



**Geotecnologias de Baixo Custo Aplicadas à Avaliação de Risco por Inundação em Áreas Urbanas Costeiras em Cenários de Mudanças Climáticas**  
*Low Cost Geotechnology Applied to Flood Risk Assessment in Coastal Urban Areas in Climate Change Scenarios*

Leonlene de Sousa Aguiar<sup>1</sup>; Venerando Eustáquio Amaro<sup>1,2</sup>;  
Paulo Victor do Nascimento Araújo<sup>1,3</sup> & André Luis Silva dos Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.  
Campus Universitário Lagoa Nova, 59.078-970, Caixa Postal 1524, Natal/RN, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.  
Campus Universitário Lagoa Nova, 59.078-970, Natal/RN, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.  
Campus Macau. R. das Margaridas, 300, Conjunto COHAB, 59.500-000, Macau-RN, Brasil

<sup>4</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão.  
Campus São Luis Monte Castelo. Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, 65.030-005, São Luís-MA, Brasil  
E-mails: leonlene@gmail.com; venerando.amaro@gmail.com; paulo.araujo@ifrn.edu.br; andresantos@ifma.edu.br

Recebido em: 20/09/2018 Aprovado em: 15/02/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_267\\_290](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_267_290)

## Resumo

A elevação do nível médio do mar e a tendência de mais ocorrências de inundações costeiras no mundo são preocupações da comunidade internacional. A compreensão dos perigos, exposição e riscos nas cidades costeiras são importantes para planejar e traçar políticas de adaptação. O objetivo deste artigo foi o de modelar a inundação costeira com tendências à elevação do nível do mar em áreas baixas e planas sob influência de marés que oferecem riscos ao ambiente urbano, por meio de *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) e Geodésia de precisão de baixo custo, adotando como estudo de caso a cidade de Areia Branca no estado do Rio Grande do Norte (Nordeste do Brasil). A modelagem da inundação foi realizada em Modelo Digital de Superfície com precisão vertical de 5,2 cm gerado a partir de técnicas de fotogrametria digital, e vinculado ao Sistema Geodésico Brasileiro a partir de dados de *Global Navigation Satellite System* (GNSS). A cota de inundação foi convertida com base no Nível de Redução da Marinha e ajustada a uma Referência de Nível do IBGE. A análise dos riscos da inundação costeira na cidade de Areia Branca/RN revelou uma profundidade de lâmina d'água de 50 cm que atingem áreas públicas e privadas, sendo agravada pela própria condição de vulnerabilidade da maior parte da população e ocupação de espaços afetados pelas mais elevadas marés de sizígia. Eventos de inundação podem resultar em danos da ordem de R\$ 597.438,68 ou \$ 147.152,37 dólares (\$ 1 = R\$ 4,06 em 01/09/2018), e os cenários de mudanças climáticas demonstram tendências de inundação que podem afetar aproximadamente 40% da cidade.

**Palavras-chave:** Geotecnologias; Riscos; Inundação Costeira; Mudanças Climáticas; Elevação do Nível do Mar

## Abstract

The rise in average sea level and the trend of more occurrences of coastal flooding in the world are concerns of the international community. Understanding hazards, exposure and risks in coastal cities are important in planning and designing adaptation policies. The goal of this article was to model coastal flooding due to sea level rise in low and flat areas under the influence of tides that pose risks to the urban environment through *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) and low-cost accuracy geodesy taking, as a case study, the city of Areia Branca in the state of Rio Grande do Norte (Northeastern Brazil). The flood modelling was carried out on a Digital Surface Model with vertical precision of 5.2 cm generated by digital photogrammetry techniques, and linked to the Brazilian Geodetic System from Global Navigation Satellite System (GNSS) data. The flood quota was converted based on the Reduction Level of the Navy and adjusted to an IBGE Reference Level. The analysis of the risks of coastal flooding in the city of Areia Branca / RN revealed a flood depth of 50 cm, reaching public and private areas, aggravated by the vulnerability of most of the population and by the occupation of areas affected by the highest spring tides. Flood events may result in damages of the order of R\$ 597,438.68 or \$ 147,152.37 (\$ 1 = R\$ 4.06 as of 09/1/2018), and climate change scenarios demonstrate flood trends that can affect approximately 40% of the city.

**Keywords:** Geotechnology; Risks; Coastal Flood; Climate changes; Sea Level Rise

## 1 Introdução

Estudos sobre o fenômeno da inundação foram realizados em várias partes do mundo, compreendendo bacias hidrográficas, áreas costeiras, zonas úmidas, estuários e ambientes urbanos nas mais variadas escalas, e servem para identificar perigos, vulnerabilidades e riscos que subsidiam o gerenciamento de riscos à desastres (Rao *et al.*, 2011; Pezzoli *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2018; Schröter *et al.*, 2018).

A modelagem de diferentes tipos de inundação além de ser importante para o gerenciamento de riscos, vem considerando o agravamento dos cenários futuros que as inundações podem tomar, tornando-se de maior profundidade e mais frequentes como resultado das mudanças climáticas globais e os impactos decorrentes da elevação do nível do mar (Church *et al.*, 2013; IPCC, 2014; Sweet *et al.*, 2014; PBMC, 2016; IBGE, 2016; Vousdoukas *et al.*, 2018; Rasmussen *et al.*, 2018).

A projeção da inundação e investigação das cotas de risco em diferentes cenários requer a existência de uma base de dados com origem em Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos a partir de diferentes fontes, sendo fundamental a compreensão dos limites de resolução espacial, precisão e acurácia vertical para evitar erros em relação aos reais locais afetados por inundações (Cooper *et al.*, 2013; Schrkumar *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2014; Araújo *et al.*, 2018).

O sistema de referência adotado, a precisão dos dados do terreno e a escala de análise são referenciais importantes de acordo com o objeto de investigação, e para o caso das zonas costeiras e estuarinas que requerem análises locais com escalas grandes, tornam-se de difícil realização, pois dados gratuitos são limitados no Brasil e a geração de MDE na maioria dos casos exige trabalhos demorados e dispendiosos do ponto de vista financeiro. Além disto é preciso conhecer o erro do MDE, principalmente para trabalhos realizados em nível local com riqueza de detalhes (Vousdoukas *et al.*, 2018b).

Os perigos da inundação costeira preocupam, pois cerca de 10% da população mundial vive nas zonas costeiras com até 10 metros de altitude, repre-

sentando 2% da área terrestre do mundo, vulneráveis aos possíveis impactos das mudanças climáticas (McGranahan *et al.*, 2007; Nicholls & Cazenave, 2010). Para se ter ideia, até o ano de 2050 estimam-se prejuízos econômicos da ordem de US\$ 940 milhões de perdas médias anuais caso o nível do mar se eleve 20 cm nas 22 maiores cidades costeiras da América Latina e Caribe, ultrapassando o intervalo de mais de US\$ 1 bilhão no caso de subida de 40 cm do nível do mar (Adams *et al.*, 2014).

Diante das preocupações, bases altimétricas em intervalos centimétricos tornam-se fundamentais, sobretudo quando há o interesse na análise do uso e ocupação do solo em cidades costeiras, ou quando ocorrem atividades econômicas nesses ambientes, com o intuito da estimativa de riscos por inundação. A modelagem de perdas por inundação fornece o conhecimento para otimizar investimentos e prover o gerenciamento dos riscos por inundação, e com as atuais possibilidades de modelar cidades virtuais em 3D com base em sensoriamento remoto, só vem a contribuir cada vez mais para o planejamento (Schröter *et al.*, 2018).

A probabilidade das inundações costeiras vem aumentando no mundo, e a necessidade de construir cenários consistentes com precisões confiáveis em relação as modelagens de inundação são uma realidade também necessárias no Brasil a partir de referenciais únicos e fixos (Santos & Amaro, 2011; MMA, 2018). Portanto, requer a geração de modelos digitais de elevação compatíveis para ambientes urbanizados, de modo a permitir análises da profundidade da inundação, das áreas afetadas, a realização de cálculos de danos econômicos, a avaliação dos riscos à exposição e sensibilidade costeira para tomadas de decisão (Marengo *et al.*, 2017; Cian *et al.*, 2018), sendo cada vez mais utilizadas novas tecnologias para salvaguarda do patrimônio costeiro (Armenio *et al.*, 2018). Mesmo assim, é importante considerar a realidade financeira de várias cidades costeiras, sendo essencial a busca de soluções de baixo custo que permitam a realização de modelagens e avaliação dos riscos por inundação costeira.

O objetivo deste artigo é modelar a inundação costeira com tendências à elevação do nível do

mar em áreas baixas e planas sob influência de marés que oferecem riscos ao ambiente urbano, por meio de *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) e Geodésia de precisão de baixo custo, adotando como estudo de caso o contexto da cidade de Areia Branca no estado do Rio Grande do Norte (Nordeste do Brasil).

## 2 Geotecnologias de Baixo Custo

A adoção de Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro (Rosa, 2005; Amaro *et al.*, 2012) partem do interesse em se obter as principais informações de base necessárias para modelar a inundação e analisar os riscos que esta ocasiona nos ambientes urbanos situados em áreas costeiras. Para isto, requer a geração de um MDE representado pelo Modelo Digital da Superfície (MDS) (Mancini *et al.*, 2013) e do ortofotomosaico com resolução espacial de centímetros gerado a partir de aerofotos, para servir de fonte de informações do terreno.

A geração de dados altimétricos e de uso do solo a partir de informações de alta resolução espacial antes do advento do RPA, exigindo técnicas de mapeamento mais tradicionais, requer custos elevados e por vezes inviáveis para as cidades brasileiras, além de grande demanda de tempo, mão de obra, e ainda os impedimentos em áreas de difícil acesso (Rosa *et al.*, 2018), mas a nova tecnologia tem apresentado uma série de vantagens e ainda um custo reduzido para obtenção de dados em questão de horas ou dias (Yastikli *et al.*, 2013; González-Jorge *et al.*, 2014).

O sensoriamento remoto a partir das RPA são uma realidade, e cada vez mais surgem equipamentos e programas de processamento modernos, com possibilidades de obtenção de dados tanto planimétricos quanto altimétricos (Remondino *et al.*, 2011; Colomina & Molina, 2014; Cândido *et al.*, 2015; Sousa, 2017; Tsai & Lin, 2017; Rusnák *et al.*, 2018). A utilização de dados suborbitais crescem a cada dia para finalidades as mais diversas, sendo amplamente empregada em análises ambientais e valiosa fonte de dados para situações de mapeamento e modelagem 3D, enquanto alternativa de baixo custo à fotogrametria aérea tripulada, e ainda possui a condição de realizar voos verticais em pequenas áreas, utilizando

câmeras digitais amadoras em RGB (Remondino *et al.*, 2011; Cândido *et al.*, 2015).

Os modelos digitais de elevação (MDE) a partir da fotogrametria com RPA tem sido avaliados quanto à sua acurácia (Silva *et al.*, 2016a), onde as precisões dos mapeamentos são equiparadas aos resultados centimétricos obtidos com GNSS (Uysal *et al.*, 2015; Kršák *et al.*, 2016). As análises da acurácia vertical dos modelos normalmente são realizadas através da *Root Mean Square Error* (RMSE), comparando-se os valores obtidos com GPS geodésico ou pontos de controle em terra e o valor altimétrico do MDE gerado pelo processamento das fotografias (Uysal *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2018, Araújo *et al.*, 2019). Vantagens adicionais quando comparadas ao GNSS ou métodos mais tradicionais de topografia e mapeamento (por exemplo, teodolito e estação total) está no fato da obtenção de informações em locais que apresentem perigo ou impossibilidade na obtenção de dados diretos, geração de informações em poucas horas e alta resolução temporal (revisitas de acordo com o interesse) e espacial (Uysal *et al.*, 2015). Desvantagens verificadas neste trabalho estão associadas as limitações do uso do equipamento em situações de fortes ventos e baixa luminosidade. O planejamento de sobrevoos com RPA precisam considerar os perigos de sobrevoos caso não sejam observadas as regras de uso do espaço aéreo e proximidades com pessoas e bens, além de interferências eletromagnéticas em áreas urbanas.

O *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) ou Aeronave Remotamente Pilotada, em português, “significa a aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota com finalidade diversa de recreação” (ANAC, 2017). Essa é a terminologia atualmente aceita pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), mas no Brasil é comum a generalização do termo pela mídia enquanto *Drone*, bem como é bastante usada ainda a nomenclatura Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), oriunda do termo *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) (DECEA, 2016).

Neste trabalho foi utilizado o RPA *Phantom 3 Standard* da DJI (<https://www.dji.com/phantom-3-standard>), orientado por rádio controle e *Global*

*Positioning System* (GPS) com código C/A (Monico, 2008). De acordo com o manual do fabricante, a câmera corresponde ao modelo FC300C com sensor 1/2.3" CMOS de 12 megapixels em cores RGB, lente com *Field Of View* (FOV) de 94° 20 mm (equivalente ao formato de 35 mm) f/2.8, velocidade do obturador eletrônico 8 a 1/8000 s, captura imagens com dimensões de 4000 *pixels* (largura) x 3000 *pixels* (altura) e 24 *bits* em JPG, distância focal de 3,61 mm, tamanho do pixel de 1,56 µm x 1,56 µm. As fotografias da superfície do terreno foram tomadas em *nadir* (o ponto na superfície verticalmente embaixo do centro de perspectiva do sensor). A programação e execução dos voos ocorreram através dos *softwares DJI GO* (<https://www.dji.com/goapp>) e *Drone-Deploy* (<https://www.dronedeploy.com/>), o primeiro para configuração do *Phantom 3* e o segundo para o planejamento e realização do Plano de Voo.

