

SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÃO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA COSTEIRA

Vera Raquel Mesquita Costa ^(a), Naíla de Araújo Arraes ^(b), Kathery de Sousa Silva ^(c), Camila Everton Guterres ^(d), Gilvanele Oliveira da Silva Silva ^(e), Denilson da Silva Bezerra ^(f)

^(a) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (veraraquelmc@gmail.com)

^(b) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (nailaarraes@click21.com)

^(c) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (katherysousa@gmail.com)

^(d) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (camilaevertton33@gmail.com)

^(e) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (gilvanele@hotmail.com)

^(f) Laboratório de Geotecnologias/Universidade Ceuma, (denilson_ca@yahoo.com.br)

Eixo: Geotecnologias e modelagem aplicada aos estudos ambientais

Resumo

O Brasil possui a maior área contínua de manguezal do planeta, localizada na área da Amazônia legal, contudo são poucos os estudos brasileiros direcionados a modelagem computacional da resposta do manguezal às mudanças climáticas. Este artigo propõe uma abordagem metodológica para simular os impactos da elevação do mar neste ecossistema, usando modelagem espacialmente explícita baseada em autômatos celulares. A simulação considera 88 passos de elevação de 0.011 a 0,97 m, para o intervalo de tempo de 2012 a 2100, em uma bacia hidrográfica urbana localizada na Ilha do Maranhão, que contém extensa área de manguezal, além de ser densamente urbanizada. Os resultados são apresentados no contexto de alterações nas áreas de manguezal (aumento e redução). As regiões mais vulneráveis da área de estudo correspondem àquelas localizadas na margem esquerda da bacia hidrográfica estudada, na qual compreende a parte mais antropizada.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, zonas costeiras, autômatos celulares.

Abstract

Brazil has the largest mangroves area continues of the planet, located in the area of Legal Amazonia, but few brazilian studies addressing the computational modeling of mangrove response to climate change. This article proposes a methodological approach to simulate the impacts of sea-level rise on mangrove ecosystem, using spatially explicit modeling based on cellular automata. The simulation considers 88 elevation steps from 0.011 to 0.97 m, for the time interval 2012 to 2100, in an urban hydrographic basin located in Maranhão Island, that contains extensive mangroves area as well as being densely urbanized. The results are presented in the context of changes in mangrove areas (increasing and decreasing). The most vulnerable regions of the study area correspond to the areas located at the left margin of the studied hydrographic basin which comprises the most entropized part.

Keywords: Climate change, coastal zone, cellular automata.

1. INTRODUÇÃO

Um efeito característico das mudanças climáticas na zona costeira é o fenômeno de elevação média global do mar. Este processo é irreversível por pelo menos 1.000 anos como resultado da expansão térmica dos oceanos, mesmo que as atuais taxas de emissões de dióxido de carbono (CO₂) fossem cessadas (SOLOMON et al., 2009).

A elevação do NMRM (Nível Médio Relativo do Mar) no século XX variou de 0,12 m a 0,22 m e esta elevação poderá oscilar de 0,26 m a 0,59 m até a última década do século XXI. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-AR5) previu um cenário ainda mais alarmante para o final do século XXI, onde a elevação do NMRM pode chegar a 0,97 m (IPCC, 2013).

O estudo da variação do NMRM tem grande importância para as populações e Estados situados em regiões costeiras, pois viabiliza a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos processos costeiros, como a sedimentação e a erosão, que poderão trazer danos irreversíveis para as populações ribeirinhas e para os ecossistemas costeiros (NEVES, 2005; REIS, 2004).

As formas de uso e ocupação do solo de origem antrópica podem atuar como elemento maximizador dos impactos negativos da elevação do NMRN para o manguezal, pois a ocupação humana tende a inviabilizar a colonização de novas áreas, mesmo quando ocorrem condições propícias à colonização do manguezal em áreas adjacentes, como deslocamento da área de influência das marés, ocorrência de processos de progradação vertical e horizontal de sedimento (MCLEOD E SALM, 2006; LOVELOCK E ELLISON, 2007).

