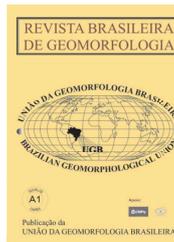


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 22, nº 1 (2021)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1887>



AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DO SOLO À EROSIÃO NAS FALÉSIAS DO LITORAL ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

ASSESSMENT OF SOIL SUSCEPTIBILITY TO EROSION ON THE CLIFFS OF THE EASTERN COASTS OF THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE

Venerando Eustáquio Amaro

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7357-2200>

E-mail: venerando.amaro@gmail.com

Ricardo Carlos Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5017-7515>

E-mail: rcc@gmail.com

Maria de Fátima Alves de Matos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2864-2027>

E-mail: mfatimaalves@gmail.com

Maria Del Pilar Durante Ingunza

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6994-7559>

E-mail: pilarduranteingunza@gmail.com

Ada Cristina Scudelari

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7594-1196>

E-mail: adaufrn@gmail.com

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

18/07/2020

Aceito (Accepted):

05/09/2020

Resumo:

No litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, localiza-se a área de estudo nos limites do Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno, que possui características naturais preservadas e onde foram avaliadas as unidades e classes temáticas do meio físico, com vistas à elaboração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão, entre as quais: geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura

Palavras-chave:

LANDSAT 8-OLI; Análise Multicritério; Álgebra de Mapas; Zona Costeira.

Keywords:

LANDSAT 8-OLI; Multicriteria Analysis; Map Algebra; Coastal Zone.

vegetacional, declividade, uso e cobertura do solo. A avaliação do grau de suscetibilidade do solo à erosão foi obtida por meio de técnicas de processamento digital de imagens multiespectrais e pancromática do LANDSAT 8-OLI, que formaram a base para a elaboração dos mapas temáticos, georreferenciados e integrados em Sistema de Informações Geográficas. Tal integração permitiu a análise qualitativa das unidades e classes temáticas por modelo multicritério em álgebra de mapas, ponderada pela atribuição de notas e pesos específicos, conforme o grau de relevância desses fatores nos processos erosivos em zona costeira com baixa intervenção antrópica. Os resultados da avaliação do potencial erosivo das unidades e classes temáticas, confirmados em visitas a campo, atribuíram para 64% da área total as classes de suscetibilidade baixa e média, para terrenos com declividades de 0° a 10°, sob o domínio vegetacional arbustivo e herbáceo. A classe de suscetibilidade erosiva muito alta representou 9% da área total conferida aos campos dunares, conectados à faixa de praia, e às falésias ativas. O mapa de suscetibilidade do solo à erosão, baseado em informações do meio físico, são fundamentais na elaboração de práticas sustentáveis de gestão de uso do solo em zonas costeiras compostas por falésias ativas e sistema dunas-praias, auxiliando na preservação de ecossistemas e no planejamento de infraestruturas costeiras mais eficazes na proteção contra a perda de solo.

Abstract:

On the eastern coast of the Rio Grande do Norte State, the study area is located at the boundaries of the Barreira do Inferno Launching Center, which has preserved natural characteristics and where thematic units and classes of physical database were evaluated, pointedly to the acquiring of the soil erosion susceptibility map, among them: geology, geomorphology, pedology, vegetation cover, slope, land use and cover. The evaluation of the soil erosion susceptibility level was obtained through digital processing techniques of LANDSAT 8-OLI multispectral and panchromatic images that formed the basis for the obtention of thematic maps, georeferenced and integrated in Geographic Information System. This integration allowed the qualitative analysis of thematic units and classes by multicriteria model in map algebra, weighted by the assignment of specific notes and weights, according to the degree of relevance of these factors in erosive processes in coastal areas with low anthropic intervention. The results of the assessment of the erosive potential of the thematic units and classes, confirmed in field visits, attributed to 64% of the total area the low and medium susceptibility, for lands with slopes from 0° to 10°, under the shrubby and herbaceous vegetation domain. The very high erosive susceptibility class represented 9% of the total area granted to the dune fields, connected to the beach stretch, and to the active cliffs. The soil erosion susceptibility map, based on information from the physical database is fundamental in the development of land use management practices in coastal zones composed of active cliffs and dune-beaches system, assisting to ecosystem preservation and planning of more effective coastal protecting infrastructures against soil loss.

1. Introdução

A aquisição de dados baseados em parâmetros do meio físico tem papel relevante no planejamento de atividades de aproveitamento sustentável do solo (VALENTE, 1999), auxiliando na preservação de ecossistemas, agroecossistemas e no desenvolvimento de obras urbanas mais eficazes e eficientes, considerando os eventuais potenciais impactos negativos do modelo de desenvolvimento adotado. Do mesmo modo, a ausência ou incompletude dos parâmetros do meio físico, podem acarretar o desequilíbrio ecossistêmico marcado

pela ampliação na degradação e erosão de solos e/ou o mau uso dos horizontes superficiais. Além disso, tal ausência fragiliza, sem os dados e informações obtidas de modo sistemático, o estabelecimento de políticas públicas e ações estratégicas que garantam a sustentabilidade ecossistêmica desses ambientes, sobretudo diante dos efeitos das alterações climáticas e das mudanças antropogênicas acarretadas nos modelos de uso da terra (SAMBUICHI *et al.*, 2012).

O uso inadequado do solo pela ausência de planejamento agroambiental e de informações geotécnicas

pode ocasionar o esgotamento extensivo e irreversível dos recursos naturais, evento já anunciado que ocorra em todo o mundo e em poucas décadas (VALLADARES *et al.*, 2012; FAO, 2015). Segundo os estudos da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), cerca de 33% dos solos de todo o planeta estão em processo de degradação em decorrência de fatores de inadequação de usos e que promovem, entre outros percalços, a aceleração do processo erosivo (XAVIER, *et al.*, 2010; MOURA-BUENO *et al.*, 2018). No Brasil, recentes estudos mostram que a ausência de planejamento para a ocupação territorial tem promovido mudanças no uso da terra e o aumento na degradação do solo e, portanto, afetando a sustentabilidade dos ecossistemas e agroecossistemas, em consequência de ações que aceleram o processo erosivo (NAVAS *et al.*, 2005; TÔSTO; PEREIRA, 2012; WANG *et al.*, 2016; MOURA-BUENO *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a zona costeira possui os ecossistemas mais diretamente afetados pelo acentuado aumento dos processos erosivos, dada à complexidade de parâmetros envolvidos na formação dessa paisagem de localização fronteira, sob a incidência de forças motrizes continentais, oceânicas, atmosféricas e antrópicas, resultando em ambiente de alta dinâmica natural e ambiental e, portanto, suscetível às alterações morfológicas e a intensos processos erosivos (MUEHE, 1998; CUNHA, 2004; AMARO *et al.*, 2012). Por ocorrer nessa interface geológico-geomorfológica, as zonas costeiras estão incluídas entre os ambientes com maior dinâmica morfológica entre todos os descritos no planeta (MARINO *et al.*, 2016). O equilíbrio dinâmico nas zonas costeiras tem sido conduzido, nas diferentes escalas espaciais e temporais, pelos processos naturais atuantes sobre a alta fragilidade e suscetibilidade naturais dos ecossistemas costeiros (por exemplo, falésias, praias, campos de dunas e bosques de manguezais) e diante das modificações promovidas pelas intervenções antrópicas (MARINO; FREIRE, 2013; AMARO *et al.*, 2015; BUSMAN *et al.*, 2016).

O crescimento populacional desordenado nas regiões costeiras, cada vez mais próximo da linha de costa, e os incrementos nas atividades socioeconômicas, têm amplificado o desequilibrado dinâmico costeiro, ora promovendo erosão continental acelerada em setores desmatados e impermeabilizados, ora pela interferência negativa do processo natural e cíclico de reposição

de sedimentos nos ecossistemas costeiros promovido pela ocupação da orla marítima com obras costeiras mal planejadas (MARINO *et al.*, 2016; AMARO *et al.*, 2015; MATOS *et al.*, 2020). Desse desequilíbrio entre os processos de erosão/deposição nas zonas costeiras frequentemente resultam perdas socioeconômicas significativas, com danos irreversíveis aos ecossistemas e, diante da intensificação das interferências antropogênicas, tem comprometido a qualidade de vida das comunidades costeiras, urbanas e rurais (WORLD BANK, 2010; MOURA-BUENO *et al.*, 2018).

O litoral oriental do Estado Rio Grande do Norte (RN) exhibe expressivas falésias marinhas ativas formadas por rochas sedimentares da Formação Barreiras compondo as feições de Tabuleiros Costeiros (NUNES *et al.*, 2011), usualmente defrontadas por praias arenosas e linhas de arenitos de praias (VITAL, 2006). Os campos de dunas móveis e fixadas por vegetação correspondem às coberturas sedimentares que ocorrem sobre as litologias sedimentares da Formação Barreiras, que também é interceptada por planícies estuarinas e vales de rios intermitentes. Devido a essa distinção geomorfológica, a área de estudo configura-se ainda como de alta relevância ao aquífero costeiro denominado sistema Dunas-Barreiras, responsável pelo abastecimento de água da região (MEDEIROS, 2001).

A área de estudo está contida nos limites administrativos do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), primeira base de lançamento de foguetes da América do Sul, mantida desde 1965 pela Força Aérea Brasileira (FAB), entre os municípios de Natal e Parnamirim (Figura 1). O CLBI tem atuado na perspectiva de preservação da fauna e flora do bioma Mata Atlântica remanescente, realizando parcerias em projetos de pesquisas da UFRN e do Projeto Tamar, sobre diferentes espécies de tartarugas marinhas ameaçadas de extinção que desovam em cerca de 9,0 km de extensão de faixa de praia arenosa do CLBI.

A área de estudo tem como limite leste a falésia ativa da Barreira do Inferno, com praia arenosa defrontante (Figura 2a) e como limite norte a Praia de Ponta Negra integrando o campo de dunas do Morro do Careca, ponto de identidade turística de Natal (Figura 2b). Apesar de tratar-se de área protegida há mais de cinco décadas, favorecendo a conservação da bio-geodiversidade desses ecossistemas costeiros, as cercanias do CLBI são áreas densamente povoadas e em processo

crescente de especulação imobiliária rotineiramente exposta às inúmeras intervenções antropogênicas irregulares, que causam múltiplos prejuízos ambientais, tais como: o desmatamento, o lançamento inadequado de lixo e esgoto, a alteração da drenagem natural e a movimentação irregular de terra, entre outros. Assim, considerando os 410 km de litoral do RN, cerca de 9,0 km do CBLI foi mantido preservado da ocupação antrópica e de acesso restrito ao público, tornando-a fundamental aos estudos sobre o potencial erosivo dos fatores diretamente concernentes ao meio físico em ambiente biológico preservado.

Portanto, este artigo objetivou identificar e caracterizar as propriedades topográficas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas, vegetacionais e de uso e cobertura do solo na consolidação de mapa de suscetibilidade do solo à erosão no CLBI e seu entorno.

Por ocupar uma região de zona costeira minimamente antropizada, o recorte geográfico do CLBI é apropriado aos estudos de suscetibilidade do solo à erosão baseados na coleta sistemática de dados georreferenciados do meio físico, fundamentados no emprego de imagens de Sensoriamento Remoto e integração em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Tais estudos são ferramentas eficazes na obtenção de informações confiáveis que orientam as ações de preservação, manejo, melhoramento no ordenamento de usos e reabilitação do solo antes que se proceda a qualquer tipo de intervenção ou ocupação. Importante ressaltar que a maioria das intervenções na zona costeira brasileira, por vezes com aval da gestão pública, mesmo naqueles setores próximos aos centros urbanos, ainda acontecem antes que se verifiquem diretrizes definidas por indicadores ambientais (SOUZA, 2009; AMARO et al., 2015).