Outra Geotecnologia mais difundida na comunidade internacional e amplamente adotada, o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) tem por objetivo obter rapidamente e com precisão as coordenadas geodésicas de qualquer lugar da superfície da Terra por meio de receptores e do posicionamento por satélites artificiais, consistindo na integração de vários sistemas em operação na órbita do planeta (Monico, 2008), e sua aplicação se tornou fundamental para realização de mapeamentos precisos e análises ambientais (Monico et al., 2009; Santos & Amaro, 2011; Santos et al., 2013; Ferreira et al., 2014; Blitzkow et al., 2016), sendo ferramenta indispensável nas atuais análises que envolvem geodésia de precisão.

Para este trabalho foi utilizado um conjunto GPS com base e *rover* da marca Trimble, com potencial para coleta de coordenadas com acurácia milimétrica, sendo o modelo 5700 com receptor L1/L2 adotado como base, e o modelo R3 com receptor L1 enquanto *rover*. O controlador Recon disponível com o *software Trimble Digital FieldBook*, permitiu a pré-configuração do levantamento no modo estático e coleta dos pontos de controle utilizando o *Datum World Geodetic System* (WGS) 84, na projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 24, Hemisfério Sul.

### 3 Área de Estudo

A cidade de Areia Branca localiza-se a 318 km de distância da cidade de Natal, em uma região conhecida como Litoral Setentrional do estado do Rio Grande do Norte (Figura 1). O local margeia a foz do rio Apodi-Mossoró, sendo formado por terrenos baixos e planos (inferior a 5 metros em relação ao nível do mar), e surgiu em ambiente de estuário hipersalino, formado por planícies fluvio-marinha e eólica onde atua um sistema de mesomare semidiurna. A área é contornada por bacias evaporadoras e cristalizadores, e a expansão urbana ocorreu justamente em um contexto econômico estimulado pela secular atividade salinera e pesqueira (Costa et al., 2013; Aguiar et al., 2018).

A região possui clima Tropical de Zona Equatorial, subtipo semiárido mediano que compreende entre 7 e 8 meses secos (Alvares, et al., 2013; Diniz & Pereira, 2015). A média anual de chuvas é de 546,5 mm e ocorrem de fevereiro a maio, coincidindo com o período de ventos mais brandos, que predominam de nordeste na região. Entre fevereiro a julho as médias dos ventos são inferiores a 4 m/s, elevando-se para além de 5 m/s nos meses seguintes. A temperatura média é de 27,3 °C, mas as máximas ultrapassam 33 °C, com evapotranspiração anual que excede os 2000 mm e umidade relativa do ar tende aos 69% (RADAMBRASIL, 1981; IDEMA, 2008; EMPARN, 2017; INMET, 2018).

Estudos identificaram o potencial risco por inundação costeira, que foram associadas as altas marés, bem como, estabelecida a relação com o processo de ocupação de zonas úmidas e as transformações do espaço pelas salinas ao longo do estuário (Boori et al., 2010; Boori et al., 2012; Medeiros et al., 2012; Aguiar et al., 2018), modificando o escoamento e dinâmica das águas.

### 4 Materiais e Métodos

#### 4.1 Levantamento de Campo com RPA e GNSS

Inicialmente foi realizado o planejamento para aquisição de dados em campo, e critérios como dias ensolarados para redução de sombreamentos (horário do sol com elevação superior a 30°) e ventos

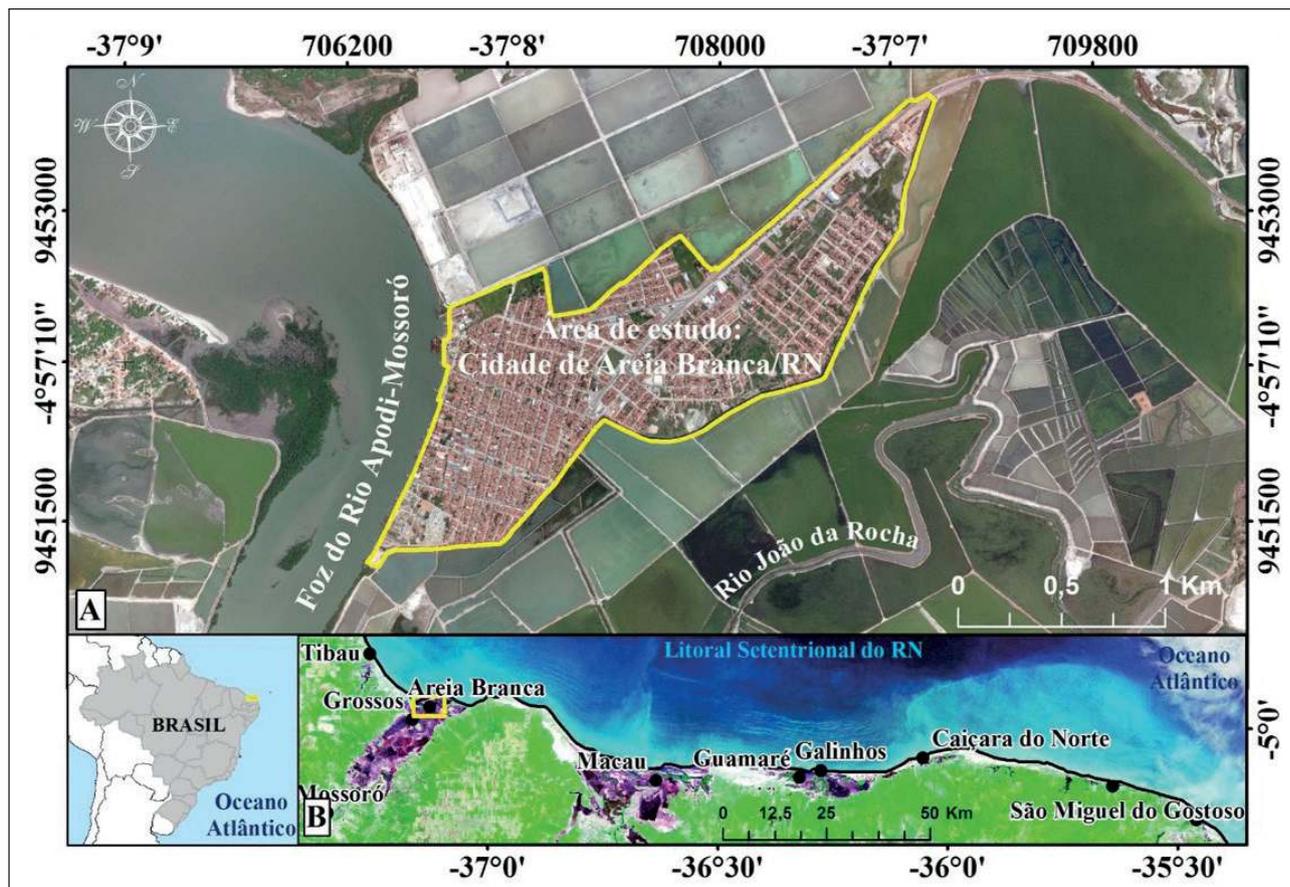


Figura 1 Localização da área de estudo. A. Cidade de Areia Branca como recorte espacial de análise; B. Região denominada de Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte com a indicação das principais cidades litorâneas.

brandos (abaixo de 35 km/h) foram considerados. Por isto o levantamento ocorreu nos dias 10 e 11 de março de 2018. No campo foram identificadas algumas torres de telecomunicação na cidade que impediram a realização de sobrevoo com RPA na região central da área de estudo, pois esses equipamentos sofrem interferências eletromagnéticas afetando o sinal de rádio. Antes da realização dos sobrevoos foram estabelecidos 21 pontos de controle levantados com o GPS Geodésico (*rover*) em modo estático por 20 minutos para permitir a correção da modelagem do RPA. Durante o levantamento, a base do GPS rastreou um marco materializado no solo pelo período de 08 horas que foi corrigido com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo através de pós-processamento, para garantir informações geodésicas que foram referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), oficial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), como referência planimétrica e

altimétrica do Brasil (Santos & Amaro, 2011; Santos *et al.*, 2013). O ajuste com Referências de Nível do IBGE existentes na cidade e região não foi possível pois várias delas foram destruídas ou modificadas (intervenção de obras).

Foram executados 14 voos a 120 metros do solo com o RPA, suficientes para a geração de ortofotomosaico com 3,6 cm de resolução espacial. Os planos de voos traçados e executados foram realizados se utilizando de um *Smartphone* AGM X1 com sistema Android 5.1, no *software* *DroneDeploy*, onde foram estabelecidos os parâmetros de altitude, sobreposição lateral e longitudinal das fotos em 70%, posição da câmera em 90° no *nadir*, tempo, direção e velocidade do voo (10 m/s).

Vale comentar que na fotogrametria digital a resolução espacial da imagem está relacionada ao

*Ground Sample Distance* (GSD), traduzido como “distância de amostra do solo”. O GSD é compreendido como a porção ou unidade do terreno capturada pela câmera (sensor) e representada no pixel da imagem (único valor de toda a energia refletida da superfície), de forma que quanto menor o seu valor, maior será a resolução da imagem, portanto, melhor a definição dos objetos. O tamanho do GSD está relacionado à altura do voo, distância focal da câmera, número de pixels por largura de imagem e largura do sensor. Contudo, outras variáveis influenciam no resultado final do mesmo, a saber, a resolução da câmera, variação no ângulo de captura das imagens da câmera e variação do relevo (Felipe-García *et al.*, 2012; Tziavou *et al.*, 2018). Os atuais programas de processamento das aerofotos obtidas pelo RPA, acabam recalculando um GSD médio para distribuição no ortofotomosaico final.

#### 4.2 Processamento de Dados

O processamento dos dados do GPS foi realizado através do *software Topcon Tools 8.2.3*, utilizando as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE (IBGE, 2018), sendo adotadas as bases dos municípios de Mossoró/RN (Estação 92449 RNMO) e Pau dos Ferros/RN (Estação 96558 RNPF), por terem apresentado melhor resultado na precisão das coordenadas e altitude da estação base e *rover* do GPS. No processamento foram corrigidas as efemérides dos satélites e desativados alguns ruídos capturados pelo equipamento. Por fim, as altitudes elipsoidais (*h*) foram convertidas em altitudes ortométricas (*H*) através da obtenção da altura geoidal (*N*), fornecida pelo programa MapGeo 2015, disponibilizado pelo IBGE (IBGE, 2015; Blitzkow *et al.*, 2016). O procedimento foi aplicado para todos os pontos de controle obtidos em campo, e corrigidos com as informações da base.

Para os dados do RPA foi utilizado o *software Agisoft Photoscan*, que permitiu a inserção das 2.257 imagens obtidas com o RPA. O processamento seguiu a rotina semiautomática disponível (calibração de câmera, exclusão de imagens sem qualidade, alinhamento de fotos, otimização das imagens, construção da nuvem densa de pontos, geração do MDS e

geração do ortofotomosaico), onde foram realizadas intervenções para inserção dos pontos de controle e eliminação de ruídos e distorções (Figura 2). Com o processamento fotogramétrico foram obtidos o MDS e ortofotomosaico ajustados ao SGB uma vez que o modelo foi corrigido com os pontos de controle do GPS.

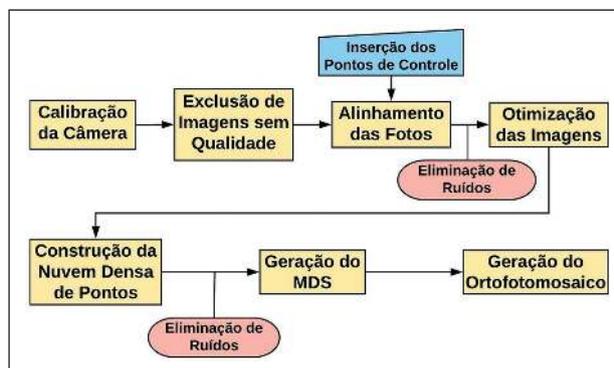


Figura 2 Fluxograma do processamento das aerofotos através de rotina semiautomática.

O MDS final foi avaliado quanto a sua precisão e acurácia, por meio da avaliação da Média da Variação da Altura Ortométrica ( $\Delta H$ ) (Equação 1); e do valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*) (Equação 2), conforme metodologia de avaliação de Modelos Digitais de Elevação proposta por Araújo *et al.* (2018), que tem o  $\Delta H$  enquanto um indicativo do deslocamento vertical geral do Modelo Digital em relação ao nível do solo verdadeiro (deslocamento positivo ou negativo), e o RMSE como uma medida estatística da magnitude do erro comumente usada para comparar modelos de elevações, de forma que todas as diferenças individuais (resíduos) entre os valores observados e os modelados são avaliados para se obter uma única medida de poder preditivo.

$$\Delta H = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})^2}{n}} \quad (2)$$

Onde o  $H_{Base}$  corresponde ao valor da altura ortométrica de referência, o  $H_{MDE}$  ao valor da altura ortométrica do modelo no ponto *i*.

A projeção da inundação sobre o MDS permitiu verificar as ruas afetadas com a profundidade, e todos os imóveis limítrofes com essas ruas foram considerados como área inundável, somando-se suas áreas enquanto imóveis afetados.

