



Imagens Sentinel-2 Aplicadas na Caracterização Geomorfológica de Ambientes Costeiros: Estudo de Caso na Planície Costeira de Icapuí, Nordeste do Brasil
Using Sentinel-2 Images to Geomorphological Characterization of Coastal Environments: a Study Case in the Coastal Plain of Icapuí, Northeast Brazil

Cláudio Ângelo da Silva Neto^{1,3}; Allison de Oliveira Maia³;
Mateus de Paula Miranda^{1,3} Cynthia Romariz Duarte² & Michael Vandesteen Silva Souto⁴

¹Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Campus do Pici, Bloco 912, 60020-181, Fortaleza, CE, Brasil

²Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Campus do Pici, Bloco 912, 60020-181, Fortaleza, CE, Brasil

³Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Laboratório de Geoprocessamento do Ceará, Bloco 913, 60020-181, Fortaleza, CE, Brasil

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Campus Universitário, 59078-970, Natal, RN, Brasil

E-mails: claudioasn@gmail.com; allisonmaia@yahoo.com.br; mateuspmiranda@gmail.com; cynthia.duarte@ufc.br; michael.souto@geologia.ufrn.br

Recebido em: 20/05/2019 Aprovado em: 30/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_118_138

Resumo

As regiões costeiras, de uma forma geral, são ambientes dinâmicos formados a partir da atuação conjunta de processos eólicos, terrestres, oceânicos e atmosféricos. O sensoriamento remoto, somado com o processamento digital de imagens e os sistemas de informações geográficas, tem sido sistematicamente utilizado em estudos relacionados ao ambiente costeiro. Porém, o uso dessas geotecnologias encontra dificuldades em individualizar compartimentos geomorfológicos do litoral devido à homogeneidade composicional entre as feições presentes. Neste contexto, a planície costeira do município de Icapuí, localizado no estado do Ceará na porção setentrional da região Nordeste brasileira, foi analisada utilizando imagens orbitais do sensor MSI / Sentinel-2. Composições HRGB e MNDWI foram submetidas a uma combinação de técnicas como realce por decorrelação e filtragens, que juntas permitiram gerar composições denominadas HRGBI e que diferenciaram as feições geomorfológicas presentes na área. A partir destes resultados, foi possível gerar um mapa temático que exibiu os diversos compartimentos geomorfológicos interpretados na área em estudo. Foi possível demonstrar a capacidade do sensor MSI e das técnicas apresentadas em caracterizar feições de ambientes costeiros recentes, permitindo levantar hipóteses acerca dos processos envolvidos na sua formação e da sua evolução sedimentar ao longo do tempo geológico mais recente.

Palavras-chave: Processamento digital de imagens; Composições híbridas; Transformação IHS

Abstract

Coastal regions are dynamic environments formed from the joint action of wind, terrestrial, oceanic & atmospheric processes. Remote sensing, coupled with digital image processing & geographic information systems, has been used in studies related to the coastal environments. The use of these geotechnologies finds it difficult to individualize geomorphological compartments of the coast due to the compositional homogeneity between the present features. In this context, the coastal plain of the municipality of Icapuí, located in the Ceará state, in the northern portion of the Brazilian Northeast region, was analyzed using orbital images of the MSI / Sentinel-2 sensor. HRGB & MNDWI compositions were subjected to a combination of techniques such as enhancement by decorrelation & filters, which allowed the generation of hybrid compositions named HRGBI that helped the differentiation of the geomorphological features present in the area. From these data, it was possible to generate a thematic map showing the several geomorphological compartments of the study area. It was possible to demonstrate the MSI sensor ability and the presented techniques to characterize features of recent coastal environments, allowing raising hypotheses about the processes involved in its formation and of its sedimentary evolution over the most recent geological time.

Keywords: Digital image processing; Hybrid compositions; IHS transformation



1 Introdução

As zonas costeiras apresentam grande importância para a sociedade pois, embora compreendam menos de 0,1% de massas continentais combinadas, concentram mais da metade da população mundial, muito devido aos inúmeros benefícios à população como acesso facilitado à navegação, pesca, turismo e atividades de lazer. Tratam-se de áreas dinâmicas, com uma grande diversidade de feições e processos, como falésias, praias, dunas, estuários lagunas e deltas (Davis Jr & FitzGerald, 2004; Bird, 2011).

As atividades econômicas desenvolvidas nestas regiões encontram na questão ambiental um fator limitante, sendo necessário estabelecer condições para um desenvolvimento sustentável da região litorânea. A preservação destes ambientes se justifica pelas inúmeras funções que ele exerce para os seres humanos, como a proteção natural da zona adjacente à linha de costa contra os processos erosivos e eventos extremos.

Consequentemente, existe a necessidade de se desenvolver métodos de monitoramento que sejam precisos, com uma boa relação de custo-benefício, com revisitação frequente, que possibilitem uma visão sinóptica do ambiente estudado. Neste contexto, sensoriamento remoto surge como uma ferramenta que satisfaz os critérios anteriormente mencionados, permitindo a aquisição de dados em larga escala com uma frequência temporal regular (Mishra, 2014).

O desenvolvimento das tecnologias de sensoriamento remoto gera diariamente uma grande quantidade de dados da superfície terrestre, fornecendo imagens com nível de detalhamento cada vez maior (Shao *et al.*, 2018). Em contrapartida, esse volume de dados obriga os pesquisadores a serem cada vez mais seletivos devido à diversidade de tipos de ambientes e suas respectivas feições e processos a serem estudados. O ecossistema de manguezal (Kuenzer *et al.*, 2011; Heumann, 2011), os ambientes marinhos rasos (Lyons *et al.*, 2011; Murray *et al.*, 2012), as atividades de gerenciamento da zona costeira (Green *et al.*, 1996) e o seu processo de uso e ocupação (Shalaby & Tateishi, 2007) são exemplos de ambientes e processos nos quais a utilização destas tecnologias pode contribuir para um

melhor entendimento da zona costeira, evidenciando também o seu caráter multidisciplinar.

Neste contexto, pesquisadores procuram entender processos costeiros associados com a dinâmica de ambientes como planícies costeiras, praias, restingas, bancos de areia, terraços marinhos e estuários, bem como sua relação com os principais agentes responsáveis pela criação de tipos específicos de formas de terreno em zonas costeiras (Jensen, 2009).

No Brasil, o sensoriamento remoto, em conjunto com as técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tem sido sistematicamente utilizado em estudos relacionados ao ambiente costeiro, em especial na porção setentrional do litoral nordestino, vide os trabalhos de Souto *et al.* (2006), Souto (2009), Santos *et al.* (2011), Santos & Amaro (2014), Castro *et al.* (2016) e Maia (2017). O uso dessas geotecnologias, associado à variedade de imagens de sensores orbitais disponíveis, tem sido essencial aos estudos de ambientes costeiros devido à sua capacidade de registrar as suas mudanças ao longo do tempo geológico mais recente, promovendo uma maior compreensão dos processos que envolvem a sua dinâmica. Assim, as técnicas de PDI, juntamente com dados multifontes e ferramentas de SIG, têm subsidiado o desenvolvimento das ciências costeiras, tanto pela integração de imagens de sensores passivos e ativos, como também pela aplicação de operações matemáticas visando a filtragem e realce de produtos de sensoriamento remoto (Costa *et al.*, 2017).

Neste estudo, o uso de composições RGB não foi suficiente para individualizar cada um dos compartimentos geomorfológicos da área de estudo devido à homogeneidade composicional entre as feições presentes no litoral, que são depósitos compostos por sedimentos ricos em quartzo. Essa dificuldade foi um fator motivador na busca de novas técnicas que pudessem destacar diferenças sutis entre os alvos da área e que fosse possível de ser replicada para outros ambientes similares.

A utilização de composições híbridas em imagens do sensor OLI/Landsat 8 auxiliou a identificação de feições geológicas e geomorfológicas costeiras do município de Macau, estado do Rio Grande

do Norte, localizado 100 km a leste da área de estudo (Rios *et al.*, 2016). Assim, com base em seus resultados, proximidade geográfica e semelhança geomorfológica entre as áreas, este artigo propõe o uso de composições HRGB similares para a caracterização da planície costeira de Icapuí, porém substituindo as imagens Landsat 8 / OLI por imagens MSI / Sentinel-2 – que possuem maior resolução espacial na faixa espectral do VNIR – e implementando técnicas de filtragem de realce e índices como MNDWI, favorecendo a compartimentação geomorfológica das feições costeiras continentais e marinhas observadas na área de estudo. Espera-se que a associação destas técnicas, que serão melhor descritas a seguir, possa contribuir para uma melhor compreensão desta área e de outros ambientes quaternários similares.

2 Área de Estudo

A área de estudo é planície costeira de Icapuí, localizada no extremo-leste do estado do Ceará, nordeste do Brasil. Dotada de paisagens naturais como praias arenosas e falésias, possui uma forma

convexa, com aproximadamente 30 quilômetros de extensão de litoral, sendo limitada a norte pelo Oceano Atlântico e a sul por falésias inativas, cuja inflexão a sudeste marca a fronteira com o município de Tibau, localizado no estado do Rio Grande do Norte (Figura 1).

Esta planície costeira sofre influência do transporte eólico e da dinâmica costeira, que são responsáveis por variações na taxa de erosão e deposição sedimentar, promovendo mudanças no fluxo de canais de marés e variações de balanço sedimentar da linha de costa pela interação entre aporte sedimentar e espaço de acomodação, dando origem a processos de progradação e retrogradação da linha de costa (Santos *et al.*, 2011; Amaro *et al.*, 2012; Damasceno *et al.*, 2014).

A área é composta por um complexo conjunto de unidades geomorfológicas, destacando-se barras arenosas, gerações de dunas, lagoas, falésias ativas e inativas, além uma extensa faixa de praia arenosa distribuída ao longo de toda a costa, com dimensões que variam entre dezenas de metros, sendo possí-

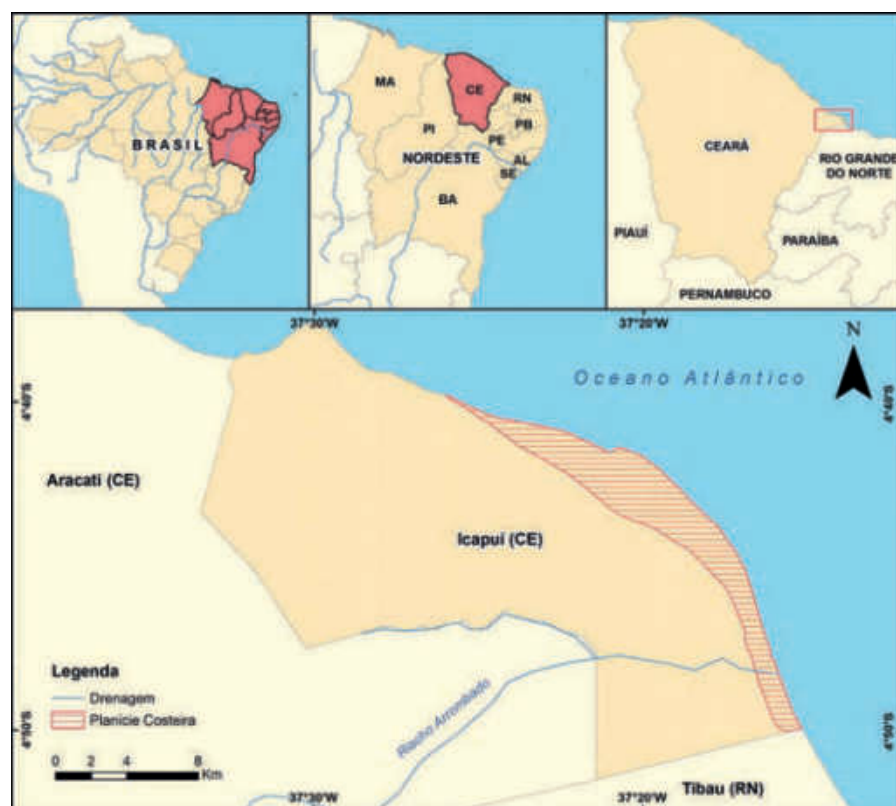


Figura 1 Área do município de Icapuí (CE), com destaque para a porção hachurada, que corresponde à sua planície costeira. Fonte: elaborado pelos autores.

vel encontrar ao longo dos seus limites as rochas sedimentares das Formações Barreiras e Tibau, que gradam lateralmente entre si e compõem as falésias. Além disso, uma grande zona estuarina associada a uma grande planície de maré e vários canais de maré é destacada na porção central da área (Figura 2), sendo ocupada atualmente por tanques de carcinicultura, salinas e vegetação de mangue (Meireles & Santos, 2012).

