UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

HEITHOR ALEXANDRE DE ARAÚJO QUEIROZ

CLASSIFICAÇÃO DA FAIXA LITORÂNEA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI E SUA CORRELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA

RECIFE

2017

HEITHOR ALEXANDRE DE ARAÚJO QUEIROZ

CLASSIFICAÇÃO DA FAIXA LITORÂNEA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI E SUA CORRELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação.

Área de Concentração: Geodésia

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira

RECIFE

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

Q3c Queiroz, Heithor Alexandre de Araújo.
Classificação da faixa litorânea através do índice de vegetação NDVI e sua correlação com a vulnerabilidade à erosão costeira / Heithor Alexandre de Araújo Queiroz. - 2017.
68 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves.
Coorientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2017.
Inclui Referências e apêndices.

1. Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2. Vulnerabilidade à erosão costeira. 3. Cartografia costeira. 4. Sensoriamento remoto. I. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Orientador). II. Pereira, Pedro de Souza (Coorientador). III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.) BCTG/2017-194

HEITHOR ALEXANDRE DE ARAÚJO QUEIROZ

CLASSIFICAÇÃO DA FAIXA LITORÂNEA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI E SUA CORRELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovado em: 07 / 03 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profº Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalvez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profª Dr. Ana Lúcia Bezerra Candeias (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt (Examinador Externo)
Universidade Federal de Uberlândia

A duas pessoas: Vovó (Emília) e Vovô (Francisco). Pessoas simples, mas de uma imensidão indescritível de alma e coração.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Em um momento de celebração, em mais um término de etapa da vida, é natural olhar para trás e perceber o número relevante de pessoas que contribuíram direta e indiretamente para este determinado fim.

Ao DECART (Depatamento de Engenharia Cartográfica), ao PPGCGTG (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, ao LACCOST (Laboratório de Cartografia Costeira), ambos da UFPE. À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de mestrado durante os dois anos de curso.

Dentre os vários mestres e doutores que me conduziram e me concederam suporte até o momento deixo meus sinceros agradecimentos. Destaque ao Professor Sydney de Oliveira Dias - que me mostrou com sua garra e força de vontade a possibilidade real de vencer na vida. Ao Professor Joseph Awange, por ser uma fonte de inspiração para o meu dia-a-dia. Ao Professor Rodrigo Mikosz Gonçalves – amigo, orientador e conhecedor do caminho das pedras, além de gozador da vida e homem de sucesso.

Agradecimentos em fluxo contínuo à minha família - meu arrimo, minha inspiração. Destaco a importância do apoio da minha mãe nesta caminhada. Mulher empenhada em me fazer bem e me proporcionar as melhores condições, trabalhando arduamente visando o meu progresso e estabilidade emocional, financeira e mental.

Por fim, notifico agradecimentos aos residentes das regiões espirituais. Até o certo momento não alcancei conhecimento suficiente para discriminar e compreender quantos, além de Deus, me ajudaram nesta caminhada. Se espíritos, se forças, se energias. Contudo, sem delongas, deixo aqui gravada a minha gratidão.

RESUMO

A zona costeira é um espaço dinâmico e pode sofrer mudanças temporais onde determinadas localidades podem apresentar características maiores ou menores de vulnerabilidade à erosão costeira. A erosão costeira é um fato recorrente, e dentre os efeitos causadores podem estar presentes as ações antrópicas e a ocorrência de eventos relacionados com as mudanças climáticas como é o caso do aumento do nível do mar, entre outros fatores. O objetivo deste trabalho foi utilizar o NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*) para classificação da faixa litorânea do Estado de Pernambuco avaliando desta forma sua correlação com a vulnerabilidade à erosão costeira. Como materiais foram utilizados uma série histórica (2013 a 2016) de imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite *Landsat* 8 e o Atlas de Vulnerabilidade à Erosão Costeira do Estado de Pernambuco. Para a validação das séries históricas obtidas com o cálculo do NDVI foi feito uso do VCI (*Vegetation Condition Index*), correlação de Pearson e intervalo de confiança. Na parte experimental para análise dos resultados foram utilizados distribuição de frequências. Os resultados obtidos mostraram que 111 dos 171 setores analisados apresentam VCI maior ou igual a 70% e a classificação obteve 84% de correlação moderada ou alta entre a cobertura vegetal (identificada e extraída pelo NDVI) e o índice de vulnerabilidade (calculado pela metodologia CVI). Destacando a importância no relacionamento entre a vulnerabilidade à erosão costeira e a presença ou ausência de vegetação.

Palavras-chave: NDVI (*Normalized differential vegetation index).* Vulnerabilidade à erosão costeira. Cartografia costeira. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The costal zone is dynamic and its changes can be caused along the time where some places can present vulnerability to coastal erosion trends. The coastal erosion is a current fact and can be caused by human factors and hazards related with climate changes, such as sea level rise, among others. The aim of this paper was to use vegetation index to classify the coastal zone of Pernambuco and evaluate its correlation with vulnerability to coastal erosion. The data used were a short-term series of Landsat 8 OLI images and the map of vulnerability to coastal erosion. Descriptive statistics among other such as Pearson's correlation and confidence intervals were used to perform analysis in the experimental step of this work. It was used to describe and verify the correlation between coastal vulnerability to erosion index (from CVI) and the vegetal cover data (from NDVI). To validate the data generated it was used the *Vegetation Condition Index* (VCI). The classification results showed a substantial relationship between vegetal cover data (from NDVI) and coastal erosion vulnerability data (from CVI) presenting about 84% of high and moderate correlation. With that it can be understood that there is a relationship between vulnerability to coastal erosion and the presence or absence of vegetation.

Keywords: NDVI (Normalized differential vegetation index). Coastal vulnerability to erosion. Coastal cartography. Remote sensing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) Mapa dos Municípios da faixa litorânea do Estado de Pernambuco; (b) Localização no Brasil. (c) Localização no Estado de Pernambuco.....22

Figura 2: Fluxograma da metodologia adotada.....25

Figura 3: Órbita e Pontos das cenas do sensor OLI do satélite Landsat 8 que cobrem a área costeira de Pernambuco.....26

Figura 4: Divisão em setores de um trecho da Ilha de Itamaracá e as distâncias contadas perpendicularmente a partir da linha de costa (50 e 100 metros).....33

Figura 5: Diferenças entre a faixa com 50 e 100 metros de largura. (a) Imagem de alta resolução que abrange o Setor 27 na Ilha de Itamaracá. (b) Ampliação da imagem de alta resolução (0,5 metro).....34

Figura 6: Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem NDVI gerada para o ano de 2013. Este recorte abrange o Setor 27 na Ilha de Itamaracá. (b) Ampliação da imagem de alta resolução (0,5 metro).....35

Figura 7: Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem de alta resolução. Este recorte abrange o Setor 8 no município de Goiana. (b) Ampliação da imagem de alta resolução.....36

Figura 8: Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem NDVI gerada para o ano de 2013. Este recorte abrange o Setor 8 no município de Goiana. (b) Ampliação da imagem de alta resolução.....37

Figura 9: Gráfico da distribuição espacial dos valores da série histórica de NDVI. (a) Valores nos setores 1 a 60; (a) Valores nos setores 61 a 120; (a) Valores nos setores 121 a 180.....39

Figura 10: Histograma da distribuição de frequências absolutas da classificação da correlação entre o NDVI e o CVI dos 171 setores analisados.....42

Figura 11: Gráfico da distribuição de frequências percentuais da classificação da correlação entre o NDVI e o CVI dos 171 setores analisados.....43

Figura 12: Histograma da distribuição de frequências absolutas da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados.....45

Figura 13: Gráfico da distribuição de frequências percentuais da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados.....46

Figura 14: Mapa da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI (Setor Norte).....48

Figura 15: Mapa da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI (Núcleo Metropolitano). 49

Figura 16: Mapa da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI (Setor Sul)....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores das variáveis divididos em classes para o cálculo do índice de vulnerabilidade.....16

Tabela 2: Intervalo de comprimento de onda nas bandas Vermelho e Infra Vermelho Próximo do sensor OLI.....18

Tabela 3: Parâmetros determinados para a classificação da correlação entre NDVI e CVI. 29

Tabela 4: Recorte da planilha de valores de média de NDVI para cada setor cobrindo a série histórica de 4 anos.....30

Tabela 5: Correlação (r) entre os valores médios de NDVI levando-se em consideração a variação na largura dos setores (50m e 100m).....32

Tabela 6: Média de valores das séries de NDVI com a diferença de quando se considera largura de 50 e 100 metros.....38

Tabela 7: Correlação (r) entre as séries de NDVI.....40

Tabela 8: Resultados dos cálculos da distribuição de frequência dos dados quantitativos da classificação da correlação entre NDVI e CVI.....43

Tabela 9: Resultados dos cálculos da distribuição de frequência dos dados quantitativos da classificação da correlação entre NDVI validado e CVI.....46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 OBJETIVO GERAL 12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 13
2 EMBASAMENTO TEÓRICO 13
2.1 VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA 13
2.2 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO 17
2.3 MODELOS EMPÍRICOS: CORRELAÇÃO 21
3 MATERIAIS E MÉTODOS 21
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO 22
3.2 MATERIAIS 24
3.3 MÉTODOS 26
***3.3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS* 27**
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 32
4.1 LARGURA DO SETOR PARA A COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE NDVI E CVI 32
4.2 SÉRIE HISTÓRICA DE NDVI 40
4.3 CLASSIFICAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE NDVI E CVI 41
5 CONCLUSÕES 52
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 53
REFERÊNCIAS 54
APÊNDICE A – SÉRIE HISTÓRICA DE VALORES DE NDVI 60
APÊNDICE B – VALORES DE VEGETATION CONDITION INDEX (VCI) POR SETOR 65

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira é o local de interação entre mar, terra, ar e a sociedade. Nos países em desenvolvimento a zona costeira sofre com o crescimento populacional e com o uso indevido do solo, motivados na maioria das vezes pelas variações nas condições econômicas do país e a posterior migração das pessoas. Atualmente, 44% da população mundial vive numa distância entre 100 Km da zona costeira (PARTHASARATHY; NATESAN, 2015). Fatores como a perda da vegetação e aumento do nível do mar vêm gerando impactos ambientais, econômicos e em alguns casos extremos podem por em risco a integridade física das pessoas que vivem nestas áreas. A erosão costeira é um problema recorrente que pode, entre outras causas, ter influência da urbanização do litoral (WANSLEY et al., 2015).

O Ministério do Meio Ambiente, em sua publicação sobre Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro (Muehe, 2006), aponta, dentre as causas que contribuem para o processo erosivo no litoral de Pernambuco, a "interferência antrópica" como a mais atuante na aceleração do processo de erosão costeira, não dando chance para que as variáveis naturais encontrem o seu equilíbrio, e ressalta a dificuldade em qualificar e quantificar cada um dos fatores que interagem no balanço sedimentar de uma praia.

Conforme Wansley et al. (2015), para a redução dos riscos de perdas ou danos e para o gerenciamento da zona costeira, a avaliação da vulnerabilidade costeira é de suma importância, pois pode subsidiar o planejamento das ações protetivas e assim garantir que as funções dos sistemas sejam mantidas frente aos processos de adaptação ou mitigação dos efeitos causados pelas mudanças climáticas ou antropogênicas.

O processo de avaliação da vulnerabilidade costeira é complexo e envolve fatores físicos e socioeconômicos. O *Coastal Vulnerability Index* (CVI) é um método usado para avaliar quão vulnerável determinada área costeira é, e vem sendo utilizado para a análise da vulnerabilidade à erosão costeira. O CVI permite a obtenção de um valor numérico representativo da vulnerabilidade em uma determinada escala a partir da integração de diferentes variáveis, que podem ser dinâmicas (altura das ondas, por exemplo), sociais (população por metro de praia), morfológicas (tipos de dunas) e tipos de escalas espaço-temporais (Gornitz et al., 1991).

De acordo com Bhandarie et al. (2012), o sensoriamento remoto e as técnicas de processamento digital de imagens podem ser utilizadas para a avaliação dos recursos naturais subsidiando desta forma o planejamento urbano e ambiental das cidades. Na literatura, os índices

de vegetação são utilizados para a identificação da cobertura vegetal como é o caso do *Normalized Differential Vegetation Index* (NDVI) (MYNENIET et al., 1995).

Existem várias aplicações dos Índices de Vegetação entre elas encontram-se: Nakaji et al. (2008) utilizando o SAVI (*Soil Adjustment Vegetation Index*) e o NDVI para a estimativa da eficiência da conservação de energia para as diferentes espécies de vegetação de uma floresta tendo como resultados a eficiência do SAVI em reduzir os efeitos da energia refletida pelo solo; Gu et al. (2013) utilizaram o NDVI para a avaliação da produtividade de pastagens; Zhu e Liu (2015) usaram NDVI oriundos de imagens *Landsat* para a estimativa de biomassa acima do solo; Marino e Alvino (2015) utilizaram, entre outros índices, o NDVI para a verificação do crescimento de culturas; Džubáková et al. (2015) utilizaram o NDVI, para analisar o comportamento da vegetação frente a problemas de inundações e para isto fizeram uso de fotografias terrestres obtidas por sensores infravermelhos; Alatorre et al. (2016) demonstram o uso de uma série temporal de NDVI gerada a partir de imagens *Landsat TM* para detectar a influência da vegetação em um manguezal; entre outros trabalhos.

A cobertura vegetal é destacada como um dos mais importantes indicadores biofísicos de ocorrência de erosão do solo e, por sua vez, pode ser conhecida e analisada através do uso dos Índices de Vegetação (KARABURUN, 2010). Enquanto a vulnerabilidade à erosão costeira pode ser avaliada utilizando-se metodologias como o CVI e diferentes variáveis de diferentes fontes e fornecer informação de grande valor para o conhecimento da área estudada. Este trabalho destaca como hipótese a alta correlação esperada entre a presença de vegetação e a vulnerabilidade à erosão costeira, detectada pela análise da correlação entre o índice de vegetação (NDVI) e o Índice de Vulnerabilidade Costeira à Erosão (CVI) e calculados para a zona costeira do Estado de Pernambuco. A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos a partir desta hipótese.

1.1 Objetivo Geral

Utilizar o índice de vegetação (NDVI) para classificar a faixa litorânea do estado de Pernambuco e investigar sua correlação com a vulnerabilidade à erosão costeira.

1.2 Objetivos Específicos

- Obter uma série histórica de imagens NDVI entre os anos 2013 e 2016 e validá-la utilizando o VCI (*Vegetation Condition Index*);
- Avaliar as condições e a dinâmica da cobertura do solo durante a série histórica;
- Classificar a correlação entre o mapa de vulnerabilidade à erosão costeira do Estado de Pernambuco, obtido pelo método CVI com a série histórica de NDVI.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O capítulo 2 é referente ao Embasamento Teórico, onde são tratados os temas vulnerabilidade costeira à erosão, índices de vegetação e modelos estatísticos empíricos, que são pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho. Em seguida foi feita uma breve revisão de literatura buscando exemplos de trabalhos relacionados ao tema. Logo após, no capítulo 3, são descritos os materiais e métodos que serão adotados. Primariamente discorre-se sobre o uso das informações obtidas através do mapa de vulnerabilidade à erosão costeira do estado de Pernambuco, depois, trata-se da geração dos índices de vegetação. Ainda neste capítulo são descritas as análises estatísticas a serem realizadas. Os resultados vêm em seguida no capítulo 4, seguido do capítulo 5, referente às conclusões e posteriormente as referências bibliográficas.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Vulnerabilidade à Erosão Costeira

Em termos gerais a vulnerabilidade é a predisposição para ser negativamente afetado. Inclui a ideia de carência ou falta de capacidade de lidar ou se adaptar a determinadas mudanças e é definida em função da exposição ao perigo, da sensibilidade e da capacidade de adaptação do sistema (IPCC, 2014).