O Brasil é o segundo país em área total de florestas de manguezais e também, detém a maior área contínua de manguezal do mundo que é localizada no litoral da Amazônia legal, entre a cidade de Belém/PA e São Luís/MA (WILSON *et al.*, 2013).

Entender o padrão de resistência do ecossistema manguezal aos potenciais impactos das mudanças climáticas para articulação de medidas de conservação/preservação, adaptação e/ou mitigação é um grande desafio.

O uso de modelagem computacional constitui uma ferramenta útil para entendimento antecipado das consequências da elevação do nível do mar em escala local e regional, pois os experimentos de modelagem podem ser entendidos como um laboratório virtual, onde é possível simular os potenciais impactos, antes que os mesmos se manifestem. Isto se torna significativamente útil principalmente em áreas de difícil acesso e/ou com pouca produção científica (BERGER *et al.*, 2008).

O objetivo geral da presente pesquisa é simular o padrão de resposta e determinar a capacidade de resistência do ecossistema manguezal à elevação do nível do mar e as

consequências desta elevação nas áreas urbanizadas em uma bacia hidrográfica costeira situada no ambiente urbano da região metropolitana da grande São Luís/MA.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica Rio Anil (BHRA) está localizada no quadrante NW da Ilha do Maranhão, encontra-se entre as coordenadas 02°29" S, 44°12" W e 02°34" S, 44°18" W limitando-se com a bacia Litorânea ao Norte; com a bacia do Rio Bacanga ao Sul; com a bacia do Rio Paciência a Leste e com a Baía de São Marcos, a Oeste (Figura 1).

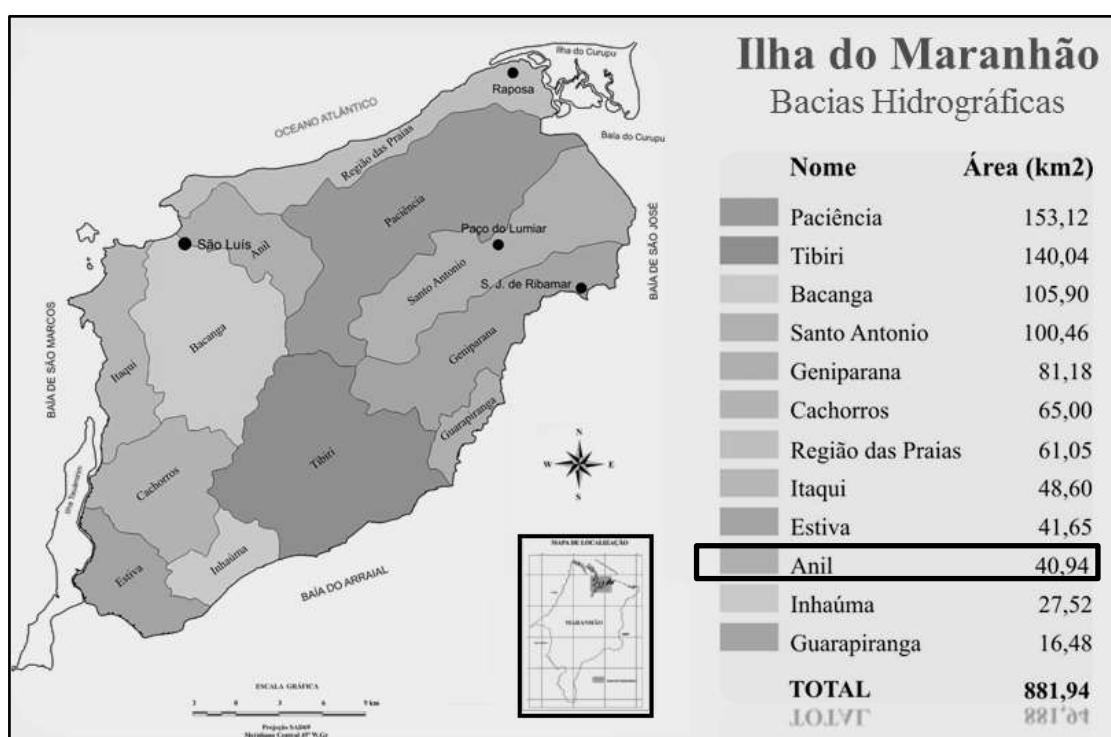


Figura 1. Bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão, com destaque para a Bacia Hidrográfica do Rio Anil.