Toda esta variedade geomorfológica torna esta região atrativa sob diversos pontos de vista científicos, como pesquisas sobre a sua gênese e a relação entre a atividade antrópica e o uso e ocupação do solo das unidades geoambientais da área. Por isso, é importante a utilização de mecanismos que possibilitem a caracterização e monitoramento destas feições, contexto no qual o sensoriamento remoto e o processamento digital de imagens podem agir com destaque.



Figura 2 Variação do relevo entre as falésias inativas e a planície costeira do município de Icapuí (CE). Ao fundo, pode ser observada parte da zona estuarina, atualmente ocupada por tanques de carcinicultura e salinas. Fonte: adquirido pelos autores.

3 Materiais e Métodos

3.1 Satélite Sentinel-2/MSI

O Sentinel-2 é uma missão da Agência Espacial Europeia (ESA) que tem adquirido imagens orbitais multiespectrais da superfície terrestre em escala global, de forma sistemática e com acesso gratuito. Trata-se da combinação de dois satélites gêmeos posicionados na mesma órbita heliosíncrona com a diferença de 180° entre eles. O Sentinel-2A foi lançado em 23 de Junho de 2015, e o Sentinel-2B em 7 de Março de 2017. Ambos os satélites têm as

mesmas características técnicas, carregando a bordo o sensor ótico MSI, que oferece o imageamento de 13 bandas espectrais (Tabela 01), sendo quatro na região do VNIR com resolução espacial de 10 metros, seis na região do Red Edge e do SWIR (20 metros) e duas bandas para correção atmosférica (60 metros), além de uma banda costeira (60 metros). As imagens geradas possuem resolução radiométrica de 12 bits e uma frequência de revisitação de 10 dias na região equatorial para cada satélite, e de até cinco dias quando combinados. Esse conjunto de características possibilita que as imagens Sentinel-2 sejam empregadas para estudos relacionados à linha de costa, desde a avaliação de sua variação ao longo do tempo até à caracterização de feições geológicas e geomorfológicas (European Space Agency, 2015).

Resolução Espacial (m)	Bandas	Satélite S2A	
		Comprimento de Onda Central (nm)	Largura de Banda (nm)
10	2 ()	496.6	98
	3 ()	560.0	45
	4 ()	664.5	38
	8 ()	835.1	145
20	5 ()	703.9	19
	6 ()	740.2	18
	7 ()	782.5	28
	8A (NIR)	864.8	33
	11 ()	1613.7	143
60	12 ()	2202.4	242
	1 ()	443.9	27
	9 ()	945.0	26
	10 ()	1373.5	75

Tabela 1 Dados técnicos das imagens da missão Sentinel-2. Adaptado de Drusch *et al.* (2012).

3.2 Transformações RGB-IHS e composições HRGB

Uma composição RGB também pode ser expressa em termos de três variáveis: *Intensity* (Intensidade), *Hue* (Matiz) e *Saturation* (Saturação), que quantificam seu brilho, gama espectral e pureza, respectivamente. Imagens matiz-derivadas obtidas a

partir de uma transformação RGB-IHS de três triplete RGB distintos podem ser alocadas novamente em uma nova composição RGB, dando origem a um produto aqui denominando de composição HRGB (Figura 3). Esse tipo de produto, quando exibido como uma composição RGB, forma uma imagem fortemente colorida cujas cores são determinadas pela resposta espectral de todas as bandas utilizadas em cada triplete original, sendo possível codificar as informações espectrais de até nove bandas em uma imagem colorida. Além disso, essas imagens não possuem sombras devido aos valores de *pixels* em uma imagem *Hue* serem independentes da iluminação, estando relacionados apenas às formas das assinaturas espectrais das três bandas (Liu & Moore, 1990).

A ideia de gerar imagens com a maior quantidade de informação espectral possível parece promissora, e em alguns casos este objetivo é conseguido facilmente devido à falta de correlação espectral entre os alvos, possibilitando a geração de imagens com uma ampla gama de cores. Assim, composições híbridas HRGB podem, em um primeiro momento, contribuir para uma melhor caracterização de alvos espectrais quando estamos trabalhando com imagens multiespectrais como os dados fornecidos pelo sensor MSI. No entanto, composições coloridas obtidas a partir de cenas espectralmente homogêneas tendem a ser monocromáticas, o que vem a ser um problema, já que estas informações podem ser críticas para a sua interpretação (Liu & Moore, 1990). Este é o caso de regiões costeiras, onde feições geomorfológicas como dunas, praias e bancos de areia podem apresentar respostas espectrais semelhantes devido à similaridade composicional entre elas, em geral essencialmente quartzosas.

Para solucionar este problema, pode ser aplicada uma técnica que é intimamente relacionada à Análise de Componentes Principais (ACP), que é o realce por decorrelação de bandas, baseado na remoção da correlação entre as bandas espectrais, consequentemente aumentando a variedade de cores, porém preservando a relação espectral original entre os alvos, e proporcionando uma melhor capacidade de distinção das feições superficiais (Harris *et al.*, 1994; Mather & Koch, 2011). Esta técnica pode ser útil para promover a melhoria de bandas empregadas em composições HRGB e assim minimizar os problemas de perda das características espectrais originais dos alvos observados nas imagens ACP, restaurando as relações das cores originais para fins de interpretação (Watrin *et al.*, 1996).

3.3 NDWI e MNDWI

Uma das técnicas de PDI mais recorrentes nos estudos costeiros, o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) utiliza comprimentos de onda do verde e do NIR, com base na alta absorção no intervalo espectral do NIR (McFeeters, 1996). O método tem sido amplamente utilizado na cartografia de ambientes aquáticos, sendo usado em produtos de diferentes resoluções espaciais e em escalas regionais e locais (Hui *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2012). Apesar de ser uma técnica amplamente difundida, o NDWI é sensível a áreas emersas (Du *et al.*, 2016), podendo gerar erros de interpretação nas aplicações em estudos de ambientes costeiros. Visando aprimorar o método, foi desenvolvido o Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água (MNDWI) (Xu, 2006), que pode ser representada pela Equação 1:

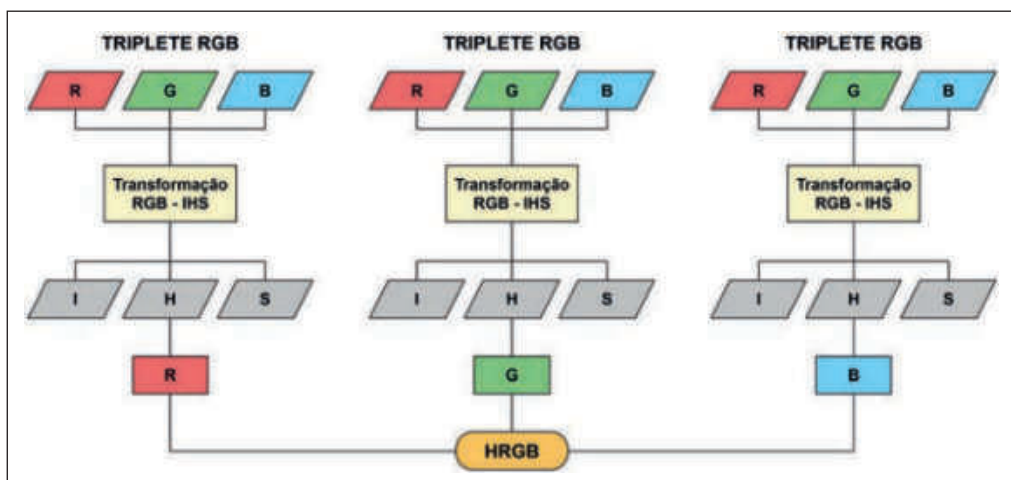


Figura 3 Diagrama de geração de uma composição HRGB. Adaptado de Liu & Moore (1990).

$$MNDWI = \frac{\text{Verde (B3)} - \text{SWIR 1 (B11)}}{\text{Verde (B3)} + \text{SWIR 1 (B11)}} \quad (1)$$

Assim, a banda 3 corresponde ao comprimento de onda do verde e a banda 11 corresponde ao infravermelho de ondas curtas (SWIR 1) que substitui a banda NIR usada no método NDWI, atribuindo à componente terrestre valores negativos e à componente marinha valores positivos, além de permitir a eliminação de grande parte das nuvens das imagens utilizadas. Vários trabalhos demonstraram que o MNDWI é mais adequado para processar informações sobre ambientes aquáticos e pode extrair informações com maior precisão do que o NDWI (Xu, 2006; Li *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2015).

3.4 Realces e Filtragens

As técnicas de filtragem são transformações da imagem a nível de *pixel* que não dependem apenas do seu respectivo nível de cinza, mas também do valor dos *pixels* vizinhos. O processo de filtragem é feito utilizando matrizes de *pixels* denominadas máscaras, que são aplicadas sobre uma imagem e podem ser lineares e não-lineares. A filtragem do tipo laplaciano é um exemplo de filtragem do tipo não-linear e é baseada em uma medida isotrópica 2-D da segunda derivada espacial de uma imagem,

realçando suas mudanças de intensidade e, portanto, é frequentemente usada para detecção de bordas. O filtro laplaciano é frequentemente aplicado a uma imagem que foi primeiramente suavizada para reduzir sua sensibilidade ao ruído. Como exemplo de filtragem do tipo linear, os filtros de realce de bordas podem fazer operações segundo direções preferenciais de interesse, definidas por máscaras específicas. Assim, a máscara norte, por exemplo, realça limites horizontais (Gonzalez & Woods, 2010; Sonka *et al.*, 2014).

3.5 Metodologia

O processo metodológico empregado foi dividido em quatro etapas principais: aquisição de dados; pré-processamento; processamento digital de imagens; e interpretação, conforme ilustrado pelo fluxograma da Figura 4. A metodologia parte da aquisição inicial de imagens do sensor MSI/Sentinel-2. Em seguida, foram geradas composições RGB, que foram convertidas para o sistema IHS e, posteriormente, alocadas em uma nova composição colorida denominada de HRGBI, onde o 'H' corresponde à banda *Hue* de cada triplete IHS e o 'I' representa o canal *Intensity* da composição híbrida, onde foram aplicadas técnicas de filtragem e realce para destacar os alvos de interesse. Posteriormente, foi realizada a correlação com as feições observadas em etapa de campo prévia, destacando-as nos produtos de PDI.

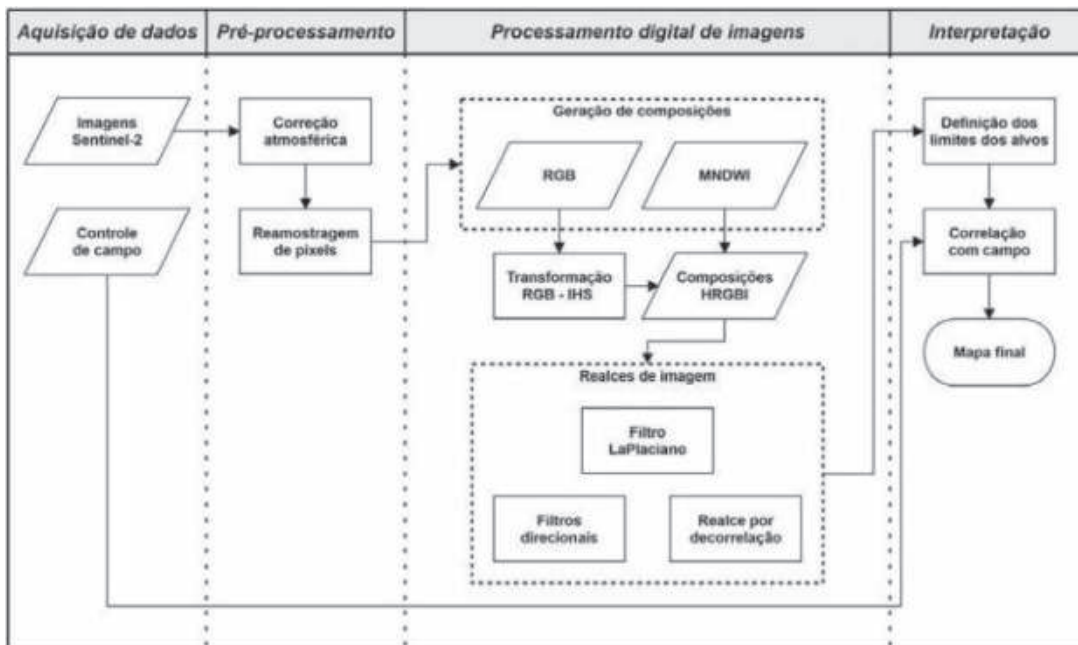


Figura 4 Fluxograma de trabalho da pesquisa.

