filipemaciel92@yahoo.com

Davis Pereira de Paula

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
davis.paula@uece.br

Fábio Perdigão Vasconcelos

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
fabioperdigao@gmail.com

Francisco José Maciel de Moura

Universidade Estadual Vale do Acaraú,
Departamento de Geografia, Sobral, CE, Brasil
fmacioldemoura@yahoo.com.br

RESUMO

As frentes oceânicas se caracterizam pela intensa dinâmica e vulnerabilidade, em função da ação conjunta das forçantes oceanográficas, meteorológicas e antropogênicas. Com isso, existem diversas abordagens para mensuração dessa dinâmica, destacando-se aquelas derivadas de dados de sensoriamento remoto, com base em indicadores, como a linha de costa. Esta se configura como a interface entre a área marinha e continental, podendo ser indicada pelo limite entre a área seca e úmida, e que não considera espessura ou diâmetro. Entretanto, a depender do método e dado aplicados, esses prognósticos têm maior ou menor incerteza/precisão espacial. A presente investigação, a partir de dados do satélite Landsat 5 e 8 do período de 2011 a 2018, aplicou duas abordagens (DSAS e Cassie) para estimar as variações da linha de costa da Praia do Icaraí, Ceará. Os resultados apontaram divergências entre as abordagens: o DSAS derivou um cenário de predomínio de processos erosivos e a Cassie um predomínio de progradação. Com base nas campanhas e dados de campo, bem como, na literatura, constatou-se que os dados do DSAS estão mais congruentes com a realidade local, representando uma variação líquida de -8,10 m e uma taxa de variação de -2,32 m/ano da linha de costa.

Palavras-chave: Linha de costa. Modelos espaciais. Variação da linha de costa de médio prazo.

MULTIVARIATE SPATIAL APPROACH APPLIED TO THE STUDY OF MEDIUM-TERM VARIATION OF THE SHORELINE

ABSTRACT

Ocean fronts are characterized by intense dynamics and vulnerability, due to the joint action of oceanographic, meteorological and anthropogenic forcing. As a result, there are several approaches to measuring this dynamic, highlighting those derived from remote sensing data, based on indicators such as the coastline, which is the interface between the marine and continental areas, and can be indicated by the limit between the dry and wet area, and which does not consider thickness or diameter. However, depending on the method and data applied, these predictions have greater or lesser uncertainty/spatial precision. The present investigation, based on data from the Landsat 5 and 8 satellite from 2011 to 2018, applied two approaches (DSAS and Cassie) to estimate variations in the coastline of Praia do Icaraí - Ceará. The results pointed to divergences between the approaches, where DSAS derived a scenario of predominance of erosive processes and Cassie a predominance of progradation. Based on campaigns and field data, as well as literature, it was found that the DSAS data are more congruent with the local reality, representing a net variation of -8.10 m and a variation rate of -2.32 m/year of the coastline.

Keywords: Coastline. Spatial models. Medium-term shoreline variation.

INTRODUÇÃO

Historicamente os ambientes costeiros, sobretudo, aqueles situados nas frentes marinhas oceânicas, sempre representam espaços complexos, associados às elevadas taxas de ocupação antropogênica e interações das condicionantes oceanográficas e meteorológicas, representando uma conjuntura que confere a esses ambientes uma variação intensa e não linear da morfologia costeira, representada por processos erosivos e/ou progradação (DAVIS e FITZGERALD, 2004; BIRD, 2008).

Com base nesse contexto de interações, variações e respostas morfológicas diferentes no espaço e no tempo em decorrência da ação conjugada das variáveis ambientais e antropogênicas, é de fundamental importância a concepção/compilação de dados históricos das mudanças costeiras como elemento base para o estabelecimento de diálogos a respeito da aplicabilidade dessas informações na gestão espacial, uma vez que se observa a crescente necessidade de investimentos em intervenções de engenharia direcionadas à regularização/redução dos processos de avanço da retração da faixa de praia.

Dessa forma, os crescentes processos de ocupação das frentes marinhas oceânicas, em específico os que ocorrem sobre as morfologias costeiras responsáveis pelas interações do pacote sedimentar, tem intensificado os processos erosivos (DONNELLY, KRAUS e ALRSON, 2006; MATIAS, 2006).

A evolução recente na coleta e na acessibilidade de informações derivadas de dados satelitais, sobretudo, os que não oneram custo ao desenvolvimento de análises e prognósticos, em específico dos ambientes costeiros, como por exemplo, mapeamento das alterações morfológicas em longo, curto e médio prazo, condicionaram o desenvolvimento de inúmeras abordagens nos âmbitos metodológico e como técnico-operacional, em especial no que diz respeito às ferramentas de análise espacial.

Nas últimas décadas observa-se uma elevação dos estudos temporais da linha costa que fazem uso de ferramentas de análise espacial, tendo como base de dados principais as imagens de satélite. Esse fato se justifica principalmente pela resolução temporal dos dados (ZAKARIA et al., 2006; SÁCHEZ-GÁRGIA et al., 2020; XU, 2018).

Nesse contexto de análise destacam-se os dados da série Landsat, que coleta dados de maneira ininterrupta desde a década 1970 e, atualmente, encontra-se na série Landsat 9. Outros sensores orbitais mais recentes, também se inserem nesse contexto, como é caso dos satélites Sentinel, Cbers, dentre outros.

Como se observa na literatura, essas abordagens tomam destaque no que diz respeito à análise da variação da linha de costa para determinação da mobilidade praial em termos de avanço ou recuo dos processos erosivos e/ou progradação (GARCIA-RUBIO HUNTLEY, 2012; MC-ALLISTER et al., 2020).

De maneira geral, a linha de costa pode ser entendida como um indicador unidimensional da posição da praia, ou seja, sem espessura ou diâmetro, tendo como referência o limite da interface entre o ambiente continental e marinho, ou ainda, a divisa entre a área seca e molhada, indicando desta forma, o estado morfodinâmico do momento da coleta da informação (OERTEL, 2005).

Logo, a concepção de que a linha de costa representa informações de um dado período pontuado no espaço e no tempo, é necessário considerar as incertezas associadas à coleta e ao processamento dos dados na concepção de prognósticos.

Face a essa questão, no âmbito das ferramentas/software aplicados, dentre as diferentes abordagens e possibilidades, tomam destaque atualmente as que são acopladas em plataforma desktop, como é o caso do *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) desenvolvida por Thieler et al. (2009), que procede suas análises no software proprietário ArcGIS®, e as que são acopladas em plataformas de *web service*, a exemplo da *Coastal Analysis from Satellite Imagery Engine* (CASSIE) desenvolvida por Almeida et al. (2021). Esta última, processa suas informações e realiza processamento de maneira gratuita a partir da base de dados disponível no Google Earth Engine (GEE).