### 4.3 Obtenção da Cota de Inundação

Para a compreensão da inundação que ocorre na cidade de Areia Branca, inicialmente foram concentrados esforços de busca em matérias de jornal, noticiários locais, *blogs online*, entrevistas com pessoas mais antigas da comunidade e pesquisa de dados oficiais da defesa civil, por exemplo, por meio do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (<https://s2id.mi.gov.br/paginas/index.xhtml>), na expectativa de se encontrar informações sobre o fenômeno da inundação que tivesse afetado a localidade.

A obtenção dos dados de maré, ocorreu por meio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), órgão militar subordinado à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), onde foram disponibilizados os registros do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), contendo a série temporal das marés observadas e previsões de marés para a Estação 30407, correspondente ao Porto de Areia Branca – TERMISA (Latitude 04° 49' 05" S e Longitude 37° 02' 04" O), durante o período de 01 de janeiro de 1970 a 31 de dezembro de 2017, baseado em constantes harmônicas e em alturas em centímetros acima do Nível de Redução (NR) local, representando um intervalo de 47 anos de dados com informações históricas de Marés Astronômicas (MA) a cada hora.

Inicialmente, foi construída uma tabela somente com os valores máximos diários das cotas das MA ajustadas ao NR. Em seguida, foi verificada a variabilidade dos dados e caracterização da distribuição de probabilidade, baseada na análise descritiva dos dados. Nessa análise, buscou-se obter as informações de tendência central, dispersão e separatrizes (quartil e percentil). Além disso, foi obtido o período de retorno ( $Tr$ ) das cotas máximas para 20, 50, 100, e 1000 anos. O  $Tr$ , também conhecido como intervalo de recorrência ou tempo de recorrência, é entendido como o tempo no qual um determinado

evento hidrológico pode ser igualado ou excedido em um ano qualquer (McCuen, 1998; Araújo *et al.*, 2019). Nesse estudo, o  $Tr$ , em anos, foi definido pela equação a seguir, onde  $p$  é a probabilidade de o evento hidrológico ser igualado ou superado (Equação 3):

$$Tr = \frac{1}{p}$$

#### 4.3.1 Ajuste do Nível de Redução ao Plano de Referência

As informações de maré disponibilizadas pela DHN nas cartas náuticas e também no BNDO são todas vinculadas ao chamado Nível de Redução (NR), sendo este o sistema de referência para mensuração das profundidades batimétricas, que adota a média das baixas marés de sizígia enquanto uma referência de medida realizada no nível local. Dessa forma, o estabelecimento do nível do mar local encontrado nas cartas náuticas e informações disponibilizadas pela Marinha do Brasil possuem referencial próprio voltado ao conhecimento do relevo do fundo do mar para segurança aos navegantes (CHM, 2018a, 2018b), portanto, não está vinculado ao zero do *datum* altimétrico do Brasil que adota o plano vertical de Imbituba-SC (Matos, 2005; Ramos & Krueger, 2009).

Na cidade de Areia Branca existe registro de uma estação maregráfica (30112) da DHN do ano de 1961 (Latitude 04° 57' 28.04" S e Longitude 37° 08' 16.85" O), como referência utilizada na carta náutica nº 720 que cobre Areia Branca a Macau no Rio Grande do Norte, tendo sido realizada análise estatística e harmônica de 32 dias de observação de maré para determinação do NR referenciado a uma régua instalada no estuário Apodi-Mossoró e vinculado a duas bases locais da DHN próximas a Cia Docas do Rio Grande do Norte (CODERN) e outra nas instalações da Capitania dos Portos em Areia Branca (DHN, 2010).

A partir dos dados foi realizada a vinculação da cota do Nível de Redução e do Nível Médio do Mar (NMM) local ao SGB por operações matemáticas de adição/subtração, uma vez que no próprio relatório da DHN (2010), passou a ser citado o re-

ferencial altimétrico de uma Referência de Nível implantada pelo IBGE (Estação Geodésica ou Referência de Nível 2404X). Como o sistema de referência do IBGE se relaciona ao *datum* de Imbituba-SC (IBGE, 2018), a conversão do Nível de Redução para o SGB se tornou referência física com possibilidade de analisar as cotas de maré e comportamento do nível médio do mar sobre o relevo local, uma vez que as informações do MDS gerado neste trabalho também estão condicionadas ao mesmo sistema de referência.

#### 4.4 Identificação das Exposições ao Risco de Inundação

Os riscos gerados pela inundação na cidade de Areia Branca, considerando situações mais críticas, requereu a identificação da cota de inundação mais alta que se tem evidências para o local. Por este motivo os dados gerados (estatística descritiva) a partir da análise dos registros de maré do BNDO, permitiram identificar a maré mais alta que foi projetada sobre o MDS e ortofotomosaico gerados para a análise local.

A partir da observação das áreas inundadas se buscou o conhecimento do território e locais de referência sujeitos ao risco por inundação costeira, relacionados à população direta e indiretamente afetada, áreas de planejamento municipal afetadas, cenários de risco futuro por inundação costeira e estimativas financeiras de danos.

##### 4.4.1 Setores Vulneráveis

A identificação das vulnerabilidades neste trabalho buscou apontar a população direta e indiretamente afetada a partir dos setores censitários disponibilizados pelo IBGE (2011), através das variáveis quantidade de moradores e nível médio de renda. Bem como foram observadas as áreas especiais de planejamento municipal estabelecidas no Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Areia Branca (PMAB, 2006).

##### 4.4.2 Cenários de Elevação do Nível Médio do Mar

A elevação do nível do mar tem sido bastante difundida na comunidade internacional como um

dos impactos relacionados às mudanças climáticas, onde a maioria das estimativas estão projetadas até o ano de 2100, ensejando estudos que possam apontar os impactos dessa mudança para que adaptações possam ser planejadas de acordo com as vulnerabilidades e riscos locais. Em decorrência da ausência de dados locais, este trabalho adotou os cenários de elevação do nível do mar no âmbito global e nacional, para incorporação das previsões de subida do nível médio do mar até o ano de referência citado, segundo previsões do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Church *et al.*, 2013) e IBGE (2016), onde estão previstos cenários de elevação do nível médio do mar sob uma ótica mais otimista e outra pessimista.

##### 4.4.3 Estimativa da Exposição Econômica por Inundação

Para estimar os danos ou prejuízos econômicos diretos, considerando a inundação costeira provocada pelas altas marés, foi utilizada a equação de prejuízo agregado (Equação 4) proposta para inundações de pequenas profundidades (James & Lee, 1971; Canholi, 2014):

$$C_d = K_d \times M_e \times h$$

Onde:

$C_d$  – dano total em unidades monetárias;

$K_d$  – fator baseado em danos de inundações históricas;

$M_e$  – valor de mercado das estruturas e áreas inundadas, em unidades monetárias;

$h$  – profundidade média da inundação (m).

Canholi (2014) observou que o índice  $K_d$  é obtido na relação entre os danos marginais e a profundidade  $d$ . Contudo, não existem referências com mensurações de custos históricos de danos ou prejuízos no âmbito do estado do Rio Grande do Norte relacionados a situações de inundação costeira, tampouco na área de estudo. Por este motivo, a aproximação do fator foi adotada da proposta de Homan

& Waybur (1960 *apud* TUCCI, 1997), que para enchenches com  $d \leq 1,5$  m corresponde a 0,052.

Para a estimativa do valor de  $M_e$ , foi aplicado o método comparativo direto de dados de mercado previsto nas Normas Brasileiras (NBR) 14.653-1 e 14.653-2 (ABNT, 2001; 2011), onde a amostra dos imóveis com seus valores de mercado foram cotados por meio das evidências (amostras) disponíveis na cidade de Areia Branca durante a realização deste trabalho. Foi calculado para cada amostra o valor do metro quadrado ou valor unitário (R\$/m<sup>2</sup> aqui representado por  $V_U$ ) a partir da divisão do valor do imóvel pela sua área. Para encontrar o valor do imóvel ( $V_I$ ), foi realizado o produto da área do imóvel ( $A_I$ ) pelo valor unitário  $V_U$  (Equação 5):

$$V_I = A_I \times V_U \quad (5)$$

Após o mapeamento de todos os imóveis no raio de abrangência diretamente afetado pela inundação, seus respectivos valores de mercado foram calculados, e a somatória final resultou no  $M_e$ .

A profundidade média da inundação ( $h$ ) foi obtida com base no MDS gerado neste trabalho e a projeção da cota de inundação atual máxima.

Além dos danos diretos foi preciso estimar também os danos indiretos (Machado *et al.*, 2005; Jonov *et al.*, 2013), que para este trabalho foi adotado o valor global de 17% sobre os danos diretos a partir da perspectiva do Banco Mundial (2012).

#### 4.5 Escolha entre Realocação versus Obra Estrutural

Considerando episódios futuros de inundação costeira cada vez mais frequentes e atingindo áreas mais elevadas dada a tendência de elevação do nível do mar, foi realizada estimativa de um possível valor atualizado para o caso hipotético de realocação de todos os imóveis no raio de abrangência direta da inundação para áreas sem o oferecimento de riscos. Cabe destacar que o cálculo estimado não inclui, por exemplo, a aquisição de uma área para receber a realocação, tampouco custos com objetos no interior dos imóveis, nem implantação de nova infraestrutura

urbana básica (ruas, rede elétrica, saneamento, etc.). Foi considerado apenas o valor do custo básico de construção.

Para calcular o custo da construção de todos os imóveis realocados, se adotou o Custo Unitário Básico de construção (CUB/m<sup>2</sup>) atualizado periodicamente pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil (SINDUSCON/RN) no estado do Rio Grande do Norte, observando-se a tabela de referência do mês de junho de 2018 (CBIC, 2018), de tal modo que foi realizada a média dos valores para o padrão residencial baixo, o padrão comercial normal e o padrão industrial.

## 5 Resultados e Discussões

A seguir são apresentados os resultados contendo a modelagem da inundação costeira e os riscos relacionados nas áreas expostas que foram identificadas. Além disto são apresentados os resultados dos cenários futuros a partir de referenciais de mudanças climáticas e estimativas de prejuízos econômicos para as principais áreas expostas ao perigo.

### 5.1 Resultado da Precisão das Geotecnologias

A geração do MDS e ortofotomosaicos a partir do RPA, ajustados com os pontos de controle obtidos com GPS Geodésico, resultaram em um modelo compatível com a análise de nível centimétrico necessário para mensurar pequenas variações do nível médio do mar e inundações com estreita lâmina d'água (inferior a 1 m).

O levantamento com GPS geodésico em modo estático pós-processado, ajustando os pontos de controle com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE, permitiu a correção do modelo e adoção do sistema de referência vinculada ao SGB como verdade do terreno. Os desvios-padrões do processamento foram de milímetros a centímetros, sendo de 9 mm para a latitude, 1,1 cm para a longitude e 2 cm para a altitude; valores satisfatórios para levantamentos geodésicos em zonas

costeiras que requeiram precisão e acurácia (Santos & Amaro, 2011; Silva *et al.*, 2016a).

Em relação aos dados do RPA, a resolução espacial do MDS ficou com 10 cm e na avaliação estatística do erro vertical com os 21 pontos de controle, foram obtidos valores de  $\Delta H$  e RMSE, respectivamente de 2,1 cm e 5,2 cm, compatíveis para aplicação de modelagens de inundações com lâminas d'água pequenas (Barry & Coakley, 2013; Feng *et al.*, 2015; Gonçalves & Henriques, 2015), uma vez que os erros de centímetros abaixo do nível da profundidade da inundação costeira permite avaliar com mais segurança as áreas possivelmente suscetíveis ao risco dada a limitada disponibilidade de dados gratuitos de alta resolução. Em relação ao ortofotomosaico, este ficou com 5 cm de resolução espacial e teve as distorções corrigidas com o MDS, e foi utilizado para a identificação das áreas atingidas pelo perigo da inundação (susceptíveis), bem como para o mapeamento de imóveis afetados e contabilização dos riscos que serão apresentados adiante.

## 5.2 Registros de Maré, Inundação Costeira e a Cota de Risco

### 5.2.1 Os Registros Históricos de Marés e Inundações

As buscas realizadas sobre os registros de inundações para a área de estudo apontaram para pelo menos 5 (cinco) episódios de inundações costeiras. 2 (duas) ocorrências em 2015 estão registradas em notícias de jornais, *blogs online* e em conversas com moradores da cidade. 2 (dois) episódios não possuem registros, mas estão na memória da população (entrevistas), sendo revelada uma ocorrência aproximada do ano de 2005 e outra na década de 1980. Finalmente algum evento ocorreu entre a década de 1950 e 1970 verificando-se através de fotografia (Figura 3F). Não foi possível determinar especificamente os anos dos episódios, dada a falta de sistematização de dados. Por exemplo, nada foi encontrado no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres enquanto fonte de consulta de entidade pública oficial. Na Figura 3 são apresentadas fotografias de alguns locais que são mais comumente afetados pelo fenômeno.