3.5.1 Aquisição de Dados

Imagens Sentinel-2 foram adquiridas através do U.S. Geological Survey (USGS). A taxa de cobertura de nuvens sobre a área de estudo foi um pré-requisito para a seleção da imagem orbital. Nesta região, a estação chuvosa tende a ocorrer entre os meses de Fevereiro e Maio. A partir destas premissas, foram obtidas imagens orbitais adquiridas pelo sensor MSI / Sentinel-2 na data 28/10/2016, às 9h58min, correspondentes à quadrícula 24MXV.

3.5.2 Pré-Processamento

Nesta etapa foi feito um recorte das imagens para delimitação da área de estudo. Como o produto gerado pelo sensor MSI é disponibilizado com correção radiométrica de topo de atmosfera (TOA), foi realizada a correção atmosférica utilizando o método *Dark Object Subtraction*, recalculando os valores de reflectância em função do *pixel* de menor valor. Por fim, foi realizada a reamostragem dos *pixels* das imagens correspondentes ao intervalo espectral do SWIR – bandas 11 e 12 – para 10m, permitindo sua utilização nas composições RGB e em operações de matemática de bandas.

3.5.3 Processamento Digital de Imagens

Inicialmente, três composições coloridas RGB foram geradas, onde a primeira representa a combinação de bandas correspondentes ao intervalo espectral do visível ‘R-4 G-3 B-2’, e que teve como objetivo inicial exibir as feições estudadas da forma mais próxima da realidade. O segundo produto gerado foi uma composição ‘R-12 G-11 B-8’, na qual as bandas envolvidas correspondem a comprimentos de onda do intervalo espectral do infravermelho, tanto do NIR como do SWIR. O terceiro produto gerado, de composição ‘R-2 G-8 B-12’, envolve a combinação de bandas correspondentes aos intervalos espectrais do VIS, NIR e SWIR, respectivamente. As três composições geradas foram convertidas do sistema RGB para o IHS. Assim, a partir de cada triplete RGB foram geradas três novas bandas do sistema IHS, totalizando nove bandas, conforme a Tabela 2. Posteriormente, uma nova composição RGB

foi gerada, desta vez alocando as bandas de Matiz (*Hue*) de cada triplete IHS nos canais. Assim, para fins de simplificação, esta nova composição ‘R-H1 G-H2 B-H3’ passou a ser denominada como HRGB. Esta combinação de bandas foi incrementada com um novo canal nomeado como *Intensity*.

Composição RGB	Hue	Saturation	Intensity
2-8-12	H1	S1	I1
12-11-8	H2	S2	I2
4-3-2	H3	S3	I3

Tabela 2 Composições RGB e seus respectivos produtos após conversão para o sistema IHS.

Utilizando imagens OLI/Landsat 8, Rios *et al.* (2016) propõe a utilização de uma banda pancromática em conjunto com a aplicação de filtros de realce neste canal, obtendo um ganho na resolução espacial e melhor definição dos alvos de interesse. Como as imagens MSI/Sentinel-2 não possuem uma banda pancromática, a banda I3 da imagem de composição ‘R-4 G-3 B-2’ foi utilizada como alternativa no canal *Intensity*, devido à maior resolução espacial de suas bandas originais. Desta forma, foi criada a composição HRGBI ‘R-H1 G-H2 B-H3 I-I3’.

No canal *Intensity* foram aplicadas técnicas de filtragem linear – do tipo direcional – para realce de alvos de interesse como as barras arenosas e os canais de maré, e de filtragem não-linear – do tipo Laplaciano – para destaque das bordas das feições da área de estudo, auxiliando na sua delimitação. Também foi alocada uma imagem que foi gerada a partir do MNDWI. À esta nova composição HRGBI também foi aplicado filtro direcional com iluminação em um azimute de 90°, possibilitando uma melhor caracterização das feições submersas presentes na planície de maré da área em estudo.

3.5.4 Interpretação

Os produtos obtidos a partir da etapa de PDI foram integrados em um ambiente de SIG, onde foi possível delimitar os alvos de interesse, além de gerar os produtos cartográficos da área de estudo. Para facilitar a interpretação dos alvos de interesse gerou-se uma máscara vetorial sobre a região continen-

tal anterior às falésias, a fim de destacar apenas as feições da planície costeira. Posteriormente, os produtos de PDI foram correlacionados com imagens capturadas em etapa de campo prévia, a fim de confirmar a compatibilidade entre as feições observadas e as imagens processadas.

4 Resultados e Discussões

A composição 'R-4 G-3 B-2' (Figura 5a) foi útil para identificar feições superficiais continentais e marinhas. Nesta imagem, solos expostos foram evidenciados em tonalidades mais claras, pois são constituídos principalmente por areias quartzosas, que por sua vez apresentam alta reflectância ao longo do espectro eletromagnético. O segundo produto gerado, a composição 'R-12 G-11 B-8' (Figura 5b), realçou os depósitos praias em tons claros devido à baixa absorção destas feições no espectro do infravermelho. Como nesta composição só foram utilizadas bandas neste intervalo espectral, ela foi útil para delimitar a extensão de corpos d'água, tanto com relação à linha de costa como também para os tanques de carcinicultura e evaporadores de salinas, devido à alta absorção de radiação nestes comprimentos de onda. Áreas com vegetação correspondente aos manguezais e depósitos de algas de supramaré foram destacados em tons azuis devido à alta reflectância destes alvos no espectro do infravermelho próximo (NIR), cuja banda foi alocada no canal do azul na composição RGB. Destacam-se ainda nesta imagem,

os sedimentos em suspensão transportados pela deriva litorânea e bancos areno-lamosos submersos ao longo da costa e destacados pelo contraste entre a alta reflectância dos sedimentos e a alta absorção dos corpos d'água.

Assim como na composição anterior, a terceira imagem gerada, pela composição 'R-2 G-8 B-12' (Figura 5c), também realçou as porções de vegetação do estuário e áreas lamosas, com a presença de bancos de algas na porção mais distal da planície de maré, porém, em tons verdes mais vibrantes devido à alocação da banda 8 (NIR) no canal do verde. Os depósitos eólicos novamente foram evidenciados em cores claras em virtude da baixa absorção em todos os canais, principalmente na porção leste da imagem, onde a faixa de praia se apresenta com maior espessura. Posteriormente, cada triplete RGB foi convertido para o sistema IHS, onde os produtos obtidos adotaram a nomenclatura exibida previamente na Tabela 2.

Na etapa seguinte, a banda H1 (derivada da Figura 5c) foi alocada no canal do vermelho, realçando as barras arenosas, os campos de dunas e as feições de solo exposto; H2 (derivada da Figura 5b) foi inserida no canal do verde, ressaltando as áreas lamosas em tonalidades verdes; e H3 (derivada da Figura 5a) foi alocada no canal do azul, distribuindo a composição do espectro eletromagnético visível com uma escala azul variando de claro a escuro.

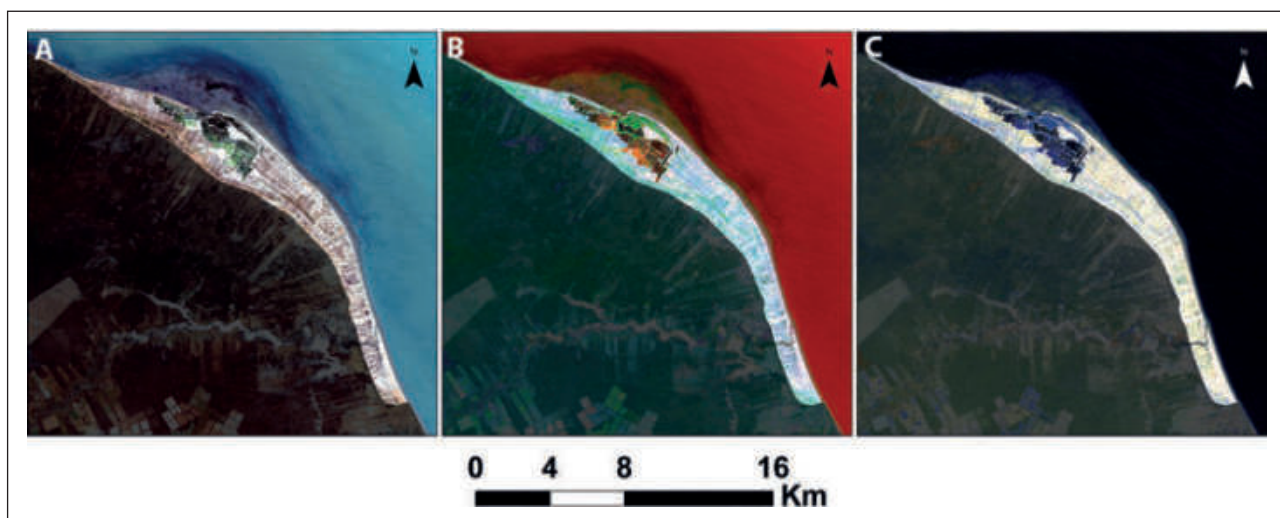


Figura 5 Composições R-4 G-3 B-2 (a); RGB R-12 G-11 B-8 (b); e R-2 G-8 B-12 (c).

Imagens Sentinel-2 Aplicadas na Caracterização Geomorfológica de Ambientes Costeiros: Estudo de Caso na Planície Costeira de Icapuí, Nordeste do Brasil

Cláudio Ângelo da Silva Neto; Allison de Oliveira Maia; Mateus de Paula Miranda; Cynthia Romariz Duarte & Michael Vandesteem Silva Souto

Como alternativa à ausência de banda pancromática nas imagens MSI/Sentinel-2, foi alocado o produto I3 no canal *Intensity*. Este recurso possibilitou um ganho na resolução espacial dos produtos gerados, visto que as bandas que estão situadas no espectro do visível do sensor MSI apresentam resolução espacial de 10m, obtendo melhor definição do que uma banda pancromática do sensor OLI/Landsat 8 e sem perda de resolução espectral. O fato da imagem alocada no canal *Intensity* ser brilho-derivada permitiu um incremento na intensidade das cores exibidas na composição híbrida, tornando-as mais vibrantes, permitindo assim uma melhor distinção entre os alvos de interesse.

A partir da combinação destes quatro produtos, foi criada a composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3', que posteriormente foi submetida a realce por decorrelação de bandas (Figura 6), proporcionando uma imagem com uma resposta espectral ainda melhor, visto que a técnica acentua a diferenciação entre as respostas espectrais dos alvos, permitindo uma melhor identificação da variação entre as diferentes feições superficiais. Esta composição destacou todas as feições existentes de modo equivalente, apresentando os melhores resultados para uma diferenciação das feições superficiais como um todo, pois nela puderam ser identificados os sedimentos praias (em vermelho), as áreas que apresentam as barras arenosas (em rosa), a região estuarina (zona de manguezal e salinas) em verde claro a escuro.