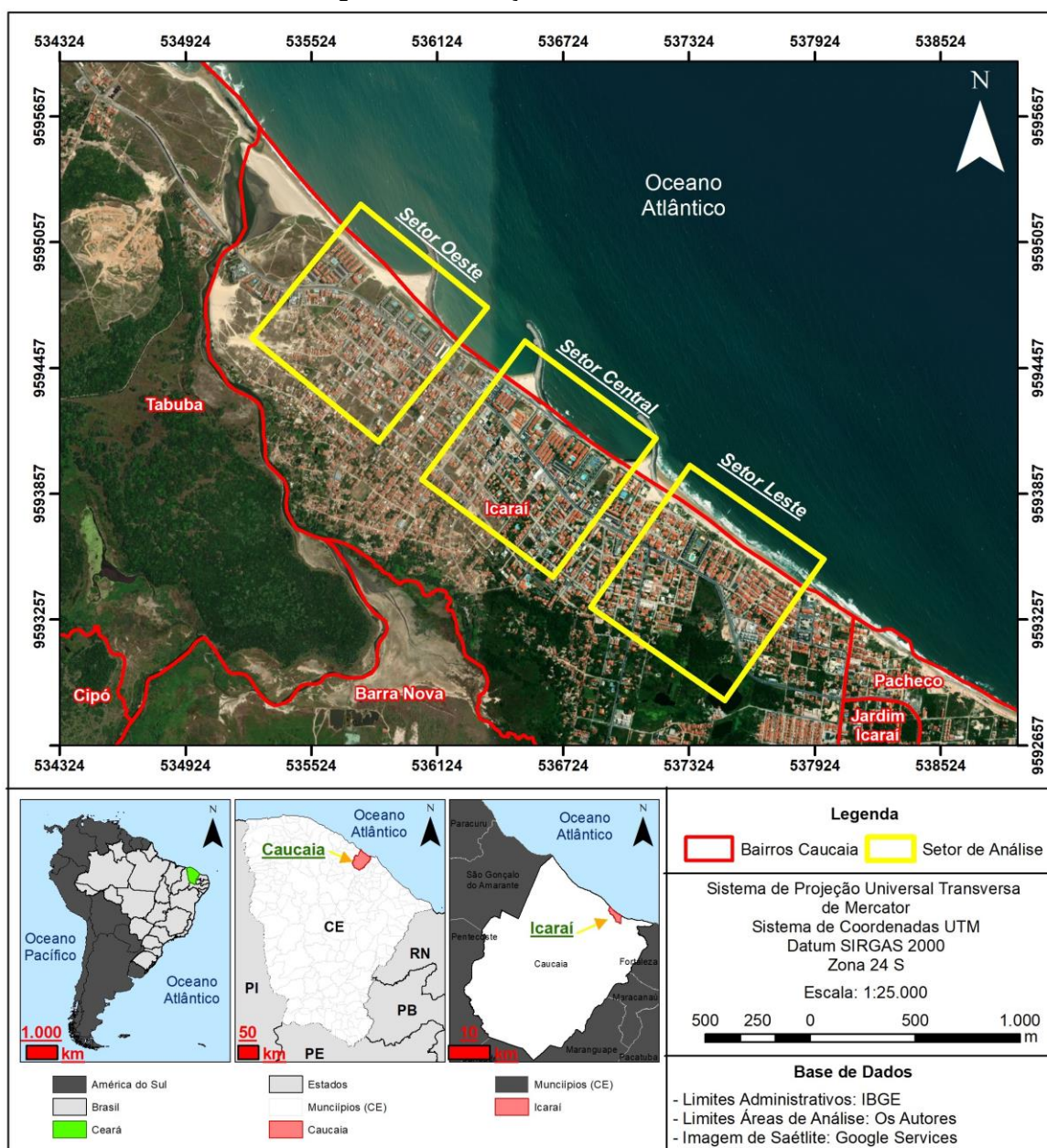
Partindo desse entendimento, e buscando averiguar as diferentes derivações de dados das ferramentas DSAS e CASSIE em dados satelitais de médio prazo, a presente investigação aplicou os dados da série Landsat, para representar a evolução temporal (2014-2018) de uma praia urbana do Estado do Ceará.

Esta investigação se justifica muito em função da carência de estudos com esse porte comparativo no cenário regional, assim como, em função de a área de experimento representar um ambiente complexo a partir da incidência/recorrência de processos erosivos permanentes

METODOLOGIA

A presente análise elencou como área de experimento a praia urbana do Icaraí, localizada no setor urbano do município de Caucaia, situado no litoral Oeste do Ceará – Nordeste do Brasil (Figura 1). Esse local, na última década tem registrado a expansão dos processos de retração da morfologia costeira. Associa-se a este fato o registro de diversas intervenções de engenharia, buscando controlar os processos erosivos e reestabelecer o equilíbrio dinâmico dessa área (PAULA e FARRAPEIRA NETO, 2017).

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fontes: INPE, 2023. Elaboração - os autores, 2023.

O horizonte temporal considerado nas análises se situa entre os anos 2011 e 2018, visto que historicamente, como aponta a literatura, a Praia do Icaraí registrou-se os maiores índices de processos erosivos associados a eventos de alta energia/ressacas do mar (LIMA et al., 2019; LIMA, 2021; MOREIRA et al. 2020; PAULA e FARRAPEIRA NETO, 2017). Há também um número significativo de intervenções de engenharia (*bagwall* – 2011/2012, e outras soluções implantadas pela população local, tais como estruturas escalonadas compostas de sacos com areia), conforme se observa na Figura 2.

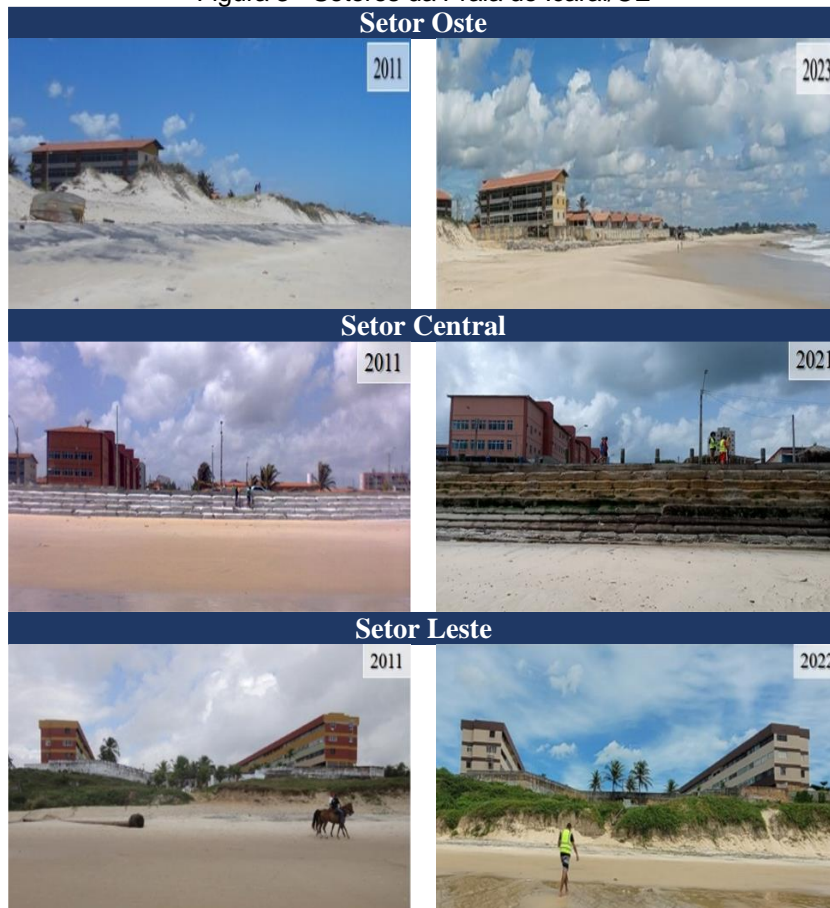
Figura 2 - Estado dos processos erosivos na Praia do Icaraí/CE – Setor Leste



Fontes: RESMAR, 2023.

Na área de estudo, observa-se estados morfodinâmicos distintos, onde o setor Oeste é composto de intensos processos erosivos, os setores central e Leste apresentam alternância de estágios erosivos e progradacionais (Figura 3).

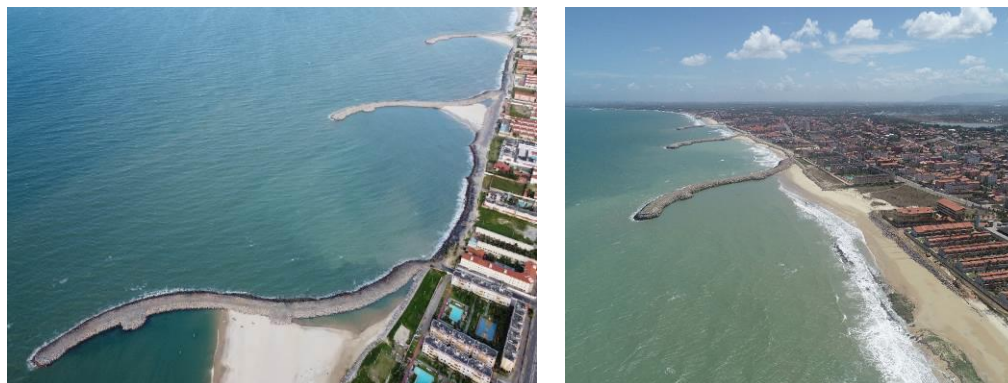
Figura 3 - Setores da Praia do Icaraí/CE



Fontes: RESMAR, 2023.