De acordo com Birkmann et al. (2013), vulnerabilidade refere-se à tendência, quando exposto, que determinado elemento tem, seja comunidade ou sistema, estando sujeito à perdas e

danos causados por eventos naturais e pelo homem, que tem impacto físico, social, econômico e ambiental.

Cabe ressaltar que vulnerabilidade é diferente de riscos e impactos. Pois riscos são tratados como a probabilidade de ocorrência de determinado evento ou fenômeno, e impactos são as consequências negativas devido à ocorrência de determinado evento (BORUFF et al., 2005; GORNITZ 1991).

Segundo o IPCC (2014), os riscos são resultados da interação entre a vulnerabilidade, os fenômenos e a exposição das áreas, enquanto os impactos são as consequências de determinado fenômeno. Entre os chamados impactos físicos estão as inundações e secas, já entre os socioeconômicos estão degradação do patrimônio cultural litorâneo e danos materiais às comunidades que residem próximo à costa.

Gornitz (1991) faz uma abordagem da vulnerabilidade em áreas costeiras, e trata-a como a suscetibilidade da costa a responder negativamente a fenômenos naturais que a expõe a riscos ou outros efeitos adversos.

Em concordância com Wansley et al. (2015), a avaliação da vulnerabilidade pode se relacionar a vários eventos de perigo, no inglês *hazard*, sejam fenômenos naturais (por exemplo, aumento do nível do mar, erosão costeira) ou antropogênicos.

A abrangência da avaliação vai determinar como a vulnerabilidade será medida, pois dependerá, dentre outras coisas, do propósito da avaliação, em quais escalas espaciais (global ou local) e temporais será dirigida e de acordo com os dados disponíveis.

Pode-se determinar a vulnerabilidade à erosão costeira pelos fatores físicos (por exemplo, relevo e litologia) e socioeconômicos (por exemplo, herança cultural e densidade populacional). É abordado mais um tipo de característica que abrange os fatores que influenciam a hidrodinâmica e a morfodinâmica (por exemplo, altura de maré e altura das ondas) (BORUFF et al., 2005; WANSLEY et al., 2015).

A utilização de um índice de vulnerabilidade costeira que integre fatores e características físicas e socioeconômicas de determinada região costeira é de suma importância, pois permite uma fácil integração dos dados, devido ao uso de um único valor para expressar multivariadas características estatísticas e espaciais (BORUFF; EMRICH; CUTTER, 2005).

Diversos métodos são encontrados na literatura para a avaliação da vulnerabilidade, por exemplo o *Synthesis and upscaling of sea-level rise vulnerability assessment* (SURVAS) é usado na avaliação da vulnerabilidade ao aumento do nível do mar. Este permite o desenvolvimento de uma avaliação global da vulnerabilidade da zona costeira utilizando conceitos básicos, através da definição dos indicadores de suscetibilidade natural ao risco; de vulnerabilidade socioeconômica; e de resistência aos efeitos das mudanças climáticas. Considerando a elevação do nível do mar como sendo o principal efeito das mudanças climáticas. Esta metodologia tem caráter quantitativo e pode ser aplicada em análises de escala local, regional, nacional e global (VEGA-LEINERT; NICHOLLS, 2001).

Outro exemplo de metodologia para a avaliação da vulnerabilidade é o *Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment* (DIVA), que é uma técnica de modelagem computacional composta por uma base de dados global de fatores ambientais e socioeconômicos, cenários com projeções do nível do mar relevantes, e um conjunto de algoritmos que representam os impactos de adaptação (HINKEL; KLEIN, 2003). Nesta avaliação são considerados fatores como erosão, inundação, salinização e perda de zonas húmidas. A DIVA foi projetada para análises de escala nacional, regional e global com caráter quantitativo (VAFEIDIS et al., 2004).

Cabe citar também o *Geomorphic Stability Mapping* (*Smartline)*, que é uma metodologia que integra múltiplas variáveis para avaliar a estabilidade das características geomorfológicas da zona costeira. O método é dividido em três fases, sendo que a primeira, apropriado para escala nacional, classifica as praias em relação ao formato, morfologia e a geologia da costa. A segunda fase, em escala regional, relaciona a estabilidade geomorfológica com critérios mais específicos como taxas de erosão e acreção. A terceira etapa, para escala local relaciona as etapas anteriores com dados de modelagem de refração e difração de ondas, balanço sedimentar, entre outros. Os resultados têm caráter qualitativo (SHARPLES, 2006; SHARPLES et al., 2009).

Por fim apresenta-se o *Coastal Vulnerability Index* (CVI), em sua tradução livre, Índice de Vulnerabilidade Costeira. Esta metodologia utiliza seis variáveis para avaliar a sensibilidade de uma região costeira, dentre elas estão: a variação da linha de costa; a geomorfologia; a declividade da costa; a variação da maré; altura de ondas; e cenários de elevação do nível do mar.

O CVI é amplamente utilizado para o cálculo da vulnerabilidade costeira à erosão. Permite a utilização de dados quantitativos e qualitativos, de diferentes escalas e unidades. Em Gornitz (1991) pode ser utilizada a soma (Equação 1) ou o produto (Equação 2) das variáveis e em Thieler

e Hammar-Klose (1999) o CVI é obtido pelo produto. Na verdade, o produto pode ser muito sensível a pequenas mudanças no ranking dos fatores individuais.

$$CVI = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)(a_1 * a_2 * \dots a_n)} \quad (1)$$

$$CVI = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)(a_1 + a_2 + \dots a_n)} \quad (2)$$

Onde a_i = variável e n = número de variáveis, e i varia de 1 a n. Estas variáveis podem ser fatores físicos e socioeconômicos.

Em síntese suponha-se que para a análise da vulnerabilidade costeira à erosão de determinada área serão consideradas quatro (4) variáveis, divididas em duas (2) categorias. Cada uma destas variáveis deve ser dividida em classes (*ranking*) (isto permite a integração de variáveis de várias escalas de tempo e métrica). Após isto, cada categoria de classe vai ter um valor obtido pela raiz da soma das variáveis divididas pela quantidade de variáveis de cada categoria e por fim o valor do índice será a soma de cada categoria de variáveis dividida pela quantidade total de categorias. Quanto maior for o valor do índice calculado, maior será a vulnerabilidade. A Tabela 1 mostra um conjunto de dados simulados de uma divisão das variáveis em classes.

Tabela 1 – Valores das variáveis divididos em classes para o cálculo do índice de vulnerabilidade.

CATEGORIA	**VARIÁVEL**	**CLASSE**		
		BAIXO (1)	**MODERADO (2)**	**ALTO (3)**
Evidências de erosão	Taxas de variação da LC*	> 0	0 - -10	< -10
	Indicadores visuais	baixo	moderado	alto
Processos dinâmicos	Altura da onda	< 0,75	0,75 - 1.25	> 1.25
	Nível do mar	< 0,50	0,50 - 0,90	> 0,90

Fonte: O autor

* Valores negativos das taxas de variação da LC representam mais riscos.

O CVI foi usado inicialmente por Gornitz (1991), no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e posteriormente passou por várias atualizações como a desenvolvida por Thieler (2000). Foi amplamente aplicada no litoral dos Estados Unidos e adaptada para ser usada em diversos outros países por ser um método rápido e consistente para determinar a vulnerabilidade de diferentes tipos de praia (WOODROFFE, 2006).

Parthasarathy e Natesan (2015) aplicaram a metodologia CVI para a análise da vulnerabilidade costeira à erosão, na cidade de Tuticorin, na Índia. As variáveis utilizadas incluem informações quantitativas e qualitativas e foram classificadas em 2 grupos: geológicas e físicas. Entre as geológicas estão as taxas de variação da linha de costa e relevo da praia, enquanto entre as físicas está a altura das ondas, variação no nível do mar e média das alturas de maré. Os valores de CVI ficaram entre 15.1 e 49.3 e foram divididos em 4 classes (baixo, moderado, alto e muito alto). Concluiu-se que 15% da área mapeada teve Índice alto, 12% moderado, e 73% baixo.

Boruff et al. (2005) aplicaram a metodologia CVI para gerar o índice para os fatores físicos e propuseram o *Coastal Social Vulnerability Index* (CSoVI) para analisar os fatores sociais e, por fim combinaram estes índices para a avaliação da vulnerabilidade da Costa Leste dos Estados Unidos da América à erosão. Os valores dos índices foram divididos em três (3) classes (baixo, médio e alto).

2.2 Índices de Vegetação

Segundo Small et al. (2000), os impactos na costa, além de outros fatores dependem da proximidade da população à zona costeira. A cobertura vegetal é um dos mais importantes indicadores biofísicos de ocorrência de erosão do solo e pode ser estimada através do uso dos Índices de Vegetação (KARABURUN, 2010).

Conforme Bhandarie et al. (2012), cada feição na superfície terrestre tem sua peculiar resposta espectral. Estes afirmam que os índices são parâmetros de medição utilizados para realçar estas feições, espacialmente distribuídas, nas imagens de sensoriamento remoto para posterior identificação e extração de informações de, por exemplo, crescimento de culturas e área de

cobertura vegetal, e corroboram que estes índices de imagens multiespectrais sejam baseados nas resoluções espacial e espectral.

Barati (2011) aponta 20 índices de vegetação utilizados, e divide-os em 5 categorias. Myneniet al. (1995) afirmam que o NDVI é o índice de vegetação mais utilizado. Para este trabalho ressalta-se o índice NDVI, que está incluso nas categorias de índices diferenciais de razão convencional.

Chouhan e Rao (2011) ratificam que há vários Índices utilizados para destacar a vegetação em imagens de sensoriamento remoto e o NDVI é amplamente utilizado para isto. Entre outros usos do NDVI incluem-se a análise da cobertura vegetal, o estudo da taxa de crescimento, a saúde e as alterações na vegetação (BHANDARI et al., 2012).

O valor de NDVI varia de acordo com a absorção da radiação na banda Vermelha pela clorofila e a reflexão da Infravermelha pelas células das folhas vivas (BARATI, 2011).

A Tabela 2 exibe a disposição dos comprimentos de ondas no espectro eletromagnético para uma cena do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite *Landsat* 8.

Tabela 2 – Intervalo de comprimento de onda nas bandas Vermelho e Infra Vermelho Próximo do sensor OLI.

Banda	Comprimento de onda (μm)
Vermelho	0,64 – 0,67
IV Próximo	0,85 – 0,88

Fonte: O autor.

Rouse (1973) e Huete (1988) mostram que o NDVI pode ser obtido pela Equação 3,

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (3)$$

Onde R_{NIR} e R_{RED} são os valores de Reflectância Espectral nas bandas do Infra Vermelho Próximo e Vermelho, respectivamente.

No cálculo usando imagens OLI para obteros valores de reflectância utilizados na equação (3) apresentada do NDVI são considerados a reflectância TOA sem correção do ângulo solar (**ρλ'**) os fatores multiplicadores de escala específicos de cada banda (**Mρ**) e (**Aρ**) e o Número digital (**Qcal**) quantificado e calibrado pela USGS EROS Center.

Segundo Karaburun (2010), os valores de NDVI variam entre -1,0 e 1,0. Os valores negativos de NDVI (NDVI < 0) correspondem a corpos d'água, valores muito baixos (NDVI < 0,1) indicam áreas inférteis, já valores considerados moderados (0,2 < NDVI < 0,3) representam áreas de pastagem e arbustos, enquanto (0,6 < NDVI < 0,8) expressam florestas tropicais e temperadas e indicam a presença de "vegetação viva", e por fim o solo exposto tem valor nulo (NDVI = 0) (CHOUHAN; RAO 2011).

A escolha do Índice mais apropriado para o cálculo da cobertura vegetal varia de acordo com as características da região em estudo. Por exemplo, em locais de vegetação escassa ou esparsa o solo reflete mais que a vegetação, logo causa dificuldades na identificação da cobertura vegetal. Para mitigar estes efeitos da interação da Energia Eletromagnética foram desenvolvidos Índices como o SAVI, *Optimized Soil Adjust Vegetation Index* (OSAVI) e o *Modified Soil Adjust Vegetation Index* (MSAVI) (BARATI et al. 2011).

Em regiões de vegetação densa grande parte da energia é refletida pelo dossel das árvores, enquanto que em regiões de vegetação esparsa, parte desta radiação é refletida pelo solo. Segundo Huete (1988), o NDVI tem problemas na identificação da cobertura vegetal nestes casos em que a vegetação é esparsa, portanto desenvolveu-se o modelo SAVI com o propósito de ter uma aplicação global, ou seja, lidar com os efeitos da variação de densidade entre vegetação e solo.

Ji et al. (2014) afirmam que uma das características de um Índice de Vegetação ideal é conseguir modelar os problemas com a influência da reflexão do solo ou dos efeitos atmosféricos. Para o cálculo do SAVI, Equação (4), é levado em consideração o valor de *L*, que é o fator de ajustamento (*L*) que é determinado em função da densidade da cobertura vegetal em Barati et al. (2001), e considerado como *L* = 0,5. Embora (*L*) varie de acordo com a densidade da vegetação a ser analisada, para baixíssima (*L* = 1), intermediária (*L* = 0,5), altíssima (*L* = 0,25) densidades, qualquer valor para *L* entre 1 e 0,25 reduz os efeitos do solo se comparados ao NDVI (HUETE, 1988, 1997).

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L)(NIR-RED)}{NIR+RED+L} \qquad (4)$$

Assim como na Equação 3, na Equação 4 o NIR e RED são os valores de Reflectância Espectral nas bandas Infra Vermelho Próximo e Vermelha, respectivamente.

Apesar de todo o potencial de separação do solo e vegetação que o SAVI tem, é de costume esquecer da ressalva que esse índice foi desenvolvido para o estudo de culturas de algodão no meio-oeste americano, evadindo-se da avaliação da reflectância da cultura com os tipos de solo próprios da região – (chamados de *light soil* e *dark soil*: solos claros e escuros). Sendo, portanto, levantado o questionamento acerca se o SAVI é um índice que não precisaria de adaptação ao Brasil, em especial para a aplicação em áreas com vegetação litorânea. Já que é comum nessas áreas a vegetação ser de menor porte e quanto maior a proximidade com a água mais escassa ou rasteira ela se torna. Ao mesmo tempo o solo arenoso tem uma resposta mais intensa que o solo argiloso do interior.

Em Chouhan e Rao (2011) foi utilizado o NDVI para identificar áreas que havia presença de vegetação com o intuito de relacionar com os impactos de desastres provenientes de um tsunami. Conclui-se que a vegetação foi um fator de proteção para o desastre costeiro ocorrido (tsunami) e os Índices de Vegetação para a detecção de tais feições permitem chegar a bons resultados.

Bhandarie et al. (2012) extraíram, entre outras, feições urbanas e cobertura de vegetação a partir de imagens geradas pelo NDVI. A percentagem de vegetação foi quase a mesma para os 6 diferentes valores de limiares (*threshold*) - método utilizado no processo de segmentação (entre 0,10 e 0,50), portanto os resultados para este caso se mostraram bons para a identificação de cobertura vegetal dispersa e com variações de densidade, como também acurados para outras feições, com a inclusão da área urbanizada. Os valores obtidos para a percentagem de vegetação foram 32,1% e 46,4%, com a adoção do valor de *threshold* igual a 0,3 e 0,2, respectivamente, e para as áreas urbanas, estruturas e rochas 23,5% e 30,8%.