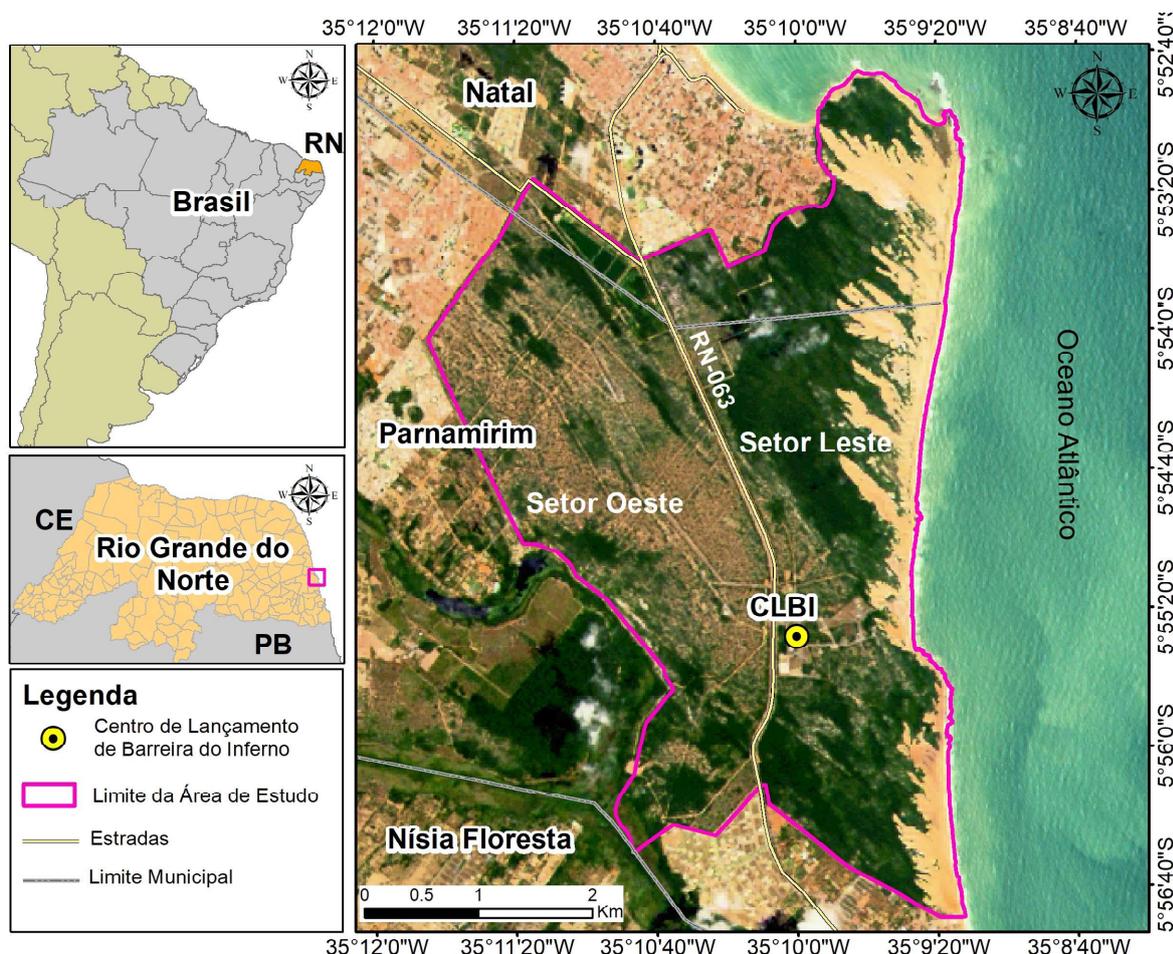


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, litoral oriental do Rio Grande do Norte (RN). Imagem do satélite LANDSAT 8 Sensor Operational Land Imager (OLI) de 29/08/2018 (USGS, 2018).



Figura 2 - No limite leste da área de estudo está a falésia marinha ativa da Barreira do Inferno (A); na porção a norte as dunas do Morro do Careca, a sul da Praia de Ponta Negra (B); vista área das instalações do Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno (C). Fonte: Acervo CLBI, 2017.

2. Materiais e Métodos

A elaboração dos mapas de suscetibilidade do solo à erosão constituiu-se de uma adaptação à metodologia proposta por Crepani (2001), baseada no conceito de ecodinâmica (TRICART, 1977), ao modelo multicritério aditivo de Valladares *et al.* (2012) e ao conjunto de indicadores do meio físico propostas por Silva (2014) e Neves (2015).

Os procedimentos metodológicos e os materiais adotados foram compilados no fluxograma da Figura 3 e contemplam uma base de dados essenciais na elaboração dessas categorias de mapas temáticos. Em razão da indisponibilidade de mapas temáticos atualizados da área de estudo, foram utilizadas as seguintes bases cartográficas prévias de instituições públicas e de pesquisas: geologia, em escala 1:100.000 (Serviço Geológico Brasileiro/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – SGB/CPRM); geomorfologia e solos, ambos em escala 1:250.000 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE); declividade, em escala 1:10.000 (Secretaria do Estado do Turismo do RN - SETUR e Secretaria de Estado da Infraestrutura-SIN). Os mapas temáticos foram geoprocessados em SIG para readequações das diferentes escalas para a escala 1:40.000, possível em decorrência do apoio na validação de dados em levantamentos de campo com *Ground Positioning System* (GPS) baseados nas combinações coloridas híbridas entre imagens multiespectrais do visível ao infravermelho, com resolução espacial de 30m, e a imagem pancromática, com resolução espacial de 15m, todas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite LANDSAT 8 do banco de dados do *United*

States Survey Geological (USGS, 2018).

A escala de 1:40.000 foi considerada como de uso mais apropriado em mapas de suporte às estratégias de tomadas de decisões municipais e estaduais, diante da dimensão geográfica da área de estudo. A Tabela 1 apresenta as fontes das bases originais dos mapas temáticos em repositórios públicos oficiais. Assim, tomando-se como base esses mapeamentos realizados previamente em diferentes escalas, novos mapas temáticos foram elaborados: geologia, geomorfologia, solos, e somados a estes: declividade, vegetação e uso do solo. A atualização destas informações foi baseada em imagens de satélites mais recentes submetidas às técnicas de geoprocessamento para a reinterpretação das classes temáticas e apoio aos levantamentos de campo visando validação e a adequação à escala 1:40.000.

Após a efetivação dos mapeamentos temáticos foi realizada a análise dos fatores majoritariamente envolvidos nos processos erosivos através de modelo de análise multicritério aditivo, utilizando operadores de álgebras de mapas em ambiente SIG, base matemática para a elaboração dos mapas de erosão natural e suscetibilidade do solo à erosão. Assim, a análise de suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo incorporou os principais fatores do meio físico propostos no referencial teórico, incluindo alguns elementos geotécnicos (BASTOS *et al.*, 2000; SOARES *et al.*, 2018), preponderantes nos processos erosivos em ambiente de baixa intervenção antrópica, ou seja, aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, integrados àqueles de declividade, vegetacionais, de uso e cobertura do solo.

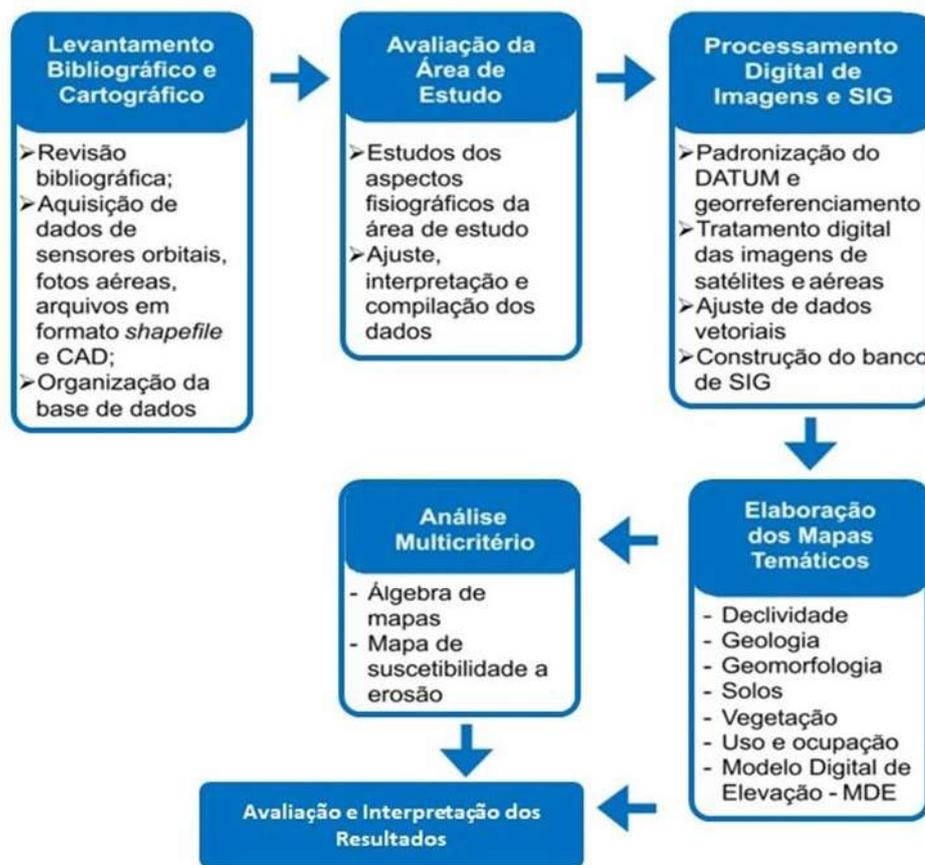


Figura 3 - Fluxograma metodológico executado para a área de estudo.

2.1 Elaboração dos Mapas Temáticos em Processamento Digital de Imagens (PDI) e Sistema de Informações Geográficas (SIG)

A elaboração dos mapas temáticos contou, inicialmente, com o levantamento cartográfico prévios nas escalas 1:100.000 e 1:250.000, selecionados em repositórios de dados digitais de instituições públicas (SGB/CPRM, EMBRAPA, IBGE, SETUR-RN e SIN-RN), como detalhado na Tabela 1. Com a verificação em campo de todos as variáveis naturais e antrópicas, todos os mapas foram readequados à escala 1:40.000 e recondicionados à mesma base cartográfica, com o datum SIRGAS 2000 e o Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 25 Sul, em ambiente SIG. As definições das classes temáticas, baseadas nas unidades homogêneas dos mapas preexistentes e considerando as alterações ocorridas nas feições morfológicas, foram estabelecidas a partir da análise e interpretação comparativa das imagens LANDSAT 8-OLI de 22/10/2015 e 29/08/2018 (Tabela 2).

Na melhoria da interpretação visual das unidades homogêneas e padrões de geologia, geomorfologia,

solos, vegetação e uso do solo foram empregadas as composições coloridas das bandas multiespectrais do LANDSAT 8-OLI no sistema de cor *Red-Green-Blue* (RGB) e no sistema híbrido de cores *Red-Green-Blue-Intensity* (RGBI), que permite a fusão entre as bandas multiespectrais e a banda pancromática, além de método índice e classificação supervisionada, como mostra a Tabela 3. O emprego de imagens híbridas RGBI garante a escala 1:40.000 pois se beneficiam da resolução espacial de 15m da banda pancromática, que destaca os atributos geométricos, melhor delineando as feições em superfície, enquanto as bandas multiespectrais realçam as informações espectrais diversas entre os alvos (TOBLER, 1987; LAZARIDOU; KARAGIANNI, 2016).

Para destacar as litologias, como por exemplo, os arenitos da Formação Barreiras, foi usado a combinação das bandas do visível, com associações do infravermelho próximo. Pois o óxido de ferro, mineral presente nos arenitos, tende a uma alta reflectância nas bandas do visível (FATIMA *et al.*, 2017), e quando associada com a banda do infravermelho próximo, auxilia no contraste com a vegetação e com os sedimentos das dunas que

são pobres em ferro (ALASTA, 2011; FRASER, 2007). O uso da banda do infravermelho próximo, se deu devido ser a faixa de frequência onde se observa a maior reflectância da clorofila, o que favorece o contraste das feições de vegetação sobre as demais feições compostas pelo solo, rocha e água (FERREIRA; SILVA, 2014; DUCART *et al.*, 2016).

