



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 3 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.912>



ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE MÉTODOS DE VULNERABILIDADE FÍSICA EM ZONAS COSTEIRAS TROPICAIS

MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF PHYSICAL VULNERABILITY METHODS IN TROPICAL COASTAL ZONES

Débora Vieira Busman

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59078-970, Brasil
Email: busman_dv@hotmail.com*

Venerando Eustáquio Amaro

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59078-970, Brasil
Email: amaro@geologia.ufrn.br*

Pedro Walfir Martins Souza-Filho

*Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará
Campus Universitário, Belém, Pará, CEP: 66075-110, Brasil
Email: walfir@ufpa.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
15/11/2015
Aceito (Accepted):
18/03/2016

Palavras-chave:

Gestão Costeira; Análise de Componentes Principais; Erosão; Inundação.

Keywords:

Coastal Management; Principal Component Analysis; Erosion; Flooding.

Resumo:

Reduzir a subjetividade, corriqueira em estudos de vulnerabilidade física, foi o objetivo desta pesquisa que avaliou os métodos Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA) e o método proposto Vulnerabilidade Ambiental ao aumento relativo do nível médio do mar (VNMM) por meio de Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis físicas e ponderações associadas. Os municípios costeiros de Macau e Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, apresentam múltiplos conflitos de uso e ocupação do solo devido as principais atividades econômicas consistirem nas indústrias do petróleo e gás, carcinicultura, salinicultura e eólica instaladas em setores de grande susceptibilidade ambiental a impactos decorrentes de mudanças climáticas. O método com resultado mais pessimista foi o VN e o método com resultado mais otimista foi o VNMM, que apresentou áreas de hot spot ao aumento relativo do nível médio do mar. O município de Guamaré apresentou maior vulnerabilidade física em todos os métodos por exibir maior extensão de sua zona costeira em áreas planas e de baixas altitudes. De acordo com a ACP, todas as variáveis influenciaram na vulnerabilidade física nos métodos VN e VA, porém com intensidades diferentes em cada área. No método VN as variáveis geologia, declividade e solos foram as mais importantes. Estes resultados podem subsidiar o processo decisório para gestores ambientais e os métodos testados são replicáveis tanto em municípios costeiros quanto interiores.

Abstract:

Reduce subjectivity, common in studies of physical vulnerability, was the aim of this research, which evaluated the methods Natural Vulnerability (NV), Environmental Vulnerability (EV) and the proposed Environmental Vulnerability to mean Sea Level Rise (EVSLR) through Principal Component Analysis (PCA) of the environmental variables and associated weighting. The coastal municipalities of Macau and Guamaré, in Rio Grande do Norte state, northeastern Brazil, feature multiple conflicts of land use/land cover since the main economic activities consist in the oil and gas industries, salt and shrimp farming, and wind power installed in segments of great environmental susceptibility to climate change impacts. The method with more pessimistic outcome was the NV and the method with a more optimistic was the EVSLR, who presented hotspot areas to higher relative sea level rising. The municipality of Guamaré presented upper physical vulnerability in all methods by displaying its coastal zone in flat areas with low heights. According to the PCA all variables were important in NV and EV methods, but with different intensity in each area. In EVSLR method the most important variables were geology, slope, and soil. These results may support the decision-making process for environmental managers and tested methods are replicable in both coastal as inner municipalities.

1. Introdução

Às mudanças climáticas têm sido atribuídos danos ambientais e socioeconômicos em todo o mundo, sendo o aumento relativo do nível médio do mar um dos fenômenos associados de maior impacto nas zonas costeiras (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; IPCC, 2012, 2014a, 2014b). A maior parte da população mundial vive na região costeira, que exibe taxas de crescimento populacional e urbanização maiores que nas regiões interiores (NEUMANN *et al.*, 2015). Nas zonas costeiras o aumento do nível médio do mar pode provocar aumento da erosão e inundação de habitats naturais e de infraestruturas litorâneas e, conseqüentemente, impactos ambientais e socioeconômicos (DWARAKISHA *et al.*, 2009; BRASIL, 2008; IPCC, 2014a, 2014b).

Com uma zona costeira abrangendo 17 estados e quase 460 municípios, onde vivem mais de 50 milhões de habitantes, aproximadamente 30% da população (IBGE, 2011), o Brasil é o sétimo país do mundo em número de habitantes na zona costeira e o sétimo em maior proporção da zona costeira em área de baixa altitude (MCGRANAHAN *et al.*, 2007). Portanto, é um país passível aos impactos relacionados ao aumento do nível médio do mar. Cerca de 60% dos eventos naturais que atingiram o Brasil entre 1948 a 2006 com conseqüências danosas à população estiveram relacionados às inundações fluviais e/ou avanços do mar (BRASIL, 2013).

A relevância de estudos sobre a vulnerabilidade física está em prevenir impactos ambientais e socioeconômicos (RANGEL-BUITRAGO; ANFUSO, 2009) e subsidiar respostas de curto e médio prazo (BRASIL,

2008). O conceito de vulnerabilidade do meio físico natural, ou vulnerabilidade física, empregado neste estudo diz respeito à maior ou menor estabilidade das variáveis físicas dos ecossistemas segundo o princípio da ecodinâmica ou princípio da dinâmica do meio ambiente dos ecossistemas. Neste princípio, as variáveis físicas são consideradas mais estáveis, portanto menos vulneráveis, quanto mais prevalecem processos pedogenéticos, e menos estáveis e mais vulneráveis quando prevalecem processos morfogenéticos (TRICART, 1977).

Avaliar áreas quanto à vulnerabilidade física é possível por meio de diferentes métodos. O método Vulnerabilidade Natural (VN) foi proposto por Crepani *et al.* (2001) que aplicou o princípio da ecodinâmica de Tricart às variáveis físicas geologia, geomorfologia, solos, vegetação e intensidade pluviométrica. O método Vulnerabilidade Ambiental (VA) foi adaptado do método VN por Grigio *et al.* (2004) e se refere à vulnerabilidade natural frente ao uso e ocupação do solo, indicando a vulnerabilidade do meio ambiente natural às mudanças antrópicas. Estes dois métodos têm sido empregados em estudos nacionais (GRIGIO *et al.*, 2004; BOORI; AMARO, 2010, 2011; BATISTA; VERÍSSIMO, 2012; BASTOS *et al.*, 2015) e foram adaptados ao presente estudo pela adição da variável declividade e retirada da variável intensidade pluviométrica. Neste estudo está sendo proposto um terceiro método, o método Vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do Nível Médio do Mar (VNMM). A VNMM agrega ao mapa de vulnerabilidade ambiental as variáveis distância da linha de costa e distância das margens dos rios e concerne sobre a vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do nível médio do mar.

A influência de cada variável na vulnerabilidade física de uma região pode ser estudada por meio de processos matemáticos e estatísticos, como o Processo Analítico de Hierarquia (PAH) e a Análise de Componentes Principais (ACP). O PAH é uma ferramenta de suporte à decisão onde múltiplas variáveis são comparadas segundo valores atribuídos por tomadores de decisão em uma escala numérica de ponderação, que varia de extremamente mais à extremamente menos importante (SAATY, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2009). A importância relativa das variáveis é indicada pelos pesos resultantes do processo (TAGLIANI, 2003) e a coerência da comparação é verificada segundo a taxa de consistência, que indica o quanto a comparação entre as variáveis foi coerente ou aceitável (SAATY, 2008). Portanto, a vantagem no uso de PAH está em diminuir a subjetividade na determinação da importância das variáveis em métodos de vulnerabilidade física (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A ACP é um método de análise estatística que objetiva reduzir a dimensionalidade dos dados multivariados, de modo a captar a maior parte das informações do conjunto original em novos conjuntos. Assim, permite uma análise mais parcimoniosa e confiável

das variáveis (LATTIN *et al.*, 2011). Por meio da ACP é possível identificar padrões de associação e estimar a influência das variáveis e cada componente principal (CP). Cada CP é uma combinação linear das variáveis originais a que está mais fortemente associada, tendo como vantagem a redução do número de variáveis, com menor perda possível da informação (MINGOTI, 2005; PENDLETON *et al.*, 2010; LATTIN *et al.*, 2011).

Na região dos municípios de Macau e Guamaré, localizados no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, o estudo de vulnerabilidade física se faz necessário por serem municípios costeiros com múltiplos conflitos de uso marcados por atividades socioeconômicas, como instalações das indústrias do petróleo e gás, carcinicultura, salinicultura e parques eólicos, localizados em ecossistemas de alta suscetibilidade ambiental, como manguezais e campos de dunas móveis (GRIGIO *et al.*, 2004; BOORI; AMARO, 2010; MATOS *et al.*, 2013; SANTOS; AMARO, 2013), além das cidades e povoados litorâneos (Figura 1). Por este motivo, foram aplicados nestes municípios os métodos de vulnerabilidade física VN, VA e VNMM.