Cabe ressaltar que o poder público municipal, com o intuito de mitigar os processos erosivos já instalados e em contante evolução, coordenou a implantação de uma série de três espigões na área de estudo, sendo estes concluídos no ano de 2023 (Figura 4). Contudo, as obras continuam em processo de implantação, onde está prevista uma série de aterros hidráulicos associados às referidas estruturas.

Figura 4 - Espigões senoidais instalados na Praia do Icarai/CE



Fontes: RESMAR, 2023.

Mediante essa questão recente, e a necessidade de monitoramento contínuo das variações morfológicas após a instalação dessas estruturas, para calibrar os modelos espaciais com essa nova variável espaço-tempo, considerou-se como data final de análise o ano de 2018.

Para desenvolvimento das análises e subsequentes resultados apresentados nesta investigação, procedeu-se a três etapas principais. A primeira se refere à revisão de literatura sobre a área de estudo e a metodologias de análise de linha de costa a partir de modelos espaciais. Na segunda concentraram visitas de campo para coleta de imagens e averiguação da realidade da área de estudo. A última etapa tratou objetivamente da concepção do banco de dados satelitais, processamento das informações e diagramação dos resultados.

Base de dados

Partindo do princípio de compatibilidade e homogeneidade das informações disponíveis para processamento em ambas as abordagens/ferramentas adotadas, considerou-se apenas os dados da série Landsat, uma vez que, a plataforma CASSIE contempla apenas em seu banco de dados informações dos satélites Landsat e Sentinel, e não permite a importação de dados externos à sua base. Este último foi desconsiderado para as amostragens, por não contemplar dados de todo o período de análise estabelecido.

Dessa forma, os dados contemplam a série Landsat 5 e 8 (órbita 217 e ponto 62), conforme observa-se no Quadro 1, estando temporalmente enquadrados entre os anos de 2011 e 2018 e fazendo referência ao mês de agosto em todos os anos. Os dados foram adquiridos por meio da Divisão de Geração de Imagens (DGI), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Quadro 1 – Dados multiespectrais aplicados

Ano	Satélite	Sensor	Resolução Espacial (m)	Bandas	Composição (RGB)
2011	Landsat 5	TM	30	1 a 7	543
2013	Landsat 8	OLI	30	1 a 7	654
2014					
2015					
2016					
2017					
2018					

Fonte: INPE, 2023. Elaboração - os autores, 2023.

Cabe a observação de que a delimitação da linha de costa por meios automatizados permite ao pesquisador a aplicação de imagens de resoluções espaciais diferentes, uma vez que os processos automatizados se baseiam em índices e não em processos de extração/delimitação manual por vetorização. Contudo, para esses experimentos, aplicou-se imagens com a mesma resolução espacial.

Em decorrência de questões inerentes aos dados da série Landsat 7 na ferramenta CASSIE, o ano de 2012 não foi considerado nas análises, em virtude da indisponibilidade de imagens de boa qualidade (percentual igual ou menor a 0% de cobertura de nuvens), ou ainda processos inseridos no código fonte da plataforma que permita ao usuário proceder rotinas de correção de falhas radiométricas. Outro ponto relevante é não permitido ao usuário inserir novas imagens de satélite a CASSIE, nem tampouco editar as ferramentas e rotinas de processos já instalados e funcionais.

Procedimentos Metodológicos

Os dados aplicados seguiram etapas criteriosas de retificação, buscando redimir quaisquer problemáticas associadas à imprecisão espacial ou falhas associadas à resposta espectral/radiométrica.

O processo de correções na ferramenta CASSIE é realizado de modo automático na plataforma, por meio de algoritmos e métricas pré-estabelecidos. Para o processamento das informações realizadas na ferramenta DSAS, utilizou-se o software ArcGIS® 10.5, versão trial, devidamente licenciada (ID: 3788757452), adquirido junto ao *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

O processamento das informações no software ArcGIS® seguiu três etapas para estabelecimento dos padrões necessários, conforme apresentado a seguir:

a) Pré-Processamento: etapa exclusivamente realizada no software ArcGIS®, para os dados a serem implementados no DSAS. Contemplou a seleção das imagens a partir do critério de percentual menor ou igual a 0% de cobertura de nuvens, e mesmo período disponível em ambas as ferramentas. Posteriormente buscando reduzir os erros eletrônicos derivados do sensor, procedeu-se à correção atmosférica, por meio de conversão dos valores de nível de cinza para radiância espectral ao nível do sensor e para reflectância aparente a partir do método de subtração por pixel escuro. Em seguida, executou-se a correção geométrica/registro com base mosaico controlado Geocover da NASA. Por fim, todos os dados foram reprojeto para o Datum SIRGAS 2000 – Zona 24 S.

b) Processamento: nesta etapa, realizou-se as análises de mistura e empilhamento de bandas, e por conseguinte a aplicação dos cálculos de índice de vegetação *Normalized Difference Water Index* (NDWI) no Arcgis, uma vez que, na ferramenta CASSIE esse é a metodologia aplicada para delimitação da linha de costa. Cabe a observação de que o processamento na ferramenta CASSIE é todo automatizado - o usuário não calibra nem altera os algoritmos.

c) Pós-Processamento: essa última etapa contemplou as duas ferramentas utilizadas, e teve como procedimentos, para o ArcGIS®, a delimitação da área de estudo, a concepção do banco de dados (importação das linhas de costa, linha de base *onshore*) e o cálculo das taxas de variação e variação líquida da linha de costa. Para a ferramenta CASSIE, procedeu-se à delimitação da área de estudo, seleção das imagens, delimitação da linha de base *onshore* e cálculo das taxas.

Indicador de Linha de Costa e Método de Delimitação Aplicado

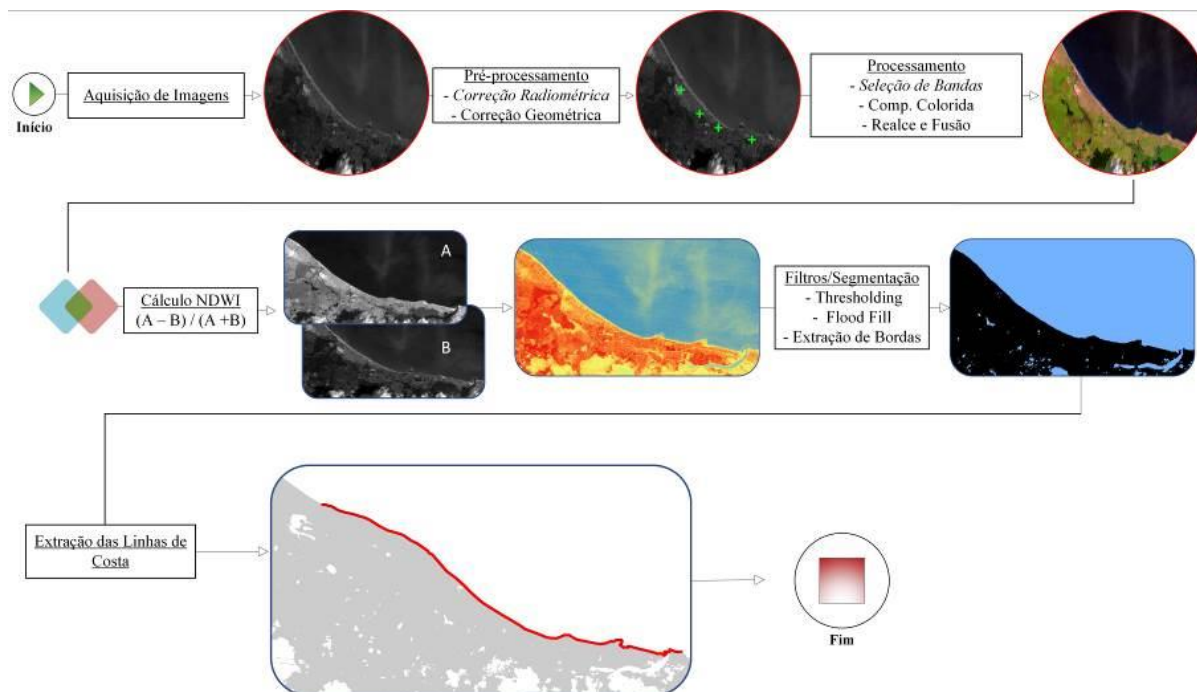
A linha de costa, é um conceito complexo que pode ser entendido de maneiras diversificadas a partir do indicador de extração (MCALLISTER et al., 2022; BOAK e TUNNER, 2005).