Outros índices como o *Vegetation Condition Index* (VCI) são derivados de índices de vegetação como o NDVI. O VCI é amplamente utilizado na detecção das alterações climáticas (influência do déficit hídrico, por exemplo) nas condições da cobertura vegetal. Ele é derivado do NDVI como pode ser visto na Equação 5, é expressado em porcentagem (%) e quanto mais próximo a 100% indica que a vegetação esteve em boas condições em determinada série histórica obtidas a partir de imagens. (QUIRING; GANESH, 2010).

$$\left(\frac{NDVI - min}{\max - \min}\right) * 100 \qquad (5)$$

Onde *max* e *min* são, respectivamente, os valores máximos e mínimos de NDVI para determinado pixel em determinada série temporal. Sendo, portanto, relevante para a discriminação

dos pixels que mostram com veracidade a presença de vegetação saudável ao longo dos anos de determinada série histórica para a comparação com dados, como por exemplo, de Índice de Vulnerabilidade, calculados para determinado período.

2.3 Modelos Empíricos: Correlação de Pearson

Nesta seção se faz necessária uma breve abordagem sobre conceitos e definições da Estatística a serem utilizados na parte experimental do presente trabalho (BONINI e BONINI, 1972).

A Correlação de Pearson é um modelo da Estatística que trata do relacionamento linear entre duas ou mais variáveis. Através da correlação chega-se ao grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias.

O coeficiente de determinação ou coeficiente de correlação linear de Pearson (*r*) é uma medida de associação linear existente entre as variáveis *x* e *y*, e é calculado pela Equação 6. É também uma estimativa do coeficiente de correlação populacional (ρ).

$$r = \frac{\sum x'y'}{\sqrt{(\sum x')^2(\sum y')^2}} \quad (6)$$

Onde x' e y' são os valores das variáveis e sua variação é apresentada no intervalo de $-1 < r < 1$.

Em suma este é o número que expressa a correlação entre as variáveis. Quando $r = +1$ existe uma perfeita correlação direta entre *y* e *x*. Se $r > 0$ existe correlação direta entre as variáveis, mas se $r = 0$ não existe correlação linear entre as variáveis. No caso em que $r < 0$, então, existe correlação inversa entre as variáveis e, por fim, se $r = -1$ há uma correlação inversa perfeita.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção estão descritos os materiais a serem utilizados e os métodos adotados para a obtenção dos resultados.

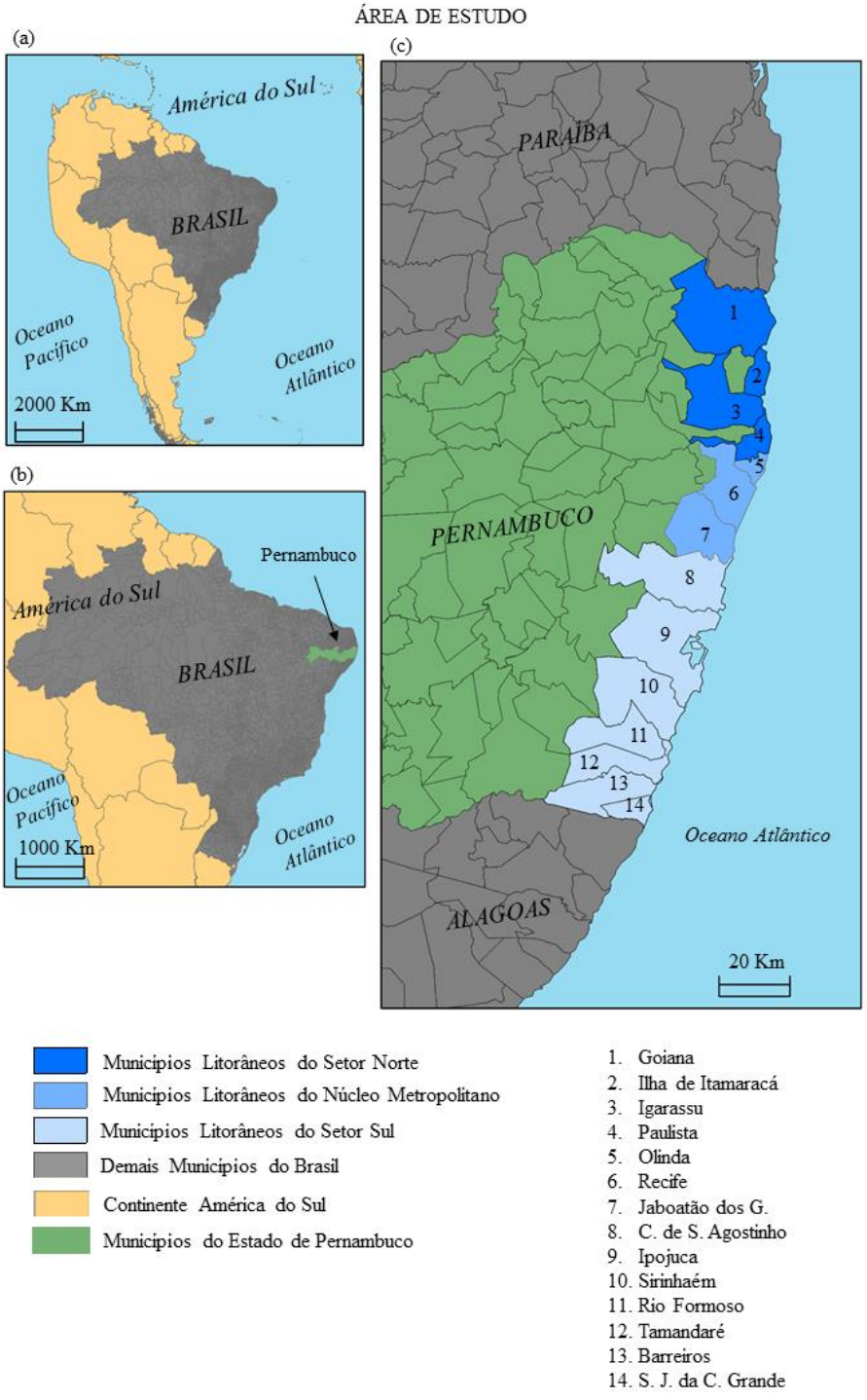
3.1 Características da Área de Estudo

O estado de Pernambuco é composto por 185 municípios e possui população aproximada de 9,3 milhões de habitantes, sendo a cidade do Recife o mais importante aglomerado populacional do Estado, concentrando 44% da sua população (IBGE, 2015).

A Zona Costeira do Estado de Pernambuco é dividida em três setores (Norte, Núcleo Metropolitano e Sul), composta por 21 municípios, distribuídos numa faixa de 187 km, nos quais estão inseridos não só os municípios litorâneos e estuarinos, mas, também os municípios integrantes da Região Metropolitana.

A faixa litorânea, representada na Figura 1, compreende os municípios costeiros do Estado de Pernambuco que fazem divisa com o oceano. Esta área limita-se ao Norte pelo Rio Goiana e a Sul pelo Rio Persinunga. E é formada por 14 municípios entre eles estão: Goiana, Itamaracá, Igarassu, Paulista, Olinda, Recife, Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Sirinhaém, Rio Formoso, Tamandaré, Barreiros e São José da Coroa Grande.

Figura 1 – (a) Localização no Brasil na América do Sul; (b) Localização do Estado de Pernambuco no Brasil. (c) Mapa dos Municípios da faixa litorânea do Estado de Pernambuco.



Fonte: O autor.

Dentre as formações litorâneas existe um número significativo de tipos florestais, entre os quais se destacam a floresta perenifólia de restinga, os manguezais, as formações de praia e os campos de várzea (flúvio-lagunar). Na parte do litoral arenoso a vegetação caracteriza-se por ser pouco densa e herbácea. Sua ocorrência tem início geralmente depois das cristas de berma, mais

precisamente na pós-praia, e são representados por gramíneas, salsas de praia, capim da areia e psamófica herbácea alastrante (MUEHE, 2006).

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho estão listados a seguir:

(i) imagens multiespectrais do satélite *Landsat* 8 sensor OLI, órbita 114 e pontos 65 e 64, para o procedimento de geração dos índices de vegetação e posterior classificação; oito imagens foram utilizadas (4 pares), sendo cada par correspondente a um mesmo ano, (considerando a mesma data ou períodos próximos), a partir da construção de mosaicos.

(ii) linha de Costa atual do Estado de Pernambuco, proveniente do mapeamento realizado no ano de 2014 através de uma parceria entre a UFPE e SEMAS (http://www.semas.pe.gov.br/web/semas/mapa-da-linha-de-preamar1); e

(iii) computador com processador Intel Core I7, com 6GB RAM, 64 bits.

(iv) mapa de vulnerabilidade à erosão costeira do Estado de Pernambuco.

O item (iv) apresentado desta seção materiais refere-se ao Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira do Estado de Pernambuco utilizado neste trabalho no procedimento principal, que é a geração da classificação da correlação entre o NDVI e o CVI. Os procedimentos metodológicos para geração deste mapa podem ser encontrados com mais detalhes no Atlas de Vulnerabilidade à Erosão Costeira e Mudanças Climaticas em Pernambuco em ATLAS (2015) como também na dissertação de mestrado de Martins (2015). E ainda mais detalhes sobre os indicarores de erosão envolvidos no cálculo do CVI em podem ser vistos em Martins et al. (2016).

O mapa de vulnerabilidade à erosão costeira do Estado de Pernambuco foi gerado através da aplicação da metodologia CVI, semelhante à utilizada em Gornitz (1991) e em Thieler e Hammar-Klose (1999). Neste produto, foram considerados fatores divididos em quatro (4) categorias: dinâmicos, sociais, morfológicos e evidências de erosão. Foram selecionadas 10 variáveis para serem utilizados na geração do índice CVI e dividido nas seguintes categorias:

a) na primeira categoria, de processos dinâmicos, estão as variáveis: exposição relativa à onda, nível do mar e altura da onda;

b) na segunda categoria, referente aos fatores sociais, as variáveis foram: distância das moradias à LC, população por metro de praia e tipo de urbanização;

c) a terceira, que está relacionada aos fatores morfológicos, teve como variáveis o tipo de substrato e a conservação das dunas; e

d) a quarta e última categoria, que tem relação com as evidências de erosão, as variáveis consideradas foram: taxas de variação da linha de costa entre os anos de 2005 e 2014 e indicadores visuais de erosão.

Feito isso foram atribuídos pesos a cada variável, baseados na opinião de 10 especialistas. Estes pesos foram incluídos no modelo matemático do CVI. Portanto foi utilizada a Equação 7 para a geração do índice de vulnerabilidade costeira à erosão.

$$CVI = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)(a_1 * p_1 + a_2 * p_2 + \cdots a_n * p_n)} \quad (7)$$

Onde a_i = variável, p_i = peso da variável, n = número de variáveis, e i varia de 1 a n.

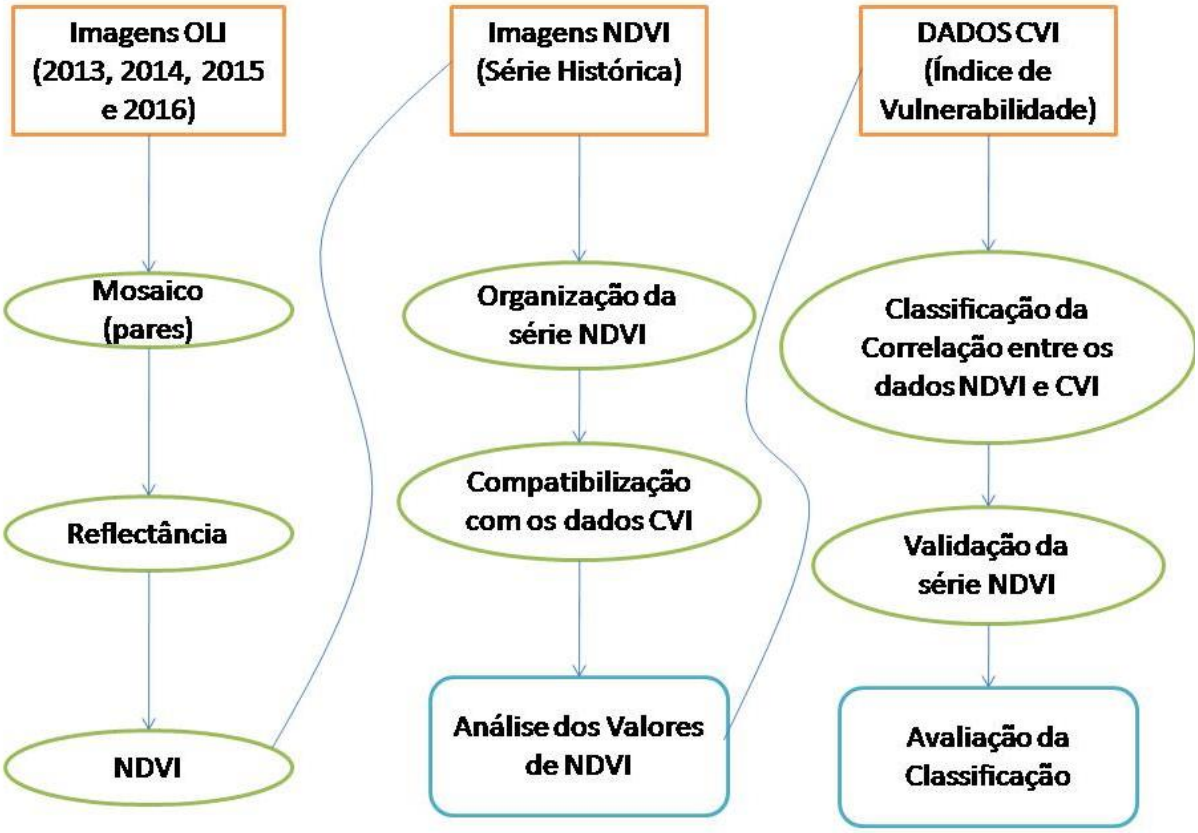
Cabe salientar que os valores de CVI são disponibilizados por setores com aproximadamente 1 km de extensão seguindo a linha de costa. Esses valores de CVI são posteriormente classificados em alto, moderado e baixo ou nulo, para toda a costa de Pernambuco. No qual alta vulnerabilidade significa que o local está mais suscetível à erosão. Valores moderados significam que existe a possibilidade de ocorrência de erosão e posteriores impactos, e vulnerabilidade baixa ou nula indica que o local é menos predisposto a sofrer erosão.

Faz-se a observação que esses dados são disponibilizados em formato digital. Para esta pesquisa serão utilizados dados vetoriais que contém informações de CVI (baixo ou nulo, moderado e alto) bem como características físicas de todo o litoral. Todas essas informações adquiridas são divididas em setores conforme citados anteriormente. Embora toda a costa pernambucana tenha cerca de 187 km, contabilizou-se um total de 171 setores (1 km de extensão cada), distribuídos ao longo do litoral, tendo em vista a indisponibilidade de dados do índice de vulnerabilidade para alguns poucos quilômetros de costa. Contudo, isso não interfere nos resultados e análises almejados no presente trabalho.

3.3 Métodos

A Figura 2 representa de forma simplificada as etapas da metodologia a serem adotadas, bem como os materiais relacionados.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: O autor.