A banda azul do visível, teve um papel importante para distinguir as feições das dunas móveis (FADHIL, 2013) holocênicas do arenito da Formação Barreiras, posto que esses depósitos eólicos por possuírem grande porosidade intergranular, a resposta espectral desses campos dunares obteve um alto contraste em relação aos afloramentos rochosos que constituem as falésias (DUCART *et al.*, 2016).

Tabela 1: Fontes das bases de dados digitais de repositórios públicos que foram combinados às imagens de satélite submetidas ao Processamento Digital de Imagens (PDI) na elaboração dos mapas temáticos atualizados da área de estudo.

Mapas Base	
Municipais	Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Malha geométrica dos limites dos municípios, estradas e localidade, reprocessados em ambiente SIG.
Mapas Temáticos	
Mapa de Declividade	Fonte: Dados vetoriais do projeto Polo Costa Dunas, com restituição aerofotogramétrica, da Secretaria do Estado do Turismo do RN (SETUR) e Secretaria de Estado da Infraestrutura (SIN), reprocessados em ambiente SIG.
Mapa de Geologia	Fonte: Dados vetoriais do Serviço Geológico do Brasil-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB-CPRM), Folha Natal SB.25-V-C-C, reprocessados em ambiente SIG.
Mapa de Geomorfologia	Fonte: Dados vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Folha SB-25, reprocessados em ambiente SIG.
Mapa de Solos	Fonte: Dados vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Folha SB-25, reprocessados em ambiente SIG.
Mapa de Vegetação	Imagem baseada no Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
Mapa de Uso e Cobertura do Solo	Fonte: Imagem digital submetida a Classificação Supervisionada

* Os mapas temáticos foram validados e revisados por meio de levantamentos de campo, baseados em imagens de sensoriamento remoto submetidas a realce espectral e espacial com técnicas de Processamento Digital de Imagens. As imagens empregadas foram do satélite LANDSAT 8-OLI, ajustadas para a área de trabalho, com imageamentos realizados em 22/10/2015 e 29/08/2018. Fonte: USGS (2018).

As características das imagens digitais do LANDSAT 8-OLI estão resumidas na Tabela 2. Tais imagens digitais atualizadas (imageamentos realizados em 22/10/2015 e 29/08/2018) foram obtidas no formato *GeoTIFF*, com o sistema referencial *datum* WGS-1984 e o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 25 Sul. As imagens foram georreferenciadas com precisão superior a 0,4 pixel (ROY *et al.*, 2014), valor considerado aceitável para precisão espacial das imagens LANDSAT 8-OLI (YANG *et al.*, 2015; ACHARYA *et al.*, 2016).

Para elaboração do mapa de vegetação foi aplicado

o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) obtido por meio da razão da diferença normalizada entre as reflectâncias das bandas do infravermelho próximo (0,85 – 0,88µm, na sigla IVP) e vermelho (0,63 - 0,68µm, na sigla R), conforme Roue *et al.* (1973). A variação dos valores do NDVI entre 1 a -1, obtida por meio da ferramenta *Imagery Analysis* (TOWNSHEND; JUSTICE, 1986; TUCKER; SELLERS, 1986), indicam que quanto mais próximo de 1 maior é a presença de vegetação saudável e quanto mais próximo de -1 maior é o indicativo de solos expostos e/ou afloramentos rochosos.

Tabela 2: Características das imagens do satélite LANDSAT 8-OLI utilizadas em auxílio à elaboração dos mapas temáticos.

Sensor	Bandas Espectrais#	Resolução Espacial	Data de Aquisição (dd/mm/aaaa)	Hora de Aquisição	Fonte
OLI	Bandas 1 a 8 (B1 a B8)	30 m (Bandas 1 a 7) 15 m (Banda 8)	22/10/2015	12:28:44	USGS
OLI	Bandas 1 a 8 (B1 a B8)	30 m (Bandas 1 a 7) 15 m (B8)	29/08/2018	12:49:48	USGS

Comprimentos de ondas das bandas multiespectrais (bandas 1 a 7) e pancromática (banda 8) do LANDSAT 8-OLI: Banda 1: 0,43 – 0,45; Banda 2: 0,450 – 0,51 ; Banda 3: 0,53 - 0,59 μm ; Banda 4: 0,64 - 0,67 μm ; Banda 5: 0,85 - 0,88 μm ; Banda 6: 1,57 - 1,65 μm ; Banda 7: 2,11 - 2,29 μm ; Banda 8: 0,50 - 0,68 μm .

Na preparação do mapa de uso e cobertura do solo foi utilizado o processo de classificação supervisionada baseado no algoritmo Máxima Verossimilhança, que utiliza a média e covariância das amostras computando a probabilidade de um pixel desconhecido pertencer a uma ou a outra classe (Tabela 3). Nesse procedimento, o algoritmo auxilia na identificação de pixels similares de modo automático no

restante da imagem, por meio da extração de amostras de pixels nessas imagens que correspondam à setores de unidades temáticas reconhecidas no terreno, com base nas propriedades espectrais dessas unidades (BUSMAN *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2016). A imagem resultante da classificação supervisionada representa quatro classes: afloramento rochoso, área urbana, área vegetada e solo exposto.

Tabela 3: Composições coloridas das bandas espectrais do LANDSAT 8-OLI nos sistemas de cores RGB e RGBI e tratadas por ferramentas de Processamento Digital de Imagens.

Sistemas de Cores	Composições Coloridas	NDVI	Classificação de Imagens
RGB	R(B5) G(B4) B(B3) R(B6) G(B5) B(B2) R(B7) G(B6) B(B4)	$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)}$	Classificação Supervisionada por Máxima Verossimilhança
RGBI	R(B5) G(B4) B(B3) I(B8) R(B6) G(B5) B(B2) I(B8)		

RGB = Red-Green-Blue; RGBI = Red-Green-Blue-Intensity; NDVI = Normalized Difference Vegetation Index; IVP = Infravermelho Próximo; R = Red.

Os resultados obtidos para o indicador temático declividade indicam o predomínio de cinco classes (Figura 4a, Tabela 4). Aquelas com intervalos entre 0° – 2,5° e 2,5° – 5°, consideradas de muito baixa e baixa declividades, respectivamente, estão situadas nas porções centrais e oeste da área de estudo sobre o Tabuleiro Costeiro. As classes entre 5° – 10° e 10° – 15° demonstram o padrão retilíneo, de direção geral NW, a curvilíneo que marcam a geometria de dunas móveis e fixas. As declividades entre 15° – >32° ocorrem marcadamente no setor de dunas do Morro do Careca (a sul da Praia de Ponta Negra) e na extensão das falésias marinhas ativas da Barreira do Inferno, nas porções nordeste e leste da área de estudo, respectivamente. O realce do relevo e,

consequentemente, das declividades, é realçado pelo sombreamento associados às diferentes colorações nas unidades geológico-geomorfológicas por meio das composições coloridas no sistema de cores híbrido: imagens R(B5) G(B4) B(B3) I(B8) e R(B6) G(B5) B(B2) I(B8).

A distinção das classes do mapa geológico, geomorfológico, de solos, de vegetação, de uso e cobertura do solo foram realçadas pelas imagens digitais tratadas em PDI e são delineadas pelas diferenças texturais descritas pelo relevo (altimetria, declividade e rugosidade na superfície), bem destacadas nas imagens híbridas em RGBI, e nas colorações que denotam as diferenças espectrais indicadas nas três imagens coloridas R(B5) G(B4) B(B3), R(B5) G(B4) B(B3) e R(B5) G(B4) B(B3).

No mapa de geologia (Figura 4b), os depósitos litorâneos eólicos vegetados (dunas fixadas por vegetação) predominam em 83% do total da área de estudo (Tabela 4), seguido pelos depósitos litorâneos de praias arenosas e dunas móveis, depósitos aluvionares em canais fluviais, afloramentos das rochas sedimentares da Formação Barreiras na proximidade desses canais e nas falésias marinhas da Barreira do Inferno. As unidades geológicas são distintas nas composições coloridas em contatos abruptos entre afloramentos rochosos, sedimentos arenosos nas dunas móveis e fixas, com cobertura vegetal (BARRETO *et al.*, 2004).

Igualmente, nas unidades geomorfológicas (Figura 4c), as dunas fixas (relacionados aos depósitos litorâneos eólicos vegetados) predominam sobre o Tabuleiro Costeiro perfazendo o equivalente à 16,8km² da área estudo (Tabela 4). Com 2,65km² de representatividade tem-se o sistema composto pelas dunas móveis e os depósitos de praias. O Tabuleiro Costeiro é limitado diretamente junto à linha de costa pelas falésias da Barreira do Inferno, com desnivelamentos superiores a 20m (CPRM, 2010), além de ser recortado pela planície de inundação fluvial.

Para o mapa de solos são definidos três classes (Figura 4d), sendo a classe Neossolo Quartzarênico a mais representativa com 18,69km², correspondente a 93% da área de estudo (Tabela 4). Esse solo tem sua formação ligada à deposição de areias marinhas eutróficas (areias do pós-praia e campos de dunas) sobre as quais se desenvolve uma fina camada de solo que suporta a cobertura vegetal típica desse setor, como a restinga e a vegetação de Tabuleiro Costeiro associada ao bioma Mata Atlântica (SANTOS *et al.*, 2018; CPRM, 2010). Os Argissolos, segunda classe representativa com 5% de área, estão diretamente associados ao Tabuleiro Costeiro caracterizados pelos depósitos sedimentares da Formação Barreiras (CPRM, 2010).

Por estar o CLBI sob a proteção jurisdicional de ocupação, a vegetação da área de estudo encontra-se ainda em sua formação pioneira, com espécies preservadas do bioma Mata Atlântica e de restinga (Figura 4e). Por meio das imagens NDVI foram definidas cinco classes vegetacionais: alto vigor vegetativo, médio vigor vegetativo, baixo vigor vegetativo, baixíssimo vigor vegetativo e ausência de vegetação. Assim, as classes de baixo, médio e alto vigor vegetativo que

representam as vegetações herbácea, arbustiva e arborea (IBGE, 2012), correspondem à 17,9 km² da área de estudo (Tabela 4).

No mapa de uso e cobertura do solo (Figura 4f) a unidade com maior predomínio é a área vegetada, com 84% (16,76 km²), seguido do solo exposto com 5% (1,89 km²) e área urbanizada, que correspondem predominantemente às instalações operacionais do CLBI (Tabela 4).

2.2 Elaboração do Mapa de Suscetibilidade do Solo à Erosão

2.2.1 Atribuição de Notas às Classes dos Indicadores Temáticos

Nos planejamentos de uso agrícola do solo e de risco ambiental têm sido empregados, usualmente, o mapeamento digital baseado em métodos multicritérios aditivos com média ponderada baseados em ambiente SIG (SILVA; ZAIDAN, 2004; YESILNACAR *et al.*, 2012; VALLADARES *et al.*, 2012; BUSMAN *et al.*, 2016). Isso decorre da relevância dos atributos variáveis, dados oriundos de diferentes fontes de coleta (vetoriais, matriciais e alfanuméricos), usadas na análise da suscetibilidade do solo à erosão serem expressas e relacionadas espacialmente, frequentemente por conjunto de operadores de álgebra de mapas, permitindo a análise integrada em domínio cartográfico (ROSA, 2011).

O potencial erosivo do solo e a intensidade como se manifesta deriva de variáveis como: a intensidade e duração das chuvas, as características topográficas do terreno (em especial a declividade), as condições geológico-geomorfológicas, o tipo de solo, o recobrimento vegetal, o uso e cobertura do solo. Os atributos de maior influência na erosão do solo estão relacionados à resistência exercida pelo tipo de substrato (solo e/ou rocha) à ação erosiva promovida pela água e/ou vento, à capacidade do substrato em resistir ao à capacidade de infiltração da água no substrato, ao arranque e arrasto de partículas, além da quantidade e do tipo do recobrimento vegetal (AHMED, 2009). Assim, para a área de estudo foram definidas as seguintes variáveis temáticas para integração, em ambiente SIG, na análise de suscetibilidade do solo à erosão: declividade, geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso e cobertura do solo.