Fonte: UEMA (2012).

A BHRA possui uma área total aproximada de 41 Km² e o rio Anil uma extensão de aproximadamente 13,8 Km concentrando a maior área urbanizada relativa da ilha, além de ser a bacia hidrográfica mais densamente urbanizada da capital maranhense (ROSS, 1994).

A posição geográfica da Ilha do Maranhão, aliada aos embaiamentos costeiros e grande extensão da Plataforma Continental do Pará/Maranhão proporcionam o desenvolvimento de um ambiente de alta energia, dominado por macromarés, semidiurna com amplitudes variando de 4 a 6 m (DHN, 1995).

Segundo a classificação climática de Koppen, o clima da área de estudo é do tipo AW, tropical com inverno seco, apresentando estação chuvosa no verão (novembro – abril) e inverno seco (maio – julho) (GOLFARI *et al.*, 1978). A precipitação pluviométrica média anual é da ordem de 1.900 mm, sendo que o período chuvoso se estende de janeiro a junho. As temperaturas médias variam entre 26°C e 27°C, e seu regime hidrológico é fortemente influenciado pelo ciclo de marés em cerca de 2/3 da extensão de seu curso, característica comum dos rios da Ilha do Maranhão (ALMEIDA, 1995).

2.2. Modelo Conceitual

O padrão de resposta do manguezal à dinâmica de elevação do NMRM depende de fatores como a topografia, área de influência das marés (AIM), cobertura do solo em áreas adjacentes, classes de solos presentes, dinâmica costeira e a taxa média de aumento do NMRM em um determinado local (MCLEOD E SALM, 2006; LOVELOCK E ELLISON, 2007; ALONGI, 2008), assim como, das respostas humanas às mudanças climáticas na zona costeira, como, por exemplo, a construção de diques (GILMAN *et al.*, 2008).

Para simular os impactos da elevação do NMRM no manguezal da BHRA, na presente pesquisa é utilizado o modelo BR-MANGUE que foi desenvolvido por Bezerra (2014) para simular o padrão de resposta do ecossistema manguezal às mudanças climáticas na zona costeira. O BR-MANGUE estratifica os aspectos relevantes para o padrão de resposta do manguezal em quatro componentes (Figura 2): elevação do nível médio relativo do mar (NMRM), formas de uso e ocupação do solo, restrições ambientais e dinâmica do manguezal.



Figura 2. Esquema geral do modelo conceitual BR-MANGUE.

Fonte: autoria própria (2018)

No BR-MANGUE é considerado que o aumento do nível do mar deve atingir as diferentes classes de cobertura do solo em um espaço geográfico. A cada classe de cobertura

do solo tem-se associado um potencial de migração ou de barreira para o manguezal, a partir das condições ambientais e oceanográficas presentes. Condições geofísicas das marés e da coluna d'água, e o mosaico de cobertura do solo condicionam alterações na estrutura ecossistêmica do manguezal como: aumento da coluna de água, o deslocamento da área sobre influência das marés, inundação/erosão do manguezal e eventos de migração do manguezal em direção ao continente e/ou em direção ao canal do rio, conforme literatura científica (SCAVIA et al., 2002; ALONGI, 2008; GILMAN et al., 2008; SOUZA-FILHO, 2005).

Este modelo conceitual permite a adição futura de outros componentes relevantes para a dinâmica ecossistêmica do manguezal, do solo exposto e área antropizada da Bacia do rio Anil, que não foram considerados nesta abordagem, como por exemplo, a hidrologia continental, variações climáticas (precipitação) ou circulação oceânica. Os componentes propostos são ainda passíveis de complexificação, a partir de pressupostos teóricos subjacentes. Cada componente deste modelo conceitual proposto corresponde a um módulo computacional que implementa os respectivos pressupostos teóricos.