Para esta investigação, considerou-se o conceito de linha de costa, como o limite flutuante situado na interface entre a área continental e marinha, ou seja, limite entre a área seca e úmida, conforme aponta Crowell (1991).

Buscando compatibilizar as abordagens, aplicou-se o índice de vegetação *Normalized Difference Water Index* (NDWI), desenvolvido por McFeeters (1996). Observa-se na Figura 5, o NDWI tem como princípio básico, potencializar a refletância da superfície da água, com base nas bandas espectrais do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas. O índice gerado varia de 1 a -1, onde os

valores positivos representam as superfícies da água, e os negativos, as áreas de vegetação e solo (MCFEETERS, 1996).

Figura 5 - Etapas de extração da linha de costa a partir do índice NDWI - ArcGIS®



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

No que diz respeito a aplicação dessa metodologia para extração da linha de costa, uma série de investigações foram desenvolvidas e aplicadas em estudos de caso ao longo de todas as áreas costeiras do mundo, como por exemplo, os experimentos realizados por Grigio et al. (2005), Sousa et al. (2017), Lima (2021), Teixeira et al. (2021), dentre outros.

Cabe destacar que esse processo é executado automaticamente na ferramenta CASSIE, sem interferência do usuário.

Para padronizar os valores em classes cluterizadas, determinou-se alguns limiares. Para a variação líquida (NSM) expressa em metros, valores positivos indicam progradação, valores iguais a zero estabilidade e valores negativos erosão.

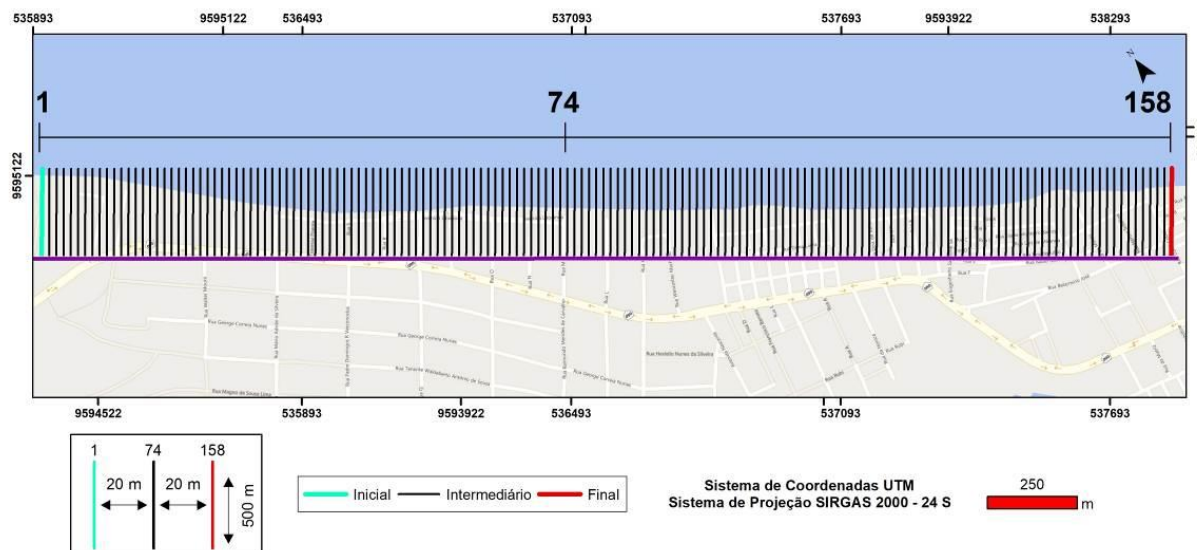
Para as taxas de variação (LRR), seguiu-se a abordagem de Esteves e Finkl (1998), expressos em metros/ano, sendo indicados da seguinte maneira: > 0,5 (progradação), - 0,5 a 0,5 (estável), - 0,5 a - 1,0 (erosão) e > - 1 (erosão crítica).

Abordagens Aplicadas

Para a determinação das taxas de variação da linha de costa (m/ano) e a variação líquida (m) da Praia do Icaraiá (CE), aplicou-se duas abordagens de análise espacial distintas. A primeira se refere ao DSAS e a segunda diz respeito à Cassie.

Como parâmetro de entrada para geração dos transectos, adotou-se um espaçamento (Leste-Oeste) de 20 metros entre os transectos, e um comprimento (Norte-Sul) de 500 metros para cada transecto (Figura 6).

Figura 6 - Parâmetros de entrada para geração dos transectos



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

A ferramenta DSAS, foi desenvolvida por Thieler et al. (2009), no contexto do projeto de riscos de mudança costeira do *United States Geological Survey* (USGS), tendo como foco principal a estimativa de estatísticas da taxa de mudança para uma série temporal de dados de linha de costa.

O DSAS fornece um conjunto de métricas que derivam valores de taxas e variações líquidas de um ambiente costeiro, considerando a linha de costa antiga e a mais recente, e a mais distante e mais próxima da linha de base *onshore*, e ainda considerando todo o pacote de linhas de costa.

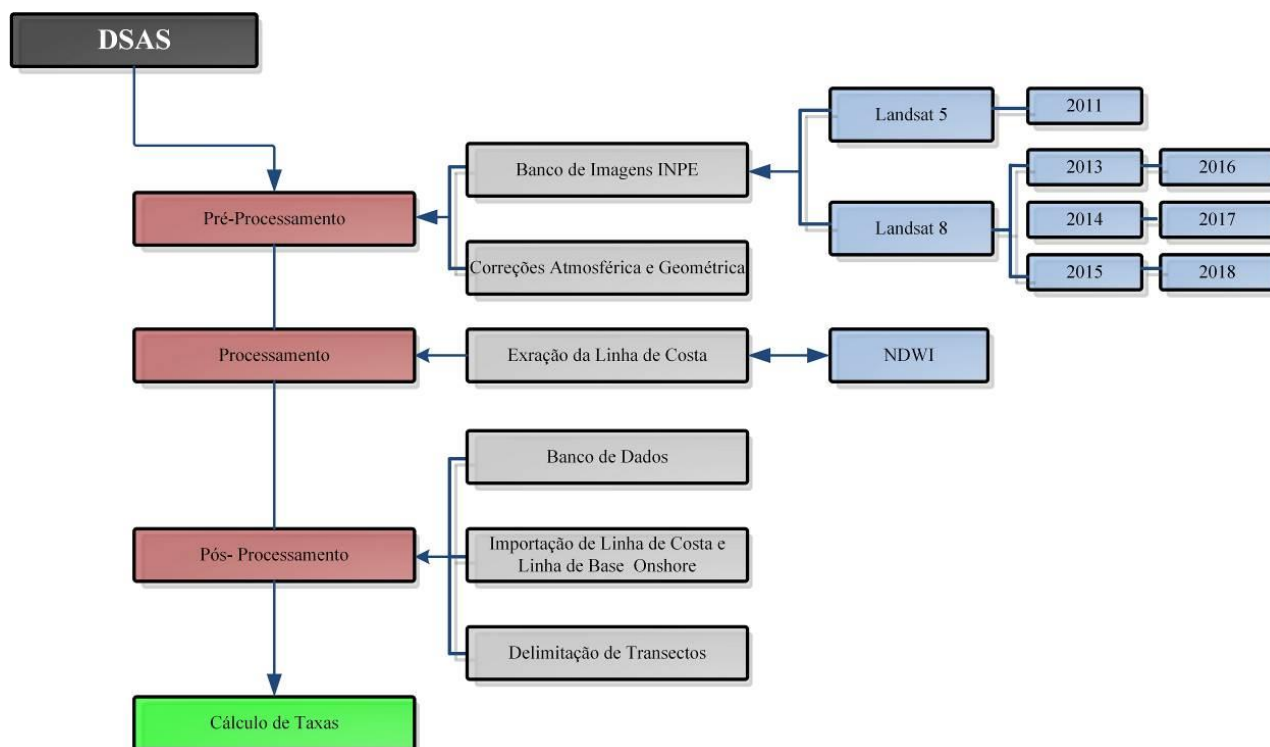
Para esta investigação, considerou-se apenas as variáveis *Net Shoreline Movement* (NSM) e *Linear Regression* (LRR), uma vez que, na ferramenta CASSIE, essas duas variáveis são calculadas com base na mesma sintaxe de cálculos do DSAS (THIELER et al. 2009).

