

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL APLICADA À PREVISÃO DA DEMANDA HÍDRICA

Tereza Margarida Xavier de Melo Lopes¹; Samiria Maria Oliveira da Silva²; Lais Marques de Oliveira³; Taís Maria Nunes Carvalho⁴; Brenda Arielly Mendonça Rodrigues⁵ & Renata Locarno Frota⁶

RESUMO - O crescimento populacional, as variações climáticas e o desenvolvimento dos padrões de consumo tendem a acentuar os períodos de escassez hídrica em diversas conjunturas globais. Nesse viés, as previsões relacionadas ao consumo de água são fundamentais para a elaboração de projetos capazes de mitigar as complicações das secas e aumentar a resiliência dos sistemas de abastecimento. Assim, o presente trabalho realiza uma previsão da demanda hídrica urbana através de modelagem dinâmica baseada em Autômatos Celulares (AC's). A cidade de Fortaleza (CE) foi utilizada como estudo de caso a fim de prospectar o consumo de água para o ano de 2040. Os resultados apontam que o prolongamento das tendências atuais de crescimento dos padrões de consumo de Fortaleza, devem gerar uma taxa de crescimento médio anual de, aproximadamente, 0,96%, propiciando um aumento de 33% de 2010 (ano base) a 2040 (horizonte de previsão). Diante de tal conjuntura, é extremamente necessário desenvolver estratégias capazes de reduzir os padrões de consumo e conceber balanços hídricos favoráveis.

ABSTRACT - Population growth, climatic variations and the development of consumption patterns tend to accentuate periods of water scarcity in several global conjunctures. In this bias, forecasts related to water consumption are fundamental for the elaboration of projects capable of mitigating the complications of droughts and increasing the resilience of supply systems. Thus, the present work makes a forecast of urban water demand through dynamic modeling based on Cellular Automata (AC's). The city of Fortaleza (CE) was used as a case study in order to prospect water consumption for the year 2040. The results indicate that the prolongation of current trends in the growth of consumption patterns in Fortaleza, should generate a rate of average annual growth of approximately 0.96%, providing an increase of 33% from 2010 (base year) to 2040 (forecast horizon). In the face of such a situation, it is extremely necessary to develop strategies capable of reducing consumption patterns and designing favorable water balances.

Palavras-Chave – Previsão de Demanda Hídrica. Autômatos Celulares.

1) Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, terezamelo@alu.ufc.br.

2) Professora adjunta do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, samiriamaria@gmail.com.

3) Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, lais.engciivil@gmail.com.

4) Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, taismarianc@gmail.com.

5) Mestrado em Planejamento e Operação de Transporte, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, brendaarielly.ufc@gmail.com.

6) Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, renata.locarno@hotmail.com.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos agrava os efeitos adversos das secas que atingem, majoritariamente, as regiões áridas e semiáridas do mundo. Intensificando este cenário, a UNESCO (2018) prevê, para as próximas duas décadas, o aumento expressivo do uso doméstico de água na maior parte das regiões do mundo. Agravando ainda mais essa conjuntura, a disponibilidade de água doce tende a permanecer constante ou diminuir (UNESCO, 2018), o que deve dificultar a gestão dos recursos hídricos e aumentar a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água.

No Brasil, existem diversos problemas de distribuição de água ocasionados, principalmente, pelo desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água (Santos e Farias, 2017). Para mitigar esses problemas é necessário aplicar técnicas eficientes de gerenciamento de sistemas de abastecimento de água, muitas das quais exigem a aplicação de ferramentas de previsão (Groppo *et al.*, 2019)

Tais fatores evidenciam a necessidade de analisar o consumo de água atual e de realizar previsões de demanda hídrica. Esses estudos viabilizam a elaboração de um planejamento capaz de atender as demandas futuras e apto para implantar estratégias redutoras de consumo hídrico.

Nesse contexto, a cidade de Fortaleza tem apresentado acentuado crescimento populacional e da expansão urbana. Como agravante, destaca-se a precipitação anual baixa e extremamente variável, o que deixa a oferta hídrica altamente vulnerável às condições climáticas (Carvalho, 2019; Carvalho *et al.* (2021). Portanto, é necessário conhecer as demandas hídricas atuais e futuras para ampliar as fontes de abastecimento de água e impedir possíveis desabastecimentos.