2.3. Plataforma de Modelagem

O modelo conceitual foi materializado em um experimento computacional usando a plataforma de modelagem espacialmente explícita integrada com bases de dados geoespaciais TerraME (<http://www.terrame.org>), desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O TerraME é um ambiente para modelagem dinâmica espacial com suporte para modelos baseados em autômatos celulares e agentes, com base integrada em um ambiente 2D denominada de espaço celular (CARNEIRO et al., 2013).

O código do modelo conceitual implementado utiliza a linguagem de programação Lua que é uma linguagem livre de código aberto, relativamente simples, porém robusta e com suporte para outras linguagens computacionais¹.

O procedimento de implementação utilizou o modelo computacional de autômatos celulares, isto é, um modelo baseado em um sistema lógico que tem o conceito de célula como unidade fundamental. Cada célula tem um sistema de vizinhança com as demais células do espaço celular, um estado discreto e atributos que podem variar durante a simulação de acordo com as regras de transição do modelo (WOLFRAM, 1983).

¹ Para mais detalhes acessar o site: <http://www.lua.org/>.

2.4. Base de dados

O banco de dados contendo as informações de entrada para o procedimento de modelagem e o espaço celular utilizado para desenvolvimento e aplicação do modelo foram criados em um sistema de informações geográficas desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), denominado TerraView 4.2.0 (INPE, 2011).

Os dados básicos utilizados para a modelagem foram os Planos de Informação contendo o mapeamento de uso e cobertura do solo da BHRA para o ano de 2012 realizado pelo Laboratório de Geotecnologias da Universidade Ceuma (LGUC). Os dados obtidos foram: áreas antropizadas, vegetação de terra firme, manguezal, solos exposto e água. O espaço celular criado contém 50.496 células de 900 m² de área (30 x 30 m), interiores ao perímetro da área de estudo. Como um sistema baseado em autômatos celulares, inicialmente cada célula tem um estado que a caracteriza e um conjunto de atributos. Os estados das células correspondem aos dados obtidos pelo mapeamento do LGUC, e os atributos de todas as células corresponde às classes de solos presentes e a altimetria da BHRA, obtidos respectivamente, pelo Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão e pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil² (TOPODATA), do INPE.

3. RESULTADOS

O BR-MANGUE foi projetado para simular o padrão da área de manguezal em relação a eventos de elevação do nível do mar em 3 (três) categorias (Figura 3): área total, área migrada e área perdida, segue breve detalhamento das categorias de áreas simuladas:

Área total - corresponde à área de manguezal que resiste ao processo de elevação do mar, acrescida de novas áreas de manguezais que surgem com o deslocamento da AIM;

Área migrada – corresponde a novas áreas de manguezal que ocorrem quando há elevação do NMRM no ambiente de modelagem, que provoca o deslocamento da AIM; e assim, podendo haver condições ambientais propícias a colonização de manguezal em áreas adjacentes;

Área de perda – Corresponde a áreas de manguezal que foram suprimidas pelo processo de elevação do NMRM durante o procedimento de modelagem.

² Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

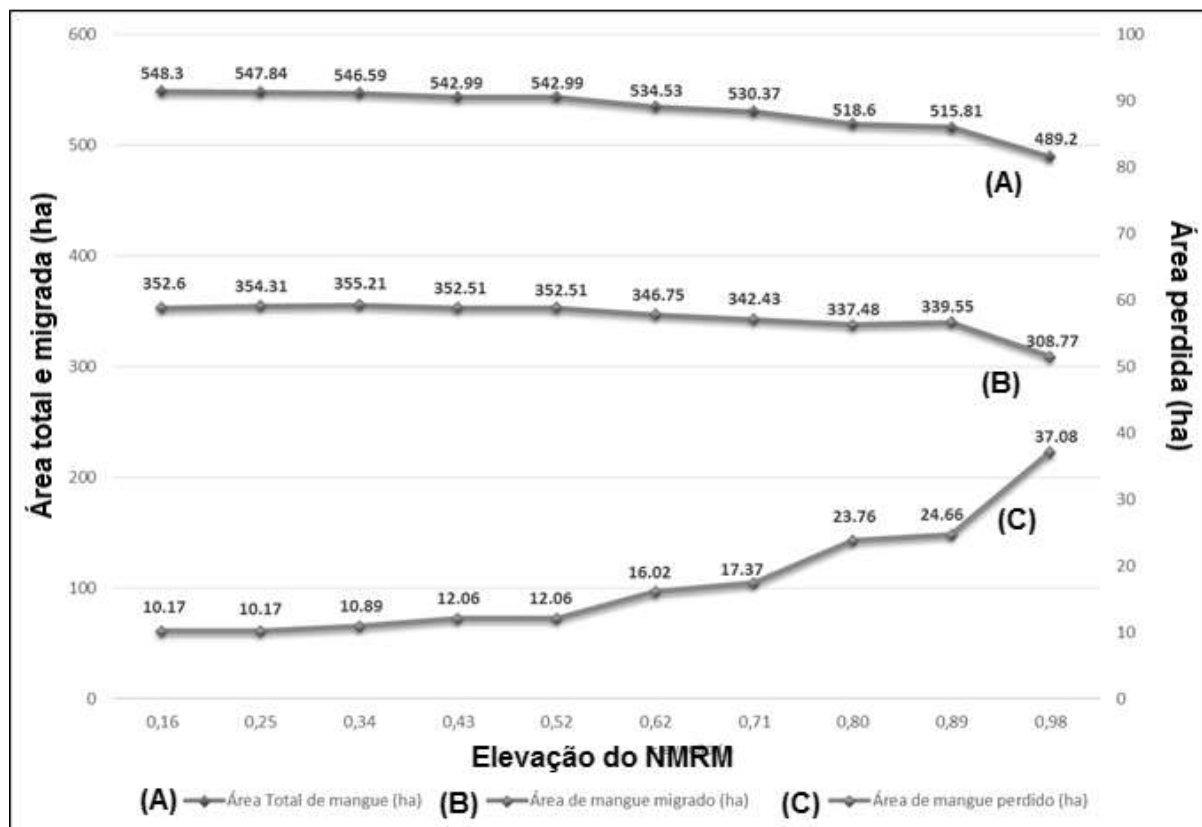


Figura 3. Área total de manguezal (ha), Área de mangue migrado (ha) e Área de mangue perdido (ha), de acordo com cada ciclo de elevação do Nível do Mar (m) adotado no presente estudo de simulação para a Bacia do Rio Anil, São Luís – MA.

Na Figura 3 é possível verificar que para valores de elevação do NMRM entre 0,16 m e 0,71 m houve um declínio constante que representou uma redução de 17,83 ha de área total do manguezal. No entanto, entre 0,71 m a 0,98 m ocorreu uma perda mais significativa de 41,17 ha. Em relação à área de mangue migrado pode-se observar que entre a elevação 0,16 m a 0,34 m houve um pequeno acréscimo de 2,61 ha, porém após o NMRM de 0,34 m houve um decréscimo constante até a elevação de 0,80 m que representou uma perda de 17,73 ha. Sendo que, logo após o decréscimo observado, houve um leve acréscimo de área de 2,07 ha para valores de elevação entre 0,80 m a 0,89 m e em seguida, um decréscimo acentuado de 30,78 ha entre a elevação 0,89 m e a 0,98 m.

Para a área de mangue perdida foi identificado que entre a elevação do NMRM 0,16 m a 0,52 m, houve um acréscimo constante que representou 1,89 ha, sendo que após a elevação de 0,52 m houve um acréscimo acentuado que representou 25,02 ha até o final do exercício de simulação.

Os valores de aumento e declínio para a área de manguezal na bacia foco da presente pesquisa, e as oscilações do aumento ou da redução de áreas de manguezal para certos

intervalos de elevação do mar podem ser explicados pela presença de barreiras e/ou de áreas com condições propícias à formação de novos bosques de mangues no decorrer do processo de simulação.