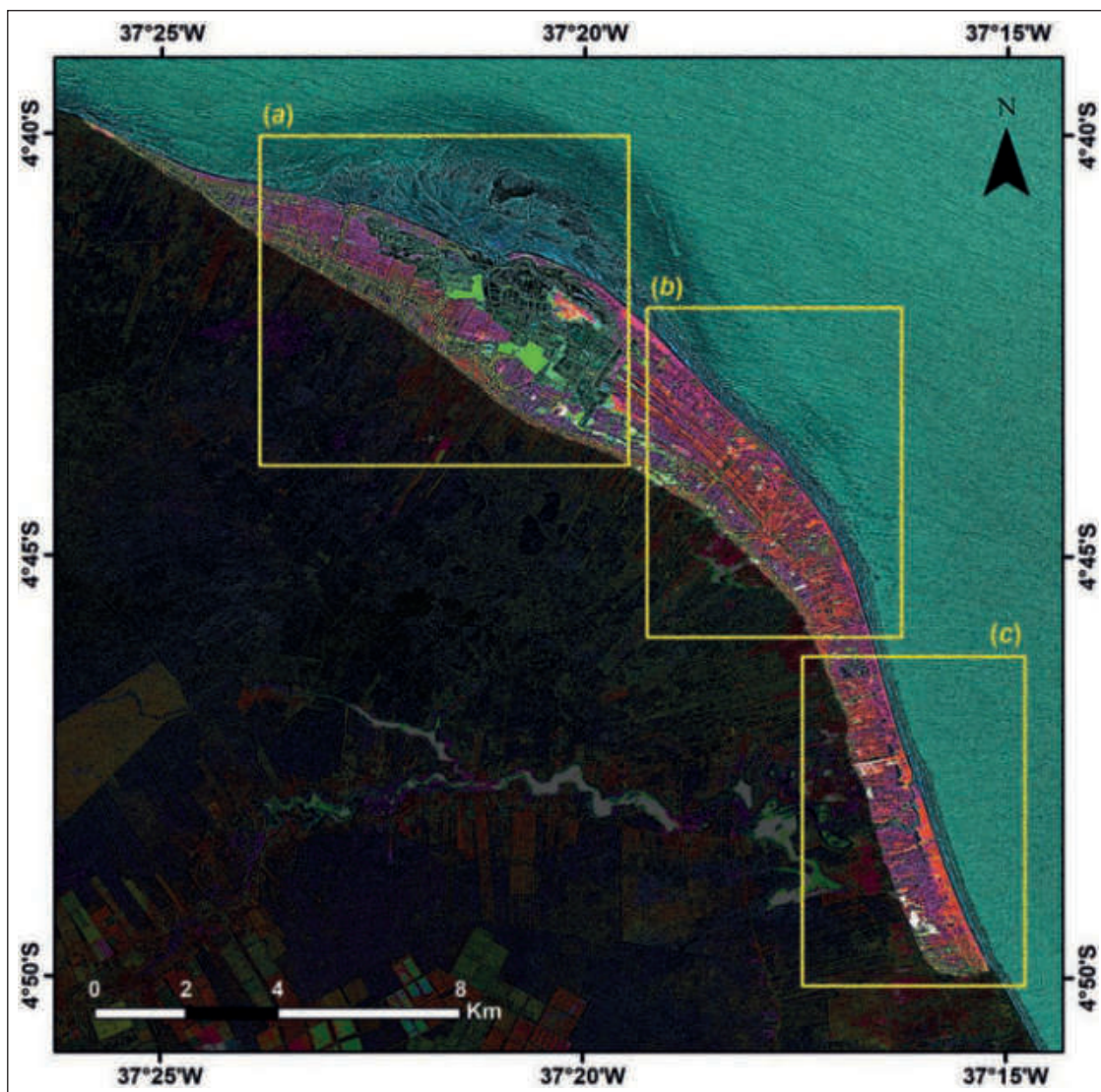


Figura 6
Composição R-H1 G-H2 B-H3 I-I3, gerada a partir da combinação de bandas do sistema IHS com posterior aplicação do realce por decorrelação.

Visando potencializar a resposta espectral das feições descritas anteriormente, foi realizada a substituição da imagem I3 alocada no canal do *Intensity* (I) pela imagem I2 juntamente com a aplicação da técnica de realce por decorrelação (Figura 7), uma vez que I2 tem uma melhor resposta espectral para a parte emersa, pois é derivada de uma composição constituída por bandas do espectro do infravermelho, acarretando em uma perda de resposta espectral nas feições submersas.

A partir da composição de técnicas exibidas nos produtos acima, optou-se por usar a composição HRGB 'R-H1 G-H2 B-H3' (Figura como base para a subdivisão da área de estudo devido à sua capacidade em destacar os alvos de interesse de forma abran-

gente, variando no canal *Intensity* o tipo de banda alocada de acordo com a feição a ser destacada.

Para facilitar a visualização dos resultados dos processamentos executados nas imagens da área de estudo, baseando-se nas diferenças entre as feições geomorfológicas existentes, foi necessário dividir a área de estudo em três setores principais (Figura 8): noroeste (8a), central (8b) e sudeste (8c). Sendo assim, partindo da análise regional para uma análise mais detalhada, as imagens foram investigadas segundo os setores propostos.

4.1 Setor Noroeste (a)

A análise da porção noroeste da planície costeira foi direcionada principalmente para o destaque

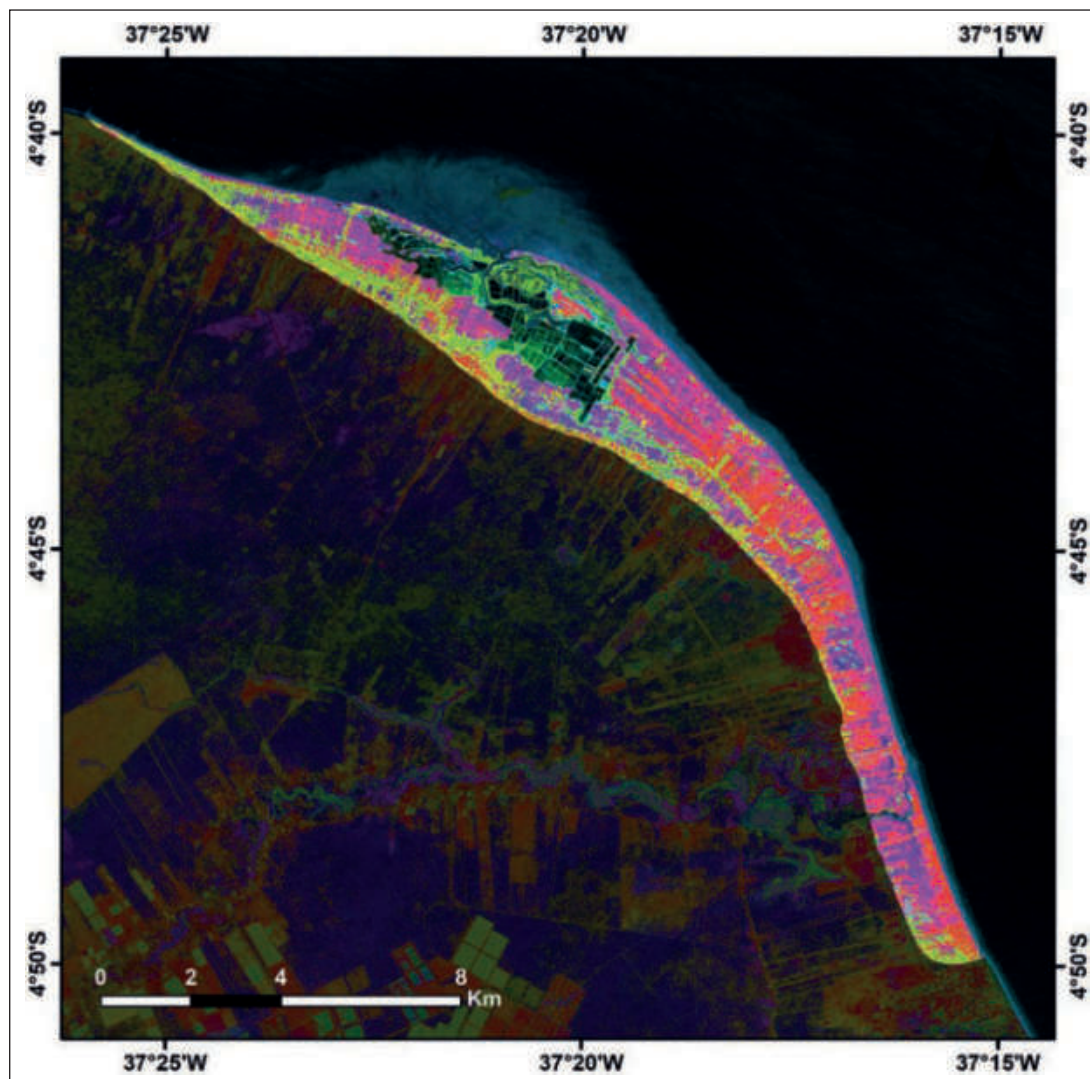


Figura 7
Composição R-H1 G-H2 B-H3 I-I2, gerada a partir da combinação de bandas do sistema IHS, com posterior aplicação da técnica de realce por decorrelação.

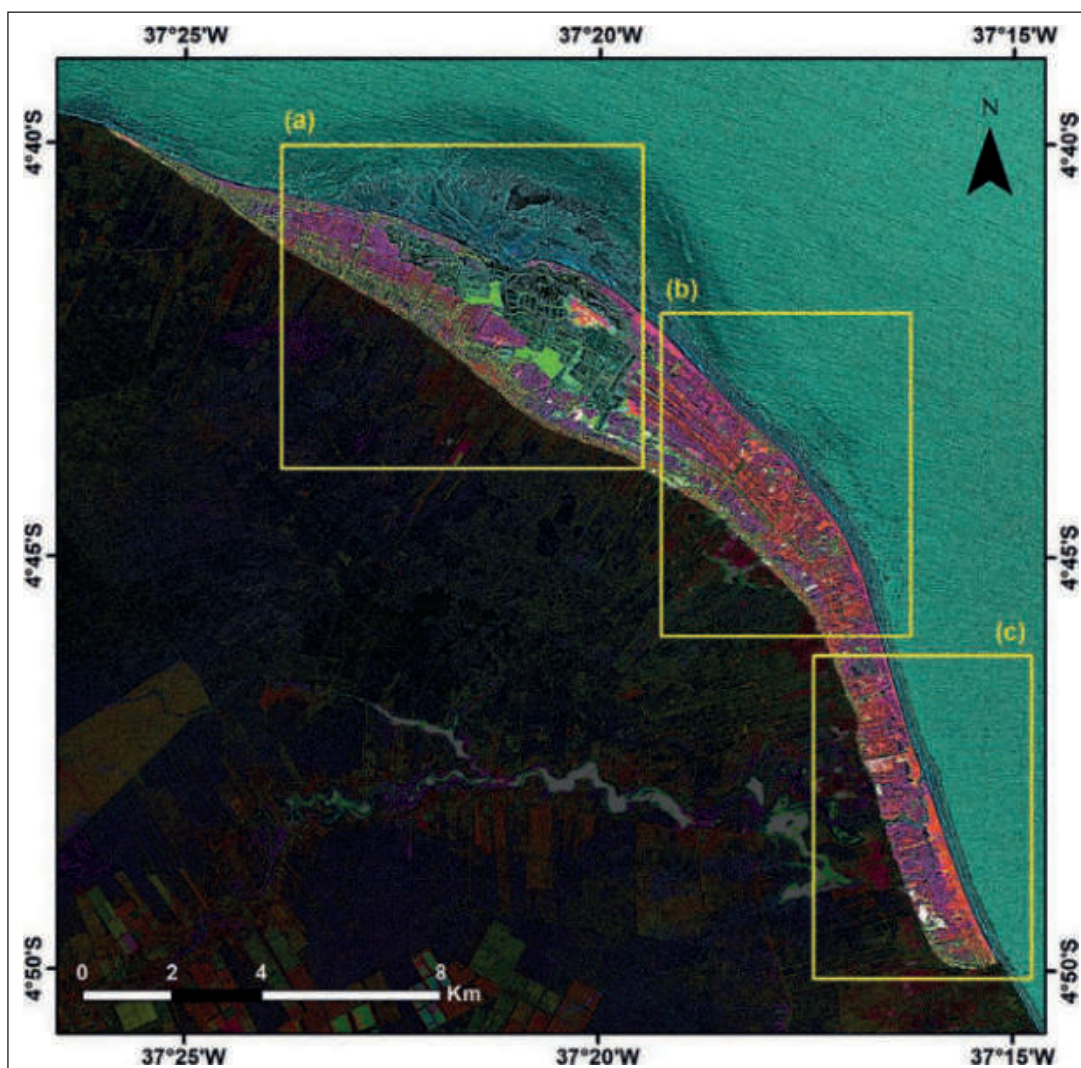


Figura 8
Composição
híbrida R-H1
G-H2 B-H3 I-I3
com aplicação
de filtragem do
tipo Laplaciano
5x5 para a
planície costeira
de Icapuí, apre-
sentando os
setores noroeste
(a), central (b) e
sudeste (c).

de barras arenosas menos preservadas, da planície de maré e seus canais, sendo a área analisada sob diferentes processamentos. A partir da composição 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' (Figura 9) associada a filtragem do tipo Laplaciano 5x5 foi possível destacar as barras arenosas – que aparecem em tons de rosa a vermelho e variando para roxo nas porções adjacentes à falésia e a oeste dos tanques de carcinicultura, o que sugere um padrão textural relacionado a *strandplains* – e os canais na região de planície de maré. Em um aspecto secundário, também foram diferenciadas as áreas de mangue, os tanques de carcinicultura e as salinas em tons que variam de azul claro a verde intenso, compondo a planície estuarina.

Foram observadas em campo feições que se assemelham à geometria de seqüências de barras

arenosas (Figura 10), orientadas aproximadamente no sentido noroeste-sudeste, o que é compatível com o padrão observado nas imagens de sensoriamento remoto. De forma semelhante, também puderam ser observadas em escala de fotografia algumas dunas frontais e suas respectivas regiões interdunares (Figura 11), que tendem a acumular águas pluviais e vegetação de pequeno porte durante os períodos chuvosos.