Diante do exposto, o presente estudo realiza a projeção da demanda hídrica urbana da cidade de Fortaleza para o ano de 2040, utilizando modelagem espacial dinâmica com base na teoria de autômatos celulares. A análise utiliza tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento que viabilizam a obtenção de dados espacializados. Os resultados podem indicar as necessidades de expansão das fontes de abastecimento e das instalações de distribuição de água.

2. METODOLOGIA

2.1 Obtenção e espacialização dos dados

A estimativa foi iniciada a partir da obtenção dos dados de micromedição de água levantados junto à Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) para os anos de 2009 a 2017. Os dados estavam organizados numa planilha por setor censitário com suas respectivas populações. Posteriormente, obteve-se o mapa de Fortaleza setorizado no formato “*shapefile*”, o arquivo básico de sistemas de informação geográfica que trata de dados cadastrais.

As informações obtidas foram organizadas espacialmente, a nível de setor censitário, por classe de consumo per capita com o objetivo de identificar os polos de maior e menor demanda hídrica (Tabela 1). A espacialização foi efetuada no software QGIS.

Tabela 1 – Divisão categórica da demanda hídrica

Classe	Demanda (l/hab.dia)
1	0-50
2	50-200
3	200-400
4	400-600
5	600-800
6	>800

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

2.2. Simulação dinâmica

Para simulação dinâmica urbana da cidade de Fortaleza foi utilizado o *software* DINAMICA EGO que possui os autômatos celulares (AC's) como o principal modelo matemático que conduz a simulação. Para representar fenômenos, os AC's executam modelos de sistemas dinâmicos simples que identificam uma vasta variedade de comportamentos. Tal simplicidade atrelada a versatilidade e a representatividade do método, tornou o AC uma das ferramentas favoritas para o estudo de comportamentos genéricos de sistemas dinâmicos complexos (Bar-Yam, 1997).

A modelagem por autômatos celulares é composta por células espacializadas agregadas a valores numéricos. Os estados de cada célula variam a partir da interação de três fatores: o estado da célula (valor e geometria), o estado das células vizinhas, e o padrão de transição celular identificado em um determinado espaço temporal, isto é, as mudanças ocorridas no cenário estudado. Com base nesses três elementos, os autômatos celulares reconhecem um padrão de transformação e tornam possível a elaboração de certos prognósticos (Wolfram, 1994).

Para estimar a demanda hídrica por modelagem dinâmica, o estudo é consolidado em três etapas principais:

- organização dos dados de entrada;
- calibração do modelo (determinação dos parâmetros de cada variável, realização de testes de simulação e validação do modelo);
- estimativa de cenários futuros (prognóstico).

2.2.1. Primeira fase: organização dos dados de entrada

Os dados de entrada foram convertidos em arquivos TIF para que pudessem ser inseridos como base da modelagem. O TIF é um formato gráfico que permite armazenar imagens em *bitmap (raster)*, o que o torna compatível para leitura e edição nos dois *softwares* que basearam a simulação: o DINAMICA EGO e o QGIS.

Para compor os dados de entrada do modelo de simulação, era preciso adotar anos que não representassem períodos de escassez hídrica, uma vez que esta conjuntura tende a reduzir a demanda e gerar um prognóstico não representativo do fenômeno. A partir dessas premissas, foram escolhidos os anos de 2010 e 2013 como base da simulação dinâmica. Estes dados, espacializados por setor censitário e categoria de consumo, compõem cenários que norteiam a assimilação e identificação das variações de demanda hídrica urbana de Fortaleza.

Além disso, foram adicionadas variáveis explicativas (estáticas e dinâmicas) das mudanças observadas no consumo de água. A variável estática (mapa de diferença do consumo de água entre os anos 2010 e 2013) foi obtida por meio de uma subtração matricial no QGIS, entre os mapas categóricos do ano de 2010 e 2013. Já a variável dinâmica (distância às classes de consumo de água) foi calculada pelo modelo de simulação do Dinâmica EGO. Tais distâncias são determinadas a partir das estimativas de probabilidade de mudanças de classes ocorridas entre os mapas categóricos dos anos base da simulação.