O objetivo desta pesquisa foi estudar os resultados de três diferentes métodos de vulnerabilidade

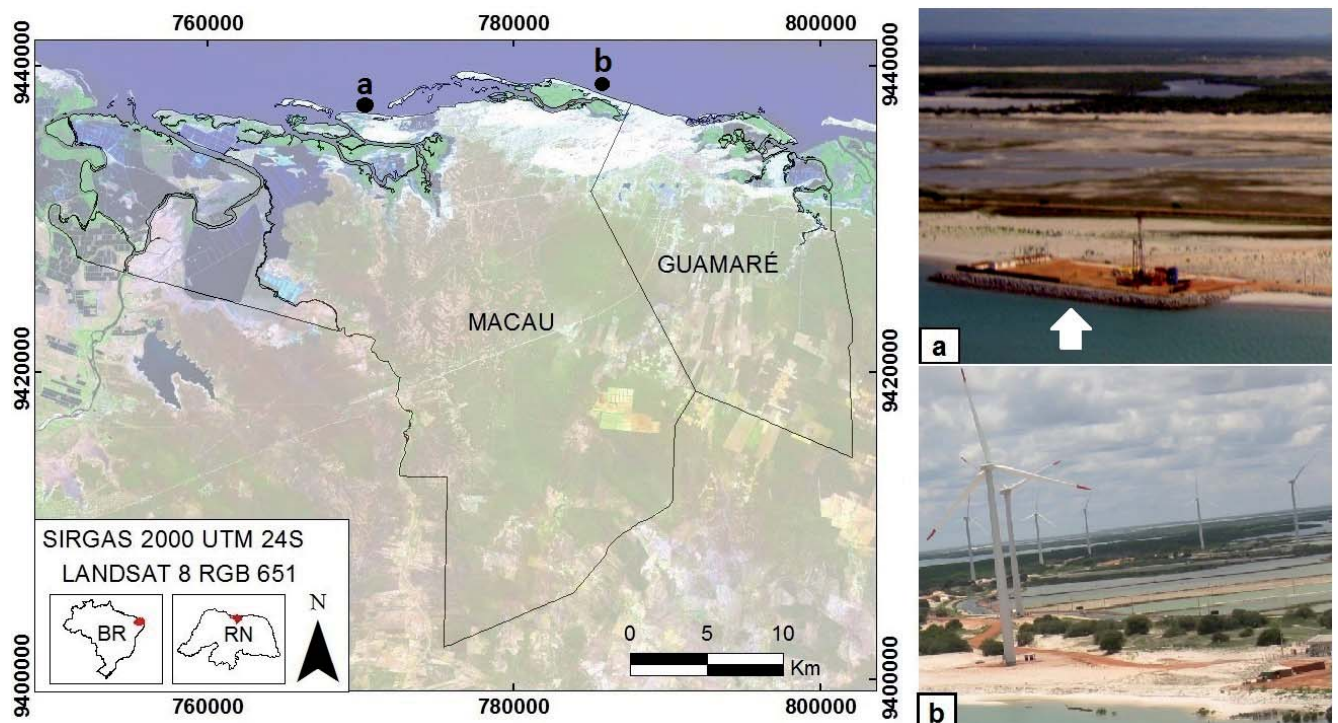


Figura 1 - Localização dos municípios de Macau e Guamaré no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, com detalhes para: (a) vista aérea da indústria petrolífera, e (b) da infraestrutura instalada da indústria eólica, carcinicultura e salinicultura. Notar em (a) o enrocamento na linha de costa para proteção das instalações contra o aumento do nível médio do mar e ação das ondas (seta branca).

física aplicados aos municípios costeiros de Macau e Guamaré (RN), de acordo com as variáveis físicas e com as ponderações associadas, com o intuito de (i) avaliar a importância de cada variável nos resultados de vulnerabilidade física, (ii) identificar o método de vulnerabilidade física mais adequado e (iii) identificar qual o município de maior vulnerabilidade física.

2. Área de estudo

O litoral setentrional do RN apresenta clima semiárido seco e quente, segundo a classificação de Köppen-Geiger (YOO; ROHLI, 2016), baixa precipitação anual (< 750mm/ano), umidade média de 66,7%, temperaturas máximas de 34,7°C e mínimas de 20,7°C (INMET, 2014). Esta região costeira apresenta um mosaico de ecossistemas assinalados por florestas de mangues, praias oceânicas arenosas expostas e abrigadas, sistema de ilhas barreiras e canais de maré de alta dinâmica sedimentar de curto prazo (GRIGIO *et al.*, 2004; SANTOS; AMARO, 2011; AMARO *et al.*, 2012, 2014).

A geomorfologia da região é composta em maior parte por superfície de tabuleiros costeiros, sistemas de ilhas barreiras com praias arenosas, campos de dunas fixas e móveis, planícies de inundação flúvio-estuarina e flúvio-marinha. A superfície de tabuleiros costeiros é constituída por litologias do Grupo Barreiras, recoberta por depósitos eólicos e aluvionares, ao longo de drenagens, sobre o relevo plano a suavemente ondulado. A planície flúvio-estuarina ocorre na proximidade da linha de costa em áreas de baixa declividade em direção ao mar e/ou canais principais de drenagens onde formam terraços planos a suavemente inclinadas, inundáveis em períodos de cheias. A planície flúvio-marinha ocorre em faixas de transição do ambiente marinho e fluvial, sendo uma das características a alta salinidade. Os sistemas ilhas barreiras com praias arenosas, campos de dunas fixas e móveis são depósitos sedimentares de areia média a muito fina, sujeitos à dissipação pela hidrodinâmica (ondas e correntes marinhas em ambiente de mesomarés) e ventos. As dunas fixas apresentam alguma cobertura vegetal (IDEMA, 2002).

A geologia da área de estudo é composta por unidades litológicas da Bacia Potiguar, cuja sequência estratigráfica, da base para o topo, se inicia com os depósitos da Formação Açú (~140 Ma), Formação Jandaíra (~110 Ma), Grupo Barreiras (~80 Ma), Basalto Macau

(~30 Ma). No fechamento da sedimentação da Bacia Potiguar registram-se os sedimentos atuais de depósitos aluvionares, flúvio-estuarinos, flúvio-marinhos, praias e eólicos litorâneos (CPRM, 2007). Os tipos de solos comuns na região são, sobretudo, Neossolos, Gleissolos e Latossolos (EMBRAPA, 2013). Na compleição vegetal predominam caatinga, restingas e manguezal.

Na zona costeira estão instaladas atividades petrolíferas de exploração, produção e transporte de petróleo e gás natural, tanques de evaporação/cristalização da indústria salinera, tanques de carcinicultura e, mais recentemente, infraestruturas típicas da indústria eólica, tornando a região mais suscetível aos impactos socioambientais negativos e exposta a constante risco ambiental (GRIGIO *et al.*, 2004; BOORI; AMARO, 2010; MATOS *et al.*, 2013; SANTOS; AMARO, 2013) (Figura 1a e 1b).

3. Metodologia

3.1 Mapas temáticos

Os mapas temáticos foram gerados a partir de dados obtidos em sítios de instituições públicas e de pesquisa nacionais e/ou por meio de processamento em ambiente de Sistemas de Informação Georreferenciadas (SIG) (Tabela 1). Estes mapas estão na escala de 1:100.000 e na mesma base cartográfica, Datum SIRGAS2000, Elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (*Geodetic Reference System 1980 – GRS80*) (IBGE, 2005), Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) e Zona 24S.

3.2 Ponderação das variáveis físicas

As variáveis físicas que compõem cada método de vulnerabilidade física foram ponderadas por PAH de acordo com a escala de ponderação de Saaty (Tabela 2) (SAATY, 2008; EASTMAN, 2012). Os pesos ou ponderações resultantes foram aplicados nas variáveis por método de vulnerabilidade (Tabela 3) e as taxas de consistência dos PAH aplicados nos métodos foram aceitáveis (< 0,10) (SAATY, 2008).

3.3 Análise de Componentes Principais

A ACP foi aplicada nas variáveis físicas de cada método, segundo as proporções das classes de vulnerabilidade (Tabela 4). Para tanto, as classes de

Tabela 1: Mapas temáticos ambientais e de vulnerabilidade física.

MAPA BASE	FONTE	PROCESSAMENTO / PRODUTO	ESCALA
Municípios	IBGE ¹	Processamento em Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG). Malha geométrica dos municípios brasileiros.	1:100.000
MAPAS AMBIENTAIS			
Vegetação	GEOPRO ²	Classificação supervisionada de imagem de satélite L8, ajustada por trabalho de campo.	1:100.000
Uso do solo	GEOPRO	Classificação supervisionada de imagem de satélite L8, ajustada por trabalho de campo.	1:100.000
Recursos Hídricos	ANA ³	Processamento em SIG.	1:100.000
Declividade	INPE ⁴	Processamento em SIG.	1:100.000
Geologia	SGB ⁵	Processamento em SIG.	1:100.000
Solos	EMBRAPA ⁶	Processamento em SIG.	1:100.000
Geomorfologia	GEOPRO e IDEMA ⁷	Processamento em SIG.	1:100.000
Distância da linha de costa	GEOPRO	Mapeamento da Zona Tampão (ZT) em SIG.	1:100.000
Distância da vegetação protegida	GEOPRO	Mapeamento da ZT em SIG.	1:100.000
Distância de recursos hídricos	GEOPRO	Mapeamento da ZT em SIG.	1:100.000
MAPAS DE VULNERABILIDADE FÍSICA			
VN	GEOPRO	Álgebra de mapas em SIG. Mapa Vulnerabilidade Natural (VN).	1:100.000
VA	GEOPRO	Álgebra de mapas em SIG. Mapa Vulnerabilidade Ambiental (VA).	1:100.000
VNMM	GEOPRO	Álgebra de mapas em SIG. Mapa Vulnerabilidade Ambiental ao aumento relativo do Nível Médio do Mar (VNMM).	1:100.000

¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

⁵ Serviço Geológico do Brasil

² Laboratório de Geoprocessamento/UFRN

⁶ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

³ Agência Nacional de Águas

⁷ Instituto de Desenvolvimento Sustentável do Meio Ambiente/RN

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Tabela 2: Escala de ponderação de Saaty aplicada no Processo Analítico de Hierarquia para obtenção da importância relativa das variáveis físicas.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema mente	Muito Fortemente	Forte mente	Moderada mente	Igualmente	Moderada mente	Forte mente	Muito Fortemente	Extrema mente
MENOS IMPORTANTE					MAIS IMPORTANTE			

Tabela 3: Ponderações das variáveis físicas segundo o Processo Analítico de Hierarquia e formulações dos métodos de vulnerabilidade física.