A comparação entre as imagens de campo e os produtos de PDI permitiu também reforçar a importância do sensoriamento remoto na expansão da percepção sensorial do ser humano, ampliando-a através da visão sinóptica dada pela visão aérea ou espacial e da possibilidade de se obter informações em regiões do espectro eletromagnético inacessíveis à visão humana.

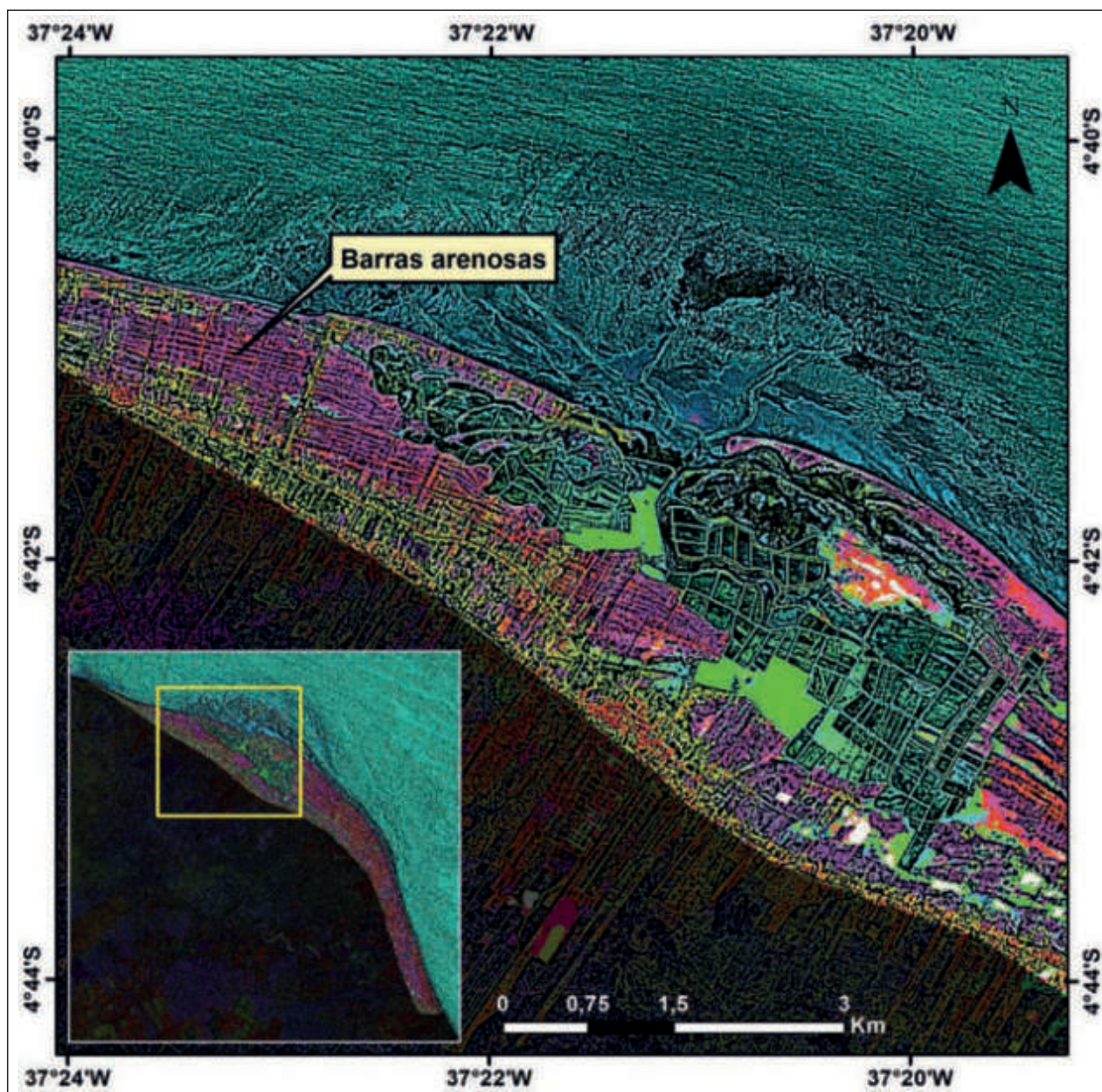


Figura 9 Composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' com aplicação de filtragem do tipo Laplaciano 5x5 para o setor noroeste da planície costeira de Icapuí, com destaque para a região que intercala tons de cores vermelho e roxo, realçando o conjunto de barras arenosas existente.



Figura 10 Porção noroeste da planície costeira de Icapuí com presença de possíveis sequências de barras arenosas (tracejado vermelho) interpretadas na imagem, apresentando-se paralelamente à linha de costa.

Utilizando apenas o espectro visível e em uma perspectiva de campo, é muito difícil analisar a variação geomorfológica da superfície. Na Figura 10, todo o terreno parece ser relativamente homogêneo, com algumas feições lineares mais distintas interpretadas como possíveis sequências de barras arenosas. Já o resultado do PDI na Figura 9 expande a percepção acerca destas feições, mostrando que conjunto de barras arenosas existente é muito mais extenso, sendo possível visualizar sua estrutura interna, truncamentos existentes e delimitar seus limites.

Em relação à planície de maré, a substituição de I3 por I2 no canal do *Intensity* deu origem à composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I2' (Figura 12), que associada ao filtro direcional com iluminação a um azimute de 135° possibilitou uma melhor individualização desse compartimento geomorfológico.

Posteriormente, a aplicação de uma composição MNDWI no canal do *Intensity* deu origem à composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-MNDWI' (Figura 13), na qual foi alterado o ângulo do filtro direcional com iluminação em azimute de 90°. Esta combinação destacou os canais de maré submersos existentes, destacando uma tendência a se posicionarem nas direções NE-SW e NW-SE.

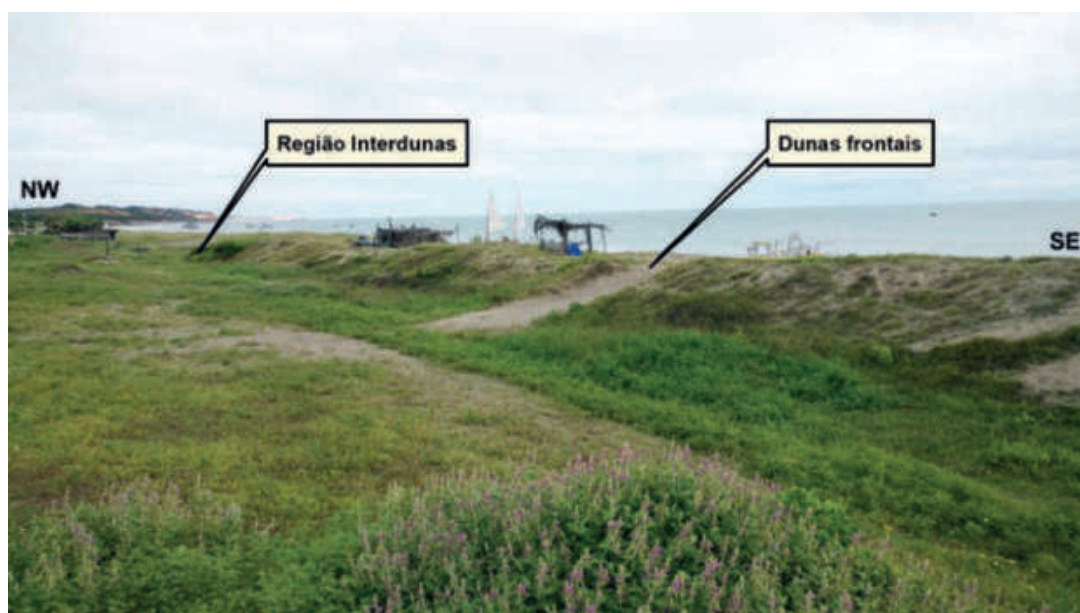
As fotografias obtidas na planície de maré corroboraram as interpretações realizadas por senso-

riamento remoto, onde pode ser observada – durante a maré enchente – a existência de pequenos leitos (Figura 14) que possuem entre 10 e 50 metros de largura e profundidade estimada da ordem de alguns metros no canal principal, visto que permitem a navegação de pequenas embarcações movidas a motor, sendo estas características compatíveis com os canais de maré observados nas imagens de sensoriamento remoto. Também foram observados alguns fragmentos de vegetação de mangue em porções mais internas da planície de maré, sendo este fato possível, entre outras razões, devido ao seu baixo gradiente batimétrico.

4.2 Setor Central (b)

A análise da porção central da planície costeira foi usada para destacar as feições lineares relacionadas às barras arenosas – mais bem definidas nesta porção em comparação aos outros setores – que tendem a se posicionar paralelamente à linha de costa. Devido à sua geometria, foi aplicada à composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' (Figura 15) um filtro direcional com iluminação em azimute de 45° para realçar seus limites. Algumas porções da região das barras arenosas são sobrepostas por sedimentos eólicos – que se encontram distribuídas principalmente na parte leste deste setor – denotando o caráter dinâmico da área. Além disso, também

Figura 11 Ocorrência de dunas frontais (dunas frontais) e regiões interdunares, a noroeste da área de estudo, conforme indicado na Figura. Essas estruturas ocorrem de forma paralela à linha de costa, no sentido noroeste-sudeste.



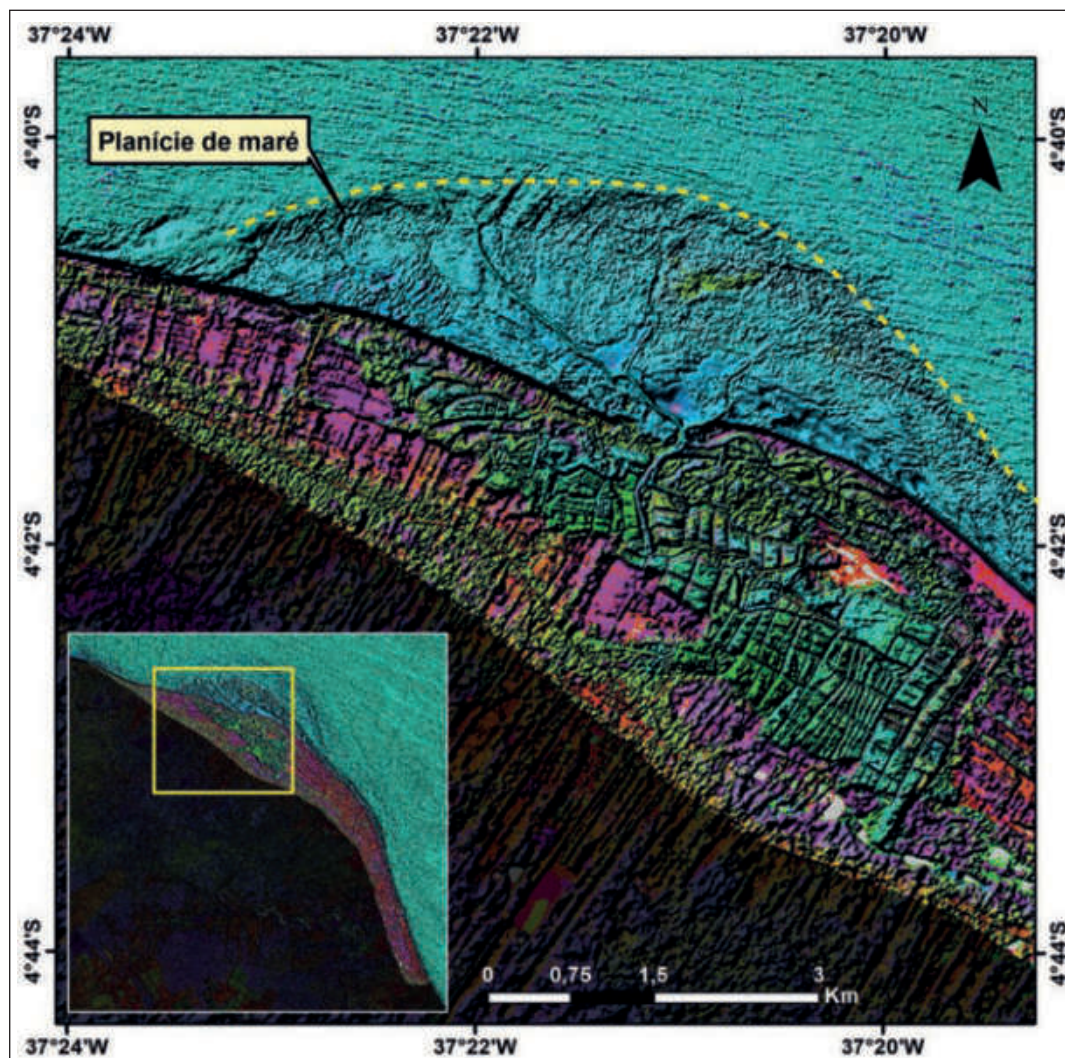


Figura 12 Composição híbrida R-H1 G-H2 B-H3 I-I2 com aplicação de filtro direcional a 135° Az no setor noroeste da área de estudo, com destaque para a borda da planície de maré interpretada.

foi possível observar, tanto por meio de imagens de satélite quanto por análises de campo, que a face da praia parece mais desenvolvida em comparação com o setor nordeste. Provavelmente este fator pode estar relacionado aos baixos gradientes batimétricos, com ondas ocorrendo de forma mais suave, reduzindo o transporte por ação de deriva litorânea.