2.2.2. Segunda fase: calibração e validação do modelo

A calibração do modelo é realizada a partir de quatro etapas principais: cálculo das matrizes de transição, cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência, análise da correlação dos mapas, e ajuste e execução do modelo de simulação.

O resultado da matriz de transição, corresponde ao percentual de mudanças de uma classe de consumo para a outra, ou seja, retorna ao DINAMICA EGO a porcentagem de regiões que alteraram a intensidade de demanda por categoria. Estes dados são calculados por meio da análise dos mapas categóricos final e inicial (ROSSETTI *et al.*, 2013).

A calibração é pautada no método dos pesos de evidência descrito por Bonham Carter *et al.* (1988) e Bonham-Carter (1994), também denominado por teorema da probabilidade condicional de Bayes. O modelo infere a possibilidade de ocorrência de um evento diante de um episódio anterior, o qual pode ter sido uma variável explicativa ou uma evidência (TRENTIN e FREITAS, 2010). No caso do presente estudo, o método calcula a probabilidade de ocorrer uma transição categórica influenciada pela vizinhança, ou seja, estima a possibilidade de mudança da classe de consumo de uma região de acordo com a demanda hídrica de suas proximidades.

Tais resultados são obtidos por meio de evidências do fenômeno ou de variáveis explicativas, entretanto, de acordo com o teorema de Bayes, essas variáveis devem ser independentes para que possam explicar as transformações ocorridas no cenário analisado. Por conta de tal premissa, aplicou-se uma análise de correlação para analisar a interdependência espacial dos mapas. Para isto, o modelo utiliza o: (i) Incerteza de Informação Conjunta – JIU, que consiste em um indicador de correlação entre os mapas; e (ii) o Índice de Cramer (V), que se baseia nas dimensões de área das categorias (Almeida, 2003).

De acordo com Bonham-Carter (1994), a dependência espacial entre os pares de variáveis cresce à medida que se aproximam de 1 (100%). Portanto, para que a modelagem dinâmica tenha êxito, é recomendado que as variáveis que contenham correlação acima de 0,5 (50%) sejam desprezadas ou combinadas com uma terceira que substituirá o par correlacionado no modelo.

Para prosseguir com a calibração, o DINAMICA EGO utiliza como regra local de Autômato Celular dois funtores que funcionam como mecanismos de transição: o *expander* e o *patcher*. O *expander* dedica-se a analisar a ampliação ou redução de manchas pré-existentes, e a função *patcher* é caracterizada por produzir novas manchas (Soares-Filho *et al.*, 2007).

O *software* RStudio foi utilizado para complementar a calibração. A plataforma utiliza a linguagem de programação em R para a manipulação de dados. O aplicativo foi empregado para determinar o tamanho médio e a variância da área de mudança, além de definir o índice de isometria. De acordo com Almeida *et al.* (2008), o índice de isometria é inversamente proporcional ao grau de fragmentação das manchas. Tal indicador varia entre 0 e 2 e aponta manchas mais isométricas à medida que o número aumenta.

Para validar o modelo, o DINAMICA EGO reconhece as distinções entre os mapas reais de uso final e inicial, e identifica as discrepâncias entre os mapas de uso final simulado e inicial real, sendo que nesta etapa são gerados os “mapas de diferença”. Além disso, o modelo também elabora “mapas de similaridade”, os quais são produzidos através da comparação entre os mapas de uso simulado e real referentes ao mesmo ano, tal defrontação considera a posição das células e avalia as classes de uso que estão inseridas (Rodrigues *et al.*, 2007).

A validação foi pautada no índice de similaridade *fuzzy*, este indicador considera que o aspecto de uma célula é influenciado por ela mesma e pelas células adjacentes (Hagen, 2003). Como resposta ao teste, o DINAMICA EGO retorna valores que variam de 0 a 1, em que 1 representa a medida máxima de similaridade (100%). Tal avaliação foi possível por meio da comparação entre os dois mapas de diferença resultantes. Para tanto, adotou-se uma função de decaimento exponencial com o tamanho de janela 11x11 e uma função de decaimento constante, estimada com as dimensões: 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11.