PESOS	VULNERABILIDADE NATURAL	PESOS	VULNERABILIDADE AMBIENTAL	PESOS	VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO AUMENTO RELATIVO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR
0,42	DECLIVIDADE	0,36	DECLIVIDADE	0,26	DECLIVIDADE
0,25	GEOMORFOLOGIA	0,21	GEOMORFOLOGIA	0,12	GEOMORFOLOGIA
0,06	GEOLOGIA	0,05	GEOLOGIA	0,03	GEOLOGIA
0,16	VEGETAÇÃO	0,17	VEGETAÇÃO	0,09	VEGETAÇÃO
0,1	SOLOS	0,09	SOLOS	0,05	SOLOS
-	-	0,11	USO DO SOLO	0,06	USO DO SOLO
-	-	-	-	0,2	DISTÂNCIA DA LC
-	-	-	-	0,18	DISTÂNCIA RH
FÓRMULA = DECLIVIDADE * 0,42 + GEOMORFOLOGIA * 0,25 + GEOLOGIA * 0,06 + VEGETAÇÃO * 0,16 + SOLOS * 0,10		FÓRMULA = DECLIVIDADE * 0,36 + GEOMORFOLOGIA * 0,21 + GEOLOGIA * 0,05 + VEGETAÇÃO * 0,17 + SOLOS * 0,09 + USO DO SOLO * 0,11		FÓRMULA = DECLIVIDADE * 0,26 + GEOMORFOLOGIA * 0,12 + GEOLOGIA * 0,03 + VEGETAÇÃO * 0,09 + SOLOS * 0,05 + USO * 0,06 + DISTÂNCIA DA LINHA DE COSTA * 0,20 + DISTÂNCIA DAS MARGENS DOS RIOS * 0,18	
SIGNIFICADO FÍSICO DOS MÉTODOS DE VULNERABILIDADE					
Vulnerabilidade física intrínseca às unidades de paisagem		Vulnerabilidade física às modificações antrópicas		Vulnerabilidade física ao aumento relativo do Nível Médio do Mar	

cada variável foram convertidas em 5 classes de vulnerabilidade física, com escore de 1 a 3 (muito baixa a muito alta vulnerabilidade), sendo as proporções calculadas e usadas na ACP. A figura 2 mostra, como exemplo, a conversão das classes de geomorfologia em classes de vulnerabilidade física.

As variáveis de maior influência em cada CP

foram as que apresentaram cargas maiores que |0,5|, valor a partir do qual a correlação linear varia de moderada a forte (COLTON, 1974; LATTIN *et al.*, 2011). A fim de reduzir a dimensionalidade, foram consideradas apenas as componentes principais cuja variância ou autovalor foi superior a 0,7 (JOLLIFFE, 1972, 1973).

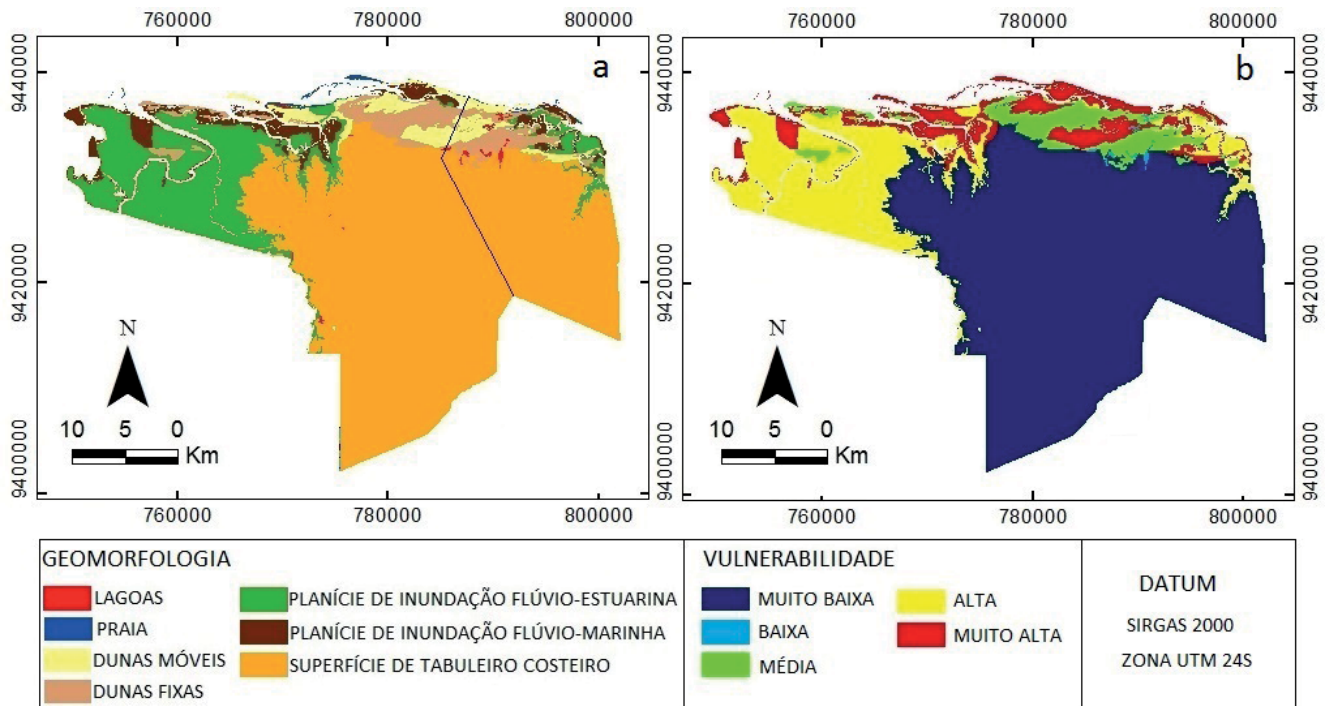


Figura 2 - (a) Classes de geomorfologia convertidas em (b) classes de vulnerabilidade física.

3.4 Métodos de vulnerabilidade física

A vulnerabilidade física foi considerada segundo a proporção das classes de vulnerabilidade, com escore de 1 (menos vulnerável) a 3 (mais vulnerável) (Tabela 4). O cálculo compreendeu a combinação linear de cada variável multiplicado pelo seu peso ou ponderação (Tabela 3). Os métodos de vulnerabilidade física foram

aplicados tanto por município quanto para a área total. Os mapas ambientais foram combinados por álgebra de mapas em ambiente de Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG), derivando os mapas de Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA) e Vulnerabilidade Ambiental ao Aumento Relativo do Nível Médio do Mar (VNMM).

Tabela 4: Escores das variáveis físicas aplicadas aos métodos de Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA), Vulnerabilidade Ambiental à Erosão e à Inundação Costeira (VNMM).

Variável	Muito Baixa (1)	Baixa (1,5)	Média (2)	Alta (2,5)	Muito Alta (3)
Geologia	Formação Açú, Formação Jandaíra	Basalto Macau, Formação Tibau, Grupo Barreiras	Depósitos flúvio-lacustrinos, flúvio-marinhos e aluvionares antigos	Depósitos aluvionares, aluvionares de canal, aluvionares de planície de inundação, eólicos litorâneos vegetados	Depósitos eólicos litorâneos não vegetados, litorâneos praias, de mangue
Geomorfologia	Superfície de Aplainamento ou de Tabuleiro Costeiro, lagoas	Lagoas temporárias	Dunas fixas	Planície de inundação flúvio-estuarina	Planície flúvio-marinha, Praia, Dunas móveis
Vegetação	Cidade, Carcinicultura, Salineiras, Instalações petrolíferas, Solo exposto antrópico e natural, Dunas móveis, Ilhas e Praias, Mangue degradado	Cultivo	Caatinga esparsa, Dunas fixas (Restingas)	Caatinga densa	Mangue
Uso do solo	Caatinga, Mangue, Dunas, Ilhas e Praias, Solo exposto natural	Solo exposto antrópico	Cultivo, Salineiras	Carcinicultura, Instalações petrolíferas	Cidade
Solos	Gleissolos	Cambissolos	Latossolos	Neossolos (Areia Quartzosa)	Neossolos (Areia Quartzosa Marinha)
Declividade	5 - 45%	3,33 - 5%	2 - 3,33%	1 - 2%	0 - 1 e > 45%
Distância linha de costa	> 1000m	500 - 1000m	200 - 500m	50 - 200m	< 50m
Distância margens de rios	> 1000m	500 - 1000m	200 - 500m	50 - 200m	< 50m

A tabela 4 apresenta as classes de vulnerabilidade segundo os escores de cada variável física. As classes de vulnerabilidade quanto à geologia e geomorfologia foram adaptadas de Boori e Amaro (2010); as classes de solos foram baseadas na classificação dos solos de superfície segundo a EMBRAPA (2013); quanto à distância da linha de costa foram estabelecidas de acordo

com a definição de Orla Costeira (BRASIL, 2002) e de proximidade da costa (ÖZYURT; ERGIN, 2010) e quanto à distância das margens dos rios segundo as áreas de preservação permanente (BRASIL, 2012). As classes de declividade respeitaram os critérios apresentados por Özyurt e Ergin (2010) e a definição de áreas de preservação permanente (BRASIL, 2012).

4. Resultados e discussão

4.1 Análise das variáveis físicas

4.1.1 Processo Analítico de Hierarquia

Na escala de ponderação de Saaty, os maiores valores numéricos foram dados às variáveis declividade e geomorfologia, pois denotam a maior ou menor susceptibilidade à inundação e deslizamentos. A variável vegetação recebeu um valor intermediário, pois uma região vegetada tem menor susceptibilidade à erosão do solo. A variável geologia recebeu os menores valores em virtude das baixas alterações desta variável na escala de tempo geológico. A variável uso do solo teve valor intermediário porque mudanças nesta variável refletem mais rapidamente na vulnerabilidade física. As variáveis distância da linha de costa e distância das margens dos rios receberam valores altos por indicarem áreas susceptíveis à erosão e inundação.