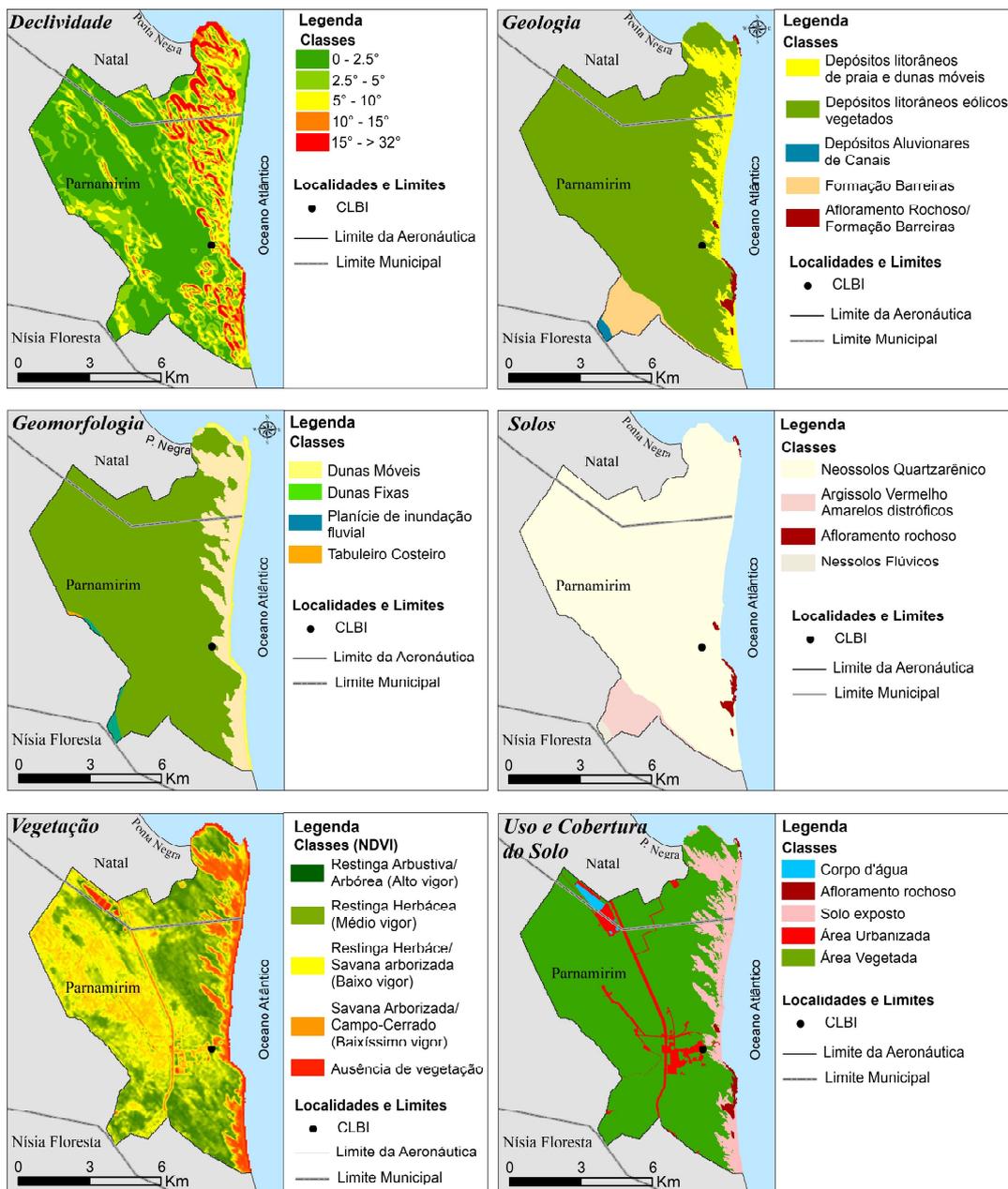


Figura 4 - Mapas temáticos com a classificação das unidades temáticas definidas para compor a malha matricial de notas e pesos empregadas na confecção do mapa de suscetibilidade do solo à erosão nas falésias da Barreira do Inferno e adjacências do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno.

As metodologias propostas por Crepani *et al.* (2001), Valladares *et al.* (2012), Silva (2014) e Neves (2015) foram consideradas, conforme hierarquização definida do menor ao maior potencial erosivo (Tabela 5).

Considerando-se que os indicadores apresentam diferentes graus de importância no cálculo da suscetibilidade, optou-se por estabelecer pesos de compensação que indicam a importância de um indicador em relação aos demais, atribuindo assim, a soma total de 1 (100%) e notas de 1 a 5 para cada classe temática (TAGLIANI,

2003). Os pesos para cada indicador temático adotaram a importância que desempenha na efetividade do processo erosivo, a partir de critérios consolidados no conhecimento científico do comportamento desses indicadores frente ao desenvolvimento da erosão. As notas de 1 a 5 atribuídas a cada classe indicaram o seu comportamento na suscetibilidade do solo à erosão, desde muito baixa, baixa, média, alta e muito alta (Tabela 5), e seguiram a proposta de Crepani *et al.* (2001), após adaptação às características gerais da área de estudo.

Tabela 4: Classes de cada mapa temático com respectivas áreas (km²) e equivalentes percentuais referentes à totalidade da área de estudo.

Classes	Área (km ²)	Área (%)
Mapa de Declividade		
0° - 2.5°	8,17	47
2.5° - 5°	3,87	22
5° - 10°	3,39	20
10° - 15°	1,23	7,0
15° - >32°	0,75	4,0
Mapa de Geologia		
Depósitos litorâneos eólicos vegetados	16,81	83
Depósitos litorâneos de praia e dunas móveis	1,89	10
Formação Barreiras	1,01	5,0
Afloramento rochoso nas falésias da Formação Barreiras	0,12	1,5
Depósitos aluvionares de canais	0,08	0,5
Mapa de Geomorfologia		
Dunas fixas	16,83	85
Dunas móveis	2,65	9,0
Tabuleiro costeiro	0,02	5,0
Praia	0,31	0,6
Planície de inundação fluvial	0,16	0,4
Mapa de Solos		
Neossolos Quartzarênicos	18,69	93,5
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	1,01	5,0
Afloramento rochoso	0,12	1,0
Neossolo Flúvico	0,08	0,5
Mapa de Vegetação (Imagem NDVI)		
Alto vigor de vegetação	5,05	25
Médio vigor de vegetação	4,59	23
Baixo vigor de vegetação	4,90	24
Baixíssimo vigor de vegetação	3,35	17
Ausência de vegetação	2,10	11
Mapa de Uso e Cobertura do Solo		
Área Vegetada	16,76	84
Solo exposto	1,89	9,0
Área Urbanizada	1,02	5,0
Lagoa de tratamento de esgoto	0,11	1,0
Afloramento rochoso	0,12	1,0

As maiores influências erosivas foram estimadas aos terrenos com maiores declividade, aquelas com maiores rampas de escoamento superficial. Assim, foi atribuída nota 1 para as declividades consideradas muito

baixas, de 0° a 2,5°, nota 2 para as declividades baixas, de 2,5° a 5°, nota 3 para as declividades médias, de 5° a 10°, nota 4 para as declividades altas, de 10° a 15° e nota 5 para as declividades muito altas, superiores a 32° (Tabela 5).

Nas unidades geológicas tem-se a menor suscetibilidade à erosão conferida aos afloramentos de rochas sedimentares da Formação Barreiras, especialmente devido ao maior grau de cimentação entre as partículas do que nos solos e demais depósitos sedimentares (BARRETO *et al.*, 2004; ARAÚJO *et al.*, 2006; MARTINS *et al.*, 2017). Tal condição confere maior resistência ao material (SANTOS JR. *et al.*, 2008; SEVERO, 2011; TAQUEZ, 2017) e, isto posto, foi estabelecida para a Formação Barreiras a nota 1 nos afloramentos rochosos nas proximidades das falésias ativas e nota 2 quando as rochas da Formação Barreiras estiverem em setores planos e sobrepostas por fino horizonte de solo. Os depósitos aluvionares de canais fluviais receberam nota 3 (média) por serem suscetíveis à erosão devido ao desmatamento e subsequente ocupação desses setores, por vezes muito próximas aos canais fluviais, para fins agrícolas. Os depósitos litorâneos eólicos vegetados com nota 4 (alta), nos casos em que ocorrem a supressão vegetal e exposição direta dos sedimentos à ação intempérica, e os depósitos litorâneos de praia e dunas móveis, recebendo a nota 5 (muito alta), por serem de fácil remoção e transporte (Tabela 5).

Nas unidades geomorfológicas, influenciadoras das propriedades do relevo na área de estudo, o Tabuleiro Costeiro recebeu nota 1 (muito baixa), composto por terrenos de baixa declividade formados pelas rochas sedimentares da Formação Barreiras ou por depósitos litorâneos eólicos vegetados. A planície de inundação fluvial recebeu a nota 2 (baixa), as dunas fixas recebeu a nota 3 (média), as dunas móveis a nota 4 (alta) e à praia foi conferida a nota 5 (muito alta), dada ao potencial erosivo, diante de impactos diretos das chuvas, ventos e frentes de ondas.

Devido à ausência ou baixa espessura de horizontes de solos, os afloramentos rochosos da Formação Barreiras demonstram maior resistência ao processo erosivo (TAQUEZ, 2017), recebendo a nota 1 (muito baixa). A classe de solos Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos recebeu a nota 3 (média), têm natureza pouco coesa em superfície e menor permeabilidade nos horizontes subsuperficiais e, por esse motivo, são pouco mais susceptíveis à erosão, ocorrendo em baixa representatividade de recobrimento na área de estudo. Aos Neossolos Flúvicos foi atribuída a nota 4 (alta) e aos Neossolos Quartzarênicos, que recobrem mais de 90% da área estudada, recebeu a nota 5 (muito alta).

Para as classes de cobertura vegetal reconhecidas das imagens do NDVI, que denota sensibilidade à quantidade e à condição da vegetação verde, as classes de alto vigor vegetativo foi considerada com a nota 1 (muito baixo), de médio vigor vegetativo com a nota 2 (baixo), de baixo vigor vegetativo com a nota 3 (médio), de baixíssimo vigor vegetativo com a nota 4 (alta) e os setores onde ocorre a ausência de vegetação foram considerados com a nota 5 (muito alta).

Para o indicador temático uso e cobertura do solo, aos afloramentos rochosos foi alocada a nota 1 (muito baixa), à área urbanizada a nota 2 (baixa), à área vegetada a nota 3 (média) e às áreas de solo exposto a nota 5 (muito alta), seguindo a tendência de maior suscetibilidade a erosão (Tabela 5). Não foi considerada a lagoa de tratamento de efluentes.

Os mapas de indicadores temáticos reclassificados conforme as notas atribuídas para cada classe estão apresentadas na Figura 5, como imagens com pixel de 30m, para subsequente elaboração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão com operadores de álgebras de mapas em SIG.

2.2.2 Álgebra de Mapas

Na hierarquização pesos foram atribuídas aos mapas de declividade e de uso e cobertura do solo as maiores relevâncias e, distintamente, pesos de 0,25 (ou 25%) a cada um, como mostra a Tabela 5. Portanto, tais indicadores temáticos são considerados os principais influenciadores nos processos da erosão na área de estudo. Dada à baixa antropização, a declividade assume relevância, devido ao favorecimento dado ao escoamento superficial, sobretudo onde não ocorra cobertura do solo significativamente marcada por cobertura vegetal, que promova a proteção direta do solo ao impacto da chuva/vento e a dispersão da água antes que alcance o solo exposto.

Ao mapa de solo foi atribuído o peso de 0,15 (15%) visto que, apesar de ser o elemento diretamente afetado pelo processo erosivo, as características e distribuição na área de estudo não apresentam grande variação. O mapa de vegetação também recebeu o peso de 0,15 (15%) diante da importância de suas classes, mas já consideradas no mapa de uso e cobertura do solo.

À distribuição das unidades geológicas e geomorfológicas foram consideradas com peso de 0,10 (10%),

dada à reduzida exposição e ao tipo de afloramentos rochosos (rochas sedimentares da Formação Barreiras), com conspícuo desenvolvimento de coberturas com Neossolos Quartzarênicos, depósitos arenosos variados e ampla cobertura vegetal.