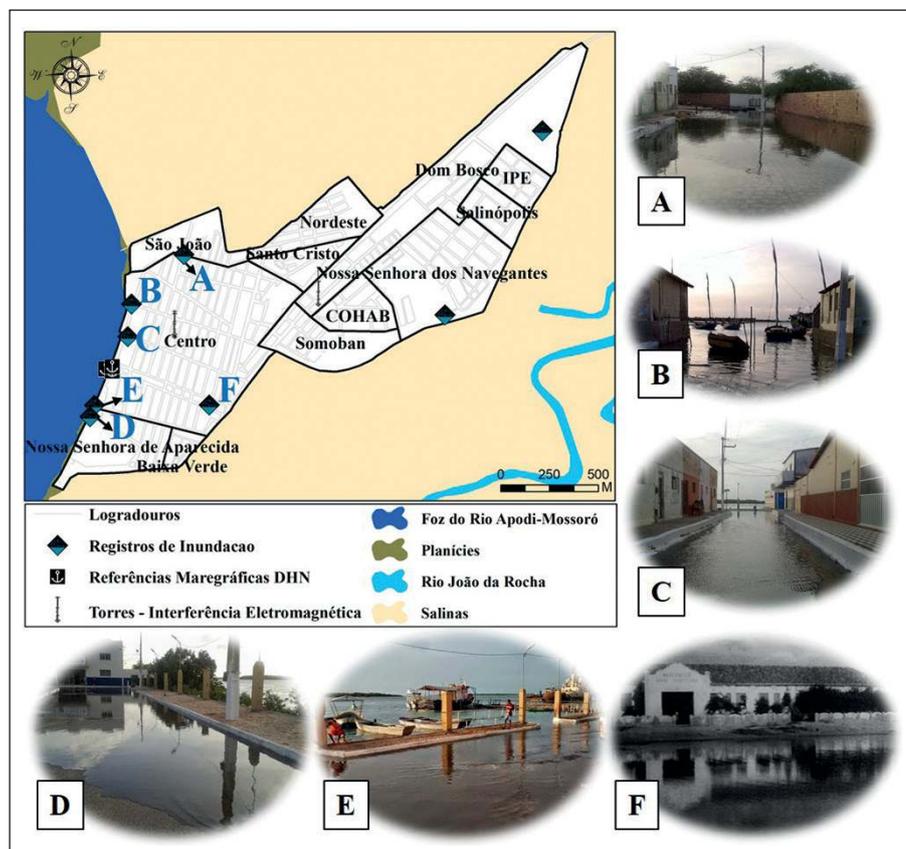


Figura 3 Áreas atingidas pela inundação costeira em Areia Branca encontradas em registros. A, B, C, D, E. Fotos da inundação costeira ocorrida em 2015; F. Inundação possivelmente ocorrida entre as décadas de 1950 a 1970.

Nas informações encontradas, todas as evidências apontam que as inundações costeiras estão relacionadas ao raro processo de elevação do nível das águas do estuário Apodi-Mossoró, que durante marés de sizíguas mais altas, chegam a inundar as porções mais periféricas do território da cidade, devido as suas características de altimetrias baixas e planas, favoráveis ao transbordamento das águas, que se elevam em canais que circundam a cidade a atingem diversas ruas.

Destaca-se que os máximos valores das marés de sizígia não ocorreram concomitantemente aos períodos chuvosos e não representam a soma de fenômenos de cheias da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, que tem a vazão controlada por barragens. Além disto, durante a realização deste trabalho constatou-se a ocorrência de inundação costeira no ano de 2015, quando a área se encontrava em regime de seca elevada, momento com baixa contribuição fluvial no estuário em praticamente toda a bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, cuja precipitação na região da foz não chegou a 300 mm/ano (EM-PARN, 2017). Também foram observados registros de precipitação no período para analisar a relação da inundação e fenômenos de escoamento superficial e alagamentos urbanos em áreas de fundo de bacia. As áreas periféricas foram afetadas pela inundação, apesar desses espaços não formarem depressões no relevo que potencializem acúmulos de precipitação. Apesar das Marés Astronômicas de sizígia (MA) mais altas verificadas na região, o fenômeno de inundação não seria totalmente explicado somente com base na previsão das constantes harmônicas. Considerou-se a ocorrência concomitante de Efeitos Não Astronômicos (ENA), que apesar de ainda se desconhecem as origens desse fenômeno, foi possível apontar oscilações de 10 cm acima da MA esperada por períodos entre 10 e 15 dias, concentrados principalmente entre os meses de março e setembro, durante o equinócio (Frota *et al.*, 2016).

### 5.2.2 Série Temporal e Análise da Maré Astronômica

Verificou-se que o conjunto de dados com os valores das alturas máximas diárias da maré astronômica possuíam distribuição gama (Park & Bera,

2009). A estatística descritiva da série temporal dos últimos 47 anos, contendo os valores das marés máximas diárias da MA em Areia Branca, como na Tabela 1, em que se observou valores mínimos e máximos de 226 cm e 385 cm, respectivamente. A amplitude de maré somente para as máximas foi de 159 cm, todas em relação ao Nível de Redução (NR) da DHN. Em relação à tendência central, observa-se que a moda e a mediana apresentam valores respectivos de 318 cm e 312 cm no conjunto total de 17.532 registros.

Mínimo	226
Máximo	385
Moda	318
Mediana	312
Desvio padrão	33,99
Variância da amostra	1155,49
Intervalo	159
N	17532

Tabela 1 Estatística descritiva das previsões diárias em centímetros das Marés Astronômicas em relação ao Nível de Redução. N = Número de previsões diárias.

Analizando o período de retorno no conjunto de dados da série temporal, observou-se os períodos de retorno de 20, 50, 100 e 1000 anos, onde foram apresentados os valores respectivos de MA máxima de 365 cm, 373 cm, 376 cm e 385 cm em relação ao NR (Tabela 2). Nota-se que mesmo o período de retorno de 100 anos possuindo uma baixa probabilidade de ocorrência (1%), foi observado que nos últimos 05 anos houve 12 (doze) episódios de maré astronômica. Enquanto isso, enfatiza-se também as 02 ocorrências no período de retorno de 1.000 anos, nesses mesmos 05 anos (série completa dos anos de 2013 a 2017).

Probabilidade (p)	Período de Retorno Tr = 1/p	Marés Astronômicas Máximas Referência NR (cm)	Frequência das ocorrências nos últimos 5 anos (n vezes)
5%	20	365,00	24
2%	50	373,00	16
1%	100	376,33	12
0,1%	1000	385,00	2

Tabela 2 Probabilidade e períodos de retorno da série temporal das alturas máximas diárias da Maré Astronômica (cm).

Isto pode significar uma evidência de aumento na ocorrência das maiores cotas da maré astronômica na área de estudo, e possivelmente podem estar associadas às mudanças de elevação do nível do mar e ao paradigma das mudanças climáticas, as quais refletirão no aumento dos riscos, danos e nas frequências de inundação e profundidade da coluna de água (Bilskie *et al.*, 2014; Cazenave *et al.*, 2014).

Em virtude dos riscos representados pela cota de 385 cm da maré astronômica, em relação a sua contribuição para as inundações costeiras em Areia Branca, e ainda considerando que foi com esse comportamento de maré que ocorreu o fenômeno de inundação na cidade no ano de 2015, é que esta foi adotada como Cota de Inundação (CI) de máxima referência para o local.

A partir das informações dos elementos de maré observados de 04/03/1961 a 04/04/1961 pela DHN (2010), foi possível realizar a conversão do NR local ao SGB (Figura 4) graças a existência da Referência de Nível 2404X do IBGE existente nas imediações da Referência de Nível cadastrada pela DHN e locada na Capitania dos Portos a menos de 30 metros de distância.

O cálculo da conversão da Cota de Inundação mais elevada registrada, ou seja, 385 cm, pode ser visualizado através da Tabela 3. A Figura 6 ilustra a conversão de qualquer cota de MA existente na Carta Náutica local, ou outros dados da Marinha do Brasil condicionados ao NR local de Areia Branca-

-RN, para o Sistema Geodésico Brasileiro e o *datum* oficial, por meio da Equação 6:

$$CM_{SGB} = (NR) + (MA) \quad (6)$$

Onde,  $CM_{SGB}$  = Cota da maré vinculada ao SGB;  $NR$  = Nível de Redução da DHN (valor obtido de -1,606), e;  $MA$  = Maré Astronômica (obtido na Tábua de Maré e BNDO).

Base de Referência	Altitude (cm)	Altitude Ortométrica (m)
RN3 DHN	339,72	3,397
RN 2404X IBGE - SGB	339,02	3,390
Nível do Mar Local	-2,98	-0,030
Nível de Redução - NR	-160,58	-1,606
Zero da Régua	-221,98	-2,220
RN 1	224,12	2,241
RN 2	286,12	2,861
MA Máxima (385 cm do NR)	224,42	2,244

Tabela 3 Cálculo de conversão para vincular o NR ao SGB e demais cotas da Maré Astronômica. Na tabela consta a altura ortométrica em metros da MA 385 cm.

Mesmo de posse do valor de maré vinculado ao SGB (cota 2,244 m), mas é preciso considerar que as inundações costeiras na região não podem ser explicadas somente a partir dos valores das marés astronômicas. Nesse sentido foi considerado que o risco de inundação costeira está associado à ocor-

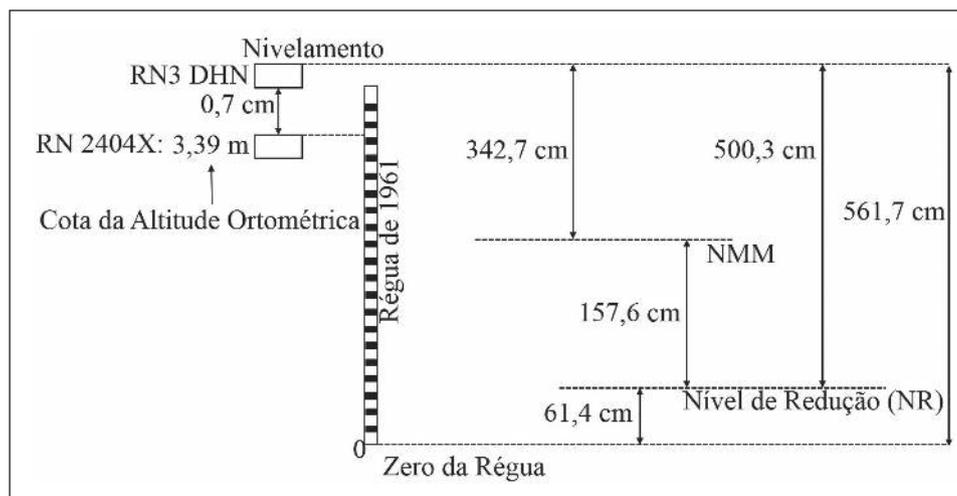


Figura 4 Diagrama ilustrando as medidas para conversão do Nível de Redução para Altitude Ortométrica. Fonte: Adaptado de DHN (2010).

rência concomitante de ENA, acrescentando-se 10 cm ao cálculo para se identificar a Cota de Inundação. Finalmente, os 5,2 cm do erro vertical do MDS (RMSE) foi acrescentado ao cálculo da inundação enquanto um fator de segurança para preservar o risco da maior elevação das águas. A Figura 5 mostra as variáveis que representam o risco de inundação costeira para a cidade de Areia Branca, e como é estabelecida a relação das marés com o sistema de referência oficial do IBGE.

Como complemento ao período de retorno apresentado na Tabela 02, as cotas mais elevadas MA que ocorreram em Areia Branca para os períodos de retorno de 20, 50, 100 e 1000 anos, ajustadas ao sistema de referência do SGB, apresentam os respectivos valores de 204,40 cm, 212,40 cm, 215,70 cm e 224,40 cm. O último valor foi adotado como a CI quando somados aos outros parâmetros apresentados na Figura 5, resultando na CI de 2,396 m adotada na modelagem.

### 5.3 Os Riscos da Inundação Costeira

A projeção de cenários para a inundação costeira na cidade de Areia Branca considerou a soma da MA máxima de sizígia, do ENA e do RMSE do MDS.

#### 5.3.1 Áreas e População Direta e Indiretamente Afetadas

A área atingida pela inundação costeira possui escolas, hospital, cemitério, igreja, indústrias, praças, residências, comércios, instituições públicas e privadas (Figura 6). O mapeamento representa todas as áreas da cidade abaixo da cota de inundação de 2,396 m e coincide com os registros históricos e com a maré de sizígia mais elevada registrada pela CHM.

No contexto das áreas afetadas foi identificada população residente total de 13.949 habitantes, distribuída de acordo com os setores censitários, onde se verifica a distribuição de pessoas na relação aproximada com os bairros (Figura 7A), que sofrem as influências diretas e indiretas dos transtornos gerados pelas águas que invadem as ruas, terrenos e imóveis nas mais baixas cotas. Em algumas ruas mais próximas ao rio Apodi-Mossoró, nota-se as iniciativas da população na adaptação, com calçadas mais elevadas para impedir a invasão das águas.

A área que sofre com problemas de inundação encontra-se com urbanização consolidada, exceto onde existem aterros, por tratar-se de vazio urbano em processo de expansão urbana, onde se constatou com frequência a disposição inadequada de entulhos como iniciativa de aterrar e nivelar o solo para a ocupação, mesmo sob o risco da inundação costeira.