Os resultados do PAH nos métodos VN e VA mostraram que as variáveis declividade e geomorfologia tiveram os maiores pesos, o somatório das duas

significando 67% e 57% do peso total nesses métodos, respectivamente. As variáveis de maior peso no método VNMM foram declividade, distância da linha de costa, distância das margens dos rios e geomorfologia, equivalentes a 76% do peso total (Tabela 3).

4.1.2 Classes de variáveis físicas

As variáveis geologia e solos apresentaram maior proporção da classe alta vulnerabilidade e as variáveis distância da linha de costa, uso do solo e geomorfologia se destacaram como aquelas com maior proporção da classe muito baixa vulnerabilidade (Figura 3 e 4).

A variável declividade foi a de maior peso segundo o PAH e a maior parte das áreas dos municípios apresentou classes de vulnerabilidade média por estarem localizados em zona costeira plana de baixas altitudes. No entanto, em Guamaré as classes de vulnerabilidade média, alta e muito alta quanto à variável declividade foram maiores, tornando esse município o mais vulnerável nesta variável (Figura 4c).

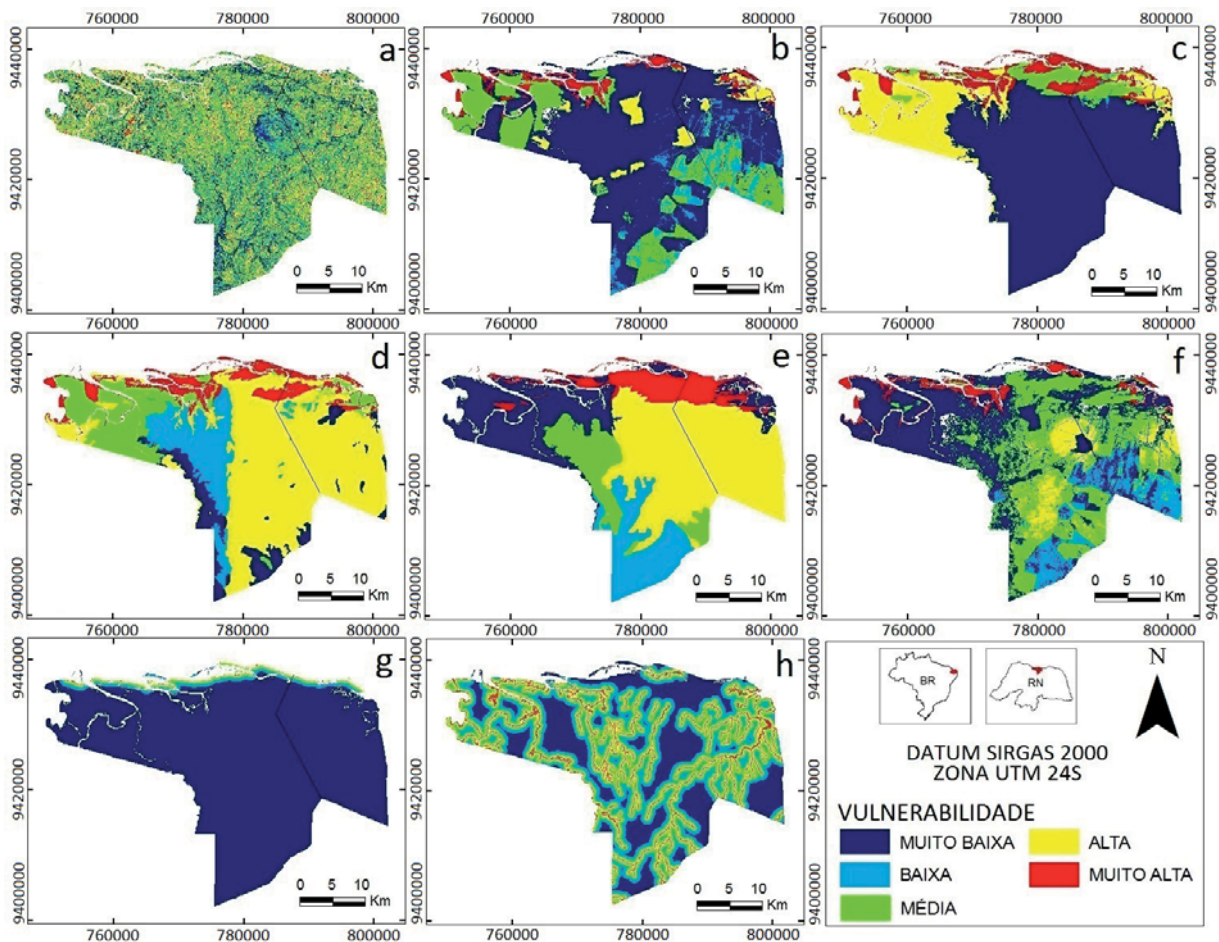


Figura 3 - Classes de vulnerabilidade física segundo as variáveis: (a) declividade, (b) uso do solo, (c) geomorfologia, (d) geologia, (e) solos, (f) vegetação, (g) distância da linha de costa e (h) distância das margens dos rios.

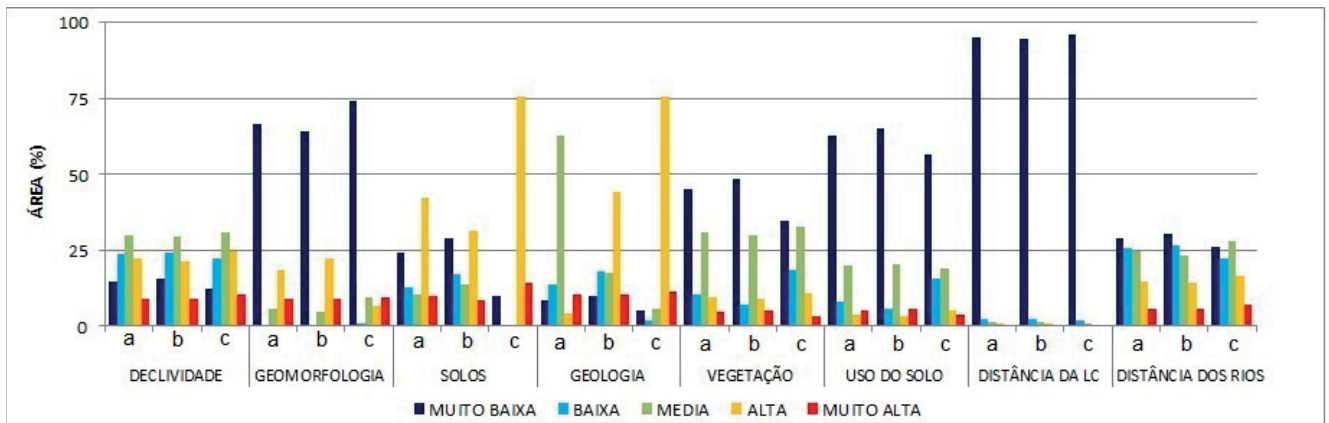


Figura 4 - Distribuição das classes de vulnerabilidade por variável na (a) área total, (b) Macau e (c) Guamaré.

Quanto à variável geomorfologia, segunda em maior peso para os métodos VN e VA, Guamaré apresenta uma proporção ligeiramente superior nessa classe, significando, portanto maior vulnerabilidade de Macau segundo esta variável, embora ambos os municípios apresentem maior proporção em vulnerabilidade muito baixa (Figura 4b e 4c).

Na variável solos, a classe alta vulnerabilidade foi a de maior proporção, sendo cerca de 30% da área de Macau e 76% de Guamaré. A segunda maior classe para Macau foi muito baixa vulnerabilidade, cerca de 3 vezes superior a Guamaré. Guamaré não apresentou as classes baixa e média vulnerabilidade, sendo a classe muito alta vulnerabilidade a segunda maior, com quase o dobro da área de Macau, configurando Guamaré como de maior vulnerabilidade neste quesito (Figura 4c).

Na variável geologia a classe vulnerabilidade alta foi a de maior proporção em ambos os municípios; porém, Guamaré apresentou área 1,7 vezes maior que Macau. A segunda maior classe em Guamaré foi muito alta vulnerabilidade, enquanto em Macau a segunda maior classificação foi baixa vulnerabilidade, cerca de 10 vezes maior do que em Guamaré. Portanto, Guamaré é mais vulnerável que Macau também segundo esta variável (Figura 4b).

A variável vegetação apresentou uma distribuição bimodal, com o maior pico na classe muito baixa vulnerabilidade, representando quase 50% e 35% da área de Macau e Guamaré, respectivamente. O segundo pico foi na classe média vulnerabilidade, correspondendo a cerca de 30% e 33% das áreas de Macau e Guamaré, respectivamente. Na classe muito baixa vulnerabilidade Macau teve área 1,4 vezes superior a Guamaré, condi-

cionando Guamaré também segundo esta variável como mais vulnerável (Figura 4b).

Para ambos os municípios, a classe predominante quanto à variável uso do solo foi muito baixa vulnerabilidade, quase 65% da área de Macau e 57% de Guamaré. Também para ambos a segunda maior classe foi média vulnerabilidade, correspondendo a cerca de 20% dos municípios (Figura 4a). Macau teve área 1,5 vezes superior a Guamaré na classe muito alta e Guamaré teve área 1,5 vezes superior na classe alta vulnerabilidade e quase 3 vezes superior na classe baixa vulnerabilidade (15,76%). De modo que Macau apresentou-se mais vulnerável que Guamaré nesta variável.

Na variável distância da linha de costa, específica do método VNMM, as classes foram praticamente equivalentes entre os municípios, estando quase 95% de Macau e 96% de Guamaré classificados como de muito baixa vulnerabilidade (Figura 3g, 4b, 4c). Esta variável foi a de segundo maior peso para o método VNMM e, por este motivo, forçou o resultado deste método para as classes baixa e muito baixa vulnerabilidade. Tanto que neste método a classe de vulnerabilidade muito alta se mostrou reduzida (<0,1%) e foi o de menor proporção na classe alta vulnerabilidade (< 3,5%).