Na análise da suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo considerou-se a integração dos indicadores temáticos conforme a Equação 1:

$$ISE = ([Dm] * 0,25) + ([G] * 0,10) + ([Gm] * 0,10) + ([S] * 0,15) + ([NDVI] * 0,15) + ([UC] * 0,25)$$

(Equação 1)

onde: *ISE* = Índice de Suscetibilidade Erosiva; *Dm* = Declividade; *G* = Geologia; *Gm* = Geomorfologia; *S* = Solos; *NDVI* = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; *UC* = Uso e Cobertura do Solo.

Tabela 5: Indicadores temáticos, classes temáticas, notas (1 a 5) e pesos (0 - 1) referentes a cada critério para o mapa de suscetibilidade à erosão do solo.

Indicadores Temáticos	Classes	Notas (1 - 5)*	Pesos
Declividade	0 - 2,5°	1	0,25
	2,5° - 5°	2	
	5° - 10°	3	
	10° - 15°	4	
	15° - > 32°	5	
Geologia	Afloramento rochoso nas falésias da Formação Barreiras	1	0,10
	Formação Barreiras	2	
	Depósitos aluvionares de canais	3	
	Depósitos litorâneos eólicos vegetados	4	
	Depósitos litorâneos de praia e dunas móveis	5	
Geomorfologia	Tabuleiro costeiro	1	0,10
	Planície de inundação fluvial	2	
	Dunas fixas	3	
	Dunas móveis	4	
	Praia	5	
Solos	Afloramento rochoso	1	0,15
	Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	4	
	Neossolo Flúvico	3	
	Neossolo Quartzarênico	5	
Vegetação	Alto vigor de vegetação	1	0,15
	Médio vigor de vegetação	2	
	Baixo vigor de vegetação	3	
	Baixíssimo vigor de vegetação	4	
	Ausência de vegetação	5	
Uso e Cobertura do solo	Corpo d'água (Lagoa de tratamento de efluentes)	0	0,25

* As notas de 1 a 5 atribuídas a cada classe correspondem às classes desde muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente.

3. Resultados e Discussões

A Figura 5 indica que as classes referidas como de muito alta influência na suscetibilidade à erosão do solo na área de estudo estão fortemente presentes nos mapas de indicadores temáticos. No mapa de solo ocorre o maior percentual, superior a 90% da área total, indicando que os tipos de solos, da classe Neossolo Quartzarênico, são muito frágeis aos processos erosivos por serem originados de depósitos arenosos, em horizontes de pouca evolução e espessura (inferiores a 2,0m), com a textura areia, de teor de argilas de baixa atividade inferior a 15% em associação com óxidos-hidróxidos de Fe e Al, e baixo teor em nutrientes (BONNA, 2011).

No mapa de geologia, a classe alta tem destaque

nos depósitos litorâneos eólicos vegetados. A classe média é representativa nos indicadores temáticos de geomorfologia e uso e cobertura do solo correlacionadas às classes dunas fixas e sua correspondente área vegetada, respectivamente, devido à maior presença de vegetação arbórea e arbustiva (IBGE, 2012). A classe baixa possui a menor participação nos resultados da reclassificação, marcando as áreas ocupadas e os contatos com a vegetação arbórea e arbustiva, em setores com declividade entre 2,5° - 5°, e nos ambientes de planície de inundação fluvial e depósitos aluvionares de canais. A classe muito baixa de suscetibilidade erosiva acompanha os setores com declividades de 0° - 2,5°, sobre as classes de alto vigor vegetativo, sobre os afloramentos rochosos e sobre algumas infraestruturas instaladas.

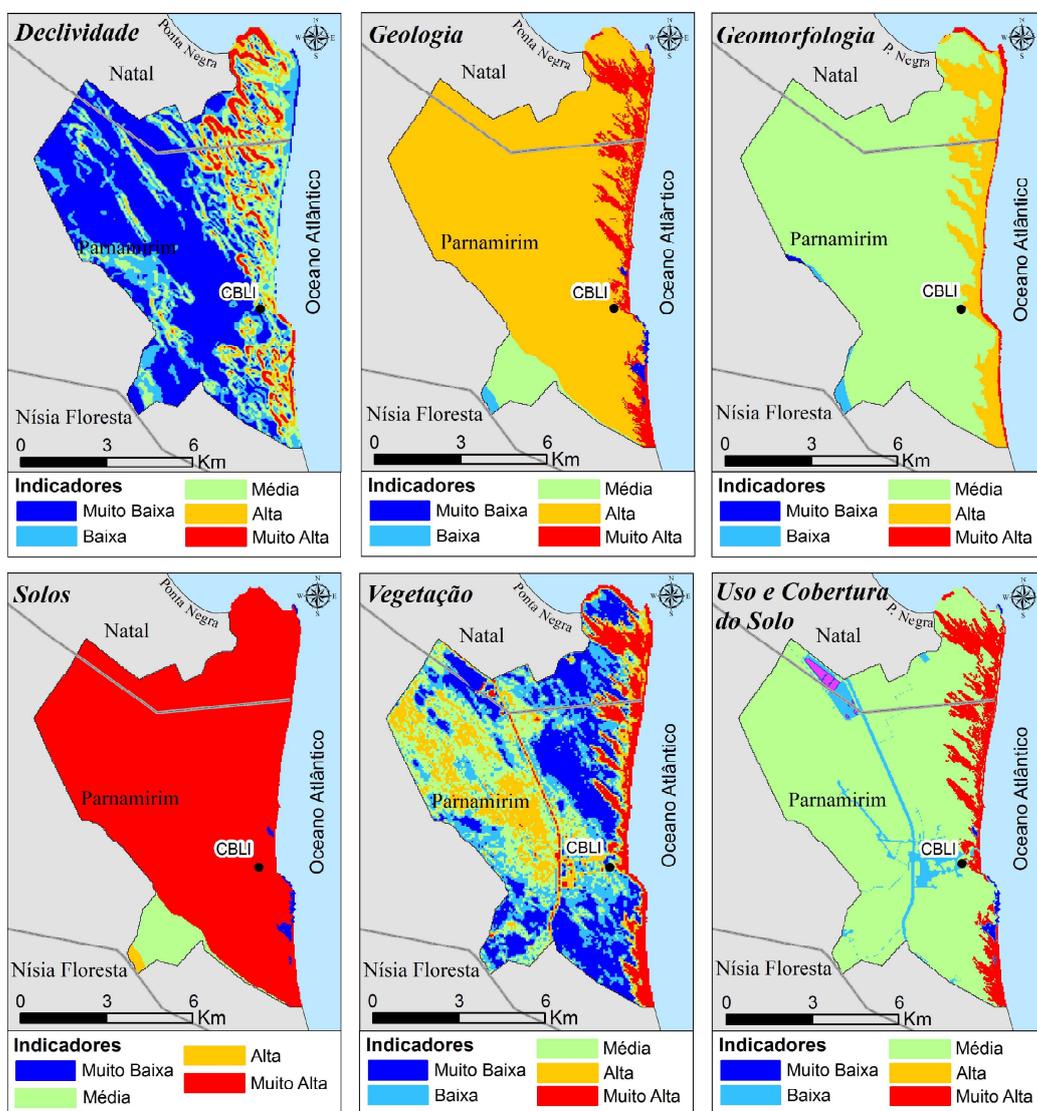


Figura 5 - Mapas com as notas de 1 a 5 atribuídas a cada uma das classes dos indicadores temáticos, indicando o seu comportamento na suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, desde muito baixa (nota 1), baixa (nota 2), média (nota 3), alta (nota 4) e muito alta (nota 5).

Na Figura 6 é apresentado o mapa de suscetibilidade do solo à erosão para a área de estudo resultante dos valores numéricos obtidos na álgebra de mapas (Tabela 6) e que foram expressos em indicadores qualitativos agrupados em cinco classes de suscetibilidades à erosão: muito baixa (azul escuro), baixa (azul claro), média (verde), alta (laranja) e muito alta (vermelho). Nas estimativas envolvendo os indicadores e classes temáticas, com respectivas notas e pesos, foi utilizado algoritmo classificador sobre os mapas temáticos em estrutura matricial e o pixel como unidade territorial. A influência de cada variável considerada foi estimada no somatório das classes com as notas relativas, multiplicado pelos pesos dos indicadores temáticos em cada unidade territorial.

Constata-se o predomínio de suscetibilidades à erosão entre as classes baixa e média, que somadas representam 64% do total da a área de estudo, seguida da classe muito baixa com 14%. As classes com alta suscetibilidade do solo à erosão ocorrem em 13% e a classe muito alta representa 9% da totalidade da área de estudo. Tais resultados decorrem, notadamente, pelas feições

características do terreno, ou seja, nas inter-relações entre os tipos de solos/rochas sedimentares, o relevo local, o clima e a cobertura vegetal. O tipo de uso e cobertura do solo resultou em menores potenciais de erosão também relativos às áreas vegetadas, consequentemente, demonstrando maiores potenciais erosivos nas áreas descobertas, que correspondem basicamente às dunas móveis e afloramentos rochosos. Contudo, é marcante a relevância do predomínio da vegetação natural localmente preservada e recobrendo os limites territoriais do CLBI, que atua como anteparo ao impacto direto das chuvas nos solos e no arrefecimento na energia de escoamento de partículas pelo fluxo da água em enxurradas, fatores essenciais no desenvolvimento de processos erosivos. Destaca-se ainda a fragilidade erosiva dos Neossolos Quartzarênicos, predominantes na área de estudo, quanto à natureza composicional e textural, e o controle morfológico dos campos de dunas e falésias que marcam as maiores variações na declividade. Portanto, corrobora-se como fundamental a manutenção das coberturas vegetacionais para a preservação do solo face ao potencial erosivo das áreas expostas.

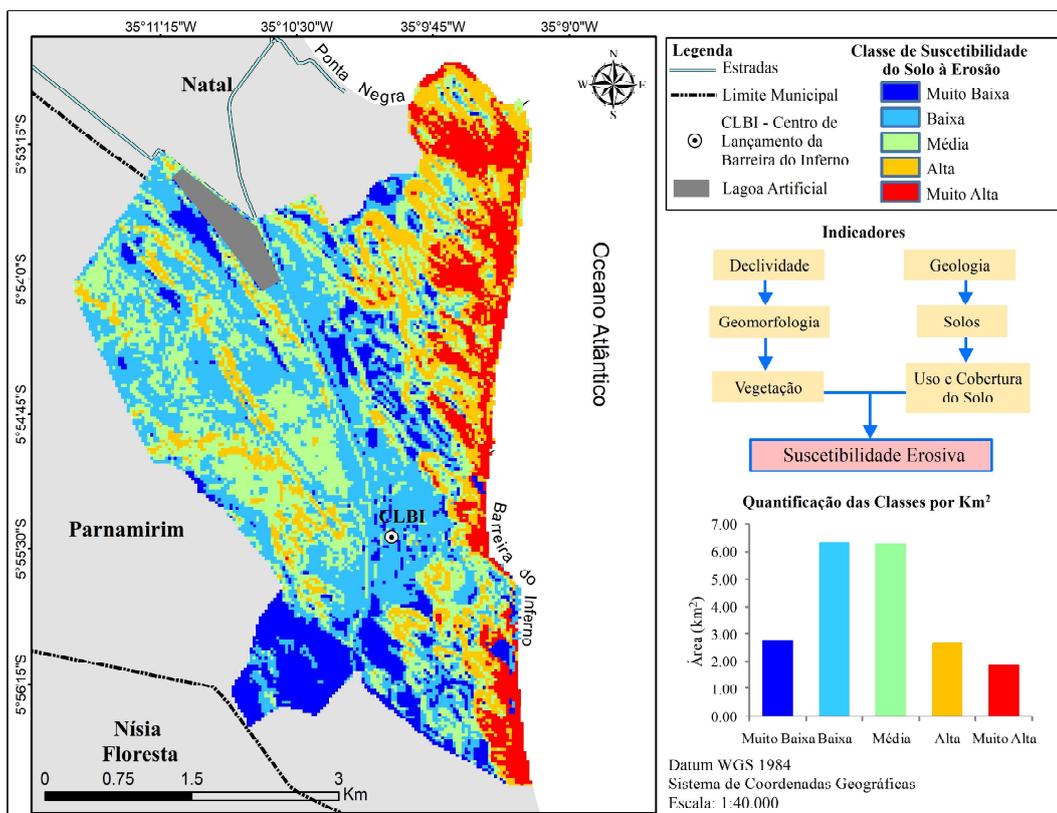


Figura 6 - Mapa de suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo.