A métrica *Net Shoreline Movement* (NSM) retorna à informação da movimentação líquida da linha de costa em metros (valores positivos e negativos), com base na distância entre a linha de costa de período mais antiga e a mais recente (THIELER et al. 2009).

A métrica *Linear Regression* (LRR), por sua vez, representa a taxa de variação da linha de costa em metros/ano com base em todas as linhas da base de dados (THIELER et al. 2009).

Desta forma, para geração das informações seguiu-se as etapas apresentadas na Figura 7, sendo essas totalmente desenvolvidas no software ArcGIS®.

Figura 7 - Etapas de processamento DSAS



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Coastal Analysis from Satellite Imagery Engine (CASSIE)

Como alternativa ao DSAS, partindo da premissa de acessibilidade e custos, Almeida et al. (2021), no contexto do projeto Bay Squeeze, executado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade do Vale do Itajaí com colaboração da Universidade Federal de Rio Grande, e do COLAB +ATLANTIC LVT de Portugal, desenvolveram a ferramenta *From Satellite Imagery Engine (CASSIE)*.

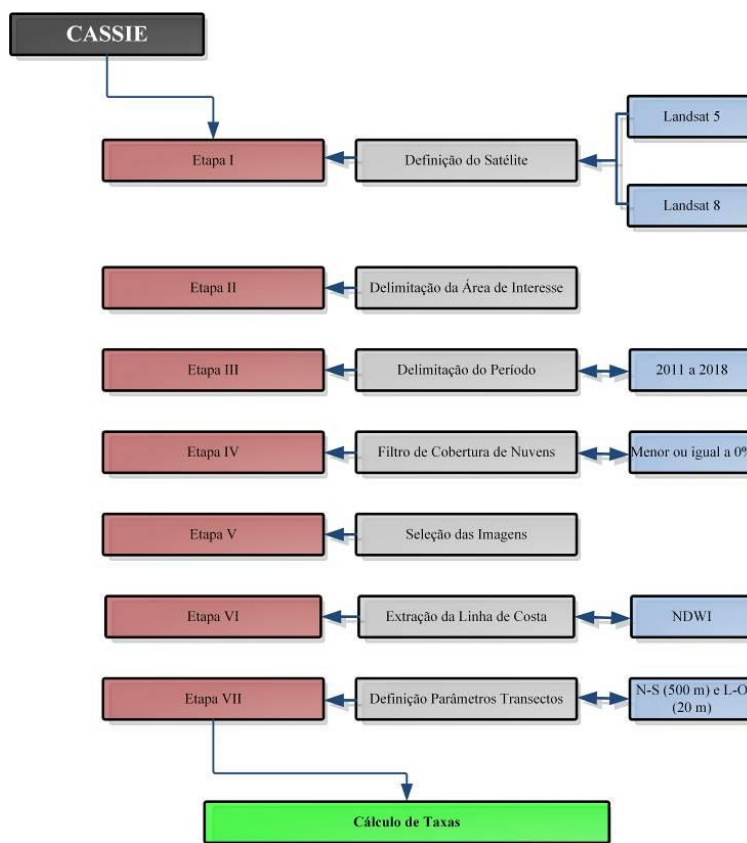
Essa abordagem, utiliza os serviços do *Google Earth Engine (GEE)* como fonte de dados para as análises, porém, não ficam claros ao usuário quais são os algoritmos aplicados, apenas a sequência de processos como especificado na Figura 8. A ferramenta é dividida em três módulos: análise da linha de costa, batimetria e compressão costeira. Para esta investigação, aplicou-se apenas o módulo de linha de costa.

Conforme apresentado, as bases teóricas e sintaxes de cálculo dessa ferramenta foram baseadas no DSAS, o que permite de fato a comparação entre as métricas geradas por ambas as abordagens.

Para esta ferramenta, também se considerou as variáveis NSM e LRR.

A geração das informações seguiu as etapas apresentadas na Figura 8, sendo essas totalmente desenvolvidas na plataforma on-line CASSIE.

Figura 8 - Etapas de processamento Cassie



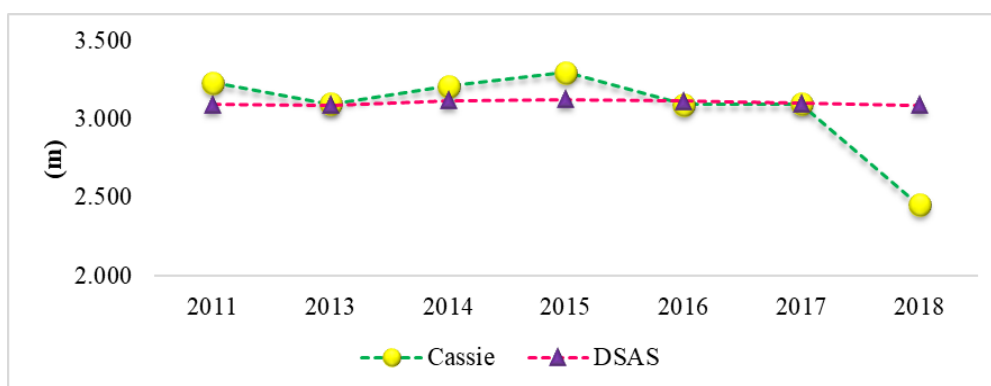
Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises executadas apresentaram um cenário de redução significativa do comprimento da linha de costa, com destaque principal aos dados derivados da ferramenta CASSIE, que indicou um comprimento médio de 3.068,12 m. Quando comparados ao do DSAS, este apontou para um comprimento médio de 3.104,88 m.

Apesar de no contexto geral serem similares, nota-se, a partir da Figura 9, um ponto de inflexão notável dos dados, no caso para o ano de 2018, onde o comprimento da linha de costa extraída pela ferramenta Cassie, teve uma retração da ordem de 20,60% em relação á extraída no DSAS para o mesmo período.

Figura 9 - Evolução do comprimento da linha de costa



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Uma análise mais completa dos dados aponta para valores tendencialmente lineares dos dados derivados do DSAS (Quadro 2), e uma discrepância nos valores oriundos do modelo Cassie. Essas discrepâncias podem ter relação com a geração da linha de costa a partir da descalibração da sintaxe de cálculo da ferramenta Cassie. Fato é que modelos baseados em índices de vegetação para áreas urbanas devem estar devidamente calibrados, no que diz respeito à resposta espectral dos alvos, face à grande diversidade de materiais e teores de umidade.

Quadro 2 - Dados multiespectrais aplicados

Indicador	Cassie	DSAS
Mínimo	2.453,15 m	3.089,51 m
Média	3.068,38 m	3.104,88 m
Máximo	3.297,12 m	3.126,49 m

Fonte: Elaboração - os autores, 2023.

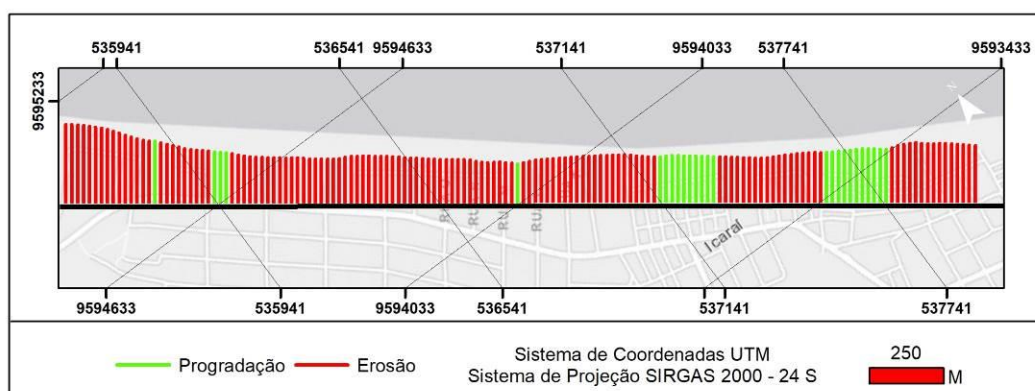
Os dados apontam ainda, para um ponto de inflexão registrado no ano de 2015, onde se observa a elevação da extensão da linha de costa para ambas as abordagens. Houve, respectivamente, um aumento percentual de 1,07% no DSAS e um aumento de 1,98% na Cassie.