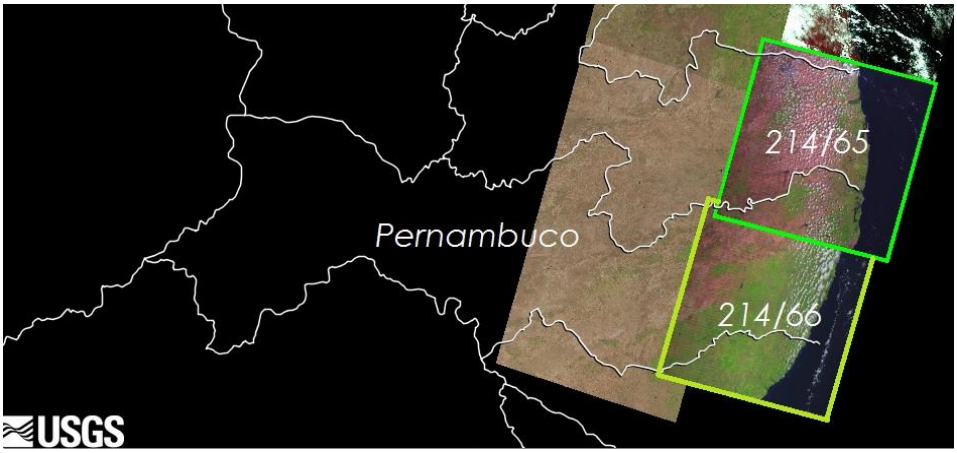
Este fluxograma apresenta três colunas. A primeira refere-se à sequência de etapas realizadas para se obter a série histórica de NDVI entre os anos 2013 e 2016, utilizando imagens do sensor OLI (*Landsat* 8). A segunda está relacionada ao procedimento de verificação das correlações existentes entre os anos das séries contendo o NDVI, para a verificação da dinâmica da cobertura do solo, bem como a avaliação da influência através da divisão de setores considerando a

largura de 50 e 100 metros, para assim verificar o comportamento amostral de correlação estatística com os dados CVI e ainda a validação da série de NDVI através do VCI. A terceira e última coluna refere-se às análises estatísticas realizadas entre os dados de vulnerabilidade à erosão costeira e a série histórica de NDVI e a classificação do relacionamento existente entre esses dados, bem como a validação da série histórica de NDVI, para posterior avaliação da qualidade da classificação.

3.3.1 Procedimentos Metodológicos

Para a obtenção dos valores de NDVI, foi realizada, inicialmente, a aquisição das Imagens *Landsat* 8 OLI, através do portal *online* do seguinte sítio: http://glovis.usgs.gov/. Para o recobrimento total da área litorânea de Pernambuco, área de estudo escolhida nesta pesquisa, foram necessárias duas cenas *Landsat* 8 OLI, para cada ano, de órbita 114 e pontos 65 e 64, como mostra a Figura 3. Portanto, foram utilizadas no total 4 pares de cenas OLI, os quais passaram pelo processo para a geração do mosaico (cada par).

Figura 3 – Órbita e Pontos das cenas do sensor OLI do satélite *Landsat* 8 que cobrem a área costeira de Pernambuco.



Fonte: glovis.usgs.gov.

Tendo em vista o objetivo do trabalho não contemplar o uso de multi-sensores orbitais, foram adquiridas imagens de um intervalo curto de tempo (2013 a 2016), já que partir de 2013 o OLI entrou em funcionamento, e as imagens multi-espectrais passaram a ser disponibilizadas pela USGS.

Cabe salientar que estas imagens são datadas do período mais chuvoso para a região litorânea do Nordeste, que vai de Fevereiro a Junho, conforme a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), devido ao fato que quanto mais chuva maior a umidade do solo e consequentemente serão melhores as condições hidrológicas da cobertura vegetal, resultando assim, quando avaliados os valores de NDVI, uma fácil distinção dos valores que representam vegetação saudável, permitindo uma melhor discriminação em relação às outras feições da cobertura do solo.

Cada imagem *Landsat* 8 OLI cobre uma extensão de aproximadamente 190 km por 196 km. Diante disto foram utilizadas as imagens na sua extensão total para a geração do NDVI. Os procedimentos para o cálculo do NDVI para as imagens provenientes dos sensores TM e OLI são distintos. Para as imagens do TM geralmente é realizada a calibração radiométrica para a conversão de número digital (*ND*) para radiância espectral (*Lλi*), por meio da Equação 8, vista em Markan e Baker (1987).

$$\mathrm{L\lambda i} = \mathrm{a} + \frac{\mathrm{b} + \mathrm{a}}{255} * \mathrm{ND} \qquad (8)$$

Por outro lado, para a obtenção do NDVI através de imagens do sensor OLI foi calculada, a partir do número digital (*ND*), diretamente a reflectância, tendo em vista que as imagens já são disponibilizadas pelo *United States Geological Survey* (USGS) após um processo de correção atmosférica. Portanto é desprezada a realização do procedimento de correção atmosférica.

Os procedimentos para a obtenção do NDVI consistiram em calcular a reflectância planetária no topo da atmosfera (reflectância TOA) a partir do ND (Equação 9) e aplicar a Equação 10, apresentada por Rouse (1973).

$$\rho\lambda' = M\rho Qcal + A\rho \qquad (9)$$

Onde: **ρλ'** = Reflectância TOA sem correção do ângulo solar; **Mρ** = fator multiplicador de escala específico de cada banda presente nos metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_x); **Aρ** = fator multiplicador de escala específico de cada banda presente nos metadados (REFLECTANCE_ADD_BAND_x); **Qcal** = Número digital (ND) dos pixels quantificado e calibrado pela USGS EROS Center.

Por conseguinte o NDVI foi calculado por meio da Equação 3, (ROUSE, 1973; HUETE, 1988):

A partir das Equações 9 e 3 foram obtidas quatro pares de imagens classificadas (cada par com as imagens correspondentes a mesma data ou próximas) pelo NDVI que cobriram totalmente a área de estudo do presente trabalho (faixa litorânea). Em suma, os valores de NDVI obtidos para cada setor são uma média de todos os valores de NDVI presentes em cada pixel incluídos neste setor. Portanto para uma avaliação da eficácia da extração dos valores de média do NDVI por setor a partir das imagens, bem como para uma validação desta etapa da metodologia, foram obtidos valores de NDVI para toda a extensão da área de estudo, porém considerando setores com extensão de 1 km e largura de 50 m e setores com extensão de 1 km e largura de 100 m. Podendo, a partir disso, comparar os valores estatisticamente e as caraciterísticas da área visualmente e assim chegar à conclusão se os valores de média de NDVI apresentam diferenças significativas conforme a variação na largura considerada do setor, e enfim escolher qual a largura mais adequada.

A escolha dos valores 50 e 100 metros de largura para a avaliação é justificada pelo fato de essas medidas atenderem a dois critérios para a compatibilização dos valores de NDVI e CVI. O primeiro critério é o melhor aproveitamento da quantidade de *pixels* considerados para a avaliação dos valores de NDVI por setores. Por exemplo, a partir de um setor que tem 50 metros de largura e 1000 metros de comprimento, vai ser calculado o valor médio de NDVI baseado em aproximadamente 1500 a 2000 pixels, tendo em vista cada pixel da imagem OLI utilizada representar 30 metros de largura por 30 metros comprimento (i.e, resolução espacial), evitando-se portanto a utilização de um valor de largura muito pequeno para os setores. Já o segundo critério para a avaliação da compatibilização entre o NDVI e o CVI, está relacionado à resolução espacial das amostras coletadas em campo para o cálculo do CVI (i.e, na produção do Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira) realizado por Martins (2015) que foi de 1 km contado ao longo da costa e uma largura de aproximadamente 50 m (como pode ser visto na Figura 4), sendo portanto interessante a obtenção dos valores de NDVI numa área de extensão compatível com as observações utilizadas para o cálculo do CVI.

Após a avaliação para discernir qual a melhor largura de setor a ser usada foi realizada a organização dos dados obtidos para cada ano (2013, 2014, 2015 e 2016). Sendo portanto extraídos os valores de NDVI numa faixa em direção ao continente de 50 metros contados a partir e perpendicularmente à linha de costa atual do estado de Pernambuco, de forma que restasse para a análise uma faixa que contemplasse apenas a área de interesse, ou seja a Zona Costeira.

Salienta-se que a linha de costa usada como referência para o traçado dos setores é reconhecida como oficial, por decreto de número 42.010, de 4 de Agosto de 2015, (http://www.semas.pe.gov.br/web/semas/mapa-da-linha-de-preamar1), e foi gerada através de levantamento GNSS, onde se percorreu toda a extensão do litoral do estado de Pernambuco, identificando-se e mapeando-se a feição indicada como a linha de costa para o ano de 2014. Por conseguinte, considera-se este como um dado conciso para a área de estudo em questão.

O procedimento para a geração da série temporal de NDVI partiu da extração dos valores de média para cada setor a partir do raster NDVI gerado para cada ano, considerando setores com extensão de 1 km e largura 50 metros, foram organizados os dados de média de NDVI para cada setor, bem como os valores de CVI. A proposta nesta etapa foi gerar uma classificação da correlação existente entre a presença ou ausência de cobertura vegetal – identificada usando-se NDVI - com o índice de vulnerabilidade (CVI).

A Tabela 3 é um extrato da planilha de dados onde estão as médias de NDVI calculadas por setor para cada ano e utilizados nas análises deste trabalho, e é mostrada integralmente no Apêndice A, que reflete como foi realizada a organização dos dados da série histórica de NDVI.

Tabela 3 – Recorte da planilha de valores de média de NDVI para cada setor cobrindo a série histórica de 4 anos.

SETORES	2013	2014	2015	2016
	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
1	0,38	0,32	0,25	0,32
2	0,46	0,43	0,37	0,46
3	0,33	0,30	0,24	0,26
...	...	...	...	...

Fonte: O autor.

Observa-se, portanto, na Tabela 3, que foram obtidas as médias dos valores de NDVI para cada um dos 171 setores para os anos da série histórica (2013, 2014, 2015 e 2016). Esses dados foram avaliados a partir do cálculo da correlação entre os anos da série bem como do calculo do intervalo de confiança entre as médias das séries.

Com os dados NDVI e CVI devidamente organizados foi selecionado o ano de 2014 da série histórica de NDVI para esta classificação, motivado prioritariamente pela proximidade da data da imagem com a data da aquisição *in loco* dos dados usados para o cálculo do CVI, e idealizada uma classificação do relacionamento (correlação) entre a vegetação e o índice de vulnerabilidade à erosão costeira. Para a realização dessa classificação foram determinados parâmetros, que pode ser vistos na Tabela 4, onde para setores com valores que indicassem presença de vegetação, ou seja NDVI maior que 0,25 (esse valor inclui vegetação saudável rasteira e de maior porte: tipos de cobertura do solo que são característicos do litoral pernambucano) e também apresentasse valor de CVI baixo, teria alta correlação, CVI moderado teria correlação moderada, enquanto CVI alto correlação baixa. Por outro lado, para os setores com valores de média de NDVI que indicassem ausência de vegetação, (NDVI $\leq$ 0,25), e por outro lado tivessem valores de CVI baixo, teria baixa correlação, CVI moderado teria correlação moderada e por fim CVI alto teria correlação alta.

Tabela 4 – Parâmetros determinados para a classificação da correlação entre NDVI e CVI.

CVI	NDVI	CLASSIFICAÇÃO
ALTO	NDVI > 0,25	BAIXA
MODERADO	NDVI > 0,25	MODERADA
BAIXO	NDVI > 0,25	ALTA
ALTO	NDVI $\leq$ 0,25	ALTA
MODERADO	NDVI $\leq$ 0,25	MODERADA
BAIXO	NDVI $\leq$ 0,25	BAIXA

Fonte: O autor.

Portanto com a classificação da correlação entre a vegetação saudável (NDVI) e o índice de vulnerabilidade à erosão costeira (CVI) realizada, utilizando os parâmetros da Tabela 4, foram avaliados os resultados utilizando-se distribuição de frequência pontual para dados discretos, onde foram calculadas as freqüências absoluta, relativa e percentual de incidências de cada classe da classificação proposta.

Para a validação da classificação da correlação entre NDVI e CVI foi utilizado o *Vegetation Condition Index* (VCI), que permitiu o conhecimento das condições da vegetação ao longo dos

anos da série temporal (2013 a 2016) e, por conseguinte, a seleção dos setores que mostraram melhores condições ao longo dos 4 anos considerados, permitindo assim a investigação da influência das alterações climáticas ao longo do tempo e a interferência dessas mudanças nos valores de NDVI.

A partir do resultado da validação da classifcação através do VCI foi possível identificar os setores os quais apresentaram maior confiabilidade quanto aos valores anuais de NDVI e a partir disso, utilizando apenas esses setores validados, foi realizada novamente a classificação da correlação entre NDVI e CVI utilizando os mesmos parâmetros da Tabela 4 e calculadas estatísticas descriticas (distribuição de frequências, histograma, gráfico de setores) e ainda produzido um mapa para posterior análise visual da distribuição espacial da correlação classificada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos no trabalho. Parte do valor de largura encontrado e adotado como compatível com os dados de NDVI e CVI. Também trás a série histórica de NDVI, a qual mostra detalhes do comportamento da vegetação entre os anos 2013 a 2016. Por fim a classificação da correlação entre o NDVI e o CVI, obitida a partir dos parâmetros mostrados na Tabela 4.

4.1 Largura do Setor para a Compatibilização entre NDVI e CVI

Com os dados de NDVI organizados foi possível verificar, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson, tanto o relacionamento entre os valores de NDVI obtidos para cada ano, o que permitiu apontar o estado da dinamicidade na faixa litorânea considerada para estudo, como também entre os valores obtidos considerando-se 50 e 100 metros de extensão nos setores para a extração dos valores de NDVI, o que mostrou a diferença entre os valores quando consideradas extensões distintas.

Calculando-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) é possível identificar a diferença entre os valores de média do NDVI considerando diferentes larguras defaixas (50 m e 100 m de extensão) contada a partir da linha de costa. Nesta análise foi calculada a correlação entre os valores médios obtidos pelo NDVI nos setores conforme o respectivo ano (Tabela 5).

Tabela 5 – Correlação (r) entre os valores médios de NDVI levando-se em consideração a variação na largura dos setores (50m e 100m).

50m/100m	2013	2014	2015	2016
2013	0,43		0	0
2014	-	0,41	0	0
2015	-	-	0,40	0
2016	-	-	-	0,51

Fonte: O autor.