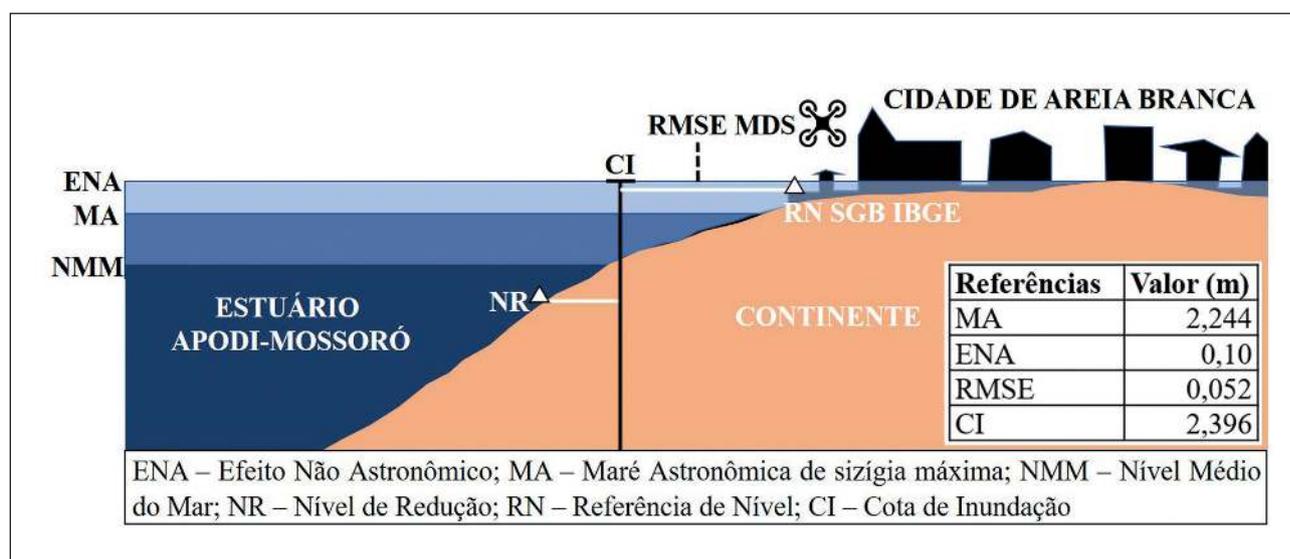


Figura 5 Variáveis que representam a Cota de Inundação utilizada na análise dos riscos de transbordamento das águas costeiras para Areia Branca/RN.

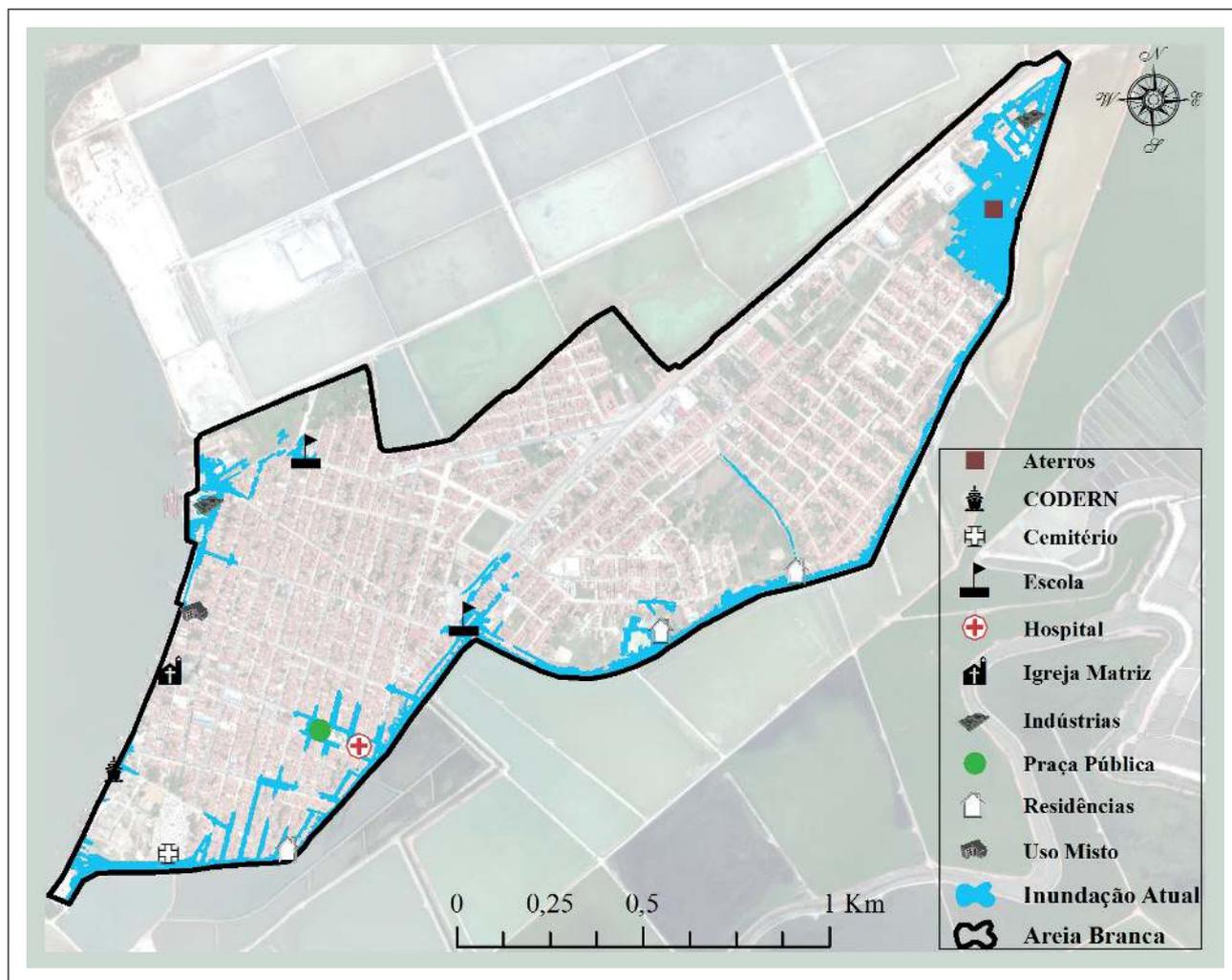


Figura 6 Pontos de referência das áreas atingidas pela inundação em Areia Branca.

Além disto, um fator que eleva o risco de inundação identificado nas áreas periféricas da cidade é a má disposição de resíduos sólidos (lixo) ao longo dos canais de drenagem urbana e igualmente o lançamento de efluentes das salinas nos canais que contornam a cidade de Areia Branca, o que pode contribuir com o nível da inundação durante grandes marés e eventos de precipitação combinados. Ao quadro de agravamento dos riscos por interferências humanas, deve ser considerada também a perda de áreas úmidas e a reduzida proteção das áreas de preservação permanente ao longo do estuário, o que afeta o comportamento da hidrodinâmica local, expondo a cidade aos perigos da inundação (Aguiar *et al.*, 2018).

A capacidade de adaptação da população, como enfrentamento dos problemas oriundos da inundação costeira, frequentemente sem o auxílio dos agentes públicos, é dificultada pela condição de alta vulnerabilidade socioeconômica dos municípios costeiros desse setor do RN (Busman *et al.*, 2017), que possui nível de renda baixo, com quantitativo elevado de pessoas que sobrevivem em média com até 1 e menos de 2 salários mínimos (Figura 7B).

É importante considerar que além do fenômeno da inundação costeira em Areia Branca, durante a realização deste trabalho se constatou a ocorrência de alagamentos em áreas topograficamente rebaixadas e com deficiência no sistema de drenagem, agra-

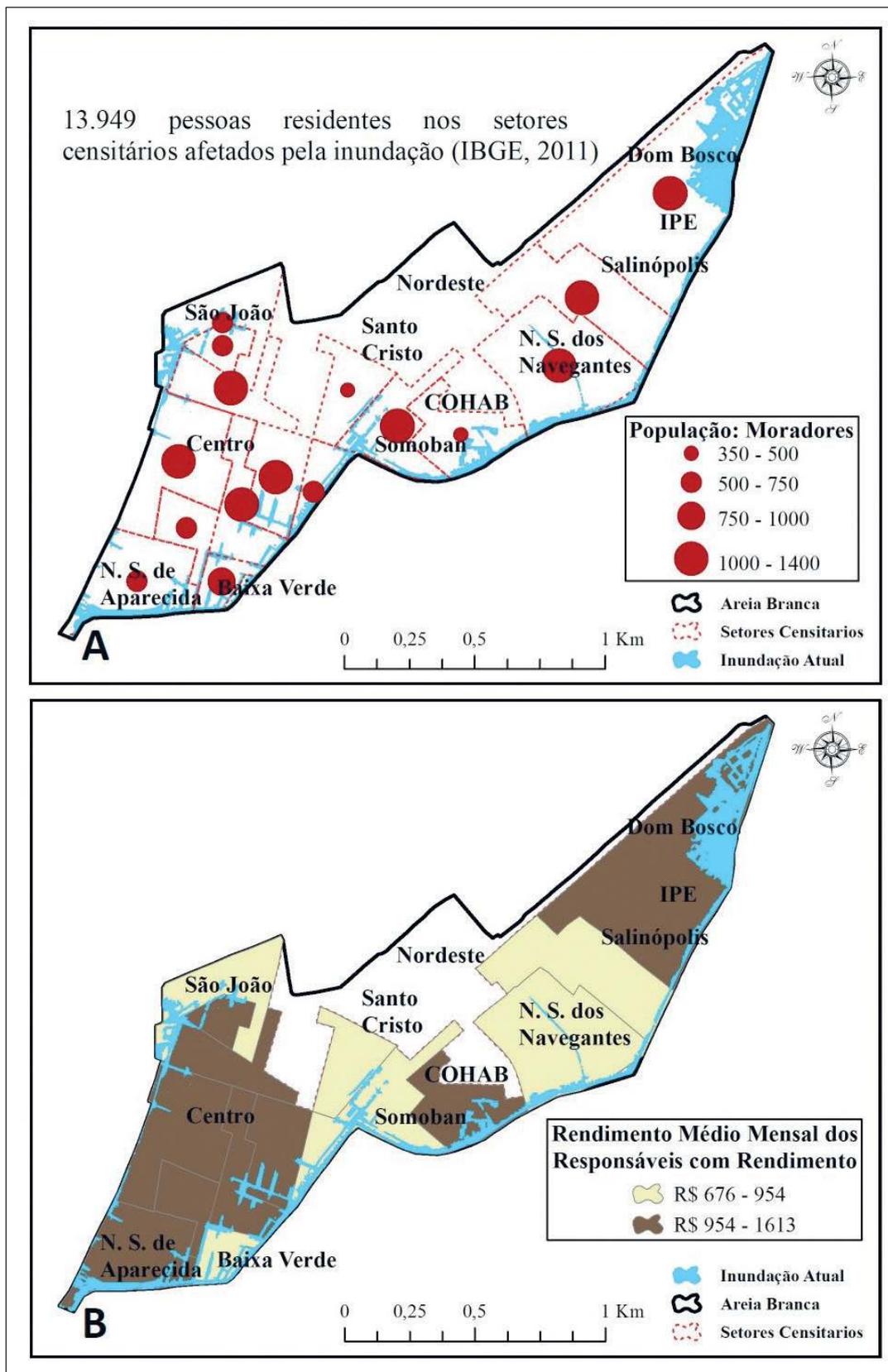


Figura 7 Características da população afetada pela inundação costeira. A. População direta e indiretamente atingida, com indicação da concentração de pessoas por setor censitário e indicação de bairros da cidade de Areia Branca/RN; B. Distribuição da renda média da população em relação aos bairros e setores censitários.

vada pela disposição de resíduos sólidos nas vias públicas que entopem galerias e bocas de lobo.

Essas áreas baixas não se conectam diretamente aos setores onde ocorrem as inundações costeiras, pela própria condição do relevo, mas sob as condições de cenários futuros de elevação do nível do mar, poderá ocorrer a conexão desses setores, que atuarão conjuntamente no fluxo de alagamento e inundação, durante episódios de precipitação pluviométrica, agravando os riscos e danos à cidade de Areia Branca. Foi possível perceber também que, mesmo não havendo conexão física atualmente, o restrito sistema de drenagem de coleta de esgoto e o nível do lençol freático (que chega até 1,5 m de profundidade em alguns locais), são diretamente influenciados pela ocorrência das inundações, o que limita os fluxos de escoamento no geral, promovendo o retorno dos efluentes sanitários em vários bairros da cidade.

### 5.3.2 Áreas Especiais de Planejamento

O Plano Diretor de Areia Branca (PMAB, 2006) estabeleceu 5 áreas especiais e acrescenta ainda 2 áreas adensáveis nos limites da zona urbana da sede do Município. Verifica-se que o risco de inundação atual ocorre parcialmente em todas essas áreas sugeridas no Plano Diretor. Entretanto, como algumas dessas áreas se sobrepõem, os valores de inundações incidentes foram individualizados e apresentados como valores de área total (AT) para cada área especial, com o respectivo quantitativo de inundação em hectares e percentual (QI) (Figura 8): Áreas Adensáveis (AT: 54,040 ha, QI: 1,452 ha – 2,69%); Interesse Social (AT: 10,862 ha, QI: 1,631 ha – 15,02%); Recuperação Ambiental Urbana (AT: 36,629 ha, QI: 5,152 ha – 14,07%); Histórico e Cultural (AT: 32,985 ha, QI: 1,264 ha – 3,83%); Turismo e Lazer (AT: 4,580 ha, QI: 0,413 ha – 9,02%) e; Paisagístico (AT: 2,749 ha, QI: 0,178 ha – 6,48%).

No contexto das áreas especiais, os grupos sociais que são representados pela vulnerabilidade mais elevada são aqueles que residem nas Áreas Especiais de Interesse Social (AEIS), uma vez que compreendem espaços ocupados por favelas, vilas, e loteamentos irregulares, habitabilidade frágil, au-

sente de regularização fundiária, comunidades tradicionais, imóveis degradados e sob riscos (PMAB, 2006). No planejamento atual também se destaca a Área Especial de Recuperação Ambiental Urbana destinada a receber processos de recuperação de áreas degradadas e ainda abrigarem atividades econômicas relevantes para o município de Areia Branca. Entretanto se faz necessário uma reanálise para esta e os outros locais que estão sujeitos ao atual risco de inundação costeira, como sendo este mais um elemento da geodiversidade a ser considerado num processo de revisão legislativa (Silva *et al.*, 2016b).