2.2.3 Terceira fase: obtenção de cenários futuros

Com a validação concluída, realizou-se a simulação de prognósticos para a demanda hídrica da cidade a partir das mesmas premissas e parâmetros de ajuste empregados na calibração e validação do modelo. Para tanto, apenas foi necessária a alteração do número de interações do programa. Nesta etapa foram obtidos, ainda, os cenários de tendência dos anos posteriores a 2013 até o ano de 2040, com um espaço temporal de 3 anos para cada projeção.

Para a estimativa da demanda total de água de 2040, em litros por dia, foi preciso realizar, juntamente com o prognóstico da demanda per capita, a projeção populacional. Para tanto, utilizou-se como base os estudos de crescimento demográfico apresentados no Relatório de Avaliação da Segurança Hídrica de Fortaleza anexados ao Fortaleza 2040, o qual apresenta uma perspectiva de crescimento populacional de 26% entre 2012 e 2040.

4. RESULTADOS

Primeiramente, foram observados as médias anuais de demanda de 2009 a 2017 (Figura 1). O gráfico demonstra o crescimento do consumo até o ano de 2013, seguido do decaimento até o ano de 2017.

Importante pontuar que o espaço temporal entre 2010 e 2013, além de ser representativo de anos típicos, favorece a simulação, haja vista que o DINAMICA EGO trabalha em passos iguais para calcular as taxas de transição da segunda fase de calibração, ou seja, de 2010 a 2040, o programa executará dez passos de três anos.