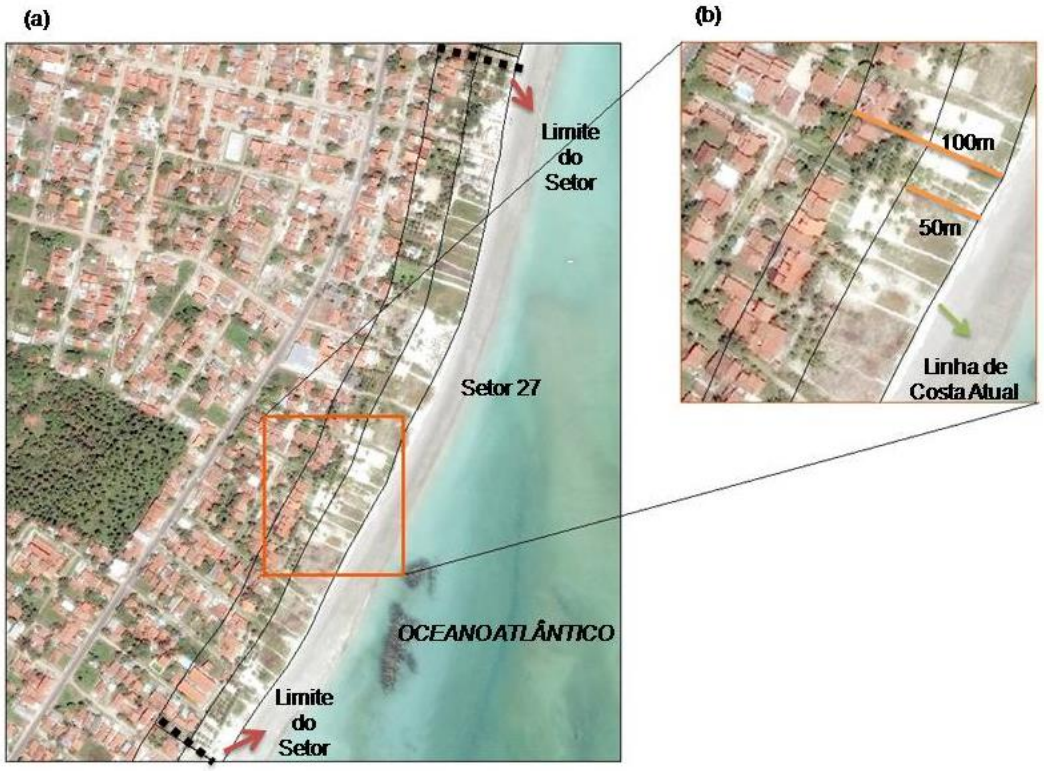
Os baixos valores de correlação apontam uma diferença considerável nos dados extraídos sobre as imagens de NDVI. Isso pode ser compreendido quando observada a Figura (4), que mostra a diferença de feições da cobertura do solo que são consideradas quando se varia a largura do setor de 50 metros para 100 metros. É perceptível fazendo-se uma análise visual que a faixa de 50m compreende predominantemente uma cobertura de solo diferente da que é considerada quando se considera uma largura de 100m. Pois nos 50m há alta presença de vegetação e areia exposta, enquanto que nos 100 metros são incluídas feições como telhados de edificações e ruas. Analisando os resultados da correlação, percebe-se uma baixa correlação entre os valores de uma amostra e outra.

Figura 4 – Divisão em setores de um trecho da Ilha de Itamaracá e as distâncias contadas perpendicularmente a partir da linha de costa (50 e 100 metros).

Fonte: O autor.

Foram coletadas amostras por setores e feitas as análises estatísticas, como também visuais realizadas a partir de imagem de alta resolução, e os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5 a 8, com os respectivos valores de NDVI extraídos mostrados na Tabela 6.

Figura 5 – Diferenças entre a faixa com 50 e 100 metros de largura. (a) Imagem de alta resolução que abrange o Setor 27 na Ilha de Itamaracá. (b) Ampliação da imagem de alta resolução (0,5 metro).

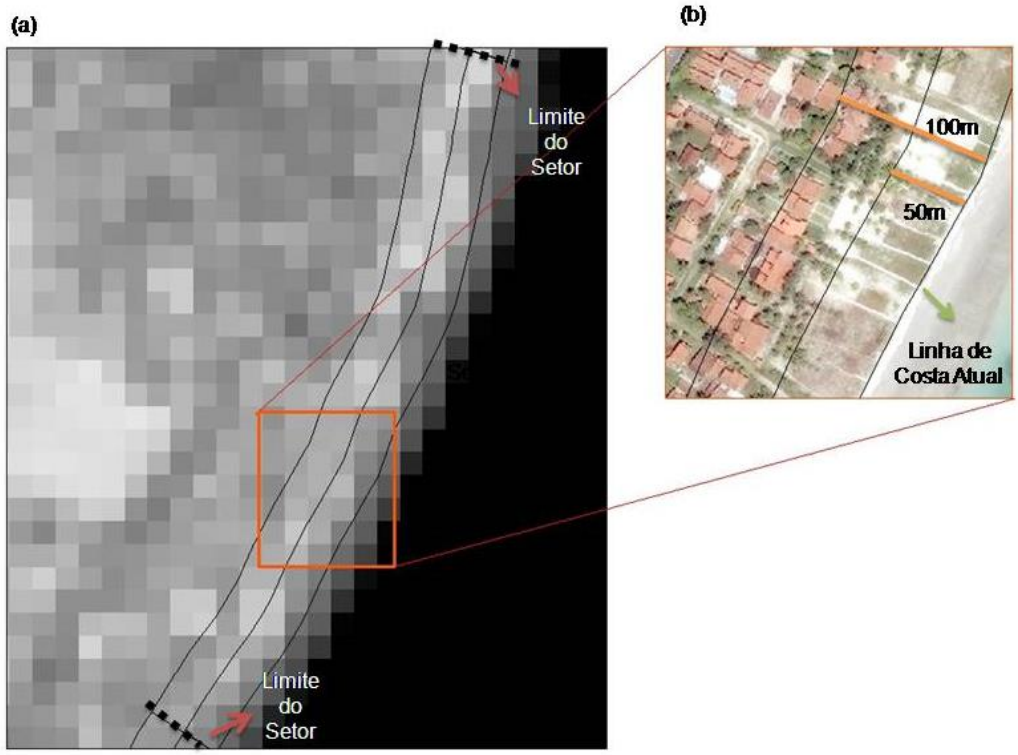


Fonte: O autor.

A Figura 5 é um exemplo é uma das poucas exceções, que quando analisado, se percebeu que os valores de média de NDVI entre os anos não apresenta uma diferença grande nos valores extraídos e mostrados na Tabela 6, porém apesar de pequena essa diferença pode causar confusão na indentificação do tipo predominante de cobertura de solo naquele determinado setor analisado devido a variedade de feições (solo exposto e telhados das edificações) que a largura de 100m contempla. Como fica visível em (b), onde se considerou a faixa com largura de 50 metros, em que

a maior parte da área ou é de solo exposto ou vegetação esparsa. Por outro lado, quando se utilizou a faixa com 100 metros de largura, vários telhados de edificações estão incluídos no setor.

Figura 6 – Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem NDVI gerada para o ano de 2013. Este recorte abrange o Setor 27 na Ilha de Itamaracá. (b) Ampliação da imagem de alta resolução (0,5 metro).

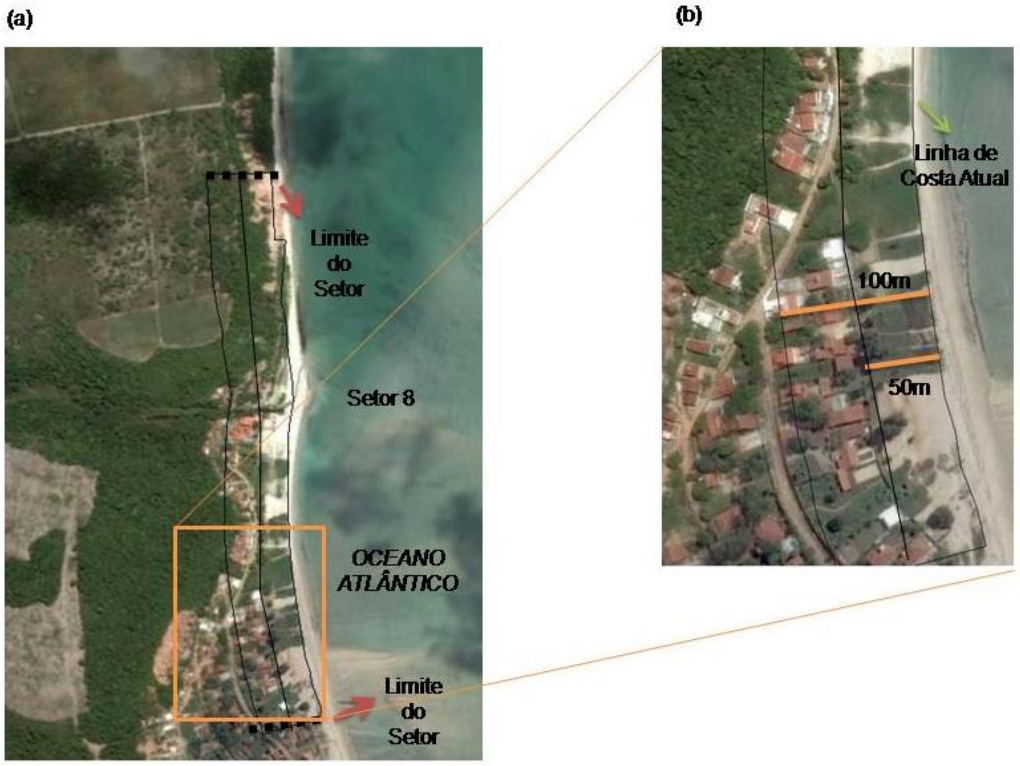


Fonte: O autor.

Analisando os dados foram identificados casos que apresentaram diferença considerável nos valores de NDVI se for considerada uma faixa de 100 metros. Já que os pixels considerados abrangeram uma área mais extensa com alvos e feições distintas, como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, onde há uma distinção considerável nos *pixels* considerados na análise, quando extraídos os valores sobre as imagens NDVI, ocasionando a diferença nos valores das médias quando se considera a largura de 50 e 100 metros. Portanto percebe-se, em confirmação aos valores de baixa

correlação entre as larguras (Tabela 5), que a adoção de uma largura de 100 metros resulta em maior confusão e erro no cálculo da média dos valores de NDVI por setor.

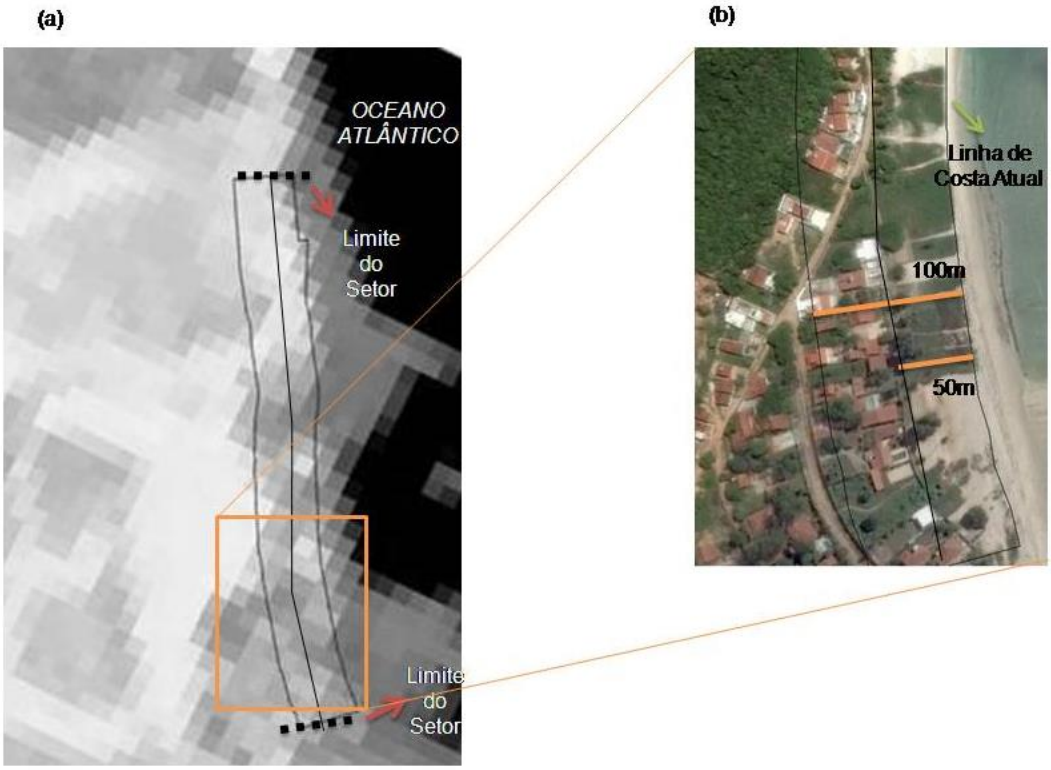
Figura 7 – Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem de alta resolução. Este recorte abrange o Setor 8 no município de Goiana. (b) Ampliação da imagem de alta resolução.



Fonte: O autor.

O recorte (a) de imagem de alta resolução e NDVI das Figuras 7 e 8, respectivamente, bem como a ampliação (b) da imagem para proporcionar uma melhor análise visual contemplam um trecho do setor norte da zona costeria do estado de Pernambuco, mais precisamente no município de Goiana.

Figura 8 – Diferenças entre as faixas de 50 e de 100 metros de largura. (a) Imagem NDVI gerada para o ano de 2013. Este recorte abrange o Setor 8 no município de Goiana. (b) Ampliação da imagem de alta resolução.



Fonte: O autor.

Quando analisados os valores das médias dos *pixels* desse setor 8, tanto o caso em que se considerou o setor com largura de 50 metros, quanto o caso com largura de 100 metros, foi possível identificar diferença que causa confusão na identificação do tipo predominante de feição

de cobertura do solo e foi possível inferir que esta diferença está relacionada diretamente a medida da largura adotada (Tabela 6).

Tabela 6 – Média de valores das séries de NDVI com a diferença de quando se considera largura de 50 e 100 metros.

LARGURA	SETOR 27			
(metros)	2013	2014	2015	2016
50	0,33	0,29	0,25	0,33
100	0,37	0,39	0,35	0,39

LARGURA	SETOR 8			
(metros)	2013	2014	2015	2016
50	0,47	0,43	0,45	0,50
100	0,39	0,33	0,33	0,38

Fonte: O autor.

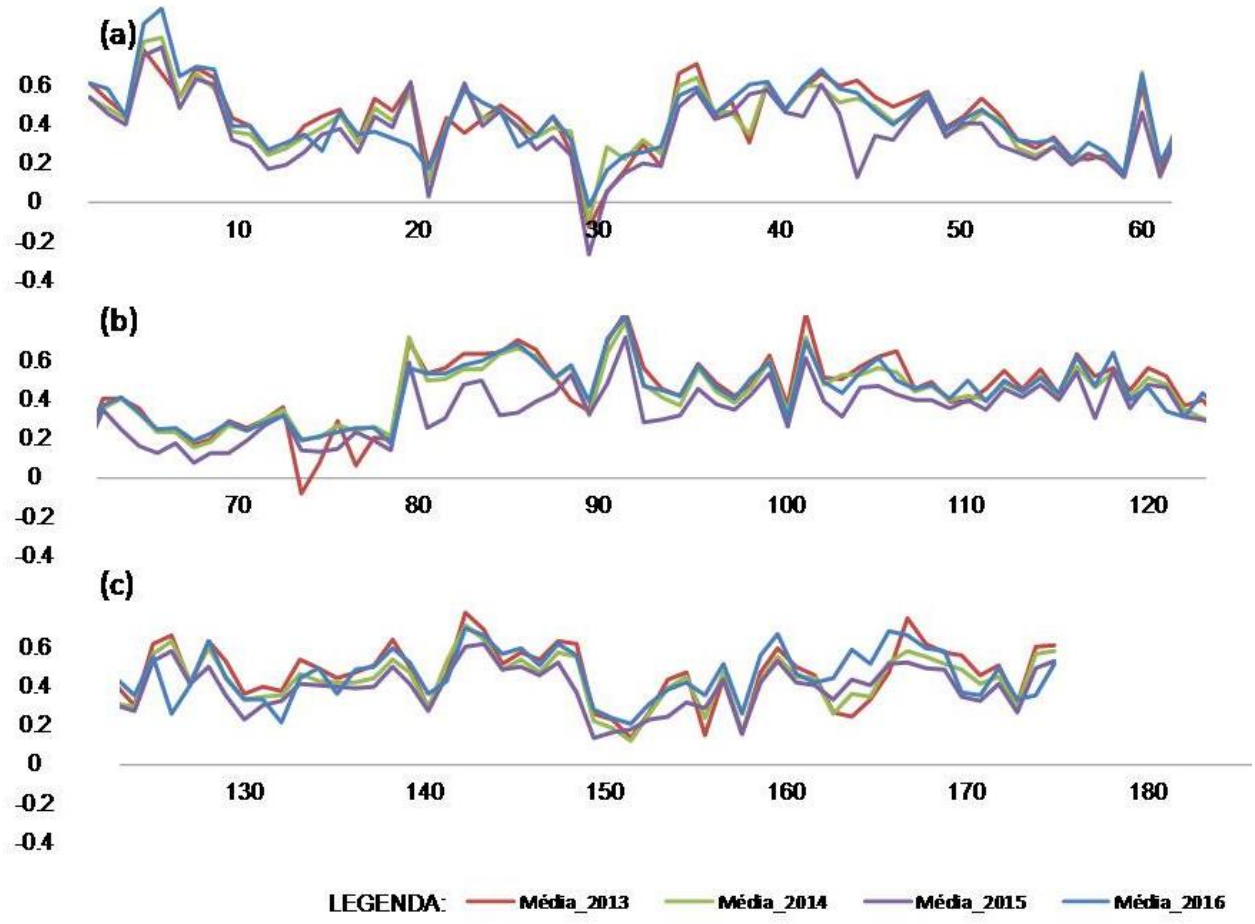
Já na avaliação dos valores de NDVI percebeu-se, assim como mostra a Tabela 6, a ocorrências das diferenças nos valores das médias de NDVI, quando se alterava a largura do setor para alguns casos, como também a semelhança entre os valores para outros casos, como explicitados nas Figuras 5 a 8. O setor 8, por exemplo, no ano de 2016 apresentou uma média de 0,50 quando considerada uma largura de 50 metros, por outro lado quando essa largura é aumentada para 100, e mais *pixels* são considerados, o valor da média é alterado para 0,38. Sendo assim o primeiro valor implicaria em presença maior de vegetação (vegetação de dunas neste caso) que é o que realmente ocorre na área como visto anteriormente, porém quando se considerou 100 metros na largura do setor, os *pixels* que foram incluídos no calculo apontaram área exposta, que no caso foi influenciado pelos telhados das casas.