Nesta porção as observações feitas em campo confirmaram a existência das condições interpretadas nas imagens de sensoriamento remoto, sendo possível constatar a taxa de variação do nível relativo do mar na região, durante a maré vazante, devido ao seu baixo gradiente batimétrico, tornando visível uma extensa planície de maré que se estende por centenas de metros em direção ao mar (Figura 16).

Também foi possível notar uma sequência de dunas frontais, com algumas dezenas de metros de largura, adjacentes à frente de praia.

4.3 Setor Sudeste (c)

A partir da composição 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' (Figura 17) associada à filtragem do tipo Laplaciano 5×5 foi possível destacar uma feição que se assemelha a uma barra arenosa de maior tamanho que aparece em tons de vermelho, variando para roxo na região retrobarreira. Essa disposição pode fornecer indícios sobre a formação da planície costeira, visto que esta geometria é comumente associada ao crescimento de barras arenosas a partir de um ponto de ancoragem pré-existente, que neste caso pode estar

Imagens Sentinel-2 Aplicadas na Caracterização Geomorfológica de
Ambientes Costeiros: Estudo de Caso na Planície Costeira de Icapuí, Nordeste do Brasil

Cláudio Ângelo da Silva Neto; Allison de Oliveira Maia; Mateus de Paula Miranda; Cynthia Romariz Duarte & Michael Vandesteem Silva Souto

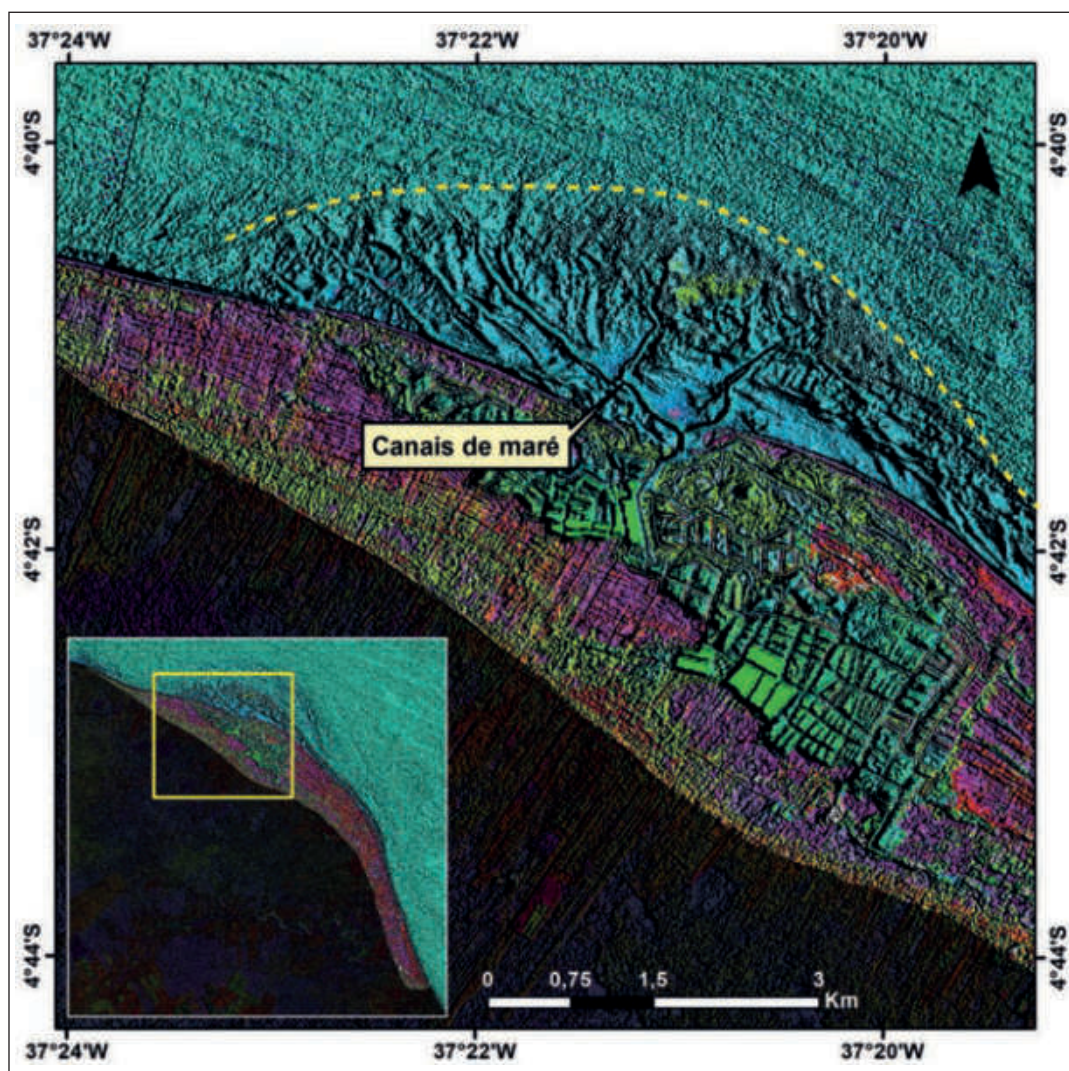


Figura 13 Composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-MNDWI' com aplicação de filtro direcional a 90° Az no setor noroeste da área de estudo, com destaque para a os canais existentes na planície de maré.

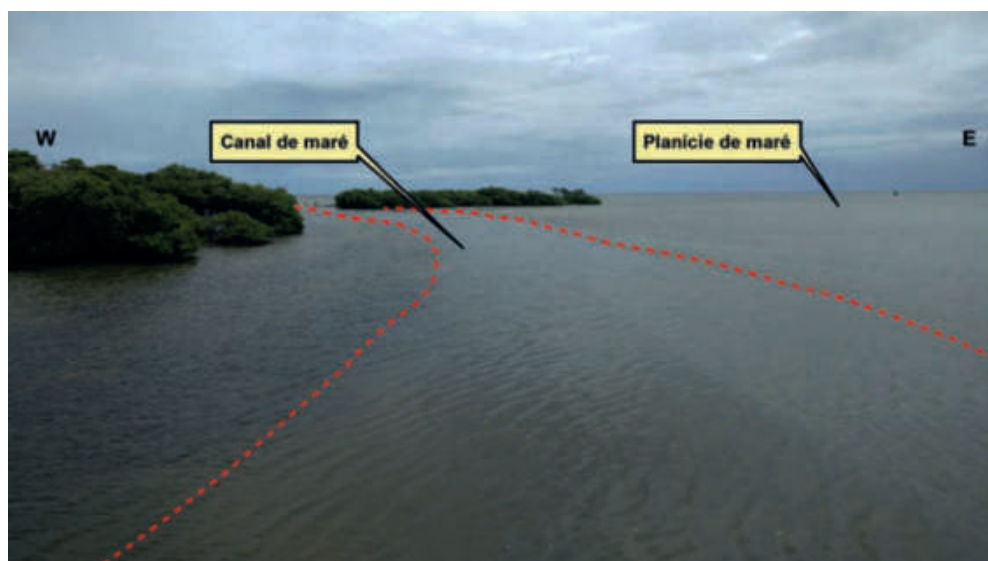


Figura 14 Região de planície de maré indicando as dimensões do canal de maré.

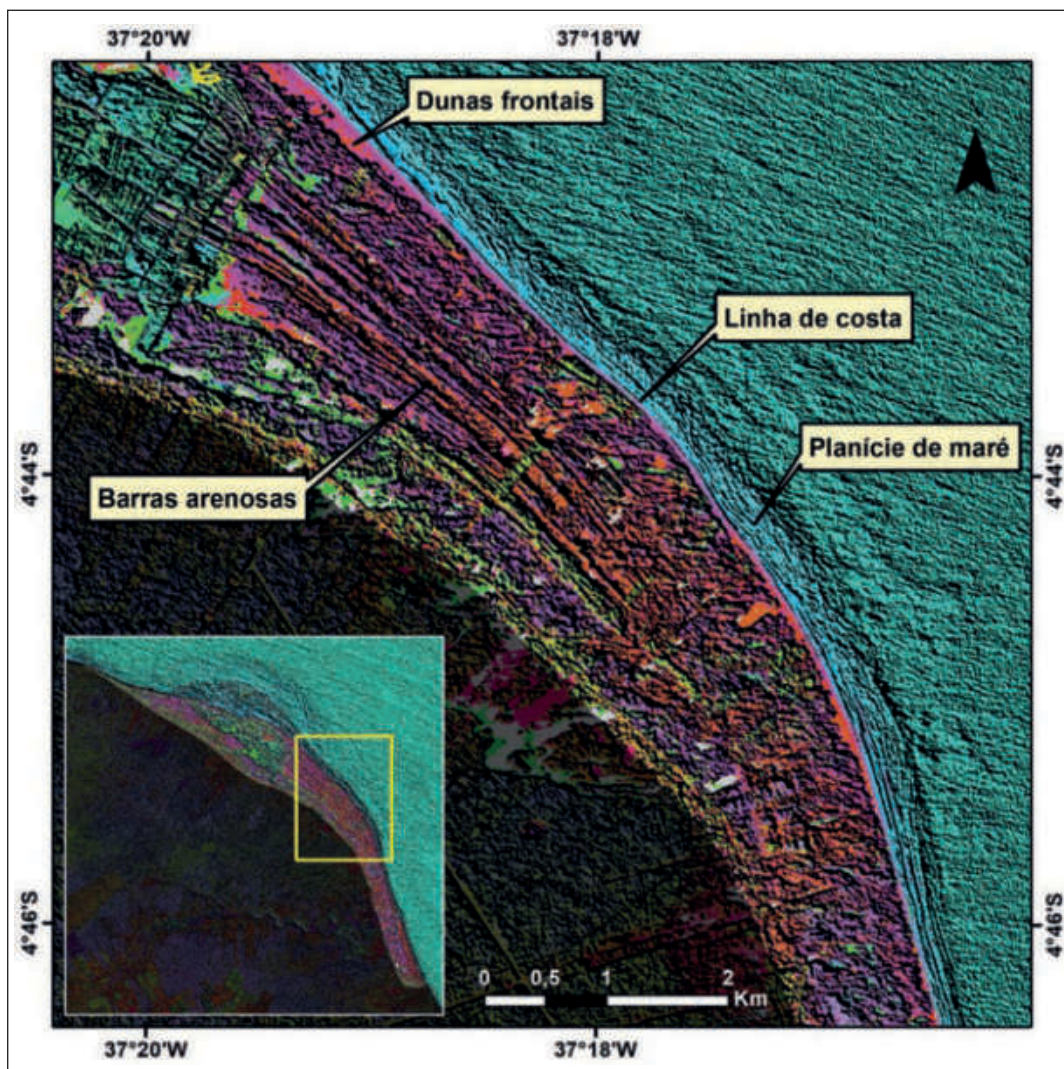


Figura 15 Composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' com aplicação de filtro direcional com iluminação em azimute de 45° no setor noroeste da área de estudo, com destaque para a sequência de barras arenosas (em vermelho e roxo).