Tabela 6: Classes do mapa de suscetibilidade do solo à erosão com respectivas áreas (km²) e equivalentes percentuais referentes à totalidade da área de estudo.

Classes	Área (km ²)	Área (%)
Muito Baixa	2,72	14
Baixa	6,30	32
Média	6,25	32
Alta	2,65	13
Muito Alta	1,82	9
Total em Área	19,76	100

A classe de muito baixa suscetibilidade do solo à erosão concentra-se na porção sul da área de estudo (Figura 7, Setor I) e também nas porções centro e norte, às margens da lagoa de tratamento de efluentes (Figura 7, Setor II), sobre relevo de morfologia plana e com proeminente cobertura vegetal arbórea e arbustiva. A porção **sul** tem declividades dominantes entre 0° - 2,5° e vigor vegetativo alto, assinala-

da por vegetação densa que se desenvolve sobre Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos no entorno de sistemas fluviais. Nesta porção são solos pouco evoluídos, pouco coesos, formados a partir de depósitos aluvionares e de materiais de origem diversas, mas com melhor fertilidade natural quando comparados às areias quartzosas predominantes nos demais setores da área de estudo.

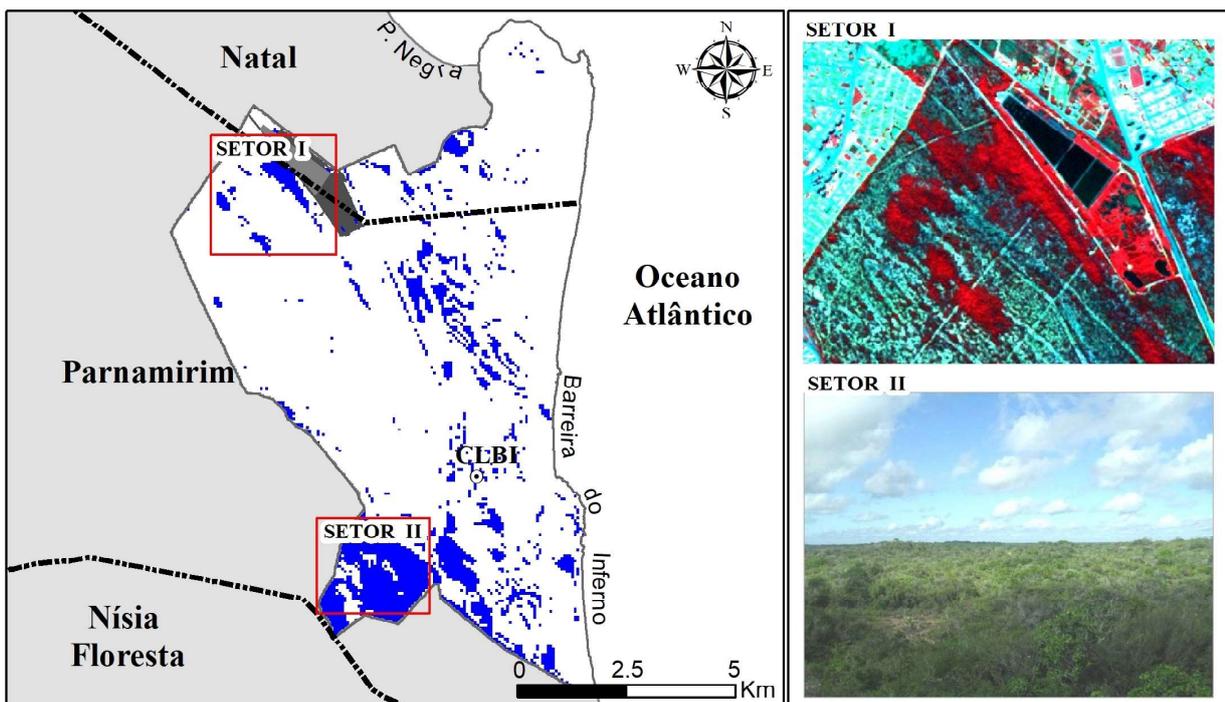


Figura 7 - Distribuição da classe de muito baixa suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, com vistas panorâmicas de setores específicos. Setor I de alto vigor vegetativo na porção noroeste do CLBI, nas proximidades da lagoa de tratamento de efluentes. Setor II na porção sul em terrenos planos e com marcada presença de densa vegetação arbórea e arbustiva.

A classe de baixa suscetibilidade do solo à erosão perfaz 32% da área de estudo e distribui-se pelas porções oeste e central, terrenos com declividades entre 0° a 2,5° e domínio de vegetação arbustiva e herbácea, de vigor vegetativo médio a baixo, onde estão as principais insta-

lações operacionais do CLBI (Figura 8, Setor III). Nesse setor, os Neossolos Quartzarênicos são **porosos** e bem drenados, resultando em melhor tendência à infiltração de águas pluviais, menor escoamento superficial e, por conseguinte, maior capacidade de participação na recarga

do aquífero Dunas – Barreiras (ARAÚJO *et al.*, 2006).

A distribuição da classe de média suscetibilidade do solo, igualmente com 32% da área de estudo, concentra-se na porção centro-oeste do CLBI, em setores com declividades entre 5° - 10° e cobertura vegetal variando de baixo a baixíssimo vigor vegetativo (Figura 9, Setor

IV). Também definem os limites dos corredores de deflação (Figura 9, Setor V), formas erosionais comuns em dunas costeiras, balizados por declividades entre 5° - 15° e vegetação arbustiva, sugerindo que com o aumento da declividade e a redução da cobertura vegetal ocorre o incremento da suscetibilidade do solo à erosão.

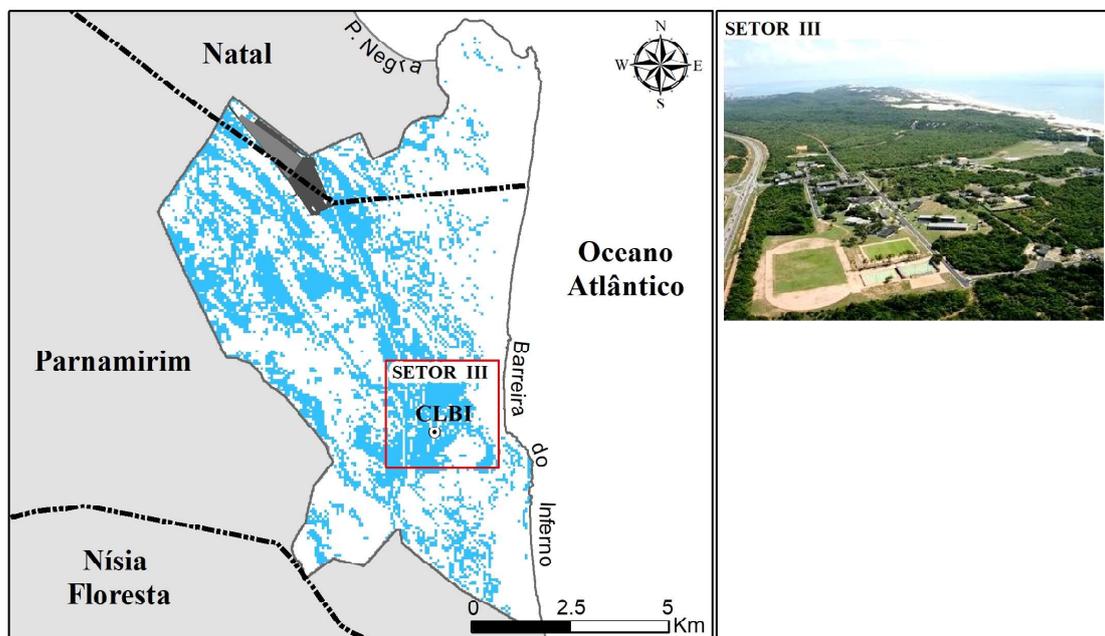


Figura 8 - Distribuição da classe de baixa suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, com vistas panorâmicas de setores específicos. Setor III no entorno das instalações operacionais da CLBI, em terrenos planos e de vegetação arbustiva e herbácea.

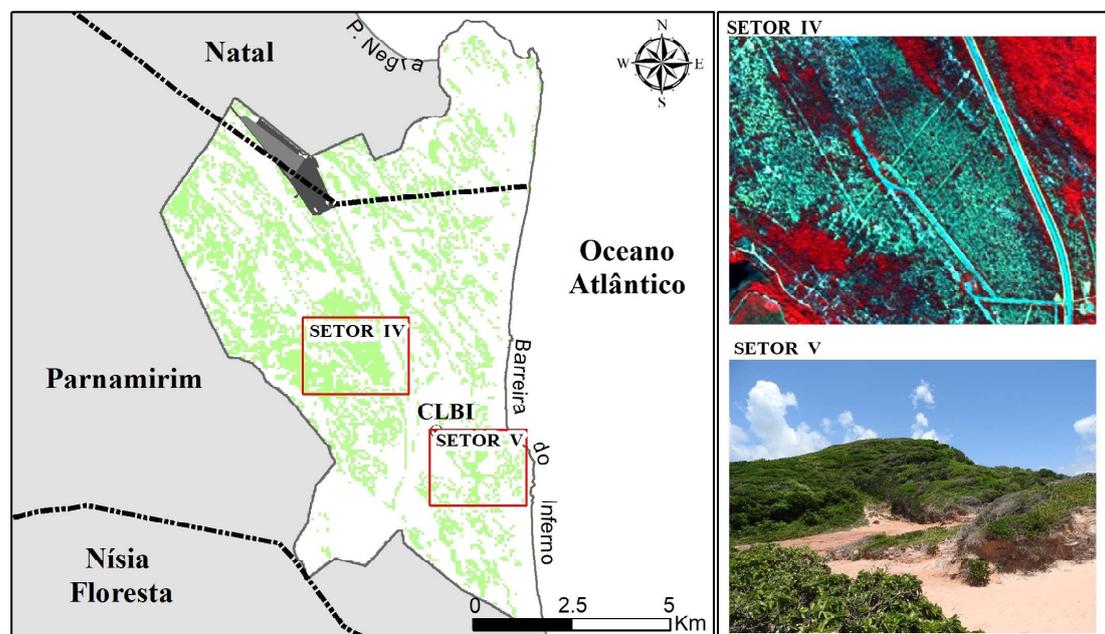


Figura 9 - Distribuição da classe de média suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, com vistas panorâmicas de setores específicos. Setor IV em terrenos com declividades entre 5° - 10° e cobertura vegetal de baixo a baixíssimo vigor vegetativo. Setor V mostra os corredores de deflação com presença de vegetação arbustiva no contorno.

A classe de alta suscetibilidade do solo à erosão delinea, principalmente, as classes de maiores declividades, de $10^{\circ} - 15^{\circ}$ e $15^{\circ} - >32^{\circ}$, em locais caracterizados pelo alto vigor vegetativo, ou seja, vegetação densa do tipo arbórea de alto porte (Figura 10, Setores VI e VII). Os terrenos da porção nordeste são os mais

elevados da área de estudo, atingindo 105m de altitude, e a cobertura vegetacional recobre os depósitos litorâneos eólicos até os limites da praia. O grau de suscetibilidade à erosão do solo sofre considerável aumento, sobretudo, em decorrência desses setores encontrarem-se limítrofes à zona de ocupação urbana da Praia de Ponta Negra.