Para as análises das taxas de variação (m/ano) e variação líquida (m) da linha de costa, cabe observar que no DSAS foram gerados 154 transectos e na Cassie 157 transectos, essa divergência está diretamente associada às linhas de costas extraídas.

Abordagem Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

A variação líquida da Praia do Icarai (CE) a partir do DSAS, tomando como base a linha de costa mais antiga (2011) e a mais recente (2018), indicou um cenário com predominância de processos erosivos em 83,12% dos transectos, sendo estes locados espacialmente ao longo de todo o trecho de estudo. A partir da Figura 10, verifica-se também que os 16,88% restantes dos transectos caracterizados por processo progradacionais estão locados preferencialmente na porção Leste. Por fim, não se determinou valores de estabilidade, ou seja, não houve variação (valores iguais a 0).

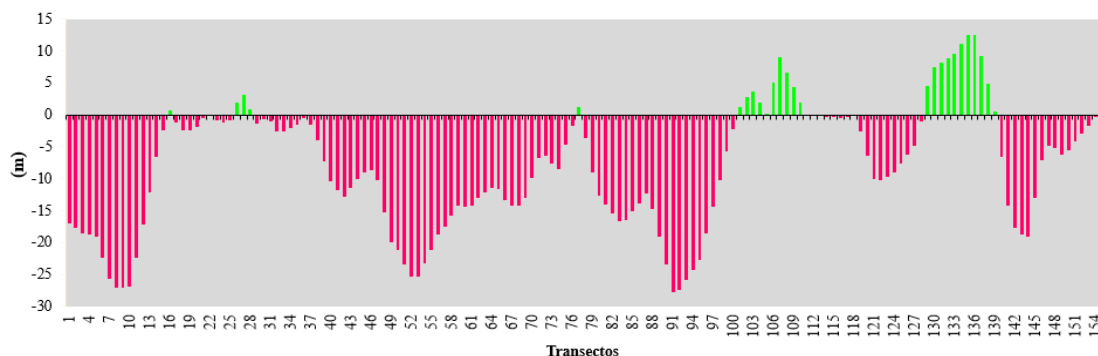
Figura 10 - Representação espacial da variação da líquida de costa (2011 e 2018) - DSAS



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Uma análise geral das distribuições dos valores da amostra denotou um valor médio de variação líquida de -8,10 m. Os valores discretizados para os transectos erosivos representaram uma variação entre - 0,10 m e - 25,70 m, com valor médio de - 10 m. Os valores referentes à progradação apresentaram uma variação ente 0,20 m e 12,62 m, com valor médio de 5,17 m (Figura 11).

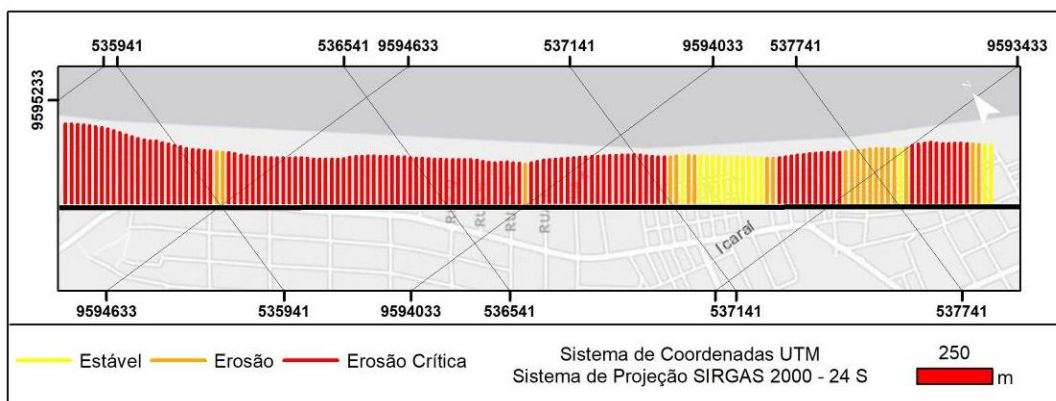
Figura 11 - Variação líquida de costa (2011 e 2018) – DSAS



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Ao se analisar todo o pacote de dados para determinar a taxa de variação da linha de costa, com base no DSAS não foram identificados processos de progradação (Figura 12). Além disso, na variável NSM houve a predominância de processos erosivos, onde a erosão crítica é representada em 76,62%, 13,64% dos transectos representam erosão, e apenas 9,74% dos transectos representaram estabilidade.

Figura 12 - Representação espacial da taxa de variação da linha de costa (2011 a 2018) – DSAS

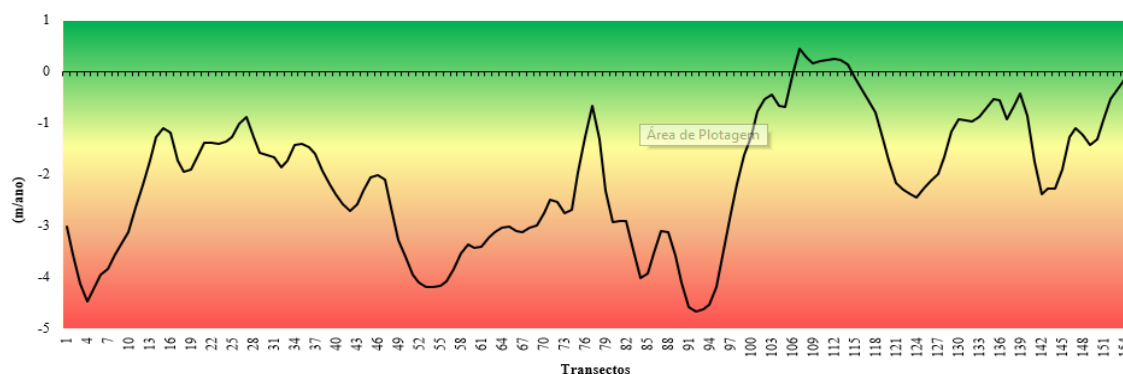


Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Conforme a Figura 12, a disposição espacial dos transectos distingue a área nos setores Oeste e Central com erosão crítica, e o Leste com processos de erosão e estabilidade. Apesar da presença de alguns transectos com erosão crítica, é importante destacar que, a porção Central é onde se encontra a estrutura de controle de processos erosivos do tipo *bagwall*.

Os dados gerais da amostra apontaram para uma taxa média de variação de -2,32 m/ano (Figura 13). A discretização das taxas por classe apresentou as seguintes variações: erosão (-0,52 e -1,01 e m/ano), erosão crítica (-1,10 e -4,66 e m/ano) e estabilidade (-0,45 e 0,45e m/ano).

Figura 13 - Taxa de variação da linha de costa (2011 a 2018) – DSAS

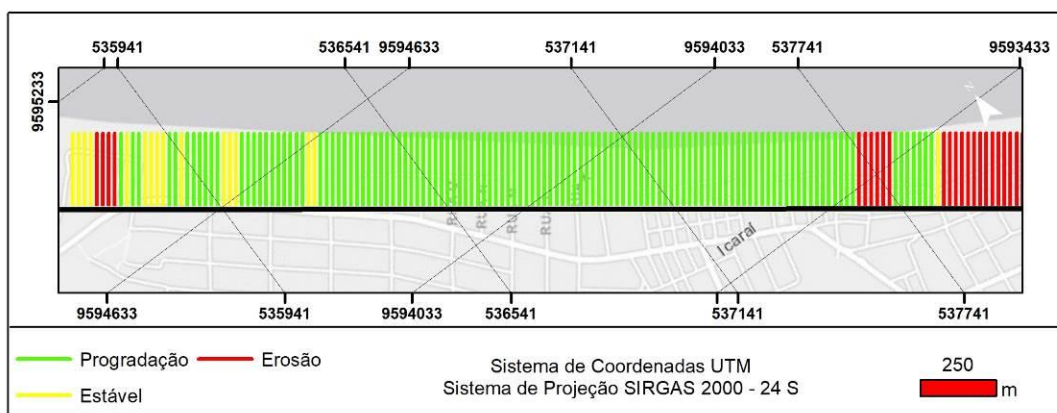


Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Abordagem Coastal Analysis from Satellite Imagery Engine (CASSIE)

A variação líquida da Praia do Icarai (CE) a partir da ferramenta Cassie, tomando como base a linha de costa mais antiga (2011) e a mais recente (2018), indicou um cenário inverso ao do DSAS, predominando processos progradação com um total de 74,7% dos transectos inseridos nessa classe, verifica-se também que os transectos erosivos representam apenas 15,2% da amostra, e 10,1% em estágio morfodinâmico de estabilidade (Figura 14).