Os resultados do exercício de modelagem ainda evidenciaram que o manguezal migrou para áreas sob pouca influência dos usos antrópicos, na margem direita da BHRA (Figura 4 (a) e (b)).

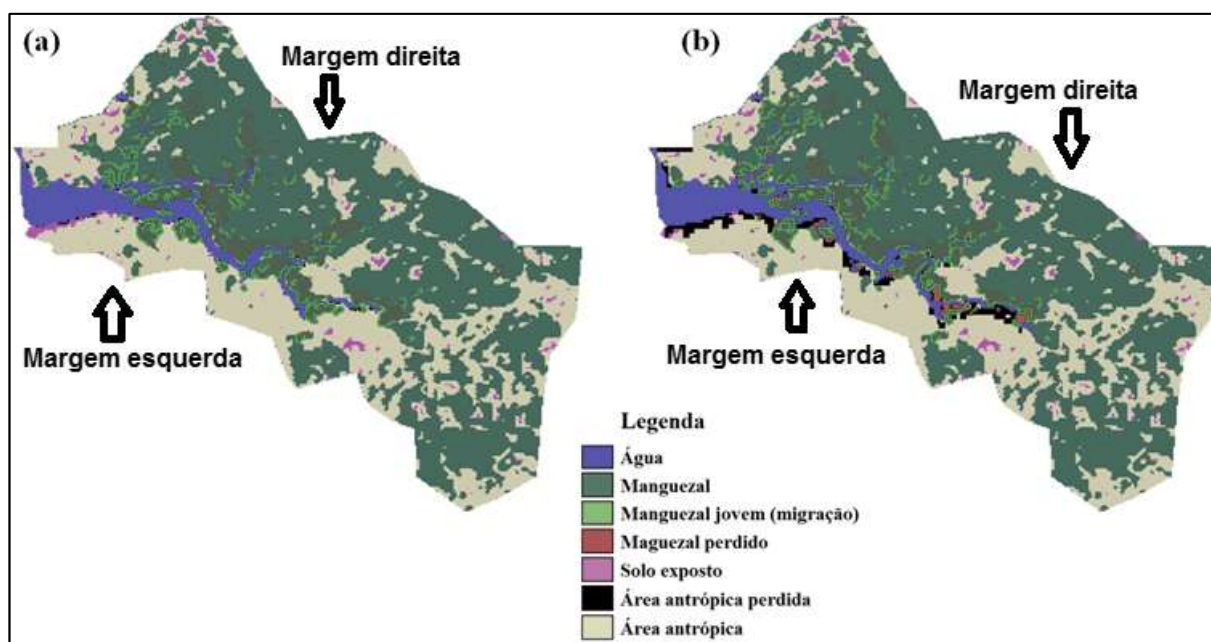


Figura 4. Classes de cobertura do solo e a distribuição espacial das áreas de manguezal na bacia do rio Anil: (A) - Situação inicial com NMRM = 0,011 m (2013), (B) – Simulação após NMRM de 0,97 m (2100).

Cabe ressaltar que as áreas de manguezal mais suscetíveis à elevação do NMRM foram às localizadas na margem esquerda, que apresentam as maiores taxas de urbanização para a BHRA, fato que pode ser um forte indício que as formas de uso e ocupação antrópica do solo em áreas adjacentes ao manguezal podem influenciar no padrão de resposta desse ecossistema em relação a potenciais eventos de elevação do NMRM, influenciando assim, sua capacidade de adaptação às mudanças climáticas.

4. DISCUSSÃO

O uso da modelagem espacialmente explícita pode ajudar a entender o padrão de resposta do manguezal à elevação do nível NMRM, assim como, em relação a outros tensores climáticos e ambientais (BEZERRA et al., 2013). Os resultados da presente pesquisa correspondem ao exercício de modelagem para simular a capacidade de resistência do

manguezal na BHRA a potenciais eventos de elevação do mar decorrentes das mudanças climáticas, tendo-se por base os pressupostos do modelo conceitual proposto como descrito anteriormente.