Na variável distância das margens dos rios houve diferenças menores que 5% entre os municípios. As diferenças foram nas classes muito baixa e baixa, quase 1,2 vezes maior em Macau, e nas classes média, alta e muito alta, todas quase 1,2 vezes maior em Guamaré (Figura 4). Esta variável equivale ao terceiro maior peso (0,18) do método VNMM e também forçou a classificação na direção das classes de menor vulnerabilidade, sendo possível observar o contorno dos rios nos mapas resul-

tantes (Figura 5). A integração das variáveis distância da linha de costa e distância das margens dos rios foi a principal responsável pelo método VNMM ter mais de 50% da área classificada como muito baixa e baixa vulnerabilidade e apresentar as menores proporções das classes alta e muito alta vulnerabilidade.

Importante ressaltar que a variável declividade foi empregada em diferentes métodos de análise de vulnerabilidade física aplicados em outras partes do mundo como, por exemplo, no Índice de Vulnerabilidade Costeira (GORNITZ *et al.*, 1994; SHAW *et al.*, 1998). Trata-se uma variável importante quando se considera que grande parte da zona costeira ocorre em baixas altitudes e possuem alta densidade populacional (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; IPCC 2012, 2014a), frente aos constantes desastres relacionados à erosão e inundações nessas regiões (MCGRANAHAN *et al.*, 2007; NEVES; MUEHE, 2008; BRASIL, 2008, 2013;

NOBRE, 2008; COSTA *et al.*, 2010; NICOLODI; PETERMANN, 2010). Özyurt e Ergin (2010) também usaram a distância da linha de costa como uma variável de análise de vulnerabilidade física. Contudo, o diferencial nesta pesquisa foi adicionar a variável distância das margens dos rios e de canais de maré, por se tratar de uma região sujeita a mesomarés semidiurnas e, portanto, mais vulnerável à inundação temporária (marés de preamar) e permanente (aumento do nível médio do mar).

Embora embasado em valores atribuídos por gestores públicos, portanto, valores subjetivos, o uso do PAH permitiu diminuir a subjetividade na determinação da importância das variáveis por incorporar ao processo de ponderação a coerência ou consistência da hierarquia dentre as variáveis (OLIVEIRA *et al.*, 2009). O PAH se mostrou uma ferramenta apropriada para suporte à tomada de decisão em estudos de vulnerabilidade física.

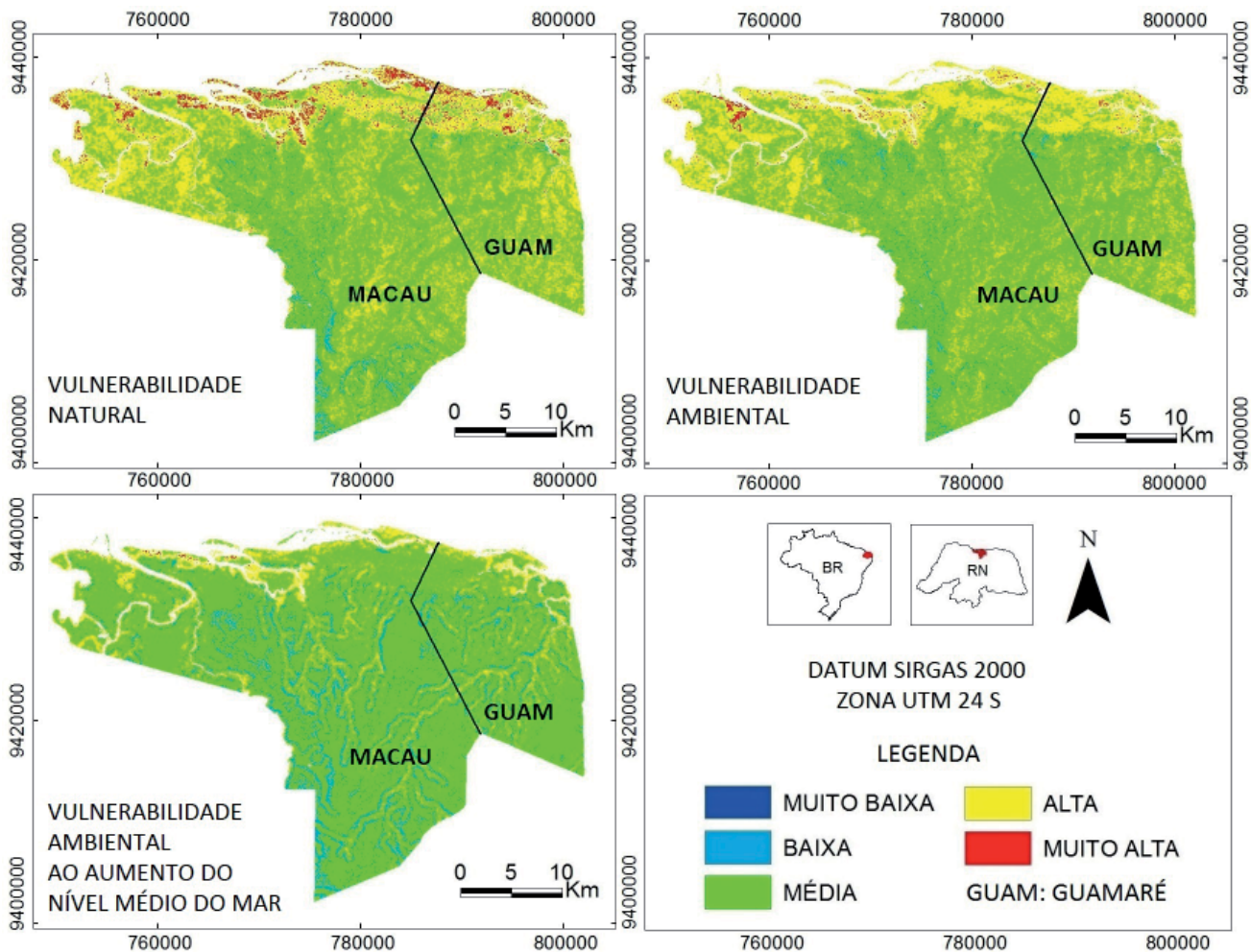


Figura 5 - Mapas de vulnerabilidade física para os municípios de Macau e Guamaré/RN.

4.2 Análise de Componentes Principais

A primeira, segunda e terceira componentes principais (CP1, CP2 e CP3) captaram de 95% a 99% da variância acumulada nos métodos e representaram bem a informação original (Figura 6). A CP1 reteve de 43% a 45%, a CP2 reteve 34% e a CP3 reteve de 14% a 21% da variância total em todas as regiões analisadas.

4.2.1 Método Vulnerabilidade Natural

Para a área total dos municípios de Macau e Guimarães, a CP1, a CP2 e a CP3 captaram 43%, 34% e 20% da variância total, respectivamente. A CP1 foi explicada principalmente pelas variáveis geologia e geomorfologia, enquanto a variável vegetação foi a de maior importância na CP2 e as variáveis solo e

declividade foram as mais importantes na CP3 (Figura 7; Tabela 5).

Na análise individualizada por município, os resultados diferiram. Em Macau, a CP1 correspondeu a 45% da variância total e teve correlação com as variáveis geomorfologia, vegetação e solos (Figura 7). A CP2 captou 34% dos dados e teve correlação com a variável geologia, enquanto a CP3 captou 20% da variância total e teve maior correlação com a variável declividade. Em Guimarães, a CP1 representou 51% da variância total e foi bem explicada pelas variáveis geologia e solos (Figura 7) e a CP2 captou 27% da variância total e a declividade foi a variável de maior carga. A CP3 reteve 22% dos dados originais e as variáveis vegetação e geomorfologia foram as de maior correlação (Figura 6).

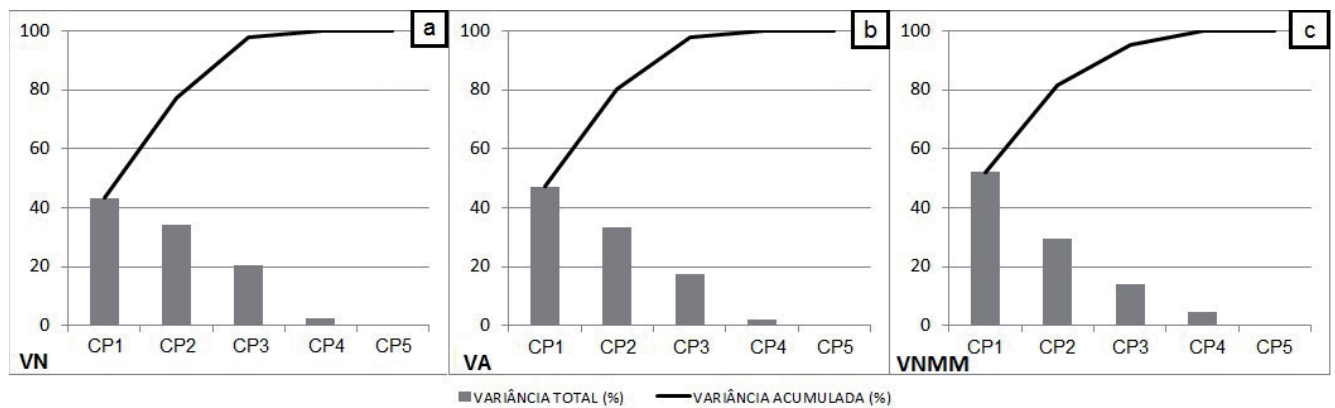


Figura 6 - Variância total e acumulada das componentes principais (CP) para os métodos (a) Vulnerabilidade Natural (VN), (b) Vulnerabilidade Ambiental (VA) e (c) Vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do nível médio do mar (VNMM).