Figura 14 - Representação espacial da variação da líquida de costa (2011 e 2018) - Cassie

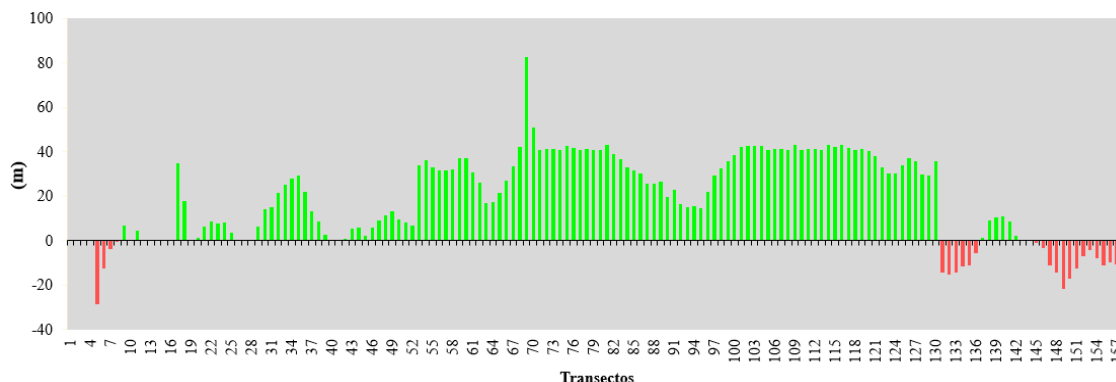


Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Observa-se uma distribuição espacial de regime predominante de progradação na porção Central da área de estudo, onde situa-se a estrutura de controle de processos erosivos do tipo bagwall e nas extremidades Oeste, processo de estabilidade, e Leste, processos erosivos.

Uma análise geral das distribuições dos valores da amostra denotou um valor médio de variação líquida de 18,44 m. Os valores discretizados para os transectos erosivos representaram uma variação entre - 0,05 m e - 28,54 m, com valor médio de - 10,44 m. Os valores referentes à progradação apresentaram uma variação ente 0,20 m e 82,72 m, com valor médio de 26,82 m (Figura 15).

Figura 15 - Variação da líquida de costa (2011 e 2018) – Cassie

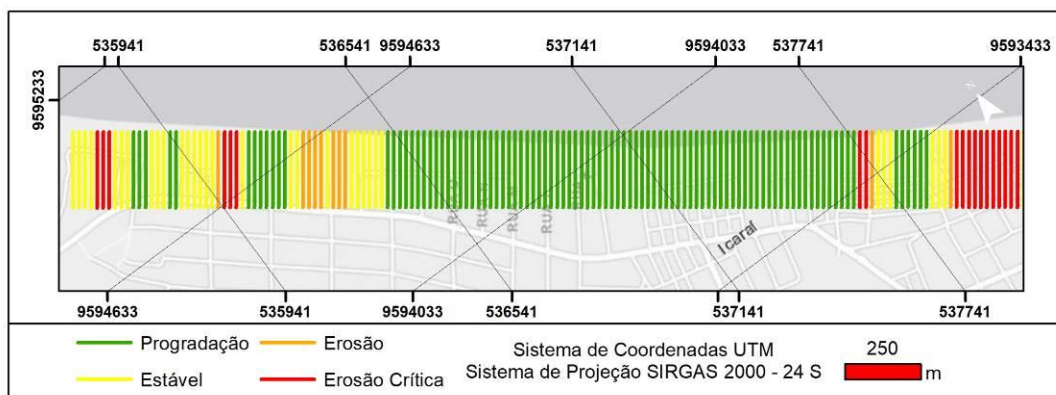


Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Ao se analisar todo o pacote de dados para determinar a taxa de variação da linha de costa, para a ferramenta Cassie, identificou-se a predominância de processos de progradação (Figura 16). A distribuição percentual se apresentou da seguinte forma: progradação (60,76%), estável (20,89%), erosão (6,33%) e erosão crítica (12,03%).

Ao se averiguar espacialmente os transectos situados a Oeste do *bagwall*, apresentam uma predominância de estágios morfodinâmicos de estabilidade. Na porção Central predominou progradação, e a Leste, erosão crítica.

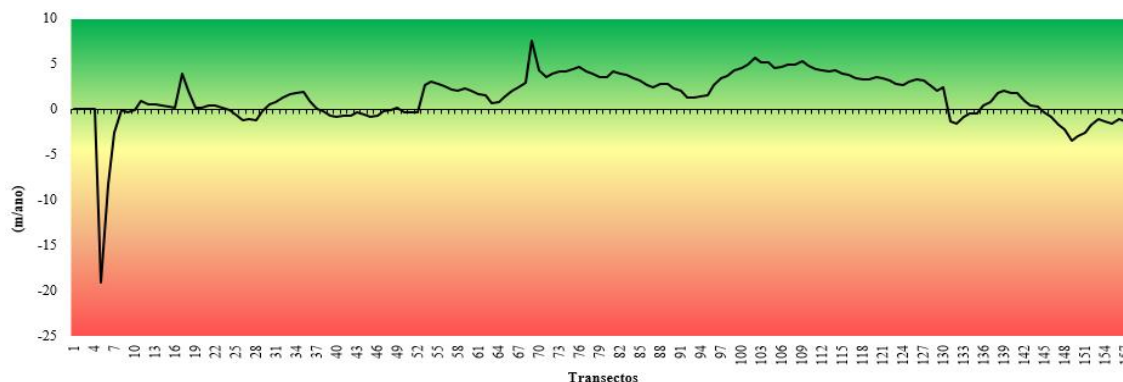
Figura 16 - Representação espacial da taxa de variação da linha de costa (2011 a 2018) – Cassie



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Os dados gerais da amostra apontaram para uma taxa média de variação de 1,40 m/ano (Figura 17). A discretização das taxas por classe apresentou as seguintes variações: progradação (0,50 e 7,52 m/ano), estabilidade (0 e -0,46 m/ano), erosão (-0,54 e -0,88 e m/ano) e erosão crítica (-1,01 e -19,15 e m/ano).

Figura 16 - Taxa de variação da linha de costa (2011 a 2018) – Cassie



Fontes: Elaboração - os autores, 2023.

Resumo Geral dos Resultados Encontrados

É importante observar que o intuito dos experimentos aqui apresentados foi a comparação dos resultados obtidos através de duas ferramentas espaciais distintas e observar sua aplicabilidade. Em virtude desse objetivo, dados de apoio/validação como seções topográficas transversais não foram aplicados, até porque esses dados foram utilizados nos estudos de autores como PAULA e FARRAPEIRA NETO (2017) e LIMA et al., (2019) e validam os cenários apresentados neste experimento.

Em termos de comparação, em decorrência dos entraves inerentes ferramenta à CASSIE, dentre os quais se destacam a não permissão de inclusão de imagens externas ao seu banco de dados e ausência de algoritmos de correção radiométricas, gera em alguns casos a necessidade de exclusão dos de alguns intervalos temporais, como também não permite ao usuário analisar a logística reversa de processamento das informações. Contudo, tem como ponto positivo o fato de ser uma ferramenta livre.

A respeito do DSAS a base de dados aplicada é de livre escolha conforme padrões determinados pelo usuário. Permite que este realize ajustes e correções nos dados de entrada. Contudo, apesar de ser uma ferramenta livre a interface gráfica funciona acoplada em um software proprietário (ArcGis), o que requer pagamento por licença de uso ou uma versão trial no caso de pesquisas vinculadas a instituições de ensino.

Logo, em termos práticos e de confiabilidade o DSAS é a ferramenta mais indicada, com a ressalva da elevada oneração de custos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As inferências das variações da linha de costa da Praia do Icaraí (CE) com base em abordagens espaciais multivariadas, apresentaram contextos distintos. A abordagem relativa ao DSAS aponta para predominância de processos de retração da linha de costa, e os cenários derivados do Cassie apontam para um cenário de predominância de processo progradacionais.