O modelo utilizado para o experimento de modelagem é o BR-MANGUE, este simula a elevação do NMRM para a área de estudo em 88 anos. Para uma melhor visualização dos resultados, o intervalo de tempo adotado foi subdividido em 10 ciclos de 8,8 anos, com elevação do NMRM variando de 0,16 m a 0,98 m, conforme uma progressão aritmética de razão 0,10 m, uma vez que, cada evento de elevação é igual ao seu antecessor, subtraído da razão de elevação. A distribuição matemática para a elevação do NMRM adotada correspondente ao período de 2012 a 2100, e pauta-se no cenário mais alarmante de elevação média global do mar apresentada no AR5-IPCC, que indicada que a elevação média global pode chegar a 0,97 m até meados de 2100 (IPCC, 2013).

Fica demonstrado o padrão de elevação do NMRM para cada evento de elevação adotado na presente pesquisa, no qual o BR-MANGUE registrou no espaço celular o padrão de resposta da área de manguezal. Através do experimento de modelagem também é possível o acompanhamento do deslocamento da AIM, da taxa de acreção vertical de sedimento e formação de novos bancos de lama (acreção longitudinal), como fatores que podem favorecer a colonização de novas áreas de manguezais.

Mesmo não sendo o objetivo do BR-MANGUE, através do exercício de modelagem realizado foi possível identificar áreas antrópicas (Figura 4) que podem ser afetadas por potenciais eventos de elevação do NMRM na bacia em estudo, o que torna o fator alarmante tanto ambientalmente quanto no contexto de desastres naturais (deslizamento, por exemplo), devido à referida bacia ser a mais urbanizada da capital maranhense (São Luís) e ser extremamente afetada pela presença de ocupações subnormais (palafitas e afins), e por áreas de aterro de manguezal influenciadas pela pressão imobiliária. A aferição de áreas antrópicas suscetíveis a eventos de elevação do NMRM foi possível porque grande parte da BHRA foi urbanizada através de áreas de aterro de manguezal (Trovão, 1994; Bezerra, 2008). Ou seja, são áreas que outrora estavam na área de influência da maré (AIM) e foram aterradas, e dessa forma, podem ser suscetíveis a potenciais eventos de elevação do NMRM.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados simulados, é possível inferir que o padrão de resposta do manguezal à elevação do NMRM é dependente das características geográficas locais da área ocupada pelo manguezal, das formas de uso e ocupação do solo de origem antrópica em áreas adjacentes, além das taxas de elevação do mar. Assim, torna-se pouco provável que seja possível simular os impactos das mudanças climáticas para a zona costeira brasileira de forma generalizada, sendo necessária a realização de estudos regionais, como ocorre no estudo de caso apresentado na presente pesquisa.

Na zona costeira brasileira, experimentos de modelagem podem ser utilizados no auxílio à tomada de decisão e na formação de medidas de mitigação às mudanças climáticas, através de instrumentos de gestão do parcelamento do solo já em uso pela legislação vigente, tais como: plano diretor dos municípios, zoneamento costeiro e zoneamento ecológico econômico.

E por fim, os resultados obtidos por meio do BR-MANGUE sugerem que experimentos de modelagem podem ser usados para promover uma melhor compreensão dos padrões de respostas do manguezal a potenciais eventos de elevação do nível do mar, principalmente em áreas de uso e ocupação complexos como na área objeto de estudo de caso, que apresenta alta densidade urbana, mesclada com áreas de manguezais bem conservadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. R.V. Aspectos geoambientais da bacia do rio Anil. Monografia (Especialização em Metodologia do ensino do 3º grau), **Universidade Estadual do Maranhão**, 1995. 62 p.
- ALONGI, D.M. Resilience of Mangrove Forests, Tsunamis, and Global Climate Change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, volume 76, issue: 1, Publisher Elsevier, p. 1-13, 2008. doi:10.1016/j.ecss.2008.08.024.
- BERGER, U. et al. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests, **Aquat. Bot**, 2008. doi: 10.1016/j.aquabot.2007.12.015.
- BEZERRA, D. S. O ecossistema manguezal em meio urbano no contexto de políticas públicas de uso e ocupação do solo na bacia do rio Anil, São Luís-MA. **Dissertação de mestrado**

apresentada ao programa de pós-graduação em Saúde e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), 122 p. 2008.