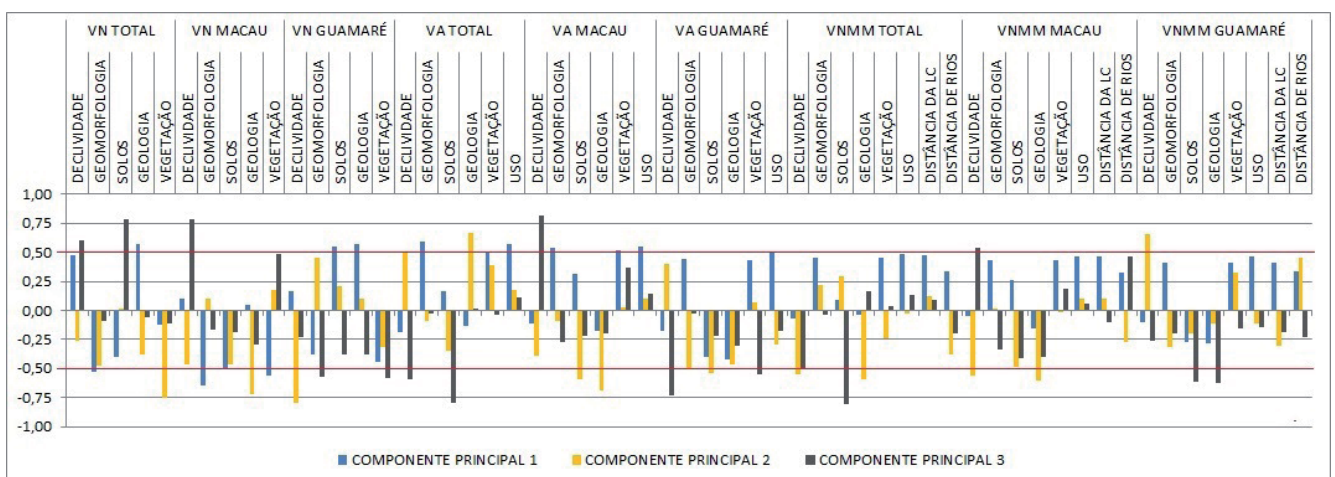


Figura 7 - Principais variáveis físicas (cargas $\geq 0,5$) para os métodos Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA) e Vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do nível médio do mar (VNMM).

4.2.2 Método Vulnerabilidade Ambiental

No método VA para a área total, a CP1 representou 47% da variância total e as variáveis de maior correlação foram geomorfologia, uso do solo e vegetação. A CP2, com 33% da variância total, foi bem explicada pelas variáveis geologia e declividade, enquanto a CP3 reteve 17% da variância total e foi bem explicada pelas variáveis solos e declividade.

Em Macau, a CP1 correspondeu a 53% da variância total, sendo uso do solo, geomorfologia e vegetação as variáveis de maior correlação (Figura 7). A CP2, com 29% da variância total, foi bem explicada pelas variáveis geologia e solos e a CP3 captou 17% dos dados, sendo bem explicada pela variável declividade. Em Guimarães, a CP1 correspondeu a 54% da variância total e a variável mais significativa foi uso do solo, portanto esta variável sozinha explicou mais da metade da vulnerabilidade física neste método. A CP2 apresentou 24% da variância total e as variáveis mais importantes foram solos e geomorfologia, enquanto a CP3 reteve 21% da informação original e teve maior correlação com as variáveis declividade e vegetação (Figura 7).

A única diferença do método VA para o método VN foi a adição da variável uso do solo e justamente esta variável apresentou sua maior carga na CP1 nos municípios de Macau e Guimarães e a segunda maior carga na área integrada. Portanto, o uso desta variável é importante nas análises de vulnerabilidade física segundo este método. Isso significa que o monitoramento multitemporal das mudanças da paisagem, principalmente da antrópica, deve ser uma pasta prioritária da gestão ambiental integrada por gestores públicos e deve constar em estudos de vulnerabilidade física em municípios costeiros ou interiores.

Como as mudanças provocadas por uso antrópico ocorrem em velocidade superior à natural (em escala de curto prazo, de meses a anos), sugere-se que os mapas de uso do solo sejam realizados com a melhor escala espacial, de 1:100.000 ou superior, e a menor periodicidade possível, inferior a uma década. Sugere-se ainda o fomento de parcerias entre gestores públicos e instituições de pesquisa científica, já que estudos com mapas atualizados das mudanças da paisagem são recorrentes na academia (GRIGIO *et al.*, 2004; BOORI; AMARO, 2010, 2011; BATISTA; VERÍSSIMO, 2012; BASTOS *et al.*, 2015).

4.2.3 Método Vulnerabilidade Ambiental ao Aumento Relativo do Nível Médio do Mar

Nenhuma variável apresentou correlação moderada na CP1 no método VNMM, mas a variável uso do solo apresentou as maiores correlações (entre 0,46 a 0,48) em todas as áreas, correspondendo, assim, à variável de maior influência nesta componente. A variável distância da linha de costa também apresentou as maiores cargas (0,46) em Macau e na área total (Tabela 5).

Na área total, a CP1 reteve 52% da variância total. Na CP2, com 30% da variância dos dados, as variáveis geologia e declividade apresentaram maior correlação e na CP3, com 14% da variância total, as variáveis solos e declividade foram as mais influentes. Em Macau, as variáveis com as maiores correlações na CP2 foram geologia e declividade, assim como ocorreu na área total de Macau e Guimarães. Na CP3 a declividade foi a variável de maior correlação. Em Guimarães, a CP2 foi explicada apenas pela variável declividade e na CP3 geologia e solos foram as variáveis mais influentes. A CP1, CP2 e CP3 representaram, respectivamente, 57%, 23% e 18% da variância total em Macau e 55%, 25% e 20% em Guimarães.

AACP fundamentou quais as variáveis foram mais significativas nos métodos aplicados de vulnerabilidade física, ao considerar as relações entre elas e a importância ou contribuição relativa de cada variável em uma CP. Como corroborado por Pendleton *et al.* (2010), que aplicaram ACP para identificar quais foram as variáveis mais importantes na determinação da vulnerabilidade à variação relativa do nível médio do mar e destacaram que todas as variáveis, foram consideradas importantes, mas algumas variáveis contribuíram mais que outras. Estes autores consideraram como influentes as variáveis com cargas a partir de $|0,4|$, enquanto neste estudo as variáveis importantes foram aquelas com cargas a partir de $|0,5|$, com força de correlação moderada (COLTON, 1974; LATTIN *et al.*, 2011), como sintetizadas na tabela 5.

AACP mostrou diferenças entre as variáveis que obtiveram maior contribuição na CP1 de acordo com o método usado e com a área analisada. Por isso, é preciso analisar a vulnerabilidade física ao menor nível possível, neste caso, o municipal. Desta forma, as características de vulnerabilidade intrínsecas a cada município poderão ser conhecidas, destacadas e melhor analisadas por gestores públicos.

Tabela 5: Variáveis físicas mais influentes (cargas $\geq |0,5|$) segundo a Análise de Componentes Principais.

		MACAU E GUAMARÉ	MACAU	GUAMARÉ
VN	CP1	GEOLOGIA	GEOMORFOLOGIA	GEOLOGIA
		GEOMORFOLOGIA	VEGETAÇÃO	SOLOS
			SOLOS	
	CP2	VEGETAÇÃO	GEOLOGIA	DECLIVIDADE
	CP3	SOLOS	DECLIVIDADE	VEGETAÇÃO
		DECLIVIDADE		GEOMORFOLOGIA
VA	CP1	GEOMORFOLOGIA	USO DO SOLO	USO DO SOLO
		USO DO SOLO	GEOMORFOLOGIA	
		VEGETAÇÃO	VEGETAÇÃO	
	CP2	GEOLOGIA	GEOLOGIA	SOLOS
	CP3	SOLOS	DECLIVIDADE	DECLIVIDADE
		DECLIVIDADE		VEGETAÇÃO
	CP1	USO DO SOLO *	USO DO SOLO*	USO DO SOLO **
		DISTÂNCIA DA LC *	DISTÂNCIA DA LC *	
	CP2	GEOLOGIA	GEOLOGIA	DECLIVIDADE
	CP3	SOLOS	DECLIVIDADE	GEOLOGIA
		DECLIVIDADE		SOLOS

* Carga da variável igual a 0,46.

** Carga da variável igual a 0,48.

Todas as variáveis contribuíram nos métodos VN e VA, porém a ordem de importância diferiu em cada área. E as variáveis geologia, declividade e solos foram as que mais contribuíram no método VNMM, sendo que uso do solo e distância da linha de costa, ainda que não tenham apresentado correlação moderada, foram as variáveis de maior importância na CP1 deste método.

A variável uso do solo foi uma das que mais contribuiu na CP1 e, por consequência, nos resultados dos métodos de vulnerabilidade VA e VNMM, como endossado na análise das variáveis físicas. Este fato, mais uma vez, destaca a variável uso do solo como muito relevante na análise de vulnerabilidade física. Enquanto as mudanças nas características de geologia, geomorfologia e solos ocorrem a longo prazo, as mudanças no uso do solo ocorrem a curto prazo. Por isso, este critério deve ser reanalisado periodicamente, ainda mais que mudanças de uso e ocupação do solo refletem rapidamente a vulnerabilidade socioambiental de uma região.

A ACP destacou a maior ou menor importância de cada variável de acordo com a proporção das classes de vulnerabilidade de cada variável. Esta análise difere do PAH, onde os gestores públicos indicaram as variáveis de maior ou menor importância, ainda que tal escolha

fosse embasada no conhecimento prévio das características físicas da área estudada ou em referências que pautem a tomada de decisão. Portanto, a ACP pode corroborar com o PAH, porém não pode substituí-lo, uma vez que a ponderação deve ser baseada em diretrizes apropriadas ao que o gestor público pretende conduzir, apoiada no conhecimento prévio a cerca das características físicas da região. Os resultados deste estudo mostraram que no PAH a variável geologia recebeu o menor peso frente às demais, porém configurou como uma das variáveis de maior importância na CP1 por ser a variável que mais apresentou áreas de alta e muito alta vulnerabilidade (Figura 4).