### 5.3.3 Cenários Futuros de Provável Inundação

A inundação costeira atual se projeta em área de 15,715 ha, afetando lotes e quadras (imóveis) contínuos que somam uma área de 18,674 ha. Esse conjunto representa uma área sujeita ao risco por inundação costeira que totaliza 34,384 ha, correspondente à 16,29% da cidade de Areia Branca (Figura 9).

Dados globais do IPCC (Church *et al.*, 2013) apontam elevações da ordem de 3,2 mm/ano do nível do mar, e as estimativas (baseadas nos *Representative Concentration Pathways* - RCP) para o ano de 2100 vislumbram aumentos médios de 44 a 74 cm considerando um cenário otimista (RCP2.6) e outro pessimista (RCP8.5) de mudanças climáticas. No Brasil, o IBGE (2016) através de sua Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia (RMPG), identificou para os últimos anos uma subida de 2,1 mm/ano na costa do Nordeste do país (entre Fortaleza/CE e Recife/PE), permitindo estimar uma elevação do nível do mar de 17,64 cm até 2100. A partir dessas informações, foram projetadas as possibilidades futuras que as inundações costeiras podem atingir em termos de cota, área e percentual na cidade de Areia Branca (Tabela 4, Figura 10).

Os riscos que a inundação costeira podem afetar são preocupantes, uma vez que aumentos centimétricos de 17,64 cm, 44 cm e 74 cm, significam inundações de 47,82 ha, 64,36 ha, e 83,45 ha (Tabela 4), respectivamente, representando um aumento de 23,25% no pior cenário, mas que podem ser ainda maiores, mas que não puderam ser mensuradas no

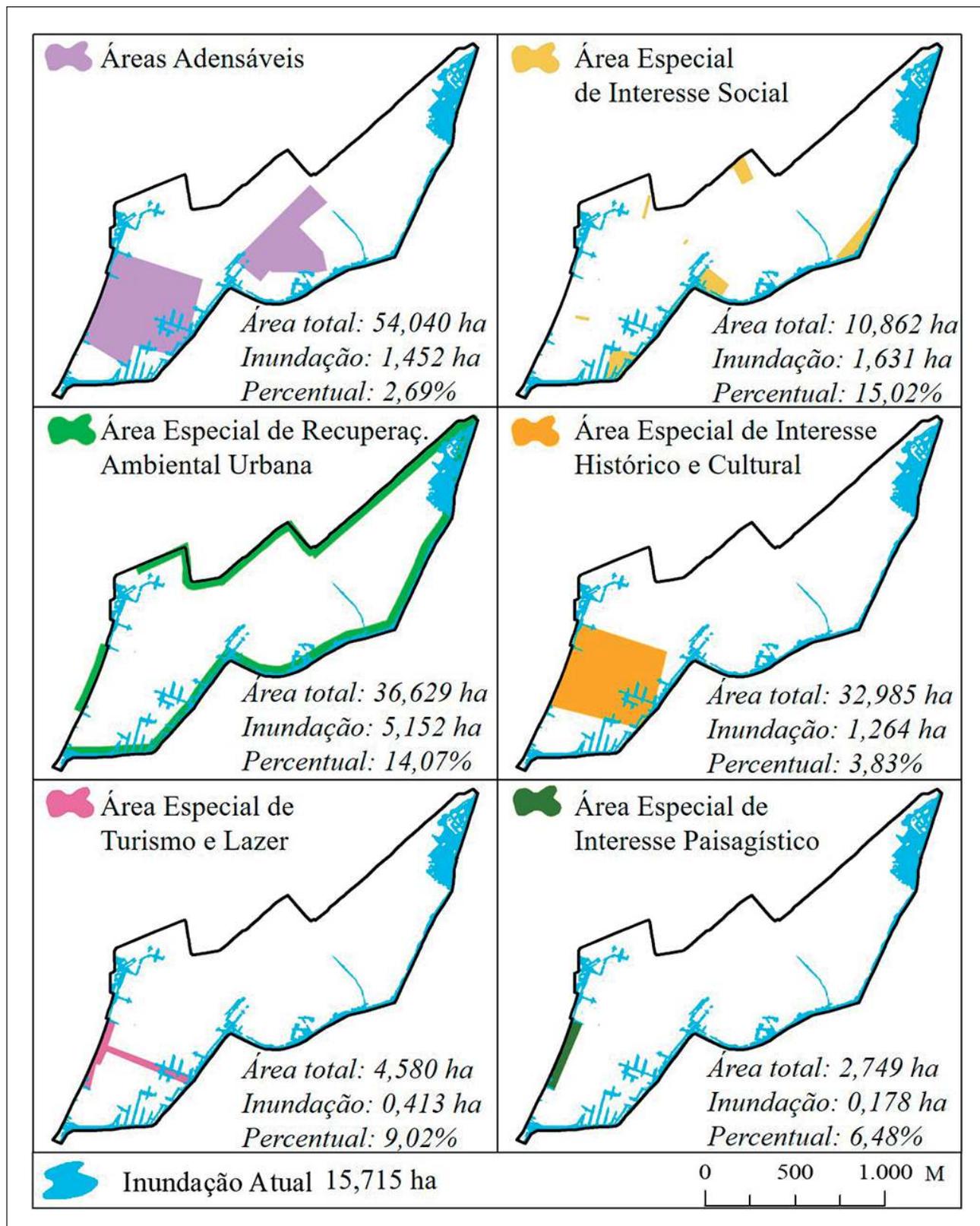


Figura 8 Áreas Especiais definidas no Plano Diretor de Areia Branca e afetadas por inundações.

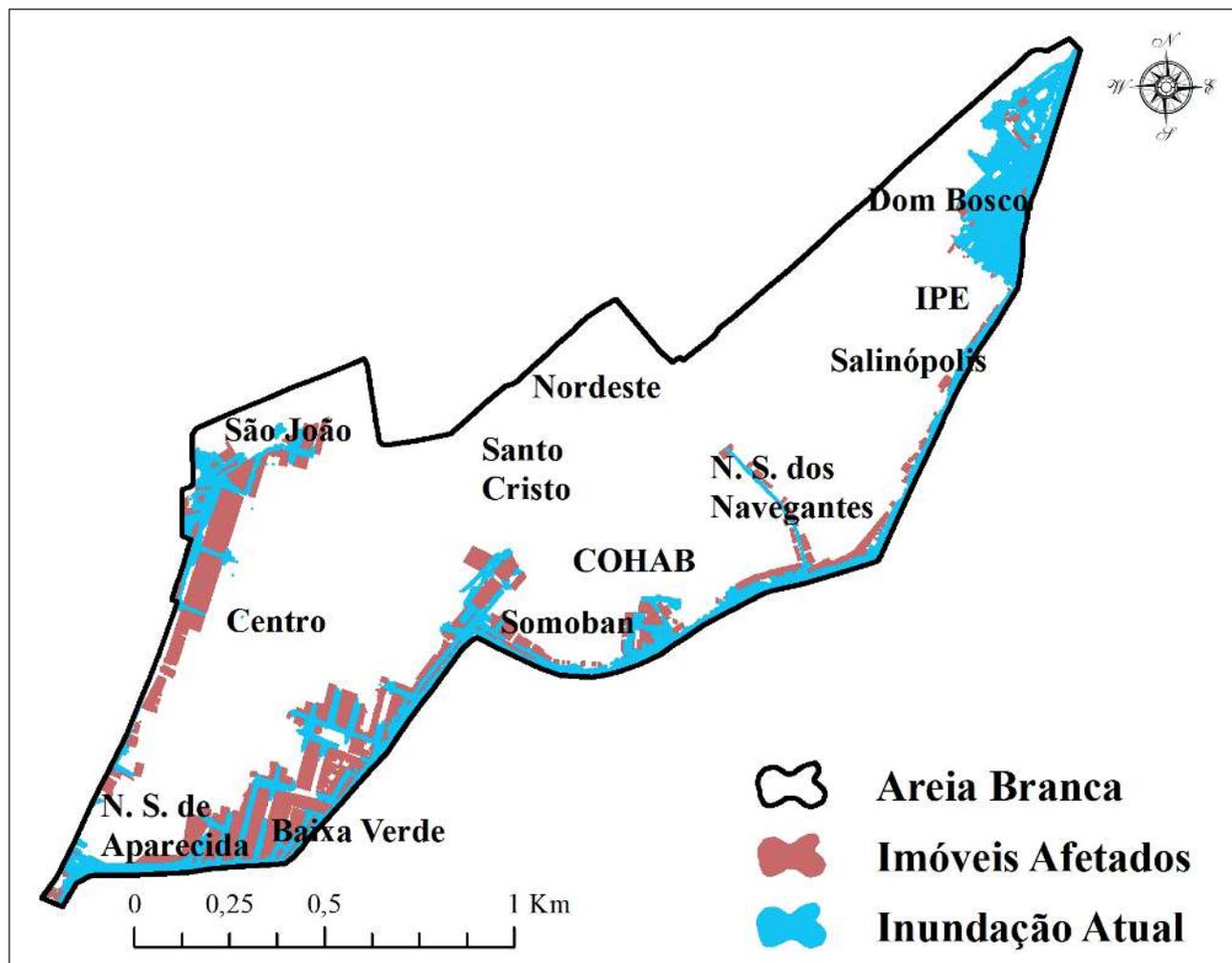


Figura 9 Imóveis, terrenos e ruas atingidos pelo risco da inundação costeira.

Cenários	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Inundação Atual	---	224,40	10	5,2	239,60	34,38	16,29
IBGE (2016)	17,64	224,40	10	5,2	257,24	47,82	22,66
RCP2.6 - IPCC	44	224,40	10	5,2	283,60	64,36	30,49
RCP8.5 - IPCC	74	224,40	10	5,2	313,60	83,45	39,54

(A) Projeção de elevação do NMM até ano de 2100 (cm); (B) MA máxima de sizígia vinculada ao SGB (cm); (C) ENA (cm); (D) RMSE MDS (cm); (E) CI vinculada ao SGB (cm); (F) Áreas de risco por inundação (ha); (G) Percentual de área inundada (%).

Tabela 4 Projeção da cota de inundação frente aos cenários de mudanças climáticas e quantificação da expansão das áreas afetadas em Areia Branca/RN.

modelo gerado neste trabalho em decorrência das interferências eletromagnéticas geradas pelas torres de telecomunicações na região central da cidade, que não permitiram o sobrevoo com o RPA. Para complementar esta área podem ser aplicados outros levan-

tamentos complementares adotando geotecnologias, como por exemplo o caminhamento com GNSS no modo de posicionamento cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic*), cinemático pós-processado ou mesmo mensurações com estação total para manter o padrão centimétrico com custos reduzidos.

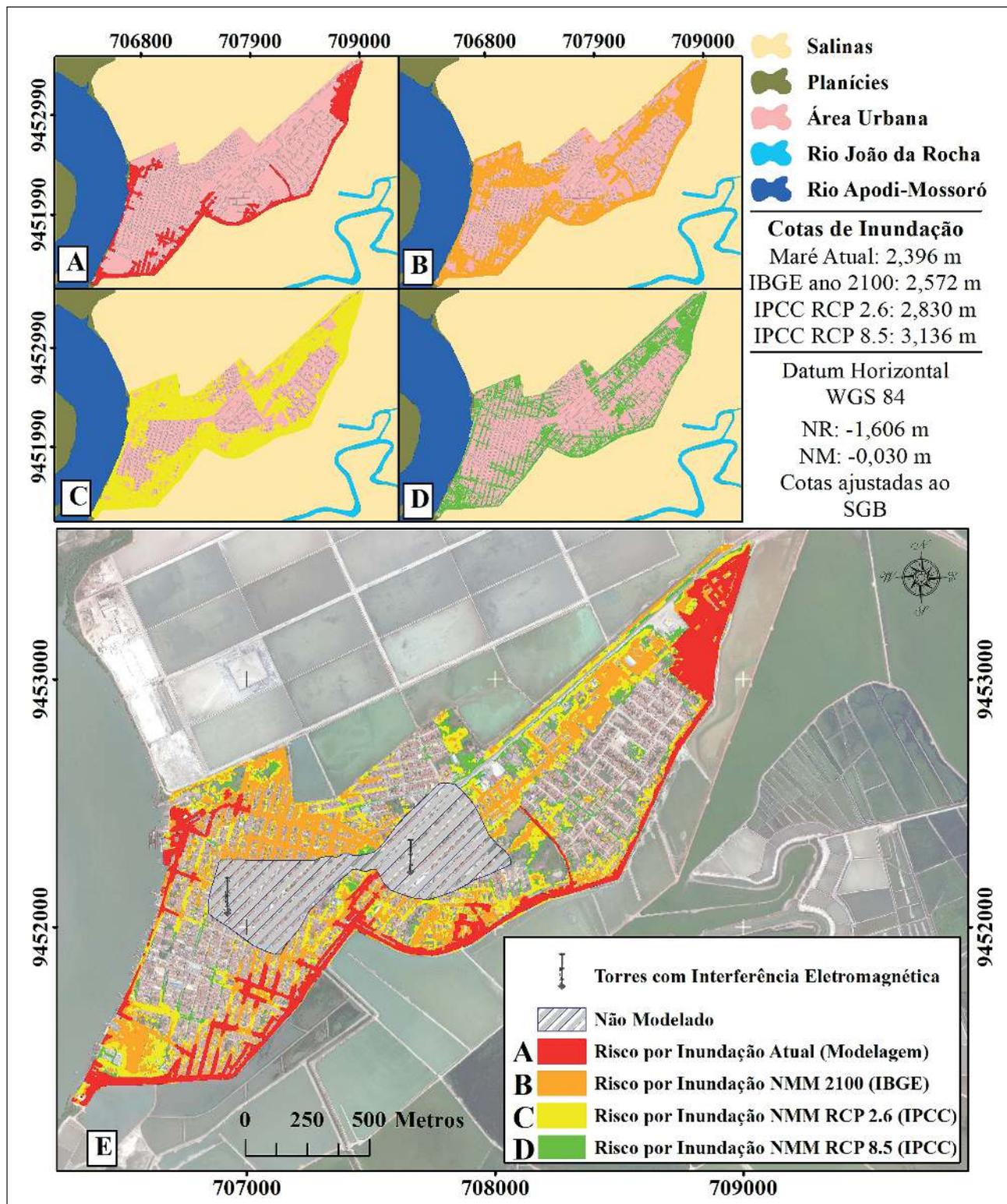


Figura 10 Cenários futuros de inundação costeira em Areia Branca/RN devido às mudanças climáticas. RCP: *Representative Concentration Pathways*.