BEZERRA, D. S.; Amaral, S.; Kampel, M. Impactos da elevação do nível médio do mar sobre o ecossistema manguezal: a contribuição do sensoriamento remoto e modelos computacionais. **Ciência e Natura**. ISSN: 2179-460X, v. 35 n. 2 Dez. 2013, p. 152-162, 2013.

BEZERRA, D.S. Modelagem da dinâmica do manguezal frente à elevação do nível do mar. **Tese de doutorado** em Ciência do Sistema terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 121 p. 2014.

CARNEIRO, T. G. S; Andrade, P. R.; Câmara, G., Monteiro, A. M. V.; Pereira, R. R. 2013. TerraME: an extensible toolbox for modeling nature-society interactions. **Environmental Modelling & Software** 46: 104-117.

Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN). 1995. Tábuas de Marés para 1994. Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros. Rio de Janeiro, DHN. p. 1-6.

GILMAN, E. L.; Ellison, J.; Duke, N. C.; Field, Colin. Threats to mangroves from climate change and adaptation options, *Aquat. Bot.*, 89 (2008), p. 237-250, 2008. doi: 10.1016/j.aquabot.2007.12.009.

GOLFARI, L.; Caser, R. L.; Moura, V. P. G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: 2ª aproximação. Belo Horizonte: Centro de Pesquisas Florestais da Região do Cerrado, 1978. 66p. (**PRODEPEF. Série Técnica; 11**).

IBGE. Anuário Estatístico do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001.

INPE. TerraView Software copyright © 2001-2011 INPE, **Tecgraf PUC-Rio and FUNCATE**, 2011.

IPCC. (2007): Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C.E. Hanson, Eds. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**. 976 p.

IPCC. (2013). Working group I contribution to the IPCC fifth assessment Report (AR5), climate change 2013: the physical science basis. **Cambridge Univ. Press**, 2013. 2216p.

LOVELOCK, C. E.; Ellison, J. C. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the great barrier reef to climate change. In: Johnson, J. E., Marshall, P. A. (Eds.), **Climate Change and**

the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia, p. 237–269, 2007.

MCLEOD, E.; Salm, R. V. **Managing Mangroves for Resilience to Climate Change.** IUNC, Gland, Switzerland, 2006. 64 p.

NEVES, C. F. O nível do médio do mar: uma realidade física ou um critério de engenharia? **Vetor**, Rio Grande, v.15, n.2, p.19-33, 2005.

REIS, J. C. M. L. O Nível Médio do Mar: de 1910 a 2004. In: **Jornadas do Mar 2002 – “O mar: um oceano de oportunidades”**, p.521-529, 2004.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, No. 8, 1994.

SCAVIA, D. et al. Climate change impacts on mangroves U.S. coastal and marine ecosystems. **Estuaries** 25: p.149-164, 2002.

SOLOMON, S. et al. (Eds.), 2007. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA**, 447.

SOLOMON, S.; PLATTNER, Gian-Kasper., K.; FRIEDLINGSTTEIN, P. 2009. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. **Proct. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** 106 (6): 1704-1709.

SOUZA-FILHO, P. W. M. S. Costa de macromaré da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica** 23 (4): p. 427-435, 2005.

TROVÃO, J. R. Transformações Sociais e Econômicas no Espaço rural da Ilha do Maranhão. **(tese de doutorado)**. Rio Claro, 1994.

WILSON, R. N.; Pedro-Valfir, S. F.; Proisy, C.; Richard, M. L. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 117, p. 83-93, 2013.

WOLFRAM, S. 1983. Statistical mechanics of cellular automata. **Reviews of Modern Physics**, Vol. 55, No. 3: 602-644.