4.3 Métodos de vulnerabilidade física

Em todas as áreas e em todos os métodos estudados as classes média e alta vulnerabilidade foram as de maior proporção. O método VN foi o que apresentou maior proporção das classes alta e muito alta vulnerabilidade, bem evidenciada pela assimetria negativa da curva de distribuição das classes, sendo, portanto, o método mais pessimista (Figura 8). Os métodos VN e VNMM não apresentaram área de muito baixa vulnerabilidade e o método VA apresentou apenas 0,01 km² nesta classe (Figura 9).

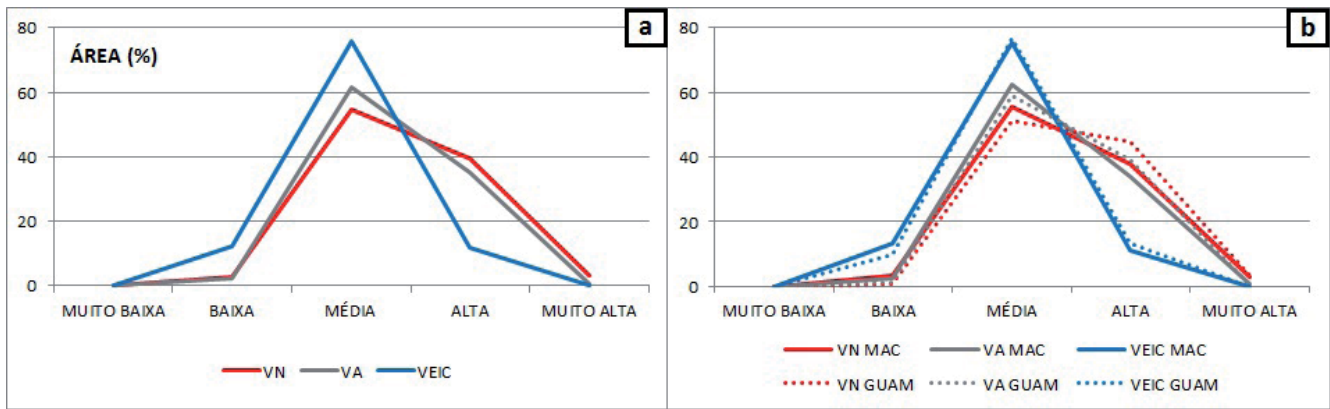


Figura 8 - Distribuição das classes de Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA) e Vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do Nível Médio do Mar (VNMM) para as áreas (a) total e (b) Macau (MAC) e Guamaré (GUAM).

O método VNMM quase não apresentou área com muito alta vulnerabilidade ($\leq 0,1\%$), porém estas áreas quando ocorreram corresponderam a *hotspots* de erosão e inundação, por indicarem áreas de menor declividade próximas à orla costeira e às margens de rios. Também este método teve maior proporção da classe baixa vulnerabilidade, sendo o método mais otimista dos três, como bem representado pela assimetria positiva da curva de distribuição das classes (Figura 8a, 6b).

O que contribuiu para resultados de vulnerabilidade maiores no método VN foi principalmente a variável declividade, que apresentou grande proporção classificada como de alta e muito alta vulnerabilidade, sendo esta a variável de maior peso do método VN (0,42), seguida das variáveis geomorfologia (0,25) e vegetação (0,16) (Figura 4). Para o método VA, estas variáveis mais a variável uso do solo foram as que mais influenciaram nos resultados. A maior parte dos municípios foi classificada como de muito baixa vulnerabilidade ($\sim 60\%$) segundo a variável

uso do solo, estando as áreas de maior vulnerabilidade em menor proporção, representadas pelas indústrias do sal, do petróleo, salinicultura e carcinicultura. Por isso este método teve redução das áreas mais vulneráveis em relação ao método VN.

As variáveis distância da linha de costa e distância das margens dos rios foram responsáveis pelo aumento na proporção da classe baixa vulnerabilidade no método VNMM, (Figura 9a, 9b). A variável distância da linha de costa foi a de segundo maior peso para o método VNMM e forçou o resultado deste método para classes de menor vulnerabilidade (Figura 4a, 4b). A variável distância das margens dos rios equivale ao terceiro maior peso (0,18) do método VNMM, sendo possível observar o contorno dos rios nos mapas resultantes (Figura 5).

Embora os três métodos de vulnerabilidade física tenham sido do tipo booleano, a vulnerabilidade física dos municípios mudou de modo gradual e não abrupto (Figura 5), como ocorre em métodos que usam lógica

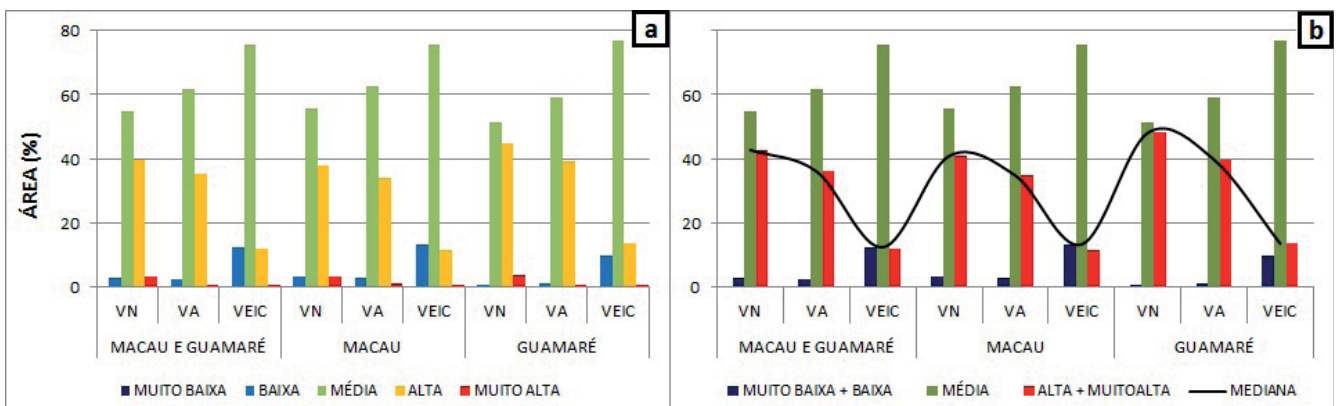


Figura 9 - Distribuição (a) normal e (b) acumulada da Vulnerabilidade Natural (VN), Vulnerabilidade Ambiental (VA) e Vulnerabilidade ambiental ao aumento relativo do Nível Médio do Mar (VNMM) para as áreas total, Macau (MAC) e Guamaré (GUAM).

fuzzy. Isto foi em decorrência das ponderações das variáveis, principalmente da variável declividade. Em geral, os estudos que aplicam a análise booleana resultam em mapas de vulnerabilidade com limites abruptos, bem definidos, como visto em Grigio *et al.* (2004), Boori e Amaro (2011), Bastos *et al.* (2015) e Batista e Veríssimo (2012). A diferença no resultado desta pesquisa foi que a variável declividade teve a maior ponderação nos métodos, dissolvendo os limites rígidos das demais variáveis.

Nos métodos VN e VA, a classe muito alta vulnerabilidade ficou concentrada nas áreas de menor declividade às adjacências da linha de costa. No método VNMM, a classe muito alta vulnerabilidade foi observada na zona litorânea e a classe alta vulnerabilidade ao entorno das margens dos rios (Figura 5).

A soma das classes alta e muito alta vulnerabilidade em Guimarães foi cerca de 20% superior a Macau no método VN e VNMM e quase 15% superior no método VA. Macau apresentou áreas de vulnerabilidade muito baixa e baixa quase 5 (método VNMM), 2,5 (método VA) e 1,5 (método VN) vezes superior que em Guimarães. Portanto, Guimarães foi o município de maior vulnerabilidade física em todos os três métodos analisados (Figura 8b). Grigio *et al.* (2004) aplicaram os métodos VN e VA para o município de Guimarães e Boori e Amaro (2010) aplicaram os mesmos métodos na região do estuário do rio Apodi-Mossoró, que engloba parte da área estudada nesta pesquisa. Estes autores encontraram vulnerabilidades maiores no método VN, como verificado neste estudo, ainda que não tenham utilizado a variável declividade na construção dos métodos e que os pesos tenham sido diferentes dos usados nesta pesquisa.

As diferenças nos resultados de Macau e Guimarães demonstraram a necessidade de que a menor célula de análise de vulnerabilidade física seja pelo menos o município, como corroborado pelo Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro que atribui ao município a responsabilidade de elaborar, implementar, executar e acompanhar o Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro que tem por objetivo o planejamento e a gestão para o uso sustentável da zona costeira (BRASIL, 1997, 2004).

Os resultados desta pesquisa indicam que a escolha do método de análise de vulnerabilidade deve ocorrer de acordo com diretrizes específicas ao que se pretende gerir, tanto na escolha das variáveis, quanto dos respectivos pesos, uma vez que as respostas de um método podem ser discrepantes às de outro em virtude desta escolha.

Neste estudo, o método VA se mostrou mais completo que o VN, em virtude de envolver a variável uso do solo, cujas mudanças de curto prazo refletem mais rapidamente na vulnerabilidade física de uma região. Embora esta variável não tenha recebido o maior valor no PAH, foi a de maior correlação na CP1 neste método e foi a de maior influência no método VNMM. Por isso, a variável uso do solo deve constar em análises de vulnerabilidade física de uma região. Considerando impactos atuais e futuros por aumento do nível médio do mar, o método VNMM é uma ferramenta útil e mais apropriada que os métodos VN e VA, por identificar regiões antrópicas mais susceptíveis à erosão e inundação e deve ser replicada em municípios da zona costeira brasileira.