### 5.3.4 Estimativas de Danos por Inundação Costeira e Referência Financeira para Adaptação

A oferta de mercado para imóveis em Areia Branca durante a realização desta pesquisa foi reduzida, verificando 4 amostras, com suas respectivas áreas e valor de mercado. Como o quantitativo da área de imóveis afetados pela inundação atual foi de 18,674 ha ou 186.742,11 m<sup>2</sup> ( $A_f$ ), e o valor de mercado obtido para a região foi de 105,17 R\$/m<sup>2</sup> ( $V_f$ ), obteve-se um total de R\$ 19.639.667,22 para  $M_e$ .

A profundidade média da inundação verificada na modelagem com o MDS, registrou um valor de 0,5 m para  $h$ . Por fim, foi adotado fator de 0,052 para  $K_d$ , obtendo-se, portanto, um dano total decorrente da inundação costeira ( $C_d$ ) de R\$ 510.631,35. Este total foi elevado para R\$ 597.438,68 ou \$ 147.152,38 (\$ 1 = R\$ 4,06: cotação do dólar no dia 01/09/2018) em decorrência dos danos indiretos calculados, usando o percentual de 17% (Figura 11).

Acredita-se que as mudanças climáticas e consequente elevação do nível do mar (Yi *et al.*, 2015) poderá ocasionar prejuízos maiores e mais frequentes, uma vez que a profundidade da inundação e a

frequência de eventos podem aumentar (Vitousek *et al.*, 2017), por isto deve haver uma antecipação do poder público para políticas de prevenção, análise de impactos e estudos de adaptação e gestão ao risco por inundação costeira.

Como referência financeira inicial para que os gestores possam se preparar para medidas de adaptação no futuro, foi estimado o valor de realocação para toda a área dos imóveis afetados atualmente pela inundação costeira, através da média do Custo Unitário Básico de construção (CUB) atualizado em junho de 2018, estipulado em R\$ 1.316,98. Com base nisso, a estimativa atual atinge os R\$ 245.935.617,87 (\$ 60.575.275,34), que pode ser uma referência, mesmo que subestimada, para se planejar possíveis soluções estruturais de engenharia para reduzir os riscos da inundação costeira em Areia Branca.

## 6 Conclusões

Este estudo contribuiu como subsídio metodológico para o melhor planejamento de cidades costeiras sujeitas ao processo de inundação costeira, através do emprego de geotecnologias de alto desem-

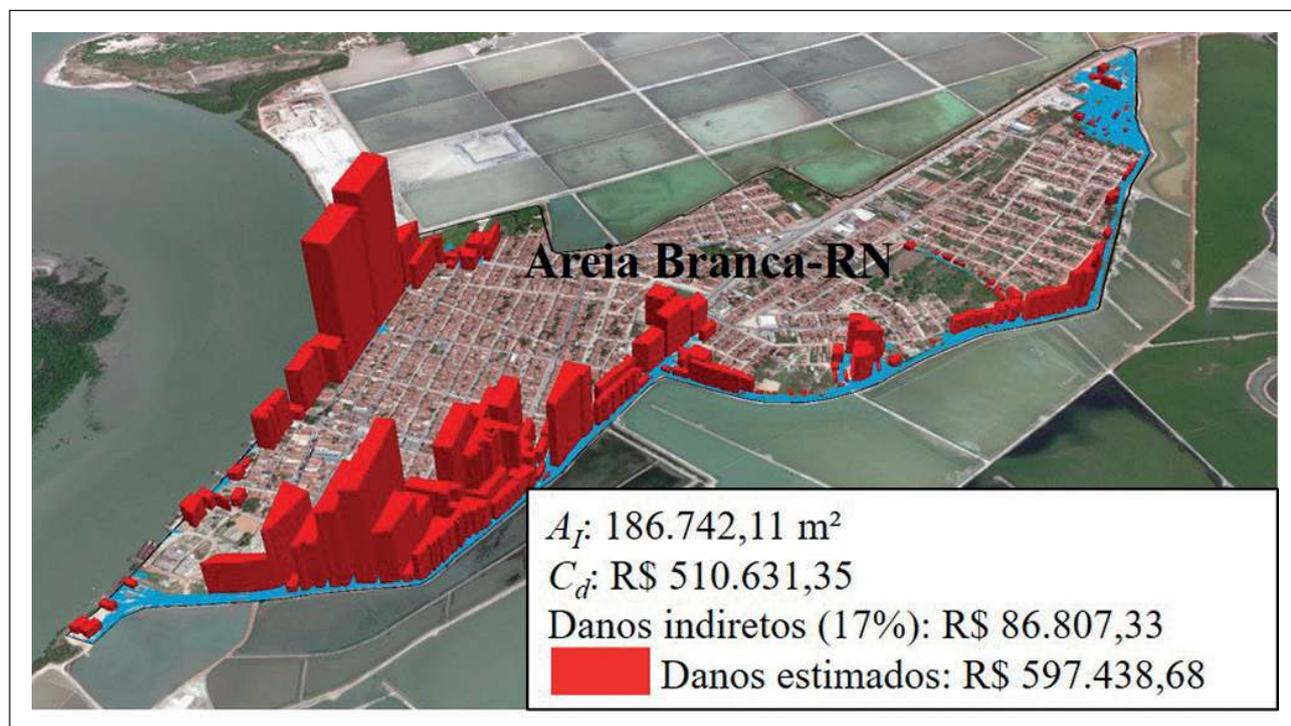


Figura 11 Danos estimados aos imóveis de Areia Branca por eventos de inundação costeira.

penho e baixo custo, em rápida evolução tecnológica e em crescente uso, que permitem modelagens da superfície terrestre com elevada precisão e acurácia (erro vertical inferior à 6 cm). Tais conhecimentos disponibilizados aos gestores das cidades subsidiam a adoção de novas práticas de gestão de riscos e soluções para elevar sua resiliência e reduzir riscos na linha do que estabelece o Marco de Sendai (UNISDR, 2015) promovido pela Organização das Nações Unidas na Estratégia Internacional para Redução de Riscos de Desastres (*International Strategy for Disaster Risk Reduction*).

Análises locais em outras cidades costeiras devem ser estimuladas a partir da vinculação do Nível de Redução da Diretoria de Hidrografia e Navegação ao Sistema Geodésico Brasileiro, para garantir um sistema de referência unívoco dos dados de maré e influência na costa, sendo este tipo de metodologia compatível com as intenções do Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa. Em Areia Branca o Nível de Redução está na cota -1,606 m de altitude do SGB, e o nível de maré que representa a cota de risco de inundação costeira encontra-se na altitude 2,396 m. A inundação oferece riscos em áreas públicas e privadas, afetando classes sociais de baixa renda em sua maioria (menos de dois salários mínimos), verificando-se incipientes tentativas de adaptação. Ao mesmo tempo, o risco de inundação torna-se mais elevado ao considerar cenários de mudanças climáticas, e baixa consciência quanto aos problemas urbanos que agravam a situação da inundação, tal como a obstrução de canais de drenagem com lixo e aterramento de áreas sujeitas a esse perigo. A própria gestão pública municipal necessita revisar seu Plano Diretor que atualmente apresenta áreas especiais que favorecem ao processo de ocupação, mesmo com o oferecimento de risco por inundação costeira e situações sazonais de alagamento.

Cerca de 34,38 ha da cidade de Areia Branca é afetada atualmente com a inundação, representando 16,29% do seu território. A estimativa financeira dos danos ocasionados pela inundação costeira no valor de R\$ 597.438,68 (\$ 147.152,38), tende a elevar com o passar dos anos, em decorrência da evolução dos valores de mercado para os imóveis e considerando também a possibilidade de lâminas d'água mais

profundas por influência das tendências de elevação do nível médio do mar (a inundação resultante das mudanças climáticas pode chegar a 23,25% no pior cenário), bem como da maior ocorrência de inundações que podem se tornar mais frequentes, apesar das probabilidades dos distantes períodos de retorno das marés de sizígia mais elevadas. Pesquisas mais exaustivas quanto aos custos dos riscos por inundação, devem ser incentivados na região, requerendo também a sistematização dos dados pelo Poder Público, uma vez que ainda são limitadas as informações disponíveis nos sistemas oficiais sobre desastres naturais. Adaptação das cidades costeiras requer custos elevados, seja com soluções de engenharia, seja com realocações e abandono de áreas sob riscos. Como estimativa inicial, este trabalho identificou o valor de R\$ 245.935.617,87 (\$ 60.575.275,34) como uma referência sobre futuras tomadas de decisão relativas ao paradigma das mudanças climáticas.

Sugere-se para trabalhos futuros, que seja adotada a nova referência altimétrica oficial do país – Altitude Normal (IBGE, 2018), somente disponibilizada em julho deste ano, após a finalização dos processamentos deste trabalho. Também a possibilidade de novos levantamentos com GPS geodésico para coleta de perfis e pontos de verificação, bem distribuídos para novos testes estatísticos da acurácia dos dados.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de doutorado de L. S. Aguiar, ao Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO/UFRN), ao projeto CRO-NALOG da Rede Cooperativa Norte-Nordeste de Monitoramento Ambiental de Áreas Sob Influência da Indústria Petrolífera (Rede 05 PETROMAR) e a CHM da Marinha do Brasil pela disponibilização dos dados de Maré Astronômica.

## 8 Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2001. *NBR 14653-1: Avaliação de bens – Parte 1: procedimentos gerais*. Rio de Janeiro, 10p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011. *NBR 14653-2: Avaliação de bens – Parte 2: imóveis urbanos*. Rio de Janeiro, 54p.

