Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

MODELAGEM HIDROCLIMÁTICA E DEMOGRÁFICA PARA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA

FERREIRA, Pedro dos Santos – pedro_spe@hotmail.com
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

SOUZA, Weronica Meira de – weronicameira@gmail.com
Universidade Federal Rural do Pernambuco / UFPE

Submetido em: 21/03/2020
Aceito para publicação em: 29/06/2020
Publicado em: 24/07/2020
DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.72381

RESUMO: Entre os problemas de ordem ambiental mais discutidos pela sociedade contemporânea, destaca-se os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Porém, a extensão dos efeitos ainda é incerta. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo consistiu em avaliar os impactos das mudanças climáticas e demográficas sobre a disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida. Para isso, foi utilizado o modelo hidrológico SWAT que, após calibração, foi abastecido com os dados dos possíveis cenários gerados pelos simuladores climáticos CCCMA e MIROC. Em seguida, foi projetado contingente populacional. Posteriormente, calculou-se a disponibilidade hídrica potencial atual e futura. Quanto a calibração do SWAT, para a estimativa da vazão anual da bacia hidrográfica do rio Brígida, obteve-se resultados classificados como muito bons, com Nash-Soutclife = 0,92, Peaerson = 0,92, PBIAS = 0,6%. Quanto aos cenários projetados pelos modelos climáticos CCCMA e MIROC, o primeiro indicou aumento de 21% na precipitação pluviométrica, enquanto o segundo, sugere redução de 17%. Quanto às projeções demográficas, verificou-se que, para a segunda metade do presente século, houve um incremento de 39,6% no número de habitantes na bacia, quando comparado ao ano de 2010. No que diz respeito ao quadro de disponibilidade hídrica per capita, a situação é classificada como crítica para o período analisado. Apesar dos dados climáticos sugerirem condições climáticas opostas em relação às chuvas, a disponibilidade hídrica, por habitante, por ano variou na faixa classificada como de Estresse Hídrico e Escassez hídrica para os dois cenários gerados pelos modelos. Este resultado encontra-se diretamente relacionado ao crescimento populacional e não investimento em infraestruturas. Desse modo, conclui-se que a combinação entre mudanças climáticas e crescimento populacional possui potencial para agravar o problema da escassez hídrica na região semiárida.

PALAVRAS-CHAVE: semiárido; aquecimento global; déficit hídrico; reservatórios, recursos hídricos.

HYDROCLIMATIC AND DEMOGRAPHIC MODELING FOR ESTIMATING WATER AVAILABILITY IN THE BRÍGIDA RIVER HYDROGRAPHIC BASIN

ABSTRACT: *Tibouchina mutabilis* (Vell.) Cogn, popularly known as manacá-da-serra, is a pioneer species of the Atlantic Forest with a high rate of secondary forest colonization. There is no mention in the literature of rain partition studies in this species. This research quantified the transprecipitation and estimated the interception from the end of February until November 2018 of an area reforested with *Tibouchina mutabilis* in the Walter Emmerich Laboratory of Forest Hydrology, located in the Serra do Mar State Park - Nucleos Cunha, southeastern Brazil. For this purpose 10 rain gauges were installed in two plots of 70 m^2 in reforested areas; one with 20° and the other with 30° of slope, which collected the throughfall. To measure the gross precipitation one rain gauge was allocated in the meteorological station of the laboratory. The stemflow was not measured and the interception was obtained by the difference of the gross precipitation and the

throughfall. The average throughfall of the two plots differed statistically. The difference in tree density between plots was the main cause for this result. The values of throughfall and interception in relation to the accumulated gross precipitation during the experiment were 89.3% and 10.7% in the plot with 20º of slope and 75.0% and 25.0% in the plot with 30°. The amounts of gross precipitation and throughfall in both plots consistently fit the simple linear regression model (R^2 = 0.98). The spatial variability of throughfall was high between the measurement points of this process.

KEYWORDS: semiarid; global warming; water deficit; reservoirs, water resources.