O acompanhamento das campanhas de campo e dados históricos apontam para predominância dos processos erosivos ao longo dos anos de 2011 e 2018. Isso, de certo modo, torna os dados provenientes das métricas da ferramenta Cassie, não totalmente ajustados à realidade, sobretudo na extremidade Oeste da área, onde são registrados os maiores recuos do pacote sedimentar.

Apesar de utilizarem a mesma base de dados, essas discrepâncias têm relação direta com o processo identificação e extração de extração da linha de costa a partir do índice NDWI, aplicados em ambas as ferramentas. Contudo, a ferramenta CASSIE não possibilita que o usuário calibre o índice executado, ou ainda estabeleça o processo inverso de cálculo para validar. Torna-se inviável assegurar que os dados dessa abordagem estejam em um intervalo de confiança aceitável.

Neste sentido, é possível determinar que ambas as abordagens têm potencialidade e limitações inerentes ao processamento das informações. O DSAS tem como potencialidade a possibilidade de integração de base de dados satelitais variados, além de estimar possíveis erros nas sintaxes de cálculo. Porém, o fato de executar suas álgebras em software proprietário é oneroso a pesquisa, além de todo o processo ser executado em etapas manuais.

A abordagem da ferramenta Cassie, tem como principais potencialidades o fato de ser gratuito e todas as etapas de cálculos e métricas serem automatizadas. Contudo, observa-se como principais limitações a impossibilidade de integração de base de dados externos, não fornecer algoritmos de correção radiométrica para os dados da série Landsat 7, impossibilidade de edição dos parâmetros de entrada após o processamento dos dados, falha no filtro de nuvens para a seleção das imagens e impossibilidade de calibração e validação do índice NDWI.

É possível concluir que, a abordagem da ferramenta Cassie tem relevante importância no contexto em análise. Porém, é necessário proceder melhorias técnicas, bem como, tornar o código fonte acessível ao usuário final, para que este se torne uma ferramenta de avanço colaborativa, visando prioritariamente processos de melhorias nas sintaxes de cálculo e calibração.

Desta forma, para a área de estudo considera-se os estados morfodinâmicos provenientes do DSAS, indicando predominância dos processos erosivos da linha de costa, representados por uma variação líquida de -8,10 m e uma taxa de variação de -2,32 m/ano.

Esta contextualização é confirmada ao se averiguar outras pesquisas realizadas para o mesmo período e mesmas abordagens na área de estudo, a exemplo de Moreira et al. (2020), que determinaram uma taxa média de variação de -3,41 m/ano. Cabe destacar que o autor incluiu o ano de 2004 nas análises, o que pode ter inflacionado relativamente à taxa. Lima et al. (2019) estimaram uma taxa média semelhante de -3,77 m/ano. Por fim, Lima (2021) aferiu uma taxa média de -2,7 m/ano.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado, ao Programa de Pós-graduação em Geografia da UECE (PROP GEO), aos Laboratórios de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO) e Laboratório de Gestão Integrada da Zona Costeira (LAGIZC).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.P.; de OLIVEIRA, I.E.; LYRA, R.; DAZZI, R.L.S.; MARTINS, V.G.; da FONTOURA KLEIN, A.H. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): Shoreline management module. **Environ. Model. Softw.**, v. 140, p. 105033, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105033>
- ARCGIS: Software.** Disponível em <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>. Acessado em 10 de agosto de 2023.
- BIRD, E. **Coastal geomorphology: an introduction**. Second Edition. Chichester, UK: John Wiley e Sons, Ltd. Geostudies, 2008.
- BOAK, E. H; TUNNER, L. L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coast Research**, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- CASSIE: Software.** Disponível em <https://cassieengine.org/>. Acessado em 25 de agosto de 2023.
- CROWELL, M.; LETHERMAN, S.P.; BUCKLEY, M.K. Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. **Journal of Coastal Research**, v. 7, n. 3, p. 839-852, 1991.
- DAVIS Jr., A. R.; FITZGERALD, D. M. **Beaches and Coasts**. Blackwell Publishing, 2004. p.115-166.
- DONNELLY, C.; KRAUS, N.; LARSON, M. State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n. 4, 965-991, 2006. <https://doi.org/10.2112/04-0431.1>
- ESTEVEZ, L. S; FINKL. C. W. "The Problem of Critically Eroded Areas (CEA): An Evaluation of Florida Beaches." **Journal of Coastal Research**, 1998, 11–18.
- GARCIA-RUBIO, G., HUNTLEY, D., and RUSSELL, P. Assessing shoreline change using satellite-derived shorelines in Progreso, Yucatán, México. **Coastal engineering proceedings (santander)**, v. 1, n. 33, sediment.79., 2012. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.79>
- GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. A Method for Coastline Evolution Analysis Using GIS and Remote Sensing—A Case Study from the Guamaré City, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, SPECIAL ISSUE, n. 42, p. 412-421, 2005.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2023. Disponível em:
<http://www.inpe.br>. Acesso em 31 de julho de 2023.

LIMA, J.C, LIMA, R.J, BARROS, E.L., PAULA, D.P. Análise Multitemporal da Variabilidade da Linha de Costa do litoral do Município de Caucaia, Ceará, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, 2019, v. 21, n. 2, p. 864-884. <https://doi.org/10.35701/rcgs.v21n2.542>

LIMA, R.J.R. **Percepção da erosão costeira e disposição a pagar pela gestão das praias do Icarai, Tabuba e Cumbuco (Caucaia-CE)**. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2021.

MATIAS, A. **Overwash sedimentary dynamics in the Ria Formosa Barrier Islands**. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências do Mar e do Meio Ambiente), Universidade do Algarve, Faro, 2006.

MCALLISTER, E.; PAYO, A.; NOVELLINO, A.; DOLPHIN, T.; MEDINA-LOPEZ, E. Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. **Coast. Eng.** 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MOREIRA, T. F.; ALBUQUERQUE, M. G.; ESPINOZA, J. M. A.; PAULA, DAVIS PEREIRA; ALVES, D. C. L.; Barros, E. L.; BENDO, A. R. R.; CONCEICAO, T. F. Estudo do comportamento da linha de costa na praia do Icarai (Caucaia, Ceará), a partir dos métodos digital shoreline analysis system e do polígono de mudança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, p. 3395-3411, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3395-3411>

OERTEL, G.F. **Coasts, coastlines, shores, and shorelines**. In: SCHWARTZ, M.L. *Encyclopedia of Coastal Science*. Dordrecht: Springer, 2005 p. 323-327.

PAULA, D.P. de; FARRAPEIRA NETO, C. de A. Resposta de uma praia arenosa a um evento de ressaca do mar: o caso da Praia do Icarai (Caucaia, Ceará, Brasil). **Ateliê geográfico (UFG)**, v. 11, p. 184-204, 2017. <https://doi.org/10.5216/ag.v11i2.39302>

SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M., PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., CABEZAS-RABADÁN, C., and GÓMEZ-PUJOL, L. (2020). An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery. **Coast. Eng.**, v. 160, p. 103732, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103732>

TEIXEIRA, C. P. B.; SOUTO, M. V. S.; PINHEIRO, L. R. S. G.; MATOS, M. F. A.; GOMES, D. D. M. Análise da evolução costeira no município de Beberibe, estado do Ceará, entre os anos de 1979 a 2019. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 40, 2021, p. 1005-1031. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15874>

THIELER, E.R.; HIMMELSTOSS, E.A.; ZICHICHI, J.L; ERGUL, A. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0**: An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009. p.2008-1278. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>

XU, N. Detecting coastline change with all available landsat data over 1986-2015: A case study for the state of Texas, USA. **Atmos.** 2018. <https://doi.org/10.3390/atmos9030107>

ZAKARIA, R., ROSNAN, Y., SAIDIN, S. A., YAHAYA, M. H., and KASAWANI, I. **Shoreline detection and changes for Terengganu river mouth from satellite imagery (Landsat 5 and Landsat 7)**, in Universiti Malaysia terengganu (UMT), 2006.

Recebido em: 26/09/2023

Aceito para publicação em: 31/07/2024