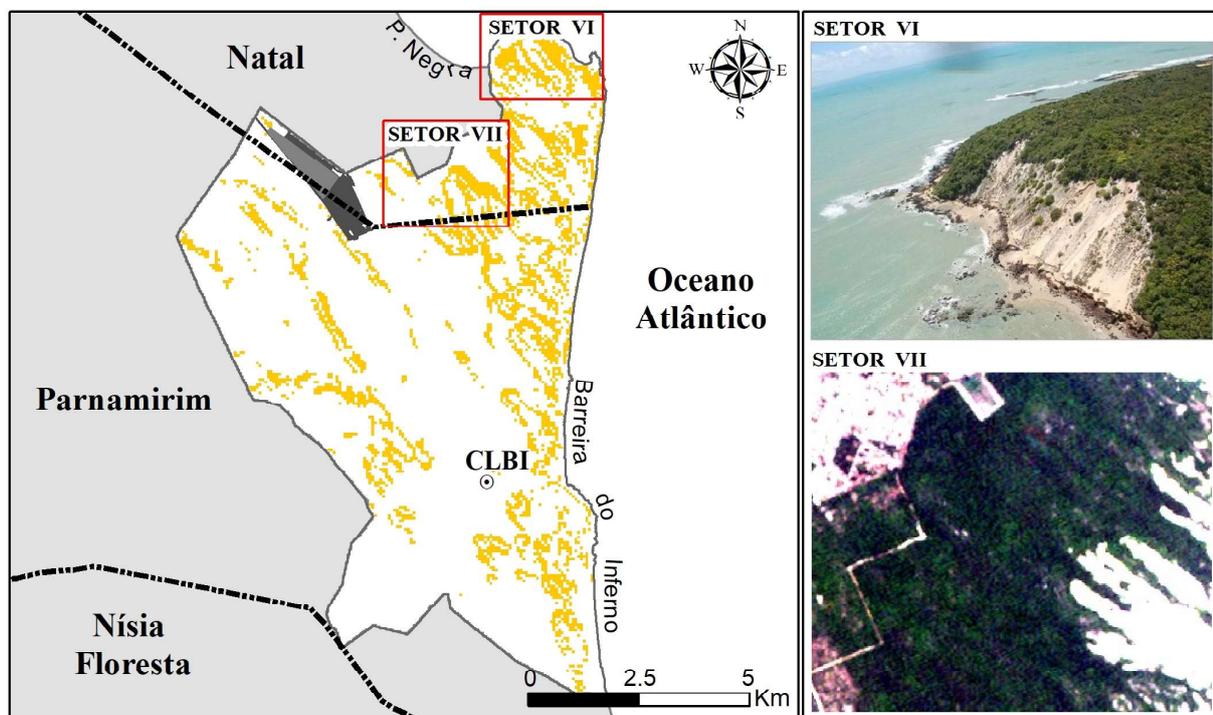


Figura 10 - Distribuição da classe de alta suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, com vistas panorâmicas de setores específicos. Setor VI da porção nordeste do CLBI, mostra declividades elevadas e vegetação densa próximo aos limites das falésias e praias. Setor VII mostra as declividades acentuadas e a cobertura vegetacional sobre os campos de dunas.

A classe de muito alta suscetibilidade à erosão demarca poucos setores na porção leste da área de estudo, satisfazendo apenas a 9% da distribuição total (Figura 11). Tratam-se, designadamente, dos setores dominados pelas morfologias de campos de dunas móveis (Figura 11, Setor VIII) e da faixa de praia (Figura 11, Setor IX), com ausência da cobertura vegetacional, declividade alta a muito alta e conspícua exposição de areias quartzosas às intempéries, fatores que potencializam a suscetibilidade erosiva, refletindo nos rótulos altos dessa classe no mapa de suscetibilidade do solo à erosão, decorrente da relevância dos indicadores e classes temáticas que, por isso, receberam maiores pesos e notas.

A Figura 11 elucidada que esses setores classificados como de muita alta suscetibilidade do solo à erosão, os

campos de dunas móveis ainda interligados à faixa de praia (Figura 11, Setores VIII e IX), categoricamente restritos em contorno por dunas fixas, falésias e, sobretudo, sem atividades de uso e ocupação antrópica, têm nessa perspectiva de **proteção** jurisdicional dada pela presença do CLBI a principal constatação de preservação ambiental, comparativamente a outros do litoral oriental do RN, diante da fragilidade natural ao processo erosivo. Os resultados conferem que o reconhecimento da distribuição e correlação entre a cobertura vegetacional e a declividade é decisivo na determinação dos setores mais propensos às perdas de solo na área de estudo. Tal confirmação *in loco* está retratada, especialmente, nos setores desprotegidos de vegetação, como os campos de duna móveis e afloramentos rochosos, incluindo parte das falésias da Barreira do Inferno que

mostram a manifestação de processos erosivos do tipo fluxo laminar, sulcos e ravinas profundas. Devido ao baixo uso antrópico nos limites do CLBI, os resultados não são expressivos para as pressões sobre o potencial erosivo exercidas pelas áreas urbanizadas. Contudo, nota-se incremento de atividades antrópicas e significativo aumento na ocupação e adensamento em áreas urbanizadas nas circunvizinhanças do CLBI.

A preservação dos campos de dunas móveis e fixas e a sustentação de suas interligações diretas com as faixas de praias são imprescindíveis na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas costeiros submetidos aos processos erosivos com forças motrizes de alta intensidade eólicas e hidrodinâmicas (ondas, marés, correntes), como é o caso do litoral oriental do RN.

Portanto, garantir a preservação dos campos de dunas (móveis e fixas) e praias nesses setores do CLBI é fundamental na manutenção do equilíbrio da orla ma-

rítima do entorno, envolvendo os municípios limítrofes e, especificamente, a Praia de Ponta Negra e feições como o Morro do Careca. Tais campos de dunas móveis, formados por grãos de areia removidos da face de praia e depositados costa adentro pela ação de ventos, no sentido dominante de SE para NW, desempenham papel essencial na recarga do aquífero Dunas-Barreiras, alimentam com sedimentos a deriva litorânea entre as praias do entorno, no sentido dominante de S para N, e garantem a singularidade estética do Morro do Careca fornecendo os sedimentos que equilibram o balanço sedimentar no rigoroso processo erosivo instalado nesse trecho do litoral oriental do RN (AMARO *et al.*, 2012, AMARO *et al.*, 2015). Logo, alterações antropogênicas implementadas sobre as variáveis temáticas naturais avaliadas nesse artigo sem que se mantenham garantias de proteção a esses setores representam alto risco à perda de solos à erosão e ao desequilíbrio ecossistêmico dessa orla marítima.

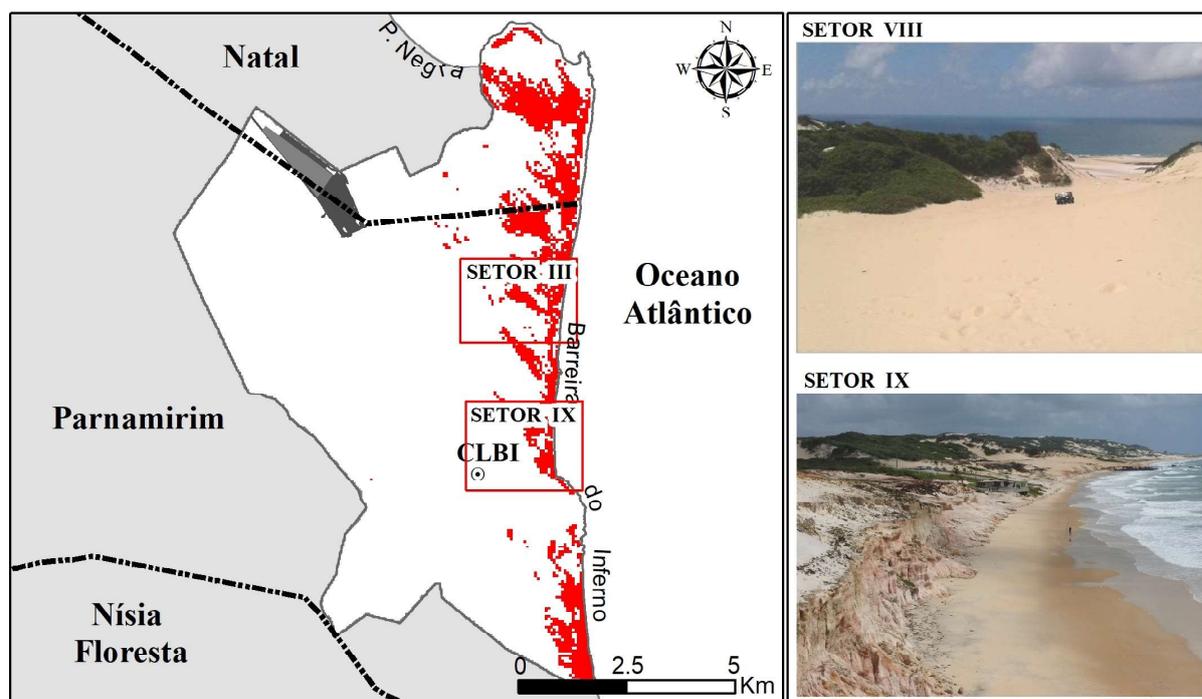


Figura 11 - Distribuição da classe de muito alta suscetibilidade do solo à erosão na área de estudo, com vistas panorâmicas de setores específicos. Setores VIII e IX mostram os campos de dunas móveis ainda enraizados na faixa de praia ao longo da porção leste do CLBI.

4. Conclusões

Para a área de estudo, contida nos limites do CLBI, a avaliação da suscetibilidade do solo à erosão considerou a integração em SIG de diferentes classes das variáveis temáticas, ponderadas por meio de operadores de álgebra de mapas com notas e pesos:

declividade, geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso e cobertura do solo. Os resultados indicaram a primazia, em 64% da área total, de setores com suscetibilidades à erosão entre as classes baixa e média, e da classe muito baixa com 14%. Os setores com alta e muito alta suscetibilidade do solo à erosão ocorrem

em 13% e 9%, respectivamente, em que convergiram a cobertura vegetal baixa a ausente associada às maiores declividades das formas do relevo, caso dos campos de dunas móveis, dunas fixas, faixa de praia e em locais de solo exposto e/ou afloramento rochoso das rochas sedimentares da Formação Barreiras, sobretudo nas falésias marinhas ativas.

A análise multicritério retratou a relação direta entre a suscetibilidade do solo à erosão, em apreciação, das classes de declividade integradas às características da cobertura vegetal, variáveis fundamentais na determinação de setores mais propensos às perdas de solo. Assim, as ponderações consideradas nos operadores de álgebra de mapas na análise multicritério alcançaram o objetivo adequadamente, revelando as variações na suscetibilidade do solo à erosão da área de estudo, onde aquelas com ausência de vegetação e alta declividade correspondem aos setores de alta a muito alta suscetibilidade do solo à erosão. Igualmente, onde ocorrem solos expostos e/ou afloramentos rochosos e nas falésias, com maiores declividades, e conforme as condições intempéricas, há diferentes velocidades de escoamento da água em superfície. Em decorrência das propriedades composicionais e texturais do perfil de solo superficial e do maciço rochoso, estes marcados por fraturas, juntas e descontinuidades composicionais, a constância no escoamento da água promove o alargamento dos sulcos, favorecendo o aparecimento de ravinas, nos processos naturais e progressivos de erosão hídrica do solo. Nas falésias da Barreira do Inferno também se destacam as incisões basais que retrataram os processos erosivos intensos provocados pelas forças hidrodinâmicas.

De modo geral, quaisquer ações antrópicas predatórias, como o desmatamento, a alteração do sistema de drenagem natural, os lançamentos inadequados de lixo e de esgoto em corpos d'água, a retirada da cobertura superficial do solo e a movimentação irregular de massa nos terrenos constituem fatores impactantes e altamente intensificadores do processo erosivo. Como a área de estudo encontra-se sob a proteção jurisdicional da Força Aérea Brasileira (FAB) nas últimas cinco décadas, notadamente com baixo uso do solo e poucas alterações superficiais da cobertura, recai sobre as características das chuvas, como a intensidade e duração, (fatores não abordados neste trabalho), do tipo de solo, da cobertura vegetal e, especialmente, dos fatores topográficos, em particular a declividade, a maior relevância na avaliação da suscetibilidade do solo à erosão.