- Adams, S.; Aich, V.; Albrecht, T.; Baarsch, F.; Boit, A.; Canales Trujillo, N.; Cartsburg, M.; Coumou, D.; Eden, A.; Fader, M.; Hare, B.; Hoff, H.; Jobbins, G.; Jones, L.; Kit, O.; Krummenauer, L.; Langerwisch, F.; Le Masson, V.; Ludi, E.; Marcus, R.; Mengel, M.; Mosello, B.; Möhring, J.; Norton, A.; Otto, I. M.; Perette, M.; Pereznieta, P.; Rammig, A.; Reckien, D.; Reinhardt, J.; Reyer, C.; Robinson, A.; Rocha, M.; Sakschewski, B.; Schaeffer, M.; Schaphoff, S.; Schewe, J.; Schleussner, C.; Serdeczny, O.; Stagl, J.; Thonicke, K.; Waha, K. & World, B. 2014. *Latin America and the Caribbean: 40 Turn down the heat - confronting the new climate normal*. World Bank Group. V2. 275p.
- Aguiar, L.S.; Amaro, V.E. & Araújo, P.V.N. 2018. Meio Século de Código Florestal e Implicações nas Áreas de Preservação Permanente de um Estuário Hipersalino no Semiárido Brasileiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(2): 191-210.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M. & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728.
- Amaro, V.E.; Santos, M.S.T. & Souto, M.V.S. 2012. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro*: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão. Editora Natal, 118p.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. 2017. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial - RBAC-E nº 94*: Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017 (SAR/SPO), 26. <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbac-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00>
- Araújo, P.V.N.; Amaro, V.E.; Alcoforado, A.V.C. & Santos, A.L.S. 2018a. Vertical accuracy and calibration of digital elevation models (DEMs) for the piranhas-assu river Basin, Rio Grande Do Norte, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(1): 351–364.
- Araújo, P.V.N.; Amaro, V.E.; Silva, R.M. & Lopes, A.B. 2019. Delimitation of flood areas based on calibrated a DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaquí, southern Brazil. *Natural Hazards and Earth Sciences*, 19(1): 237-250.
- Armenio, E.; Serio, F. & Mossa, M. 2018. Environmental technologies to safeguard coastal heritage. *Scientific Research and Information Technology*, 8(1): 61–78.
- Banco Mundial. 2012. *Avaliação de Perdas e Danos*: Inundações Bruscas em Alagoas - Junho de 2010. Brasília: Relatório Técnico elaborado com apoio do Governo do Estado de Alagoas, (Agosto), 56.
- Barry, P. & Coakley, R. 2013. Field accuracy test of RPAS Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1(W2)*: 4-6.
- Bilskie, M.V.; Hagen, S.C.; Medeiros, S.C. & Passeri, D.L. 2014. Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 927–934.
- Blitzkow, D.; Matos, A.C.O.C.; Machado, W.C.; Nunes, M.A.; Lengruher, N.V.; Xavier, E. M.L. & Fortes, L.P.S. 2016. Mapgeo2015: O Novo Modelo De Ondulação Geoidal Do Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(10): 1873–1884.
- Boori, M.S.; Amaro, V.E. & Vital, H. 2010. Coastal ecological sensitivity and risk assessment: A case study of sea level change in Apodi river (Atlantic Ocean), Northeast Brazil. *International Journal of Environmental and Earth Sciences*, 71(1): 866–875.
- Boori, M.S.; Amaro, V.E. & Targino. 2012. A Coastal risk assessment and adaptation of the impact of sea-level rise, climate change and hazards: A RS and GIS based approach in Apodi-Mossoró estuary, Northeast Brazil. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(3): 815-832.
- Busman, D.V.; Amaro, V.E. & Souza-Filho, P.W.M. 2017. Métodos de vulnerabilidade social – subsídios à adaptação às mudanças climáticas em municípios costeiros. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(4): 659–674.
- Cândido, A.K.A.A.; Silva, N.M. & Paranhos Filho, A.C. 2015. Imagens de alta resolução espacial de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo. *Anuário do Instituto de Geociências*, 38(1): 147–156.
- Canholi, A.P. 2014. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 380p.
- Cazenave, A.; Dieng, H.B.; Meyssignac, B.; Von Schuckmann, K.; Decharme, B. & Berthier, E. 2014. The rate of sea-level rise. *Nature Climate Change*, 4(5): 358–361.
- CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. 2018. *Custo Unitário Básico: indicador dos custos do setor da construção civil*. Disponível em: <<http://www.cub.org.br/cub-m2-estadual/>>. Acesso em: Ago./2018.
- CHM – Centro de Hidrografia da Marinha. *Marinha do Brasil*. 2018a. Sondagem batimétrica. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>>. Acesso em: mar./2018.
- CHM – Centro de Hidrografia da Marinha. *Marinha do Brasil*. 2018b. Maregrafia e fluviometria. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/maregrafia-e-fluviometria>>. Acesso em: mar./2018.
- Church, J.A.; Clark, P.U.; Cazenave, A.; Gregory, J.M.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.A.; Milne, G.A.; Nerem, R.S.; Nunn, P.D.; Payne, A.J.; Pfeffer, W.T.; Stammer, D. & Unnikrishnan, A.S. 2013. *Sea Level Change*. In: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. & Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cian, F.; Marconcini, M.; Ceccato, P. & Giupponi, C. 2018. Flood depth estimation by means of high-resolution SAR images and LiDAR data. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (June): 1–25.
- Colomina, I. & Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92(1): 79–97.
- Cooper, H.M.; Fletcher, C.H.; Chen, Q. & Barbee, M.M. 2013. Sea-level rise vulnerability mapping for adaptation decisions using LiDAR DEMs. *Progress in Physical Geography*, 37(6): 745–766.
- Costa, D.F.S.; Silva, A.A.; Medeiros, D.H.M.; Lucena Filho, M.A.; Rocha, R.M.; Lillebo, A.I. & Soares, A.M.V.M. 2013. Breve revisão sobre a evolução histórica da atividade salineira no estado do Rio Grande do Norte (Brasil). *Revista Sociedade & Natureza*, 25(1): 21-34.
- DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. 2016. *Portaria DECEA nº 282/DGCEA, de 22 de dezembro de*

- 2016 - ICA 100-40: Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica. 55p.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Centro de Hidrografia da Marinha. Marinha do Brasil. 2010. *Descrição de estação maregráfica*: estação Areia Branca-Continentente (30112). Carta nº 720 – de Areia Branca a Macau.
- Diniz, M.T.M. & Pereira, V.H.C. 2015. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3): 488-506.
- EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. 2017. *Meteorologia*. Disponível em: < <http://www.emparn.rn.gov.br/>>. Acesso em: dez./2017.
- Felipe-García, B.; Hernández-López, D. & Lerma, J.L. 2012. Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys. *Appl Geomat*, 4(2012): 231-244.
- Feng, Q., Liu, J.; Gong, J. 2015. Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier-A case of Yuyao, China. *Water (Switzerland)* 7(4): 1437-1455.
- Ferreira, A.T.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 66(1): 167-184.
- Frota, F. F.; Truccolo, E.C. & Schettini, C.A.F. 2016. Tidal and sub-tidal sea level variability at the northern shelf of the Brazilian Northeast Region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(3): 1371-1386.
- Gonçalves, J.A.; Henriques, R. 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104(2018), 101-111.
- González-Jorge, H.; Puente, I.; Roca, D.; Martínez-Sánchez, J.; Conde, B. & Arias, P. 2014. UAV Photogrammetry Application to the Monitoring of Rubble Mound Breakwaters. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(1): 1-8.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Coordenação de Geodésia. 2018. *Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais REALT-2018*. Rio de Janeiro. 47p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016. *Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015*. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia, Rio de Janeiro, 61.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. 2011. *Características da população e dos domicílios: resultados do universo*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. 2015. *O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil: MAPGEO 2015*. Rio de Janeiro: Coordenação de Geodésia CGED/IBGE. 17p.
- IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. 2008. *Perfil do seu município*: Areia Branca. v. 10, p. 1-22; Natal-RN.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. 2018. *Normal Climatológica do Brasil 1981-2010*: Intensidade e direção predominante do vento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: mai./2018.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: *Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Farahani, E.; Kadner, S.; Seyboth, K.; Adler, A.; Baum, I.; Brunner, S.; Eickemeier, P.; Kriemann, B.; Savolainen, J.; Schlömer, S.; Von Stechow, C.; Zwickel, T. & Minx, J.C. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- James, D.L. & Lee, R.R. 1971. *Economics of water resources planning*. Nova York: McGraw-Hill. 615p.
- Jonov, C.M.P.; Nascimento, N.O. & Silva, A.P. 2013. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação. *Ambiente Construído*, 13(3): 75-94.
- Machado, M.L.; Nascimento, N.; Baptista, M.; Gonçalves, M.; Silva, A.; Lima, J.C.; Dias, R.; Silva, A.; Machado, E. & Fernandes, W. 2005. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. *REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina*, 2(1): 35-52.
- Mancini, F.; Dubbini, M.; Gattelli, M.; Fabbri, S. & Gabbianelli, G. 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5(1), 6880-6898.
- Marengo, J.A.; Nunes, L.H.; Souza, C.R.G.; Harari, J.; Muller-Karger, F. & Greco, R. 2017. A globally deployable strategy for co-development of adaptation preferences to sea-level rise: the public participation case of Santos, Brazil. *Natural Hazards*, 88(1): 39-53.
- Matos, A.C.O.C. 2005. *Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 355f.
- McCuen, R.H. 1998. *Hydrologic Analysis and Design*, 2nd Ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- McGranahan, G.; Balk, D. & Anderson, B. 2007. The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1):17-37.
- Medeiros, W.D.A.; Cunha, L. & Almeida, A.C. 2012. Riscos ambientais e percepção no litoral: estudo comparativo Brasil-Portugal. *Revista Geonorte (Edição Especial)*, 1(4): 985-997.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental. Departamento de Gestão Ambiental Territorial. 2018. *PRÓCOSTA*: Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa. (MMA, Org.). Brasília, DF. <http://www.mma.gov.br/publicacoes/gestao-territorial/category/198-gestao-costeira-procosta>. 35p.
- Monico, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora UNESP. 476 p.
- Monico, J.F.G.; Dal Póz, A.P.; Galo, M.; Santos, M.C. & Oliveira, L.C. 2009. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(3): 469-483.
- Nicholls, R. & Cazenave, A. 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* 328(5985): 1517-1520.
- Park, S.Y. & Bera, A.K. 2009. Maximum entropy autoregressive conditional heteroskedasticity model. *Journal of Econometrics*, 150(2): 219-230.

- Pezzoli, A. & Alfredini, P. 2013. Impacts of Climate Changes on Management Policy of the Harbors, Land Areas and Wetlands in the Sao Paulo State Coastline (Brazil). *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 01(02): 1–7.
- PMAB – Prefeitura Municipal de Areia Branca. 2006. *Lei Municipal Complementar nº 1.037, de 25 de outubro de 2006*. Dispõe sobre o Plano Diretor do Município de Areia Branca e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.camaradeareiabranca.com.br/upload/2017/05/16/2-plano-diretor-de-areia-branca-7-lei-1037-2006-591b227675aa8.pdf>>. Acesso em: nov./2017.
- PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2016. *Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. [Marengo, J.A. & Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.
- RADAMBRASIL. 1981. *Levantamento de Recursos Naturais Geologia/Geomorfologia/ Pedologia/Vegetação/Uso Potencial da Terra*. Rio de Janeiro/RJ: Ministério das Minas e Energia, v. 23 – Folhas SB. 24/25 – Jaguaribe/Natal, 740p.
- Rao, K.H.V.D.; Rao, V.V.; Dadhwal, V.K.; Behera, G. & Sharma, J.R. 2011. A distributed model for real-time flood forecasting in the Godavari Basin using space inputs. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2(3): 31–40.
- Ramos, A.M. & Krueger, C.P. 2009. Aplicação de reduções batimétricas GPS em levantamentos hidrográficos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(4): 615–635.
- Rasmussen, D.J.; Bittermann, K.; Buchanan, M.K.; Kulp, S.; Strauss, B.H.; Kopp, R.E. & Oppenheimer, M. 2018. Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature stabilization targets in the 21st and 22nd centuries. *Environmental Research Letters*, 13(1): 1–12.
- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M. & Sarazzi, D. 2011. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling - Current Status and Future Perspectives - *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(1/C22): 25–31.
- Rosa, C.N.; Piccilli, D.G.A.; Tassi, R.; Favaretto, J.R. & Limberger, M.F. 2018. Utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados em Projetos de Drenagem. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 41(1): 308–317.
- Rosa, R. 2005. Geotecnologias na Geografia aplicada. *Revista do Departamento de Geografia*, 16(1): 81–90.
- Rusnák, M.; Sládek, J.; Kidová, A.; & Lehotský, M. 2018. Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology. *Measurement*, 115(1): 139–151.
- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. 2011. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 17(4): 571–585.
- Santos, M.S.T.; Amaro, V.E.; da Silva Ferreira, A.T. & dos Santos, A.L.S. 2013. Altimetria GNSS de precisão aplicada ao monitoramento da dinâmica sedimentar costeira de curta duração em escala regional. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19(4): 624–638.
- Satishkumar, B.; Muralikrishnan, S.; Narendran, J.; Raghu Venkataraman, V. & Dadhwal, V. K. 2013. Bias-corrected geoid for the generation of high-resolution digital terrain model. *Current Science*, 104(7): 940–943.
- Schröter, K.; Lüdtkke, S.; Redweik, R.; Meier, J.; Bochow, M. & Ross, L. 2018. Flood loss estimation using 3D city models and remote sensing data. *Environmental Modelling and Software*, 105(1): 118–131.
- Silva, C.A.; Duarte, C.R., Souto, M.V.S., Santos, A.L.S. DOS, Amaro, V.E., Bicho, C.P. & Sabadia, J.A.B. 2016a. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS E LiDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22(1), 73–94.
- Silva, M.T.; Grigio, A.M.; Paranhos Filho, A.C. & Souza Neto, L.T. 2016b. A geodiversidade como subsídio à revisão de planos diretores. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(6): 1725–1736.
- Singh, P.; Sinha, V.S.P.; Vijhani, A. & Pahuja, N. 2018. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28(1): 237–250.
- Sousa, H.L. 2017. Sensoriamento Remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações. *Revista Brasileira de Geomática*, 5(3): 326–342.
- Sweet, W.; Park, J.; Marra, J.; Zervas, C. & Gill, S. 2014. *Sea Level Rise and Nuisance Flood Frequency Changes around the United States*. NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Technical Report NOS CO-OPS 073, (June): 58.
- Tsai, C.H. & Lin, Y.C. 2017. An accelerated image matching technique for UAV orthoimage registration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128(1): 130–145.
- Tucci, C.E.M. 1997. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH. 943p.
- Tziavou, O.; Pytharoulis, S. & Souter, J. 2018. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Engineering Geology* 232(2018): 12–21.
- UNISDR. 2015. *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres: 2015-2030*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres – United Nations. 40p.
- Uysal, M., Toprak, A.S. & Polat, N. 2015. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler Hill. *Measurement*, 73(1), 539–543.
- Vitousek, S.; Barnard, P.L.; Fletcher, C.H.; Frazer, N.; Erikson, L. & Storlazzi, C.D. 2017. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7(1): 1–9.
- Vousdoukas, M.I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Verlaan, M.; Jevrejeva, S.; Jackson, L.P. & Feyen, L. 2018a. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1): 1–12.
- Vousdoukas, M.I.; Bouziotas, D.; Giardino, A.; Bouwer, L.M.; Mentaschi, L. & Feyen, L. 2018b. Understanding epistemic uncertainty in large-scale coastal flood risk assessment for present and future climates. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 18(2018): 1–27.
- Yastikli, N.; Bagci, I. & Beser, C. 2013. The processing of image data collected by light UAV systems for GIS data capture and updating. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(7W2): 267–270.
- Yi, S.; Sun, W.; Heki, K. & Qian, A. 2015. An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010. *Geophysical Research Letters*, 42(10): 3998–4006.