Nessa análise foi possível determinar que 50 metros de largura sejam suficientes para realizar as análises do NDVI desta área de estudo. Além de assegurar uma compatibilidade com os dados do Atlas de vulnerabilidade (CVI), tendo em vista que foram gerados baseados em dados observados ao longo do litoral, não se considerando uma longa faixa adentro do continente.

4.2 Série Histórica de NDVI

Levando em consideração os 50 metros de largura foram extraídos das imagens NDVI os valores dos pixels e calculadas as médias dos setores. A Figura 9 mostra os valores de NDVI gerados a partir da série temporal de imagens do sensor OLI. No eixo das abscissas cada setor está enumerado em ordem seqüencial desde 1 (norte da área de estudo) até 171 (sul), enquanto no eixo das ordenadas estão os valores de NDVI.

Figura 9 – Gráfico da distribuição espacial dos valores da série histórica de NDVI. (a) Valores nos setores 1 a 60; (a) Valores nos setores 61 a 120; (a) Valores nos setores 121 a 171.



Fonte: O autor.

Visualmente o gráfico demonstra uma predominância na uniformidade dos valores de NDVI para cada setor ao longo dos anos, ou seja, não há alterações consideráveis (na maior parte dos setores analisados) na cobertura do solo ao longo deste período (2013 a 2016), o que pode ser confirmado através dos valores de correlação de Pearson obtidos para esses dados (Tabela 7).

Tabela 7 – Correlação (r) entre as séries de NDVI.

	2013	2014	2015	2016
2013	-	0,94	0,83	0,83
2014	-	-	0,89	0,88
2015	-	-	-	0,84
2016	-	-	-	-

Fonte: O autor.

Os valores de correlação apresentados para a verificação da relação entre o NDVI nos anos considerados na série histórica variam entre 0,83 e 0,94, o que implica em uma alta correlação e se traduz numa baixa dinâmica das alterações na cobertura do solo para a área de estudo no período considerado. Há uma forte presença de construções das mais diversas ao longo do litoral pernambucano, contudo a análise dos últimos quatro anos não detectou uma mudança na cobertura do solo da faixa considerada de 50 metros contados a partir da linha de costa, utilizando os critérios do experimento proposto.

O intervalo de confiança entre as médias da série de NDVI (0,33; 0,32; 0,27; 0,33), por sua vez, foi calculado adotando-se como nível de confiança 95%. Com um erro padrão de 0,14 o intervalo de confiança obtido foi 0,28 e 0,34, tendo, portanto, uma amplitude de +-0,03.

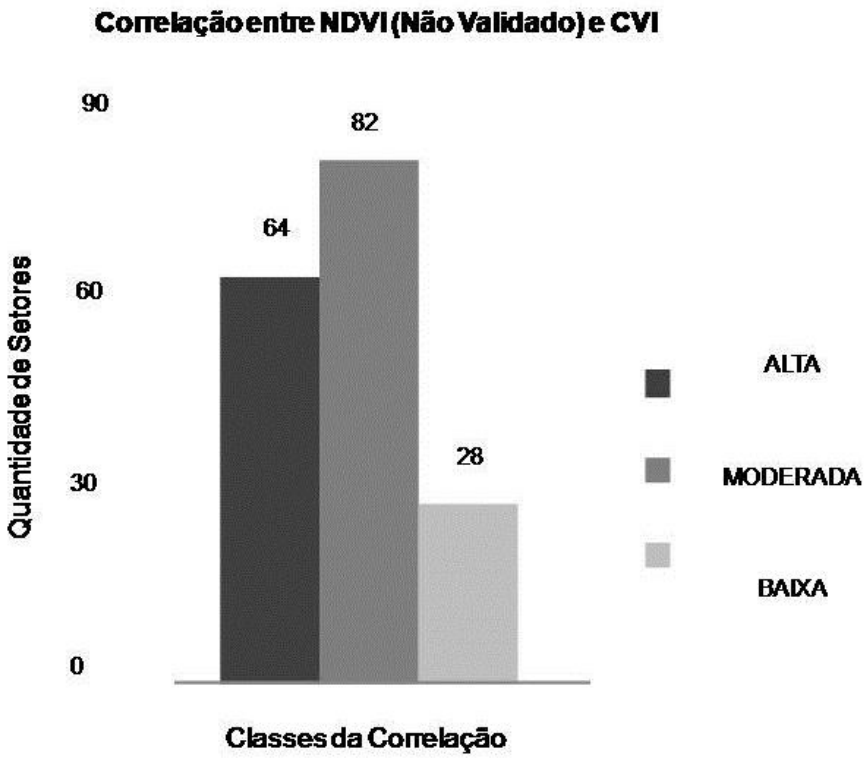
4.3 Classificação da Correlação entre NDVI e CVI

Tendo em vista a correlação apontada entre as séries NDVI e o intervalo de confiança calculado, para classificação da correlação existente entre o índice de vegetação (NDVI) e o índice de vulnerabilidade (CVI), foi selecionado o ano de 2014 da série histórica de NDVI para esta classificação, motivado prioritariamente pela proximidade da data da imagem com a data da aquisição *in loco* dos dados usados para o cálculo do CVI.

Usando-se os parâmetros da Tabela 4 a classificação da correlação entre a presença de vegetaçaõ saudável (apontada pelo NDVI) e o Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (produto final do CVI) foi realizada e permitiu obter resultados, que estão organizados no histograma (Figura 10), e mostram que 64 dos 171 setores têm alta correlação entre o NDVI e o CVI, 82 setores têm correlação moderada e 28 baixa.

Recorda-se que, para setores com valores que indicassem presença de vegetação NDVI maior que 0,25 é considerada como vegetação saudável (rasteira ou de maior porte), tipos estes de cobertura do solo característicos do litoral pernambucano. Logo os setores com médias de NDVI que representam vegetação que tivessem índice CVI classificado como baixo, teria alta correlação, já CVI moderado teria correlação moderada, enquanto CVI alto correlação baixa. Por outro lado, para os setores com valores de média de NDVI que indicassem ausência de vegetação, (NDVI menor ou igual 0,25), e tivessem valores de CVI baixo, teria baixa correlação como resultado, já CVI moderado teria correlação moderada e por fim CVI alto teria correlação alta.

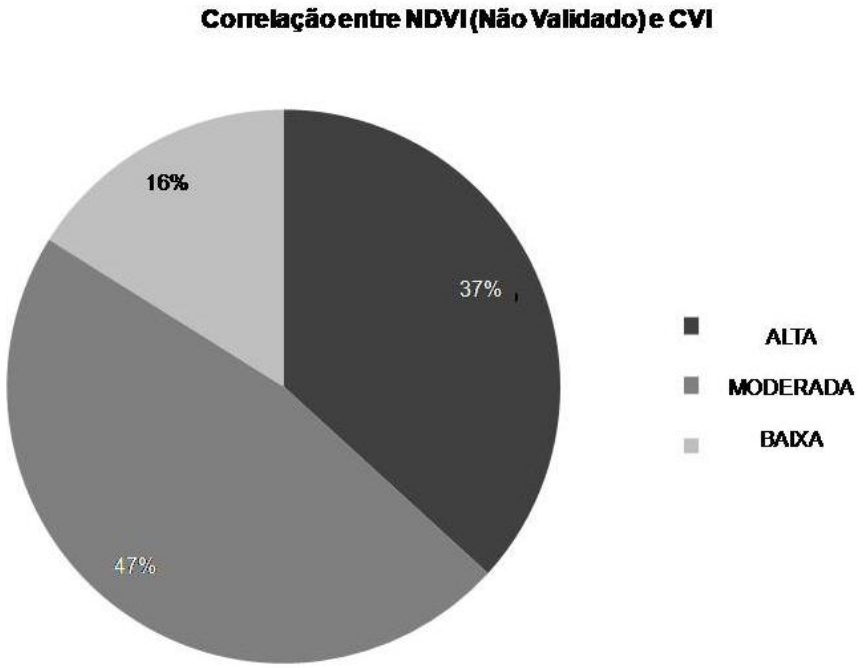
Figura 10 – Histograma da distribuição de frequências absolutas da classificação da correlação entre o NDVI e o CVI dos 171 setores analisados.



Fonte: O autor.

A partir das frequências absolutas obtidas, as frequências percentuais puderam ser calculadas, como pode ser visto no gráfico circular, na Figura 11, e mostraram que 84% dos 171 setores analisados ao longo do litoral do estado de Pernambuco têm alta ou moderada correlação entre a presença ou ausência de cobertura vegetal e a vulnerabilidade à erosão costeira, e apenas 16% tem baixa correlação.

Figura 11 – Gráfico da distribuição de frequências percentuais da classificação da correlação entre o NDVI e o CVI dos 171 setores analisados.



Fonte: O autor.

Na Tabela 8 é mostrada uma síntese dos resultados das frequências calculadas para cada classe obtidas no procedimento de classificação da correlação entre NDVI e CVI.

Tabela 8 – Resultados dos cálculos da distribuição de frequência dos dados quantitativos da classificação da correlação entre NDVI e CVI.

Classes	Frequência	Frequência Relativa	Frequência Percentual
Baixa	28	0,16	16%
Moderada	82	0,47	47%
Alta	64	0,37	37%

Fonte: O autor.

Além dos valores já mostrados de frequências absolutas e percentuais nas Figuras 10 e 11, a Tabela 8 mostra a frequência relativa, que é similar a frequência percentual, porém é mostrada num intervalo que vai de 0 a 1, e apresenta para a classificação da correlação 0,16 para correlação baixa, 0,47 para moderada e 0,37 para alta.

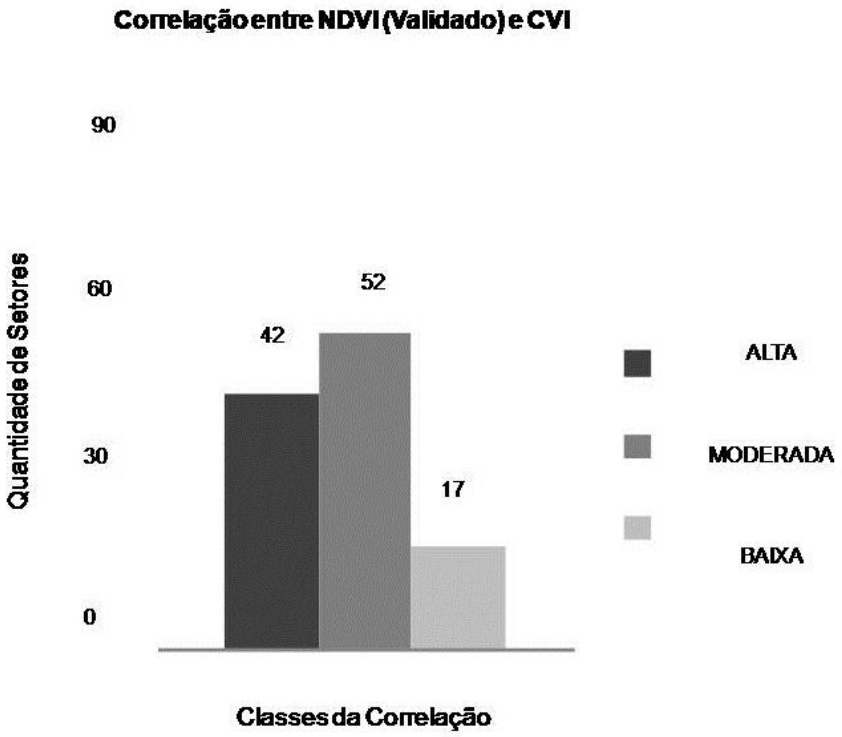
Sabe-se, porém, que diversos fatores relacionados às mudanças climáticas, como umidade do solo e precipitação, interferem nas condições fenotípicas da vegetação, o que como conseqüência pode interferir nos resultados dos valores de NDVI. Portanto faz-se necessária uma análise dos dados considerando-se esses fatores que têm relação com as condições da vegetação.

Como exposto o *Vegetation Condition Index* (VCI) é um índice utilizado para se avaliar a condição da vegetação ao longo de uma série temporal de dados de um mesmo período. Por exemplo, no caso do presente trabalho, foram utilizadas imagens do sensor OLI capturadas nos anos 2013, 2014, 2015 e 2016, todas no período chuvoso para a zona costeira da região nordeste (período entre fevereiro e junho).

Aplicando o VCI, que mostra em porcentagem os valores para cada setor analisado – quanto mais próximo a 100% mais a vegetação permaneceu em boas condições ao longo dos anos considerados na série – os resultados mostraram que 111 dos 171 setores analisados apresentam um VCI maior ou igual a 70%. Esses valores podem ser encontrados no Apêndice B.

Avaliando-se apenas os 111 setores apontados com presença de vegetação em boas condições ao longo dos anos da série temporal considerada obteve-se como resultado, através da classificação mostrada na Tabela 3 e usando-se estatística descritiva, que 42 dos 111 setores têm alta correlação entre o NDVI validado pelo VCI e o CVI, 52 setores têm correlação moderada e 17 considerada baixa, como mostra a Figura 12.