5. Conclusão

Esta pesquisa permitiu identificar com base estatística e matemática quais variáveis foram mais importantes em análises de vulnerabilidade física do meio ambiente, além de facilitar o processo decisório por diminuir a subjetividade em análises de vulnerabilidade física, tanto na escolha do método quanto da ponderação das variáveis físicas.

Nos métodos VN e VA todas as variáveis influenciaram na vulnerabilidade física, porém umas mais que outras e a ordem de importância diferiram em cada área estudada. Enquanto que no método VNMM as variáveis mais importantes foram geologia, declividade e solos. Quando da adição da variável uso do solo nos métodos VA e VNMM esta foi a variável que mais contribuiu na CP1, mesmo quando a correlação foi inferior a $|0,5|$.

O município de Guimarães tem maior vulnerabilidade física que Macau por apresentar maior proporção de sua zona costeira em baixas altitudes, portanto mais sujeito aos impactos relacionados à inundação e erosão por elevação do nível médio do mar. Os métodos testados são replicáveis às outras zonas costeiras ou interiores, com o pressuposto que a célula de análise de vulnerabilidade seja, pelo menos, a municipal. Assim, permitirá a responsabilização do poder público e a adoção de medidas de ordenamento, mitigação e adaptação do território.

O método mais pessimista, ou que apresentou áreas mais vulneráveis, foi Vulnerabilidade Natural (VN) e o mais otimista foi Vulnerabilidade Ambiental ao aumento relativo do Nível Médio do Mar (VNMM). Embora o método VN seja uma alternativa aceitável em caso de falta de recursos para realizar confirmações de campo,

uma vez que as variáveis que o compõem estão facilmente disponíveis em sítios de instituições brasileiras e em escala regional (1:100.000 a 1:250.000), o método VA é mais completo que o método VN, por relacionar a vulnerabilidade física com mudanças antrópicas da paisagem.

Enquanto o método proposto VNMM tem como diferencial apresentar áreas de *hotspot* à elevação do nível médio do mar. Este método é uma ferramenta importante ao se considerar que zonas costeiras em todo mundo já estão sujeitas a impactos negativos decorrentes de erosão e inundação costeira (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; IPCC, 2012; AMARO *et al.*, 2014; IPCC, 2014a, 2014b). Portanto, o método VNMM é o mais recomendado dos três estudados nesta pesquisa, já que sua replicação pode prevenir perdas ambientais e socioeconômicas nos próximos anos, quando eventos relacionados ao aumento relativo do nível médio do mar, e decorrentes alterações físicas da paisagem litorânea, serão mais recorrentes e de maiores pulsos de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio dos projetos HI-DROSEMA, MOLECO e CRONALOG da Rede Cooperativa Norte-Nordeste de Monitoramento Ambiental de Áreas sob a Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05-PETROMAR), financiada pelo CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq. A autora agradece à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN).

Referências Bibliográficas

- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 1ª Ed. Natal: Edição dos Autores, 2012. 118p.
- AMARO, V. E., GOMES, L. R. S., LIMA, F. G. F., 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**. p. 1-25, 2014.
- BASTOS, A. de S.; MANIESI, V.; GOMES, F. B. Vulnerabilidade natural à erosão no sudoeste da Amazônia associada aos seus modos de ocupação – o caso do entorno da terra indígena Uru Eu Wau Wau. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, n.2, p. 271-282, 2015.
- BATISTA, C. T.; VERÍSSIMO, C. U. V. Vulnerabilidade geoambiental da região metropolitana de Fortaleza: análise comparativa de dois métodos com enfoque a processos erosivos. **Geociências**, v. 31, n. 1, p. 47-56, 2012.
- BOORI, M. S.; AMARO, V. E. Land use change detection for environmental management: using multi-temporal, satellite data in Apodi valley of Northeastern Brazil. **Applied GIS**, v. 6, p. 1-15, 2010.
- BOORI, M. S.; AMARO, V. E. A remote sensing approach for vulnerability and environmental change in Apodi valley region, Northeast Brazil. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. v. 5, n. 2, 2011.
- BRASIL. **Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II. Resolução Nº 05 - Comissão Interministerial para os Recursos do Mar**. Brasília/DF. CIRM. 9 p. 1997.
- BRASIL. **Projeto Orla: fundamentos para gestão integrada**. Brasília/DF. MMA. 78p. 2002.
- BRASIL. **Decreto Nº 5.300/2004. Regulamenta a Lei no 7.661. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC e dá outras providências**. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/D5300.htm>. Acesso em: 05 de abril de 2014.
- BRASIL. **Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil**. Brasília/DF. MMA. 242 p. 2008.
- BRASIL. **Lei Nº 12.651. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências**. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm>. Acesso em: 12/01/2013.
- BRASIL. **Relatório de Gestão Gerência Costeira 2010 - 2012**. Gerência Costeira - MMA. 35 p. 2013.
- COLTON, T. **Statistics in Medicine**. Little Brown and Company, New York, NY. 1974. 372 p.
- COSTA, M. B. S. F.; MALLMANN, D. L. B.; PONTES, P. M.; ARAUJO, M. Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences (PANAMJAS)**, v. 5, n. 2, p. 341-349, 2010.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte - escala 1:500.000**. Organizador: Luiz Alberto de Aquino Angelim – Recife/PE. Serviço Geológico do Brasil. 2007.
- CREPANI, E.; DE MEDEIROS J. S.; HERNANDEZ P.;

- FLORENZANO T. G.; DUARTE V.; BARBOSA C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial.** São José dos Campos: INPE, 113 p., 2001.
- DWARAKISHA, G. S.; VINAYA, S. A.; NATESANB, U.; ASANOC, T.; KAKINUMAC, T.; VENKATARAMANAD, K.; PAIA, B. J.; BABITAA, M. K. Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udupi coastal zone of Karnataka state, west coast of India. **Ocean & Coastal Management.** v. 52, n. 9, p. 467-478, 2009.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF. 2013.
- EASTMAN, J. R. **IDRISI Selva. Guia para SIG y Procesamiento de imágenes.** v. 17. 2012.
- GORNITZ, V. M.; DANIELS, R. C.; WHITE, T. W.; BIRDWELL, K. R. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. **Journal of Coastal Research.** SI., n. 12, p. 327-338, 1994.
- GRIGIO, A. M.; CASTRO, A. F. de; SOUTO, M. V. da S.; AMARO, V. E.; Vital, H. Use of remoting sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research.** SI., v. 39, p. 293-298, 2004.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro.** Resolução do Presidente. 8 p. 2005.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas.** 177p. 2011.
- IDEMA (Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente). **Diagnóstico e Vulnerabilidade Ambiental dos Estuários do Litoral Norte e seus Entornos. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente – IDEMA.** Projeto de zoneamento ecológico-econômico dos estuários do estado do Rio Grande do Norte e seus entornos. SUGERCO/ IDEMA. Relatório Final. Natal/RN. 2002.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **BDMEP - Dados Históricos.** Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/> >. Acesso em: 08 de outubro de 2014. INMET.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.** In: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 592 p. 2012.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Chapter 19 - Final Draft. IPCC Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report. 107 p. 2014 a.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability - Summary for Policymakers.** Phase I Report Launch. IPCC Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report. 44p. 2014 b.
- JOLLIFFE, I. T. Discarding variables in a principal component analysis. I: Artificial data. **Applied Statistics.** v.21, n. 2, p. 160-173, 1972.
- JOLLIFFE, I. T. Discarding variables in a principal component analysis. II: Real data. **Applied Statistics.** v.22, n. 1, p. 21-31, 1973.
- LATTIN, J. M.; CARROL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados.** São Paulo: Cengage Learning, 2011. 475 p.
- MATOS, M. F. A.; FORTES, C. J. E. M.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Análise comparativa da agitação obtida com o Modelo Numérico (SWAN) na modelagem de ondas do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil e dados de campo. **Revista da Gestão Costeira Integrada,** v. 14, p. 1-17, 2013.
- MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment and Urbanization.** v. 1, p. 17-37, 2007.
- MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297 p.
- NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R. J. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment. **PLoS ONE.** v. 10, n. 3, 2015.
- NEVES, C.F.; MUEHE, D.C.E.H. Vulnerabilidade, impactos e adaptação às mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias Estratégicas.** v. 27, p. 217-295, 2008.
- NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science.** v. 328, 2010.
- NICOLODI, J. L.; PETERMANN, R. M. Potential vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and

- technological aspects. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences (PANAMJAS)**. v. 5, n. 2, p. 184-204, 2010.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e o Brasil – contextualização. **Parcerias Estratégicas**. v. 27, p. 8-18, 2008.
- ÖZYURT, G.; ERGIN, A. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. **Journal of Coastal Research**. v. 26, n. 2, p. 265-273, 2010.
- PENDLETON, E. A.; THIELER, E. R.; WILLIAMS, S. J. Importance of coastal change variables in determining vulnerability to sea- and lake-level change. **Journal of Coastal Research**. v. 26, n. 1, 2010.
- RANGEL-BUITRAGO, N.; ANFUSO, G. Assessment of Coastal Vulnerability in La Guajira Peninsula, Colombian Caribbean Sea. **Journal of Coastal Research**. SI., v. 56, p. 792-796, 2009.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**. v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do litoral Setentrional do estado do Rio Grande do Norte. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 17, n. 4, p.571-585, 2011.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 14, n. 2, p.151-162, 2013.
- SHAW, J.; TAYLOR, R. B.; FORBES, D. L.; RUZ, M. H.; SOLOMON, S. Sensitivity of the Canadian Coast to Sea-Level Rise. **Geological Survey of Canada Bulletin**. v. 505, 114 p. 1998.
- TAGLIANI, C. R. A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações**. In: Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril, INPE, p. 1657 – 1664. 2003.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN. 91 p. 1977.
- YOO, J. e ROHLI, R. V. Global distribution of Köppen–Geiger climate types during the Last Glacial Maximum, Mid-Holocene, and present. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 446, p. 326-337, 2016.