Logo, a elaboração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão considerou prioritariamente tais atributos do meio físico, devido à baixa influência das ações antrópicas no recorte geográfico do CLBI. Portanto, verifica-se a necessidade de manutenção da preservação institucional dessa área litorânea, garantindo o equilíbrio ecossistêmico costeiro e protegido de amplas ações antrópicas no seu interior e, igualmente, nas áreas circunvizinhas, pelo fato de estar localizada em zona costeira, composta por variáveis de alta vulnerabilidade ambiental, com ecossistemas continuamente submetidos à intensa dinâmica de processos erosivos naturais continentais e marinhos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a cooperação estabelecida entre a UFRN e o CLBI por meio do Projeto “*Estudo Ambiental e Monitoramento de Mudanças Morfológicas Costeiras na Falésia do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno - CLBI*” e do apoio de bolsas do Programa Nacional de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) por meio do Projeto “*Monitoramento de Praias Arenosas do Litoral do Rio Grande do Norte por Meio de Geotecnologias de Precisão e Modelagem Numérica do Ambiente Costeiro*”.

Referências Bibliográficas

- ACHARYA, T. D.; LEE, D. H.; YANG, I. T.; LEE, J. K. Identification of water bodies in a Landsat 8 OLI Image using a J48 decision Tree. *Sensors*, v. 16, n. 7, p. 2-16, 2016. DOI: 10.3390/s16071075
- AHMED, C. R. M. **Fatores que influenciam a erodibilidade nos solos do Município de Campos Dos Goytacazes-RJ sob uma análise multicritério**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro. 2009. 103p.
- ALASTA, A.F. Using remote sensing data to identify iron deposits in central western Libya. In: International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing (ICETCIP), 1., 2011, Bangkok. *Anais...* Bangkok: ALMARGB University, 2011. p. 56-61.
- AMARO, V. E. Laudo Pericial. Item B – Praia de Ponta Negra, Natal-RN. Indicação das obras emergenciais de contenção e reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra, Natal-RN. Rio Grande do Norte, Brasil, 2012. 245p.

- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F. DE; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, v. 38, n. 1, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257
- ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y. A.; LIMA, O. R.; PELOSI, A. P. M. R.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V. C.; LIMA-FILHO, F. P. Fácies e sistema deposicional da formação barreiras na região da Barreira do Inferno, litoral oriental do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006. DOI: 10.5327/S1519-874X2006000300006
- BARRETO, M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; TAHUMI, S. H.; YEE, M.; GIANNINI, P. C. F. Geologia e geomorfologia do quaternário costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004. DOI: 10.5327/S1519-874X2004000200001
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Avaliação geotécnica da erodibilidade dos solos. In: II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GEOSUL), 2., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, 2000. p. 203-211.
- BONNA, J. L. **Mapeamento Pedológico e de Suscetibilidade Erosiva no Alto Córrego Prata (Ouro Preto-MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011. 119 p.
- BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; SOUZA-FILHO, P. W. Análise estatística multicritério de métodos de vulnerabilidade física em zonas costeiras tropicais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 499-516, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i3.912
- CPRM. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte**. In: PFALTZGRAFF, P. A. S.; TORRES, F. S. M. (Orgs.). Programa Geologia do Brasil, levantamento de geodiversidade. Recife: CPRM, 2010, 277p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNADEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, CL. C. F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001, 124p.
- CUNHA, E. M. S. **Evolução atual do litoral de Natal – RN (Brasil) e suas aplicações a gestão integrada**. Tese (Doutorado em Ciências do Mar). Departament d’Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona. Barcelona, 2004, 128p.
- DUCART, D. F.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L. B.; ASSIS, L. M. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 3, p. 331-349, 2016. DOI: 10.1590/2317-488920162016002
- FADHIL, A. M. Sands dunes monitoring using remote sensing and GIS techniques for some sites in Iraq. **Proc. of SPIE**, v. 8762, p. 876206-2 - 876206-9, 2013. DOI: 10.1117/12.2019735
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Status of the World’s Soil Resources: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015, 607p.
- FATIMA, F.; KHATTAK, M.U.K.; KAUSAR, A.B.; TOQEER, M.; HAIDER, N.; REHMAN, A.R. Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 046006-1- 046006-18, 2017. DOI: 10.1117/1.JRS.11.046006
- FERREIRA, D.K.; SILVA, S.M.P. Delimitação de afloramentos de calcários da Formação Jandaíra utilizando dados LANDSAT 7/ETM+. **Sociedade e Território**, v. 26, n. 2, p. 31-43, 2014.
- FRASER, S.J. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite thematic mapper data: A newman case study. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 635-614, 2007. DOI: 10.1080/01431169108929678
- IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Diretoria de Geociências, 2ª ed. Rio Janeiro: IBGE, 2012, 271p.
- LAZARIDOU, M.A.; KARAGIANNI, A. C. Landsat 8 multispectral and pansharpened imagery processing on the study of Civil Engineering issues. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B8, 2016, p. 941-945.
- MARINO, M. T. R. D.; FREIRE, G. S.S. Análise de Evolução da Linha de Costa entre as praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Estado do Ceará, Brasil. **Revista Gestão Costeira Integrada**, n. 13, v.1, p. 113-129, 2013. DOI: 10.5894/rgci373
- MARINO, M. T. R. D.; FERNANDES, D.; MORAES, S. G.; TAJRA, A. A. Vulnerabilidade física de parte do litoral leste do Ceará à erosão. **DEMA - Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, p. 253-281, 2016. DOI: 10.5380/dma.v38i0.47765
- MARTINS, G.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; CASTRO, V. L. L. O arcabouço geológico subsuperficial na cidade de Natal, Nordeste do Brasil: Inferências pela interpolação de dados litológicos de poços. **Revista de Geologia**, v. 27, n. 1, p. 7-14, 2017.
- MATOS, M.F.A.; GURGEL, D.F.; SCUDELARI, A.C.;

- AMARO, V.E. Estimativa da taxa anual e sazonal do transporte longitudinal na zona costeira do litoral oriental do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p. 79-99, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1507
- MEDEIROS, T. H. L. **Evolução geomorfológica (des) caracterização e formas de uso das lagoas da cidade do Natal-RN**. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001. 105p.
- MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; MIGUEL, P. HORST, T. Z. Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. **Revista Scientia Agraria**, v.19, n.1, p. 102-112, 2018. DOI: 10.5380/rsa.v19i1.53738
- MUEHE, D. Estado Morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 2, p. 157-169, 1998. DOI: 10.1590/S1413-77391998000200005
- NAVAS, A.; MACHIN, J.; SOTO, J. Assessing soil erosion in a Pyrenean mountain catchment using GIS and fallout ¹³⁷Cs. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.105, p.493-506, 2005. DOI: 10.1016/j.agee.2004.07.005
- NEVES, S. R. **Análise prognóstica de processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Mateus Nunes (Paraty, RJ)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2015. 130 p.
- NUNES, F. C.; SILVA, E. F.; BOAS, G. S. V. Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de neotectonismo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011, 30p. (**Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos**, ISSN 1678-0892, 194).
- ROSA, R. Análise Espacial em Geografia. **Revista da ANPEGE**, v. 7, n. 01, p. 275-289, 2011. DOI: 10.5418/RA2011.0701.0023.
- ROY, D.P.; WULDER, M.A.; LOVELAND, T.R.; WOODCOCK, C.E.; ALLEN, R.G.; ANDERSON, M.C.; HELDER, D.; IRONS, J.R.; JOHNSON, M.D.; KENNEDY, R.; SCAMBOS, T.A.; SCHAAL, C.B.; SCHOTT, J.R.; SHENG, Y.; VERMOTE, E.F.; BELWARD, A.S.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W.B.; GAO, F.; HIPPLE, J.D.; HOSTERT, P.; HUNTINGTON, J.; JUSTICE, C.O.; KILIC, A.; KOVALSKYY, V.; LEE, Z.P.; LYMBURNER, L.; MASEK, J.G.; MCCORKEL, J.; SHUAI, Y.; TREZZA, R.; VOGELMANN, J.; WYNNE, R.H.; ZHU, Z. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. **Remote Sensing Environment**, v. 145, p. 154–172, 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001
- ROUE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. In: III Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., 1973, Washington. **Anais...** Washington: NASA, 1973. 1, p. 309-317.
- SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C. DE; SILVA, A. P. M. DA; LUEDEMANN, G. **A Sustentabilidade Ambiental da Agropecuária Brasileira: Impactos, Políticas Públicas e Desafios**. São Paulo: IPEA, 2012. 46p.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília, Embrapa, 2018, 355p.
- SANTOS JR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. 2008. Processos de Instabilização em Falésias: Estudo de um Caso no Nordeste do Brasil. **Geotecnia**, v. 114, n. 8, p. 71–90, 2008.
- SEVERO, R. N. F. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul - RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. 280p.
- SILVA, J.X. DA; ZAIDAN, R.T. **Geoprocessamento e análise ambiental: aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368p.
- SILVA, L. F. T. C. **Análise da suscetibilidade à erosão ao longo da RJ-165 (Estrada Paraty- Cunha)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. 109p.
- SOARES, D. O.; SANTOS, A. C.; SILVA, E. B. Análise das classificações supervisionadas e não supervisionadas com o uso de imagens Landsat 5 TM e Rapideye, e suas contribuições para o mapeamento do uso e cobertura do solo no Parque Nacional das Emas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n. 2, p. 110-115, 2016. DOI: 10.3895/rbgeo.v4n2.5492
- SOARES, D.L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E.V.; MOTTA, L.M.G.; SOUZA, C.C. Erodibilidade de solos em taludes de cortes de estrada não pavimentados. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179-193, 2018. DOI: 10.11137/2018_1_179_193
- SOUZA, C. R. G. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 1, p 11-37, 2009. DOI: 10.5894/rgci147
- TAGLIANI, C.R.A. Técnicas para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte.

- Anais... Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1657-1664. ISBN 978-85-17-00088-1
- TAQUEZ, D. E. D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no centro de lançamentos da barreira do inferno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. 216 p.
- TOBLER, W. Measuring Spatial Resolution. In: **Proceedings, Land Resources Information Systems Conference**, 1987, Beijing, *Anais...* Beijing, 1987. p. 12-16.
- TÔSTO, S. G.; PEREIRA, L. C. Zoneamento da erosão do solo como instrumento de planejamento ambiental. In: Simpósio Usos, Manejo e Gestão dos Recursos Naturais, na Conferência da Terra, Fórum Internacional do Meio Ambiente, 2012, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: 2012, p. 1-11.
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. **International Journal Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1555-1570, 1986. DOI: 10.1080/01431168608948946.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. IBGE, 1977. 97p.
- TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p.1395-1416, 1986. DOI: 10.1080/01431168608948944.
- USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Data set. Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900023
- VALENTE, A. L. S. **Integração de dados por meio de geoprocessamento, para a elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana: o caso de Porto Alegre (RS)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. 153 p.
- VITAL, H. (2006). Rio Grande do Norte. In MEUHE, D. (org.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 155-172.
- XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L. SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar da Bacia do Rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, p. 51-60, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v11i2.151>.
- WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.004
- WORLD BANK (2010) **Cities and Climate Change: An Urgent Agenda. Urban development series**. The International Bank for Reconstruction and Development. Washington, n° CC BY 3.0 IGO, 92p. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18027>>. Acesso em 12 abr 2020.
- YANG, Y.; LIU, Y.; ZHOU, M.; ZHANG, S.; ZHAN, W.; SUN, C.; DUAN, Y. 2015. Landsat 8 OLI image based terrestrial water extraction from heterogeneous background using a reflectance homogenization approach. **Remote Sensing of Environmental**, v. 117, n. 15, p. 14-32, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.005
- YESILNACAR, M.I.; SÜZEN, M.L.; KAYA, B.S.; DOYURAN, V. Municipal solid waste landfill site selection for the city of Şanlıurfa-Turkey: an example using MCDA integrated with GIS. **International Journal of Digital Earth**, v.5, n. 2, p.147-164, 2012. DOI: 10.1080/17538947.2011.583993