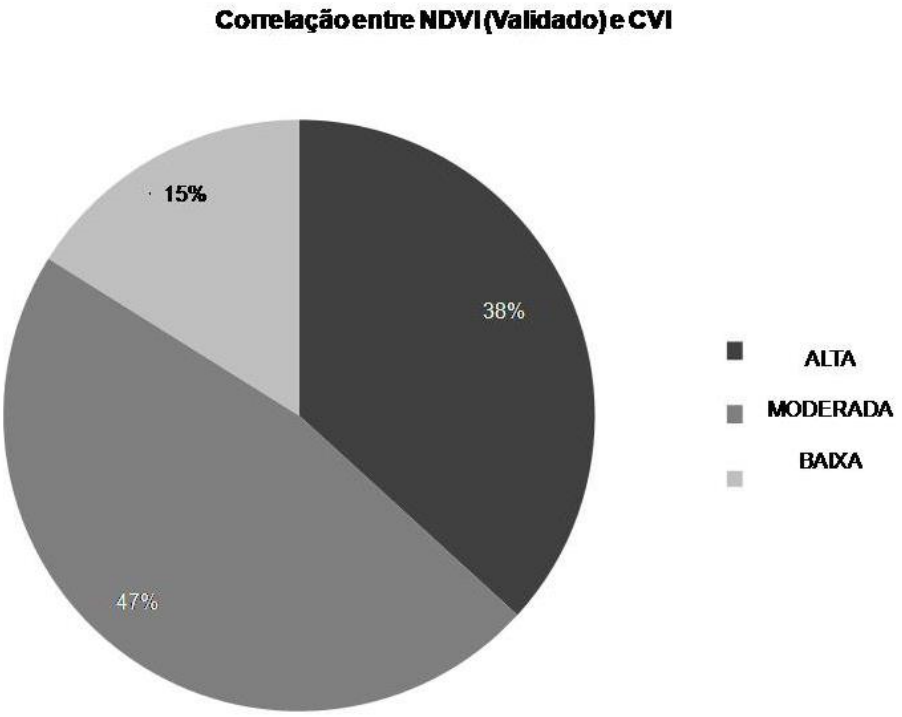
Figura 12 – Histograma da distribuição de frequências absolutas da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados.



Fonte: O autor.

A partir das frequências absolutas obtidas, as frequências percentuais puderam ser calculadas, como pode ser visto no gráfico circular, na Figura 13, e mostraram que 85% dos 111 setores analisados ao longo do litoral do estado de Pernambuco têm alta ou moderada correlação entre a presença ou ausência de cobertura vegetal e a vulnerabilidade à erosão costeira, e apenas 15% tem baixa correlação.

Figura 13 – Gráfico da distribuição de frequências percentuais da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados.



Fonte: O autor.

A Tabela 9 mostra uma síntese dos resultados das frequências calculadas para cada classe obtidas no procedimento de classificação da correlação entre NDVI validados e o CVI.

Tabela 9 – Resultados dos cálculos da distribuição de frequência dos dados quantitativos da classificação da correlação entre NDVI validado e CVI.

Classes	Frequência	Frequência Relativa	Frequência Percentual
Baixa	17	0,15	15%
Moderada	52	0,47	47%
Alta	42	0,38	38%

Fonte: O autor.

Além das estatísticas mostradas nas Figuras 12 e 13, a frequência percentual também é exibida na Tabela 9 no intervalo entre 0 e 1, e apresenta para a classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI, 0,15 para correlação baixa, 0,47 para moderada e 0,38 para alta.

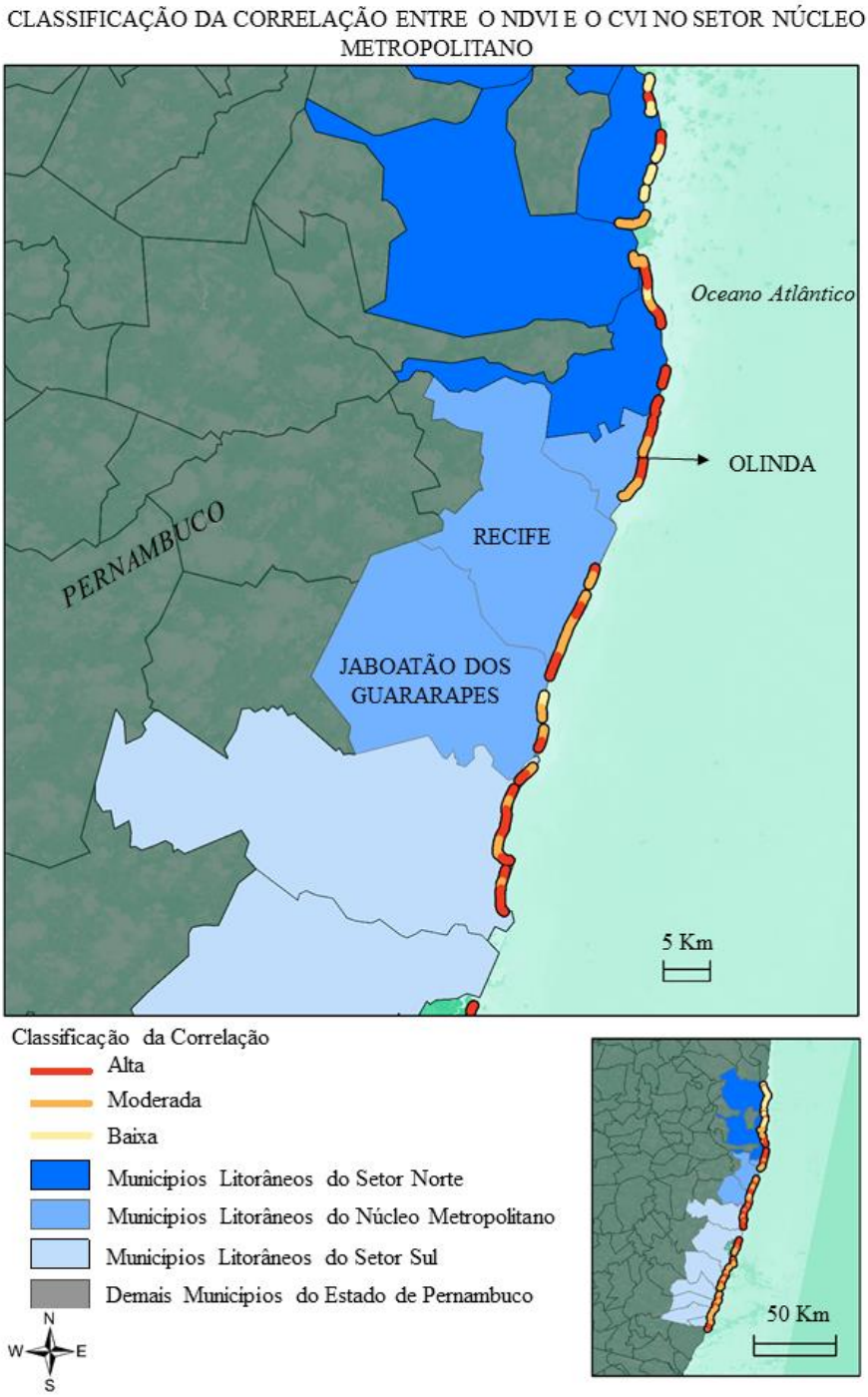
Avaliando-se esses resultados foi possível verificar que não houve alterações significativas considerando a correlação existente entre os valores de NDVI - Índice de Vegetação - e CVI – Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira - quando considerados os dados de NDVI não validados pelo VCI – *Vegetation Condition Index* - e os dados por outro lado validados.

A partir dos resultados da classificação para avaliação do relacionamento (correlação) existente entre os dados de NDVI validados pelo VCI e os dados de vulnerabilidade à erosão costeira, provenientes da metodologia CVI, foi gerado um esboço de um mapa apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Mapa proveniente da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados (Setor Norte).

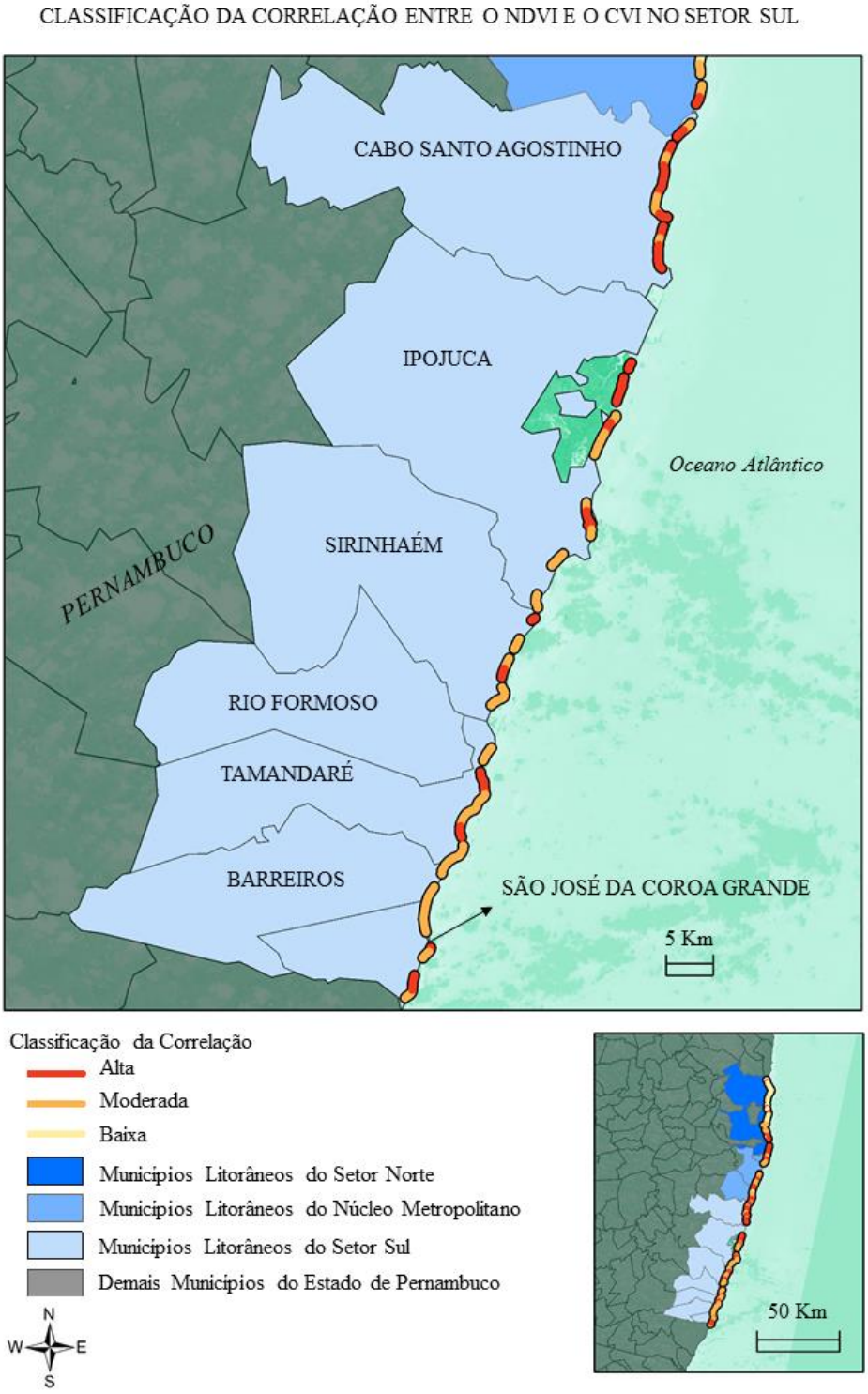
Fonte: O autor.

Figura 15 – Mapa proveniente da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados (Núcleo Metropolitano).



Fonte: O autor.

Figura 16 – Mapa proveniente da classificação da correlação entre o NDVI validado e o CVI dos 111 setores analisados (Setor Sul).



Fonte: O autor.

A partir deste é possível analisar visualmente que a maioria dos 111 setores analisados têm alta ou moderada correlação entre a presença ou ausência de cobertura vegetal e a vulnerabilidade à

erosão costeira. A predominância dos setores com baixa correlação se dá na zona costeira do município de Goiana e da Ilha de Itamaracá. Os demais municípios têm na maior parte da sua extensão presença de correlação alta e moderada.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido objetivando classificar a faixa litorânea do Estado de Pernambuco usando-se NDVI e índice de vulnerabilidade à erosão costeira (CVI). Foi gerada uma série histórica de curto prazo de NDVI e usados os valores de índice de vulnerabilidade. Ambos os dados foram distribuídos em 171 setores compatíveis ao longo da área de estudo. Estes setores foram resultados da subdivisão da área de estudo em trechos com extensão (contada ao longo da linha de costa) de 1000 metros e largura (perpendicularmente contada a partir da linha de costa em direção ao continente) de 50 metros. Então, foi proposta uma classificação, considerando-se níveis (Alto, Moderado e Baixo) para verificação do relacionamento entre a presença de vegetação indicada pelo NDVI e a vulnerabilidade à erosão apontada pelo CVI.

A série de curto prazo de imagens NDVI gerada permitiu chegar-se a conclusão que em relação à cobertura vegetal a área estudada apresenta baixa dinamicidade ao longo dos anos avaliados, na maior parte dos setores analisados. A correlação de Pearson calculada entre as séries mostra valores entre 0,83 e 0,94. Ou seja, não há uma considerável perda de cobertura vegetal, ou alterações similares ao longo desses anos, de acordo com os dados utilizados.

A partir dos resultados gerados e das análises já realizadas foi possível verificar, por meio de uma classificação com variáveis e parâmetros determinados, uma considerável correlação entre cobertura vegetal (identificada e extraída pelo NDVI) e o índice de vulnerabilidade (calculado pela metodologia CVI), tendo em vista que os valores de NDVI e CVI têm 84% de correlação moderada ou alta.

Sabendo-se, portanto, que quando classificada a correlação entre o NDVI e o CVI antes e depois da validação dos valores de NDVI, por meio do uso do Índice VCI, não houve alteração significativa nos resultados da classificação.

A validação dos valores de NDVI através do VCI pode fornecer uma maior solidez aos resultados, tendo em vista que a área estudada foi a zona costeira, que é conhecida pela alta dinamicidade dos seus sistemas, feições e estruturas ao longo dos anos. Entretanto, para a cobertura

vegetal no período analisado, não mostrou uma variação que viesse a interferir no objetivo principal do trabalho que foi a avaliação da correlação entre a vegetação (NDVI) e a vulnerabilidade à erosão costeira (CVI).

A classificação mostrou que 15% do NDVI validado apresentam baixa correlação com o Índice de Vulnerabilidade, sendo possível concluir que existem mais fatores além da cobertura vegetal que influenciam na dinâmica da vulnerabilidade de determinada área costeira. Portanto, é conclusiva a viabilidade da metodologia desenvolvida neste trabalho e também é aconselhado que sejam analisados com cautela e com um olhar amplo os processos, variações e atividades que ocorrem nas áreas estudadas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, ampliando-se os objetivos a partir do presente trabalho desenvolvido, sugere-se que seja realizada uma avaliação precisa da dinamicidade da cobertura vegetal. Pode ser interessante aprofundar-se mais em modelos estatísticos e matemáticos não-lineares, a fim de proporcionar uma modelagem mais próxima possível da realidade, alcançando novos patamares na análise.

Além disso, uma avaliação que transponha o que foi alcançado nesse trabalho pode ser realizada a fim de identificar os motivos pelos quais a relação entre a vulnerabilidade e o NDVI foi classificada como baixa.

Uma sugestão que tem grande potencial de contribuição para a ciência é uma avaliação e comparação das respostas dos alvos entre as reflectâncias dos solos arenoso, argiloso, entre outros e a análise do impacto nos índices biofísicos que essas diferenças ocasionam. Como, por exemplo, a avaliação dos resultados de um índice como o SAVI aplicado a determinada região costeira, como o litoral do estado de Pernambuco, chegando, assim, a estabelecer parâmetros que tornem mais precisos e adaptados os resultados desse índice de vegetação.

REFERÊNCIAS

ALATORRE, L.; SÁNCHEZ-CARRILLO, S.; MIRAMONTES-BELTRÁN, S.; et al. Temporal changes of NDVI for qualitative environmental assessment of mangroves: Shrimp farming impact on the health decline of the arid mangroves in the Gulf of California (1990–2010). **Journal of Arid Environments**, v. 125, p. 98-109, 2016.