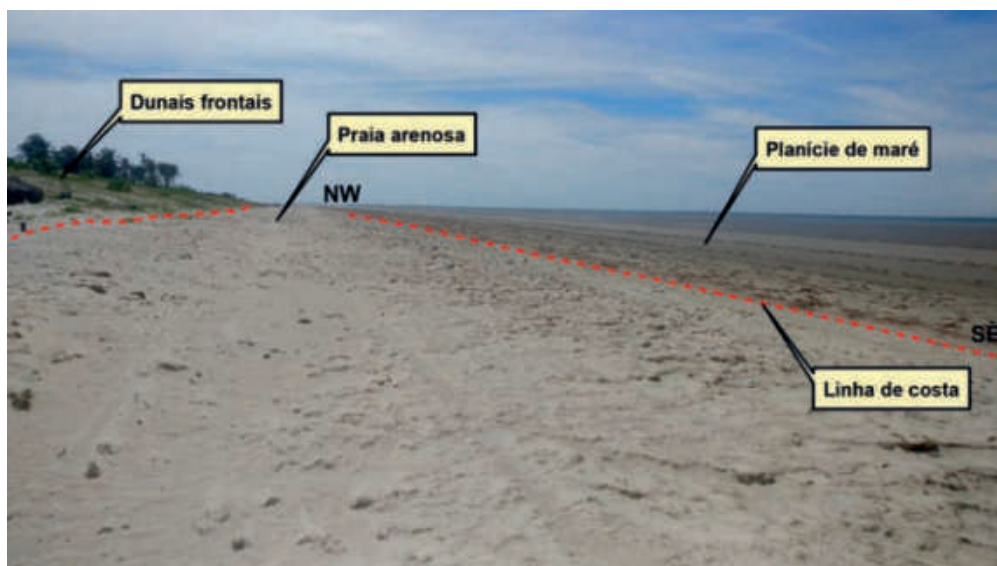


Figura 16 Extensão da faixa de praia, com a presença de dunas frontais à esquerda e a planície de maré durante a maré vazante à direita. A linha tracejada à direita indica o alcance da linha de costa.

associado às falésias do município de Tibau, estado do Rio Grande do Norte.

As interpretações obtidas por sensoriamento remoto são compatíveis com os dados obtidos em campo, permitindo obter uma visão panorâmica dos compartimentos geomorfológicos da área, que parecem formar um sistema semelhante a uma barra arenosa (Figura 18). Foi possível observar uma diferenciação entre a porção mais próxima do litoral (barra arenosa) e as áreas mais internas do continente (região retrobarreira) com destaque para a última, devido a sua menor interferência antrópica, preservando alguns corpos d'água remanescentes, o que permite supor que esta área já tenha sido uma antiga zona alagável, o que é coerente com um ambiente de retrobarreira. Com relação à barreira propriamente

dita, as observações de campo permitiram que fosse realizada uma estimativa de suas dimensões, coincidindo com a área ocupada por barracas de praia, hotéis e residências ao longo da faixa de praia.

4.4 Caracterização Geomorfológica

A partir das interpretações feitas no processamento digital de imagens, foi elaborado um mapa temático que sintetiza as principais feições geomorfológicas observadas na planície costeira de Icapuí, permitindo uma visão geral da área de estudo. Foram individualizadas na porção *offshore* a planície e canais de maré, enquanto que na região *onshore* foram caracterizadas uma sequência de barras arenosas que podem ser interpretadas como *strandplains* associa-

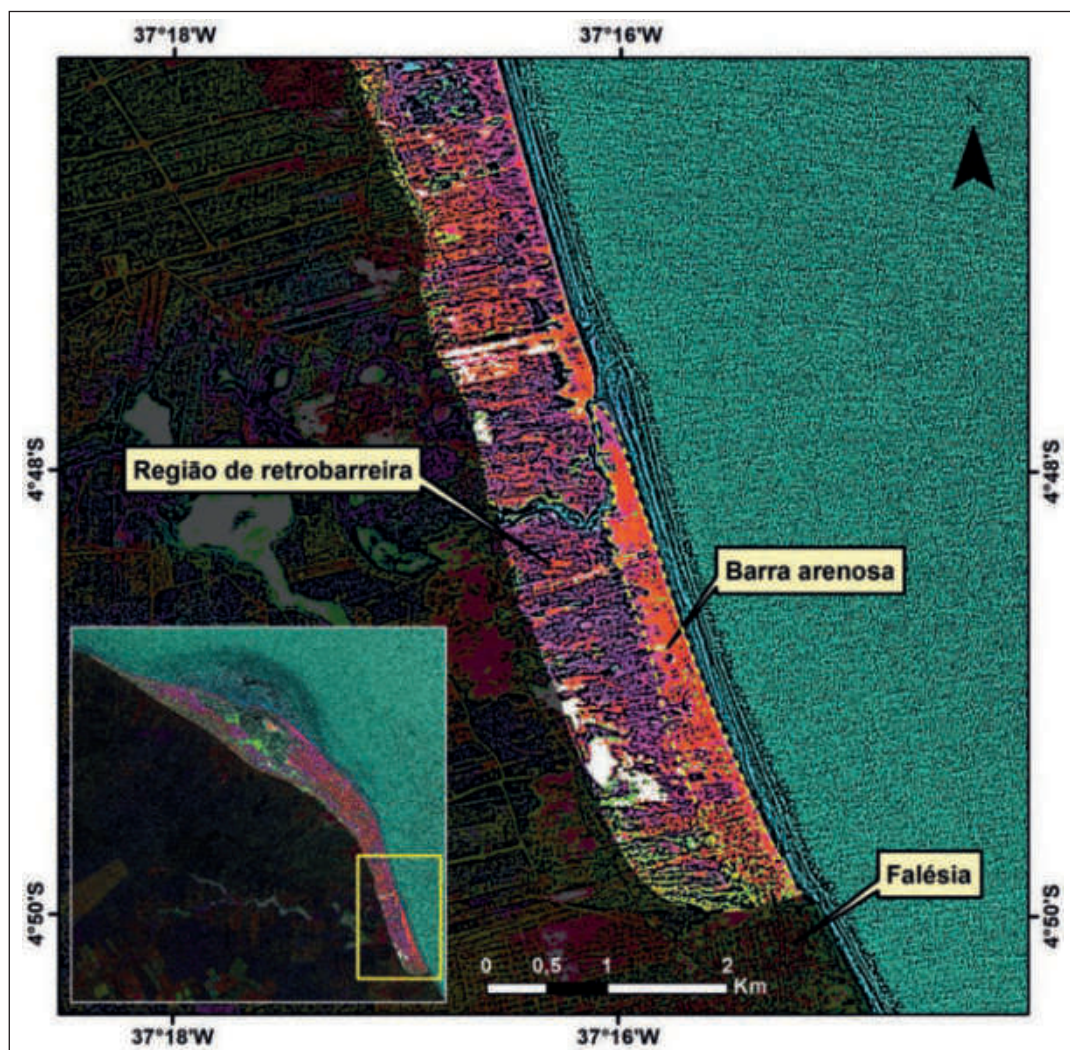


Figura 17 Composição híbrida 'R-H1 G-H2 B-H3 I-I3' com aplicação de filtragem do tipo Laplaciano 5x5 no setor sudeste da área de estudo, com destaque para um resquício preservado de uma antiga barra arenosa e sua região de retrobarreira.

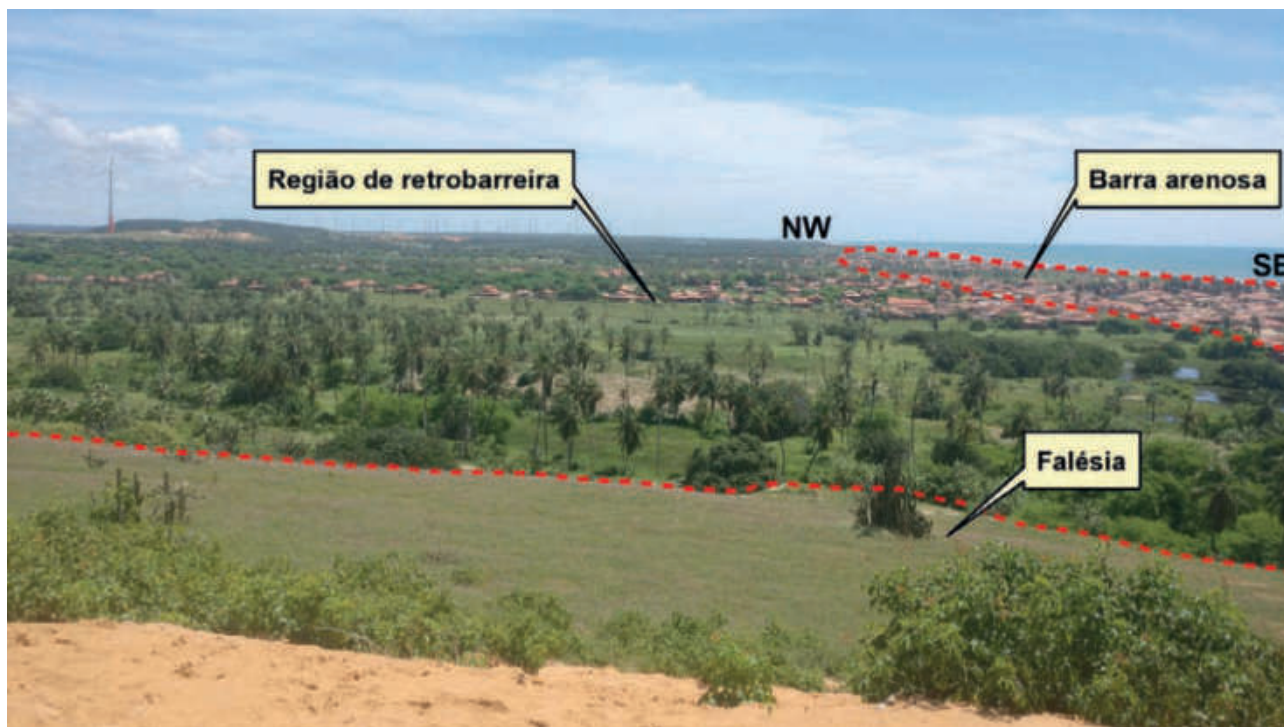


Figura 18 Vista panorâmica do setor sudeste da planície costeira, onde estão indicados os limites das paleofalésias na porção inferior, a porção retrobarreira e a estimativa da região ocupada pela barra arenosa na porção superior direita, que foi estimada com base nas imagens de sensoriamento remoto.

dos a *swales* – zonas de acumulação de águas pluviais e matéria orgânica – gerando uma topografia suave e ocorrendo em pequenos grupos de diferentes dimensões e formas, que em alguns setores estão sobrepostas por campos de dunas.

No setor noroeste, as barras arenosas apresentam cerca de 30 metros de espessura e extensão lateral de 3 quilômetros, onde são observados alguns truncamentos erosivos que podem estar relacionados a antigos processos de sobrelavagem por transgressões marinhas holocênicas. Em relação à porção central, as barras têm forma arqueada com dimensões variando de 70 a 90 metros de espessura com extensão lateral de aproximadamente 8 quilômetros, que seguem paralelamente à morfologia costeira. Ainda na porção central, são observados uma série de depósitos eólicos que cobrem as barras arenosas e estão relacionados a depósitos sedimentares mais recentes.

Na porção sudeste, o padrão observado nos demais setores dá origem a uma morfologia diferen-

ciada, onde foi possível observar indícios da existência de uma barreira com até 400 metros de espessura que se estende de Tibau (RN) por 5 quilômetros na direção de Icapuí (CE), sendo atravessada pelas águas do Riacho Arrombado na sua porção mais distal. Essa barreira parece ter proporcionado proteção a uma região de retrobarreira, que possui pequenos lagos que acumulam água da chuva durante os períodos chuvosos. Sugere-se que essa barra arenosa faz parte de um sistema maior, alimentado pela corrente de deriva litorânea, que, juntamente com os sedimentos em suspensão, pode ter promovido o crescimento lateral dessa estrutura, fato observado atualmente na desembocadura do canal de maré de Icapuí (CE).