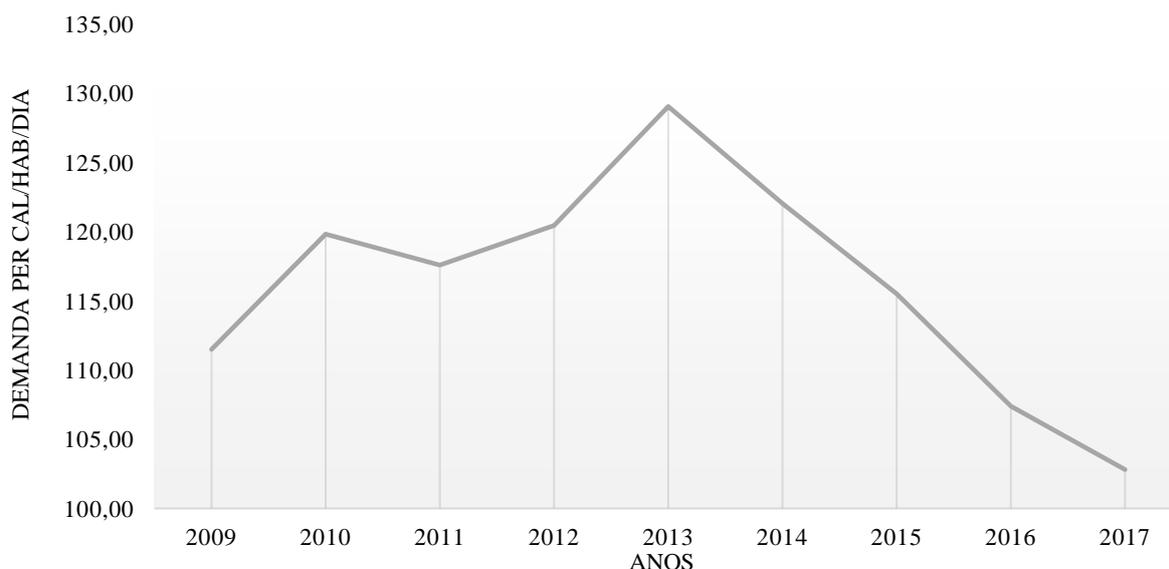


Figura 1 – Média anual da demanda per capita em Fortaleza (2009-2017)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com a espacialização dos dados de demanda de 2010 a 2013, é possível identificar as transformações ocorridas nos padrões de consumo dos fortalezenses (Figura 2). Por meio da comparação dos mapas, é notório o aumento do consumo principalmente na parte leste da cidade. Tal comportamento é decorrente do crescimento urbano desordenado que propiciou a intensificação de expansões urbanas principalmente na zona leste da cidade: Aldeota e suas adjacências. Além disso, de acordo com o censo do IBGE 2010, nove dos bairros mais ricos de Fortaleza estão situados na Regional II (Guararapes, Varjota, Cocó, De Lourdes, Aldeota, Meireles, Mucuripe, Dionísio Torres, e Praia de Iracema). Este fator reforça a correlação direta entre a renda e a demanda per capita.

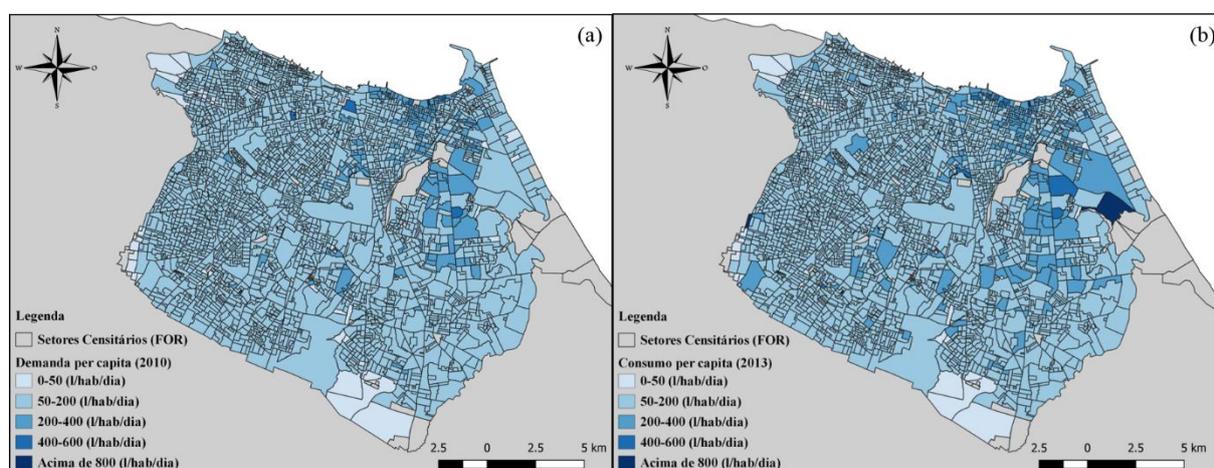


Figura 2 – Comparação entre as demandas hídricas de 2010 e 2013
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 3 apresenta uma comparação entre o cenário real de 2013 (a) e o simulado pelo DINAMICA EGO para o mesmo ano (b). Visualmente, não é perceptível mudanças no padrão de consumo, tal fator corresponde a uma das evidências de validação da modelagem. Entretanto, prosseguiu-se com uma análise quantitativa verificando o percentual de similaridade fuzzy.