ATLAS de vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climaticas em Pernambuco. Recife, **Editora Universitária UFPE**, 98 p, 2015.

BARATI, S.; RAYEGANI, B.; SAATI, M.; SHARIFI, A.; NASRI, M. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 14, n. 1, 2011.

BHANDARI, A. K.; KUMAR, A.; SINGH, G. K. Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Jabalpur City. **Procedia Technology**, v. 6, 2012.

BIRKMANN, J.; CARDONA, O.; CARREÑO, M.; et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. **Natural Hazards**, v. 67, n. 2, p. 193-211, 2013.

BONINI, E. E.; BONINI, S. E. **Estatística:** teoria e exercícios. São Paulo, L.P.M, 439 p., 1972.

BORUFF, B.; EMRICH, C.; CUTTER, S. Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. **Journal of Coastal Research**, v. 215, 2005.

CHOUHAN, R; RAO, N. Vegetation Detection in Multispectral Remote Sensing images: Protective Role-Analysis of Vegetation i. 0042 Indian Ocean Tsunami. **PDPM Indian Institute of Information Technology**, 2011. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/gi4dm/pdf/op37.pdf>.

DŽUBÁKOVÁ, K.; MOLNAR, P.; SCHINDLER, K.; TRIZNA, M. Monitoring of riparian vegetation response to flood disturbances using terrestrial photography. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 195-208, 2015.

GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 89, n. 4, p. 379-398, 1991.

GU, Y.; WYLIE, B.; BLISS, N. Mapping grassland productivity with 250-m e MODIS NDVI and SSURGO database over the Greater Platte River Basin, USA. **Ecological Indicators**, v. 24, p. 31-36, 2013.

HINKEL, J.; KLEIN, R. J. T. DINAS-COAST: **Developing a Method and a Tool for Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment**. LOICZ Newsletter, n. 27, p. 1–4, 2003.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI).**Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Eletrônica (SIDRA)**. 2015. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2015.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: **Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

KARABURUN, A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. **Ozean journal of applied sciences**, 2010. Disponível em: <http://ozelacademy.com/OJAS_v3n1_8.pdf>.

MARINO, S.; ALVINO, A. Hyperspectral vegetation indices for predicting onion (Allium cepa L.) yield spatial variability. **Computer sand Electronics in Agriculture**, v. 116, p. 109-117, 2015.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. 1987. "Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances". **International Journal of remote sensing**, 8(3), 517-523. DOI: 10.14355/ijrsa.2015.05.001

MARTINS, K. A. **Vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas através de indicadores em Pernambuco, Brasil.** 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MARTINS, K. A.; PEREIRA, P. S.; LINO, P. A.; GONÇALVES, R. M. Determinação da Erosão Costeira no Estado de Pernambuco Através de Geoindicadores. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 533-546, 2016.

MUEHE, D. C. E. H. Erosão e progradação do litoral brasileiro. **Ministério do Meio Ambiente**, 2006.

MYNENI, R.; HALL, F.; SELLERS, P.; MARSHAK, A. The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 481-486, 1995.

NAKAJI, T.; IDE, R.; TAKAGI, K.; et al. Utility of spectral vegetation indices for estimation of light conversion efficiency in coniferous forests in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 5, p. 776-787, 2008.

PARTHASARATHY, A.; NATESAN, U. Coastal vulnerability assessment: a case study on erosion and coastal change along Tuticorin, Gulf of Mannar. **Natural Hazards**, v. 75, n. 2, p. 1713-1729, 2014.

QUIRING, S. M.; GANESH, S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 330-339, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). N. SP-351. Ed **Third ERTS Symposium**. 1,309-317. Washington. NASA.

SHARPLES, C. **Indicative Mapping of Tasmanian Coastal Vulnerability to Climate Change and Sea-Level Rise : Explanatory Report.** Tasmania, AU: 116p, 2006.

SHARPLES, C. et al. **The Australian Coastal Smartilne Geomorphic and Stability Map Version 1: Project Report.** Tasmania, Australia: 69p, 2009.

SMALL, C; GORNITZ, V; COHEN, JE. Coastal hazards and the global distribution of human population. **Environmental Geosciences**, 2000. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1526-0984.2000.71005.x/full>.

THIELER, E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S., National Assessment of Coastal Vulnerability to Future Sea Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. **U.S. Geological Survey**, Open-File Report 99-593, 1 sheet. 1999.

THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level RiseOpen-File Report 00-179. 1p, 2000.

VAFEIDIS, A. et al. Developing a global database for coastal vulnerability analysis: design issues and challenges. **The International Archives of Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, p. 801–805, 2004.

VEGA-LEINERT, A. C. DE LA; NICHOLLS, R. J. **Proceedings of the Survas Overview Workshop on the Future of Vulnerability and Adaptation Studies for Coastal Arenas (VA).** Londres, UK: Flood Hazard Research Center, 2001.

WAMSLEY, T.; COLLIER, Z.; BRODIE, K.; et al. Guidance for Developing Coastal Vulnerability Metrics. **Journal of Coastal Research,** v. 31, n. 6, 2015.

WOODROFFE, P. A A. & C. D. Assessing Vulnerability of Coasts To Climate Change: a Review of Approaches and Their Application To the Australian Coast. **CoastGIS**, p. 18, 2006.

ZHU, X.; LIU, D. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 102, p. 222-231, 2015.

APÊNDICE A: Série histórica de valores de NDVI

SETOR	2013	2014	2015	2016
1	0.45	0.40	0.40	0.45
2	0.39	0.36	0.34	0.43
3	0.33	0.32	0.30	0.32
4	0.58	0.62	0.56	0.68
5	0.49	0.63	0.59	0.74
6	0.40	0.40	0.36	0.48
7	0.51	0.49	0.47	0.51
8	0.47	0.43	0.45	0.50
9	0.32	0.27	0.24	0.29
10	0.29	0.26	0.21	0.29
11	0.18	0.18	0.13	0.20
12	0.21	0.21	0.14	0.22
13	0.29	0.25	0.19	0.26
14	0.32	0.29	0.26	0.20
15	0.35	0.33	0.28	0.34
16	0.23	0.23	0.19	0.26
17	0.39	0.36	0.33	0.27
18	0.35	0.31	0.29	0.24
19	0.45	0.42	0.46	0.21
20	0.13	0.08	0.02	0.13
21	0.32	0.29	0.28	0.28
22	0.26	0.44	0.46	0.42
23	0.31	0.32	0.29	0.38
24	0.37	0.34	0.35	0.35
25	0.32	0.29	0.29	0.21
26	0.25	0.25	0.20	0.25
27	0.33	0.29	0.25	0.33
28	0.19	0.27	0.18	0.24
29	-0.09	-0.07	-0.20	-0.02
30	0.04	0.21	0.05	0.12
31	0.12	0.17	0.11	0.18
32	0.22	0.24	0.15	0.19
33	0.14	0.19	0.14	0.21
34	0.49	0.44	0.37	0.40
35	0.52	0.48	0.42	0.44
36	0.33	0.34	0.32	0.33
37	0.38	0.35	0.34	0.39
38	0.22	0.26	0.41	0.45
39	0.45	0.46	0.43	0.46

40	0.35	0.35	0.34	0.35
41	0.43	0.44	0.33	0.44
42	0.49	0.45	0.45	0.50
43	0.44	0.38	0.34	0.43
44	0.46	0.40	0.10	0.42
45	0.40	0.36	0.25	0.35
46	0.36	0.31	0.24	0.29
47	0.39	0.33	0.32	0.35
48	0.42	0.41	0.39	0.42
49	0.29	0.26	0.25	0.27
50	0.32	0.29	0.30	0.32
51	0.39	0.34	0.30	0.35
52	0.33	0.32	0.22	0.30
53	0.24	0.21	0.19	0.24
54	0.21	0.18	0.16	0.23
55	0.25	0.21	0.21	0.23
56	0.17	0.16	0.14	0.16
57	0.16	0.18	0.18	0.22
58	0.18	0.16	0.16	0.19
59	0.11	0.10	0.09	0.11
59	0.45	0.50	0.34	0.48
60	0.13	0.10	0.10	0.15
61	0.30	0.27	0.26	0.27
62	0.30	0.30	0.18	0.30
63	0.26	0.24	0.12	0.25
64	0.18	0.17	0.09	0.18
65	0.19	0.17	0.13	0.19
66	0.13	0.12	0.06	0.14
67	0.15	0.14	0.09	0.17
68	0.22	0.20	0.10	0.21
69	0.19	0.18	0.14	0.18
70	0.22	0.22	0.20	0.21
71	0.27	0.26	0.24	0.24
72	-0.06	0.15	0.11	0.14
73	0.06	0.15	0.10	0.16
74	0.22	0.20	0.11	0.17
75	0.05	0.18	0.18	0.19
76	0.15	0.19	0.14	0.19
77	0.15	0.16	0.11	0.13
78	0.52	0.53	0.44	0.41
79	0.39	0.37	0.19	0.39
80	0.42	0.38	0.23	0.40
81	0.47	0.41	0.36	0.43

82	0.47	0.41	0.37	0.44
83	0.47	0.47	0.24	0.48
84	0.52	0.49	0.25	0.51
85	0.49	0.46	0.29	0.45
86	0.38	0.37	0.33	0.38
87	0.29	0.42	0.39	0.43
88	0.25	0.24	0.24	0.29
89	0.51	0.48	0.36	0.53
90	0.63	0.60	0.54	0.61
91	0.41	0.35	0.21	0.35
92	0.34	0.31	0.22	0.33
93	0.31	0.27	0.24	0.31
94	0.43	0.42	0.34	0.43
95	0.36	0.33	0.28	0.34
96	0.31	0.28	0.26	0.30
96	0.35	0.34	0.32	0.38
97	0.46	0.44	0.40	0.44
98	0.27	0.25	0.19	0.22
99	0.62	0.53	0.46	0.51
100	0.38	0.35	0.29	0.36
101	0.37	0.39	0.23	0.32
102	0.42	0.39	0.34	0.40
103	0.46	0.42	0.35	0.45
104	0.48	0.40	0.32	0.37
105	0.33	0.33	0.29	0.34
106	0.36	0.35	0.30	0.35
107	0.29	0.30	0.26	0.30
108	0.29	0.31	0.30	0.37
109	0.34	0.30	0.26	0.29
110	0.41	0.36	0.34	0.37
111	0.34	0.33	0.31	0.32
112	0.41	0.39	0.35	0.38
113	0.32	0.30	0.30	0.32
114	0.47	0.42	0.40	0.46
115	0.38	0.34	0.23	0.34
116	0.42	0.40	0.41	0.47
117	0.33	0.31	0.26	0.29
118	0.41	0.38	0.35	0.34
119	0.39	0.36	0.34	0.25
120	0.27	0.26	0.24	0.23
121	0.29	0.23	0.22	0.32
121	0.22	0.22	0.20	0.26
122	0.45	0.41	0.38	0.40

123	0.48	0.46	0.42	0.19
124	0.30	0.31	0.30	0.29
125	0.46	0.43	0.37	0.46
126	0.38	0.33	0.26	0.32
127	0.26	0.24	0.17	0.24
128	0.29	0.26	0.22	0.24
129	0.27	0.26	0.24	0.16
130	0.39	0.34	0.30	0.32
131	0.36	0.31	0.30	0.36
132	0.32	0.31	0.29	0.26
133	0.34	0.31	0.29	0.35
134	0.37	0.32	0.29	0.36
135	0.46	0.39	0.37	0.43
136	0.36	0.34	0.30	0.38
137	0.21	0.21	0.20	0.26
138	0.33	0.39	0.33	0.31
139	0.56	0.52	0.44	0.50
140	0.50	0.47	0.45	0.48
141	0.37	0.36	0.36	0.41
142	0.42	0.39	0.37	0.43
143	0.39	0.34	0.33	0.37
144	0.46	0.42	0.38	0.45
145	0.45	0.40	0.27	0.40
146	0.19	0.16	0.10	0.21
147	0.17	0.14	0.12	0.17
148	0.10	0.09	0.13	0.15
149	0.20	0.19	0.17	0.23
150	0.31	0.28	0.18	0.28
151	0.34	0.33	0.23	0.30
152	0.11	0.18	0.21	0.26
153	0.32	0.34	0.32	0.38
154	0.12	0.12	0.12	0.19
155	0.34	0.31	0.31	0.40
156	0.43	0.40	0.39	0.48
157	0.37	0.33	0.31	0.34
158	0.33	0.32	0.30	0.31
159	0.19	0.19	0.24	0.32
160	0.18	0.26	0.32	0.42
161	0.24	0.25	0.30	0.37
162	0.34	0.38	0.37	0.50
163	0.54	0.42	0.38	0.48
164	0.45	0.40	0.36	0.43
165	0.42	0.38	0.35	0.42

166	0.40	0.36	0.26	0.27
167	0.33	0.30	0.24	0.26
168	0.37	0.33	0.30	0.36
169	0.23	0.22	0.20	0.24
170	0.44	0.41	0.36	0.26
171	0.44	0.42	0.38	0.37

APÊNDICE B: Valores de *Vegetation Condition Index* (VCI) por setor

SETOR	VCI
1	100.00
2	100.00
3	75.46
4	100.00
5	100.00
6	100.00
7	100.00
8	100.00
9	63.59
10	96.83
11	100.00
12	100.00
13	66.14
14	0.00
15	90.97
16	100.00
17	0.00
18	0.00
19	0.00
20	100.00
21	0.00
22	83.17
23	100.00
24	19.01
25	0.00
26	95.88
27	99.22
28	60.98
29	100.00
30	45.68
31	100.00
32	47.63
33	100.00

34	30.32
35	13.01
36	65.92
37	100.00
38	100.00
39	95.99
40	75.06
41	99.02
42	100.00
43	89.61
44	87.31
45	66.45
46	45.21
47	40.75
48	91.13
49	64.70
50	74.22
51	54.62
52	70.71
53	93.99
54	100.00
55	56.71
56	87.24
57	100.00
58	100.00
59	90.08
59	100.00
60	100.00
61	34.16
62	100.00
63	88.35
64	100.00
65	100.00
66	100.00
67	100.00

68	96.28
69	82.58
70	45.58
71	3.18
72	99.07
73	100.00
74	58.52
75	100.00
76	94.18
77	53.97
78	0.00
79	100.00
80	88.74
81	63.63
82	75.66
83	100.00
84	94.20
85	79.85
86	89.70
87	100.00
88	100.00
89	100.00
90	83.32
91	66.70
92	95.07
93	100.00
94	97.15
95	75.01
96	83.75
96	100.00
97	61.27
98	31.29
99	35.40
100	78.83
101	56.03

102	73.70
103	98.45
104	32.82
105	100.00
106	87.76
107	100.00
108	100.00
109	42.00
110	43.47
111	58.07
112	44.83
113	100.00
114	84.49
115	74.82
116	100.00
117	47.82
118	0.00
119	0.00
120	0.00
121	100.00
121	100.00
122	28.06
123	0.00
124	0.00
125	100.00
126	48.75
127	74.26
128	27.31
129	0.00
130	23.94
131	100.00
132	0.00
133	100.00
134	91.77
135	68.07

136	100.00
137	100.00
138	0.00
139	53.83
140	56.22
141	100.00
142	100.00
143	65.11
144	83.26
145	75.46
146	100.00
147	100.00
148	100.00
149	100.00
150	75.19
151	64.96
152	100.00
153	100.00
154	100.00
155	100.00
156	100.00
157	52.99
158	25.04
159	100.00
160	100.00
161	100.00
162	100.00
163	60.62
164	80.19
165	100.00
166	8.55
167	21.32
168	87.16
169	100.00
170	0.00
171	0.00