Ao comparar produtos de sensoriamento remoto obtidos a partir de imagens antigas (anteriores à instalação dos tanques de carcinicultura) e imagens atuais, foi possível inferir a área da planície estuarina, que se apresenta como área de confluência das águas superficiais e que se comunica com as águas oceânicas através dos canais de maré existentes, e

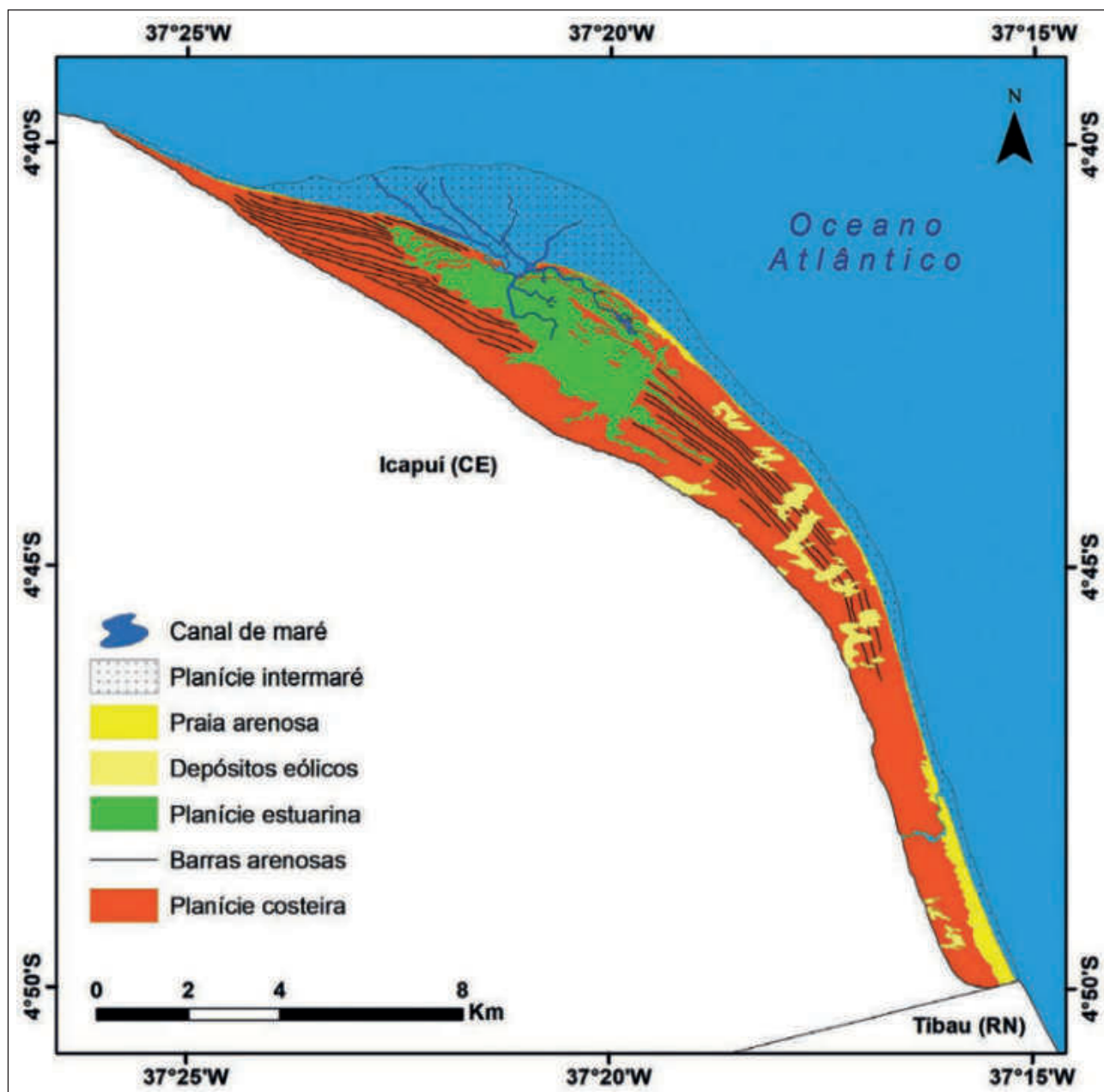


Figura 19 Mapa das feições geomorfológicas presentes na área de estudo.

onde também foi possível delimitar a planície de intermaré, que é mais desenvolvida na foz do canal de maré principal. Ainda na planície estuarina, pode-se observar pequenas porções de terra, cercadas por canais de maré, que apresentam semelhança com os *strandplains*, que foram interpretadas como paleoilhas, ou seja, porções que foram depositadas em períodos cronologicamente semelhantes e que atualmente estão separadas devido a rupturas em sua estrutura pela ação dos canais de maré previamente

existentes, marcando as antigas posições da linha de costa. A existência dessas feições na porção oeste da planície estuarina sugere que, em um tempo geológico no passado, a continuidade lateral das barras arenosas se estendia até esta porção da planície costeira.

5 Conclusões

O sensor MSI/Sentinel-2 possibilitou a obtenção de imagens orbitais de alta resolução espacial

com uma boa resolução temporal de forma gratuita, características estas que favorecem o seu uso em estudos relacionados à dinâmica costeira. O uso conjunto das diversas técnicas implementadas neste trabalho mostrou que, mesmo em áreas onde a resposta espectral dos alvos de interesse seja um fator que dificulte sua caracterização através do processamento digital de imagens, o uso integrado de técnicas de realce e filtragem em composições híbridas HRGBI, além da utilização índices matemáticos como o MNDWI, podem representar um recurso que facilite o estudo de áreas costeiras onde a resposta de produtos orbitais multiespectrais gratuitos não é suficiente para a diferenciação das suas feições geomorfológicas.

A conversão das imagens RGB para o sistema IHS e a utilização das técnicas de decorrelação nas imagens foram fundamentais para a obtenção dos resultados aqui apresentados, visto que possibilitaram a visualização das pequenas diferenças espectrais existentes entre os alvos aqui analisados. Além disso, as técnicas de realce e filtragem permitiram que feições como as barras arenosas e os canais de maré fossem melhor interpretadas, contribuindo para o estudo da área como um todo.

A aplicação destas técnicas e os resultados obtidos na área de estudo denotam a complexidade existente no que diz respeito aos processos envolvidos na formação da planície costeira de Icapuí (CE). A observação dessa quantidade de feições geomorfológicas em uma planície costeira formada em um espaço relativamente estreito do litoral, tendo sido formadas em um intervalo de tempo geológico possivelmente restrito ao Quaternário superior, reforça a necessidade da realização de estudos geológicos mais aprofundados visando melhor caracterizar a dinâmica costeira existente no litoral setentrional do nordeste brasileiro.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Geologia, ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará pelo apoio e estrutura fornecida para a realização deste

trabalho. Ao Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento pela sua contribuição na interpretação sedimentar da área de estudo, além da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de pesquisa sob o processo nº 134165/2019-5.

7 Referências

- Amaro, V. E.; Santos, M. S. & Souto, M. V. S. 2012. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão*. Natal, Do Autor. 120 p.
- Bird, E. C. F. 2011. *Coastal Geomorphology: an Introduction*. West Sussex, John Wiley & Sons. 434 p.
- Davis Jr, R. A. & FitzGerald, D. M. 2004. *Beaches and Coasts*. Massachusetts, Blackwell Publishing. 419 p.
- Castro, A. F.; Souto, M. V. S.; Amaro, V. E. & Vital, H. 2016. Desenvolvimento e aplicação de um banco de dados geográficos na elaboração de mapas da morfodinâmica costeira e sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo em áreas costeiras localizadas no estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geociências*, 33 (2): 53 - 64.
- Costa, B. C. P.; Amaro, V. E. & Silva Ferreira, A. T. 2017. Classificação de Espécies de Mangue no Nordeste do Brasil com Base em Imagens Híbridas de Sensoriamento Remoto. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40 (1): 135 - 149.
- Damasceno, A. M.; Duarte, C. R. & Souto, M. V. S. 2014. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na análise multitemporal da linha de costa região de Icapuí (CE), entre 1984 e 2013. *Revista Geonorte: Edição Especial*, 5 (16): 52-58.
- Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P. & Martimort, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ*, 120: 25 - 36.
- Mishra, D. R. 2014. Coastal Remote Sensing. *Glsci Remote Sens*, 51 (6): 115 - 119.
- Du, Y.; Zhang, Y.; Ling, F.; Wang, Q.; Li, W. & Li, X. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sens*, 8 (4): 354 - 372.
- Du, Z. Q.; Li, W. B.; Zhou, D. B.; Tian, L. Q.; Ling, F.; Wang, H. L.; Gui, Y. M. & Sun, B. Y. 2014. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote Sens. Lett*, 5: 672 - 681.
- European Space Agency (ESA). 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. Revision 2 ESA Standard Document, Paris. 64 p.
- Feng, L.; Hu, C. M.; Chen, X. L.; Cai, X. B.; Tian, L. Q. & Gan, W. X. 2012. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sens. Environ*, 121: 80 - 92.
- Gonzalez, R. C. & Woods, R. E. 2010. *Processamento Digital de Imagens*. 3ª ed, São Paulo, Pearson Prentice Hall. 624 p.

Imagens Sentinel-2 Aplicadas na Caracterização Geomorfológica de
Ambientes Costeiros: Estudo de Caso na Planície Costeira de Icapuí, Nordeste do Brasil

Cláudio Ângelo da Silva Neto; Allison de Oliveira Maia; Mateus de Paula Miranda; Cynthia Romariz Duarte & Michael Vandesteem Silva Souto

- Green, E. P.; Mumby, P. J.; Edwards, A. J. & Clark, C. D. A. 1996. Review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. *Coastal Management*, 24 (1): 1 - 40.
- Harris, J. R.; Bowie, C.; Rencz, A. N. & Graham, D., 1994. Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences. *Can. J. Remote Sens*, 20 (3): 210 - 221.
- Heumann, B. W. 2011. An Object-Based Classification of Mangroves Using a Hybrid Decision Tree – Support Vector Machine Approach. *Remote Sens*, 3: 2440 - 2460.
- Hui, F. M.; Xu, B.; Huang, H. B.; Yu, Q.; Gong, P. 2008. Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery. *Int. J. Remote Sens*, 29, 5767 - 5784.
- Jensen, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2ª ed, São José dos Campos, Parêntese Editora. 598 p.
- Li, W. B.; Du, Z. Q.; Ling, F.; Zhou, D. B.; Wang, H. L.; Gui, Y. M.; Sun, B. Y. & Zhang, X. M. 2013. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM plus and ALI. *Remote Sens*, 5: 5530 - 5549.
- Liu, J. G.; Moore, J. M. 1990. Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *Int. J. Remote Sens*, 11 (8): 1521 - 1530.
- Lyons, M.; Phinn, S. & Roelfsema, C. 2011. Integrating Quickbird Multi-Spectral Satellite and Field Data: Mapping Bathymetry, Seagrass Cover, Seagrass Species and Change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007. *Remote Sens*, 3: 42 - 64.
- Maia, A. O. 2017. *Reconstrução ambiental e evolução sedimentar da região costeira de Icapuí/CE por meio de processamento digital de imagens e análise de fácies*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 103 p.
- Mather, P. M. & Koch, M. 2011. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. 4ª ed, West Sussex, John Wiley & Sons. 434 p.
- Mcfeeters, S. K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens*, 17 (7): 1425 - 1432.
- Meireles, A. J. A. & Santos, A. M. F. 2012. *Atlas de Icapuí*. Fortaleza, Editora Fundação Brasil Cidadão. 156 p.
- Murray, N. J.; Phinn, S. R.; Clemens, R. S.; Roelfsema, C. M. & Fuller, R. A. 2012. Continental Scale Mapping of Tidal Flats across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote Sens*, 4: 3417 - 3426.
- Kuenzer, C.; Bluemel, A.; Gebhardt, S.; Quoc, T.V. & Dech, S., 2011. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sens*, 3: 878 - 928.
- Rios, V. P. L.; Amaro, V. E.; Vieira, M. M.; Matos, M. F. A.; Prudêncio, M. C. & Camara, M. R. 2016. Influência neotectônica na morfologia do sistema de ilhas barreiras, nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17 (3): 399 - 416.
- Santos, M. S. T.; Amaro, V. E. & Souto, M. V. S. 2011. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. *Revista Brasileira de Cartografia (Impresso)*, 63: 663 - 681.
- Santos, M. S. T. & Amaro, V. E. 2014. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14 (2): 151 - 162.
- Shalaby, A. & Tateishi, R. 2007. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27 (1): 28 - 41.
- Shao, Z.; Yang, K. & Zhou, W. 2018. A Benchmark Dataset for Performance Evaluation of Multi-Label Remote Sensing Image Retrieval. *Remote Sens*, 10 (6): 964 - 976.
- Singh, K. V.; Setia, R.; Sahoo, S.; Prasad, A. & Pateriya, B. 2015. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto Int*, 30: 650 - 661.
- Sonka, M.; Hlavac, V. & Boyle, R. 2014. *Image processing, analysis, and machine vision*. 4ª ed, Boston, Cengage Learning. 555 p.
- Souto, M. V. S.; Castro, A. F.; Grigio, A. M.; Amaro, V. E. & Vital, H. 2006. Multitemporal analysis of geo-environmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, city of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. In: Special Issue No. 39. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium (ICS 2004), Vol. III. *Journal of Coastal Research*, 1618-1621.
- Souto, M. V. S. 2009. *Análise da evolução costeira do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera*. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica: Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Tese de Doutorado. 177 p.
- Watrin, O. S.; Valério Filho, M. & Santos, J. R. 1996. Transformação por Componentes Principais e por Decorrelação de bandas aplicadas à caracterização de feições da paisagem do Nordeste Paraense. In: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Salvador, 1996, p. 435 - 441.
- Xu, H. Q. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens*, 27: 3025 - 3033.