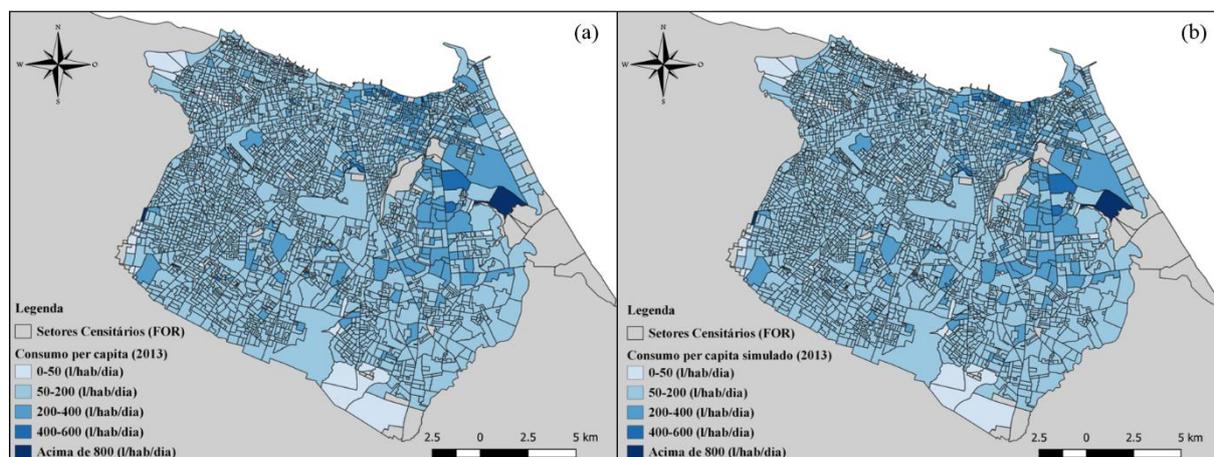


Figura 3 – Comparação entre demandas hídricas de 2013 real e simulado
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O menor valor da similaridade *fuzzy* entre os mapas de diferença foi de 0,99, com a validação utilizando função de decaimento exponencial em janela de tamanho 1x1. Isso demonstra um alto valor de similaridade, se comparado com Novaes *et al.* (2011), que indicam que valores próximos a 0,4 correspondem a um bom nível de compatibilidade.

A partir do modelo de simulação validado, foi realizada uma comparação entre o cenário de 2016 real e o obtido pelo DINAMICA EGO. A confrontação entre os dados foi efetuada por meio da diferença percentual direta realizada entre o consumo simulado (m³) e o balanço hídrico fornecido pela CAGECE para o ano de 2016 (Tabela 2). Os resultados evidenciam uma diferença de 1,22%, portanto a simulação estaria superestimando os dados reais. Tal fator pode ser explicado pelo fato de que 2016 configura-se como um ano seco e, como explicitado anteriormente, períodos de escassez hídrica tendem a apresentar demandas reduzidas.

Tabela 2 – Diferença percentual entre a demanda de 2016 estimada e real

Validação 2016 (m ³ /dia)		Diferença
Simulado	Real	
415.589,37	410.577,59	1,22%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O cenário estimado para o ano de 2040 pode ser observado na Figura 4b, em contraste com o cenário real de 2010 (Figura 4a). Os mapas evidenciam uma intensificação da demanda per capita principalmente na zona leste da cidade. A demanda futura calculada é de 533.994 m³ por dia (6,18 m³/s), totalizando um crescimento de 33%. A partir de então, foi possível calcular, por meio da equação 3, a taxa anual de crescimento da demanda correspondente a, aproximadamente, 0,96%.

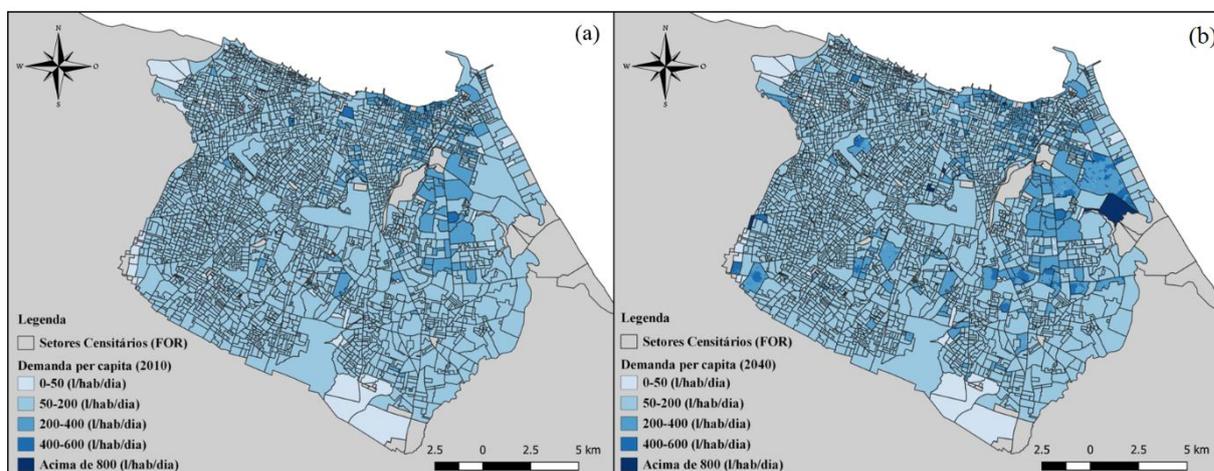


Figura 4 – Comparação da demanda hídrica de 2010 e 2040

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a aplicabilidade da modelagem dinâmica complexa como ferramenta viável para previsões de demanda hídrica urbana em cidades com características espaciais semelhantes à cidade de Fortaleza. Os dados apontam uma diferença percentual de 1,22% entre o consumo real do ano de 2016 e o estimado pela simulação para o mesmo ano. A diferença percentual apresentada é majorada em função do período de racionamento vivenciado em 2016 que, como pontuado anteriormente, tende a reduzir o consumo de água. Ademais, a ligeira superestimação da demanda é favorável, haja vista que atua em função da segurança.

A modelagem demonstrou que a cidade terá um aumento no consumo de cerca de 33% entre os anos de 2010 a 2040, caso o padrão identificado entre os anos de 2010 e 2013 seja preservado. Além disso, é geograficamente perceptível a relação entre a demanda e a renda, uma vez que os bairros com maior renda per capita apresentam consumos superiores a 200 litros diários por habitante, o qual excede o ideal de 110 litros estabelecido pela OMS.

Os dados obtidos sinalizam a necessidade de definir estratégias que contribuam para a redução da demanda hídrica. Portanto, recomenda-se a adoção de algumas medidas de racionamento que não sejam limitadas a períodos secos, mas que reverberem como forma de consciência ambiental contínua. Por fim, salienta-se que a previsão da demanda hídrica possibilita averiguar se as condições atuais de oferta são suficientes para atender as demandas futuras e, a partir de então, traçar planos, projetos e ações que possibilitem o alcance de um balanço hídrico favorável. Nesse viés, recomenda-se: (i) a utilização outras metodologias de estimativa de consumo a longo prazo que viabilizem comparações e análises; e (ii) a aplicação da metodologia desenvolvida em outras cidades com características semelhantes à cidade de Fortaleza.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M. de. (2003). Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. 351f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ALMEIDA, C. M. GLERIANI, J. M., CASTEJON E. F., SOARES-FILHO, B. S. (2008). Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 22, n. 9, p. 943 – 963.

- BAR-YAM, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Boston: Addison-Wesley.
- BONHAM-CARTER, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario: Pergamon
- CAGECE. *Balanco hídrico da CAGECE*. Fortaleza: CAGECE, 2016.
- CARVALHO, T. M. N. (2019). *Water demand modeling using machine learning techniques*. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- CARVALHO, T. M. N.; SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, V. C. (2021) *Urban Water Demand Modeling Using Machine Learning Techniques: case study of fortaleza, brazil*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 147, n. 1, p. 05020026. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001310](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001310).
- GROPPO, G. S.; COSTA, M. A.; LIBÂNIO, M. (2019). (Predicting water demand: a review of the methods employed and future possibilities. *Water Supply*, v. 19, n. 8, p. 2179-2198. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2019.122>.
- HAGEN, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 17, n. 3, p. 235-249. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810210157822>.
- NOVAES, M. R.; ALMEIDA, C. M.; RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A. (2011). *Cenários prognósticos baseados em modelagem dinâmica espacial para o manejo da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 15. Curitiba. Anais [...]. Curitiba: INPE, 2011. p. 407-414.
- SANTOS, S. M.; FARIAS, M. M. M.W.E.C. (2017). Potential for rainwater harvesting in a dry climate: assessments in a semiarid region in northeast brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 1007-1015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.251>.
- SOARES-FILHO B. S.; CERQUEIRA G. C.; ARAÚJO W. L.; VOLL E. *Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular*. *Megadiversidade*, v. 3, p. 74-86, 2007.
- UNESCO. *Nature-based solutions for water: Development report*. Paris: UNESCO, 2018.
- WOLFRAM, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity*. *Collected Papers*. MA Reading: Addison-Wesley. 1a edition.