MODELACIÓN HIDROCLIMÁTICA Y DEMOGRÁFICA PARA ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BRÍGIDA

RESUMEN: Entre los problemas ambientales más discutidos por la sociedad contemporánea, se destacan los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Sin embargo, el alcance de los efectos aún son inciertos. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar los impactos del clima y los cambios demográficos en la disponibilidad de agua per cápita en la cuenca hidrográfica del río Brígida. Para esto, se utilizó el modelo hidrológico SWAT, que, después de la calibración, se suministró con datos de los posibles escenarios generados por los simuladores climáticos CCCMA y MIROC. Luego, se proyectó un contingente de población. Posteriormente, se calculó la disponibilidad de agua potencial actual y futura. En cuanto a la calibración del SWAT para estimar el flujo anual de la cuenca del río Brígida, los resultados se clasificaron como muy buenos, con Nash-Soutclife = 0.92, Peaerson = 0.92, PBIAS = 0.6%. En relación a los escenarios proyectados por los modelos climáticos CCCMA y MIROC, el primer indicó un aumento del 21% en las precipitaciones, mientras que el segundo sugiere una reducción del 17%. En cuanto a las proyecciones demográficas, se encontró que, para la segunda mitad del presente siglo, hubo un aumento del 39,6% en el número de habitantes de la cuenca, en comparación con el año 2010. Con respecto a la tabla de disponibilidad de agua per cápita, la situación se clasifica como crítica para el período analizado. A pesar de que los datos climáticos sugieren condiciones climáticas opuestas en relación con la lluvia, la disponibilidad de agua por habitante por año varió en el rango clasificado como Estrés hídrico y Escasez de agua para los dos escenarios generados por los modelos. Este resultado está directamente relacionado con el crecimiento de la población y no con la inversión en infraestructura. Por lo tanto, se concluye que la combinación del cambio climático y el crecimiento de la población tienen el potencial de agravar el problema de la escasez de agua en la región semiárida.

PALABRAS CLAVE: semiárido; calentamiento global; déficit de agua; embalses, recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

Os debates relacionados à segurança hídrica continuam a ganhar corpo nas esferas científicas e políticas, impulsionados pelo agravamento do que muitos pesquisadores e gestores públicos chamam de "crise hídrica". Segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU), atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas não têm acesso seguro à água potável. Esse quadro tende a agravar-se até o ano de 2025, quando dois terços da população mundial residirá em áreas de escassez hídrica (AHMED et al., 2015; SORENSON; MORSSINK; CAMPOS, 2011).

No cenário atual, as mudanças na disponibilidade de água para usos difusos decorrem da complexa inter-relação que abarca fatores naturais e socioeconômicos. Nesse sentido, o aumento da pressão sobre os recursos hídricos encontra-se atrelado a fenômenos como variabilidade climática, crescimento populacional, desigualdades sociais, mudanças no uso e cobertura

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

da terra exploração, inadequada dos recursos naturais, entre outros (BAKER; MILLER, 2013; BOSSIO; GEHEB; CRITCHLEY, 2010; DAVIES; SIMONOVIC, 2011).

No Brasil, país que dispõe de uma grande quantidade de águas superficiais e subsuperficiais, a situação não é diferente do observado em escala global. Em um primeiro momento, pode-se destacar a grande seca que ocorreu entre os anos de 2013 e 2015 no estado de São Paulo. Os impactos foram sentidos no setor de geração de energia elétrica, alimentos e comércio. Pelo menos 60 mil estabelecimentos industriais foram afetados. O efeito sobre a economia foi imediato, visto que esse setor é responsável por 60% da composição do PIB paulista (MARENGO et al., 2015).

Na região Nordeste, o problema da falta de água é ainda mais grave e persistente, sobretudo no Semiárido. Nessa região, a escassez hídrica perdura há décadas, com históricos de mortes e graves prejuízos socioeconômicos, reflexo principalmente do menor potencial hídrico e da utilização ineficiente da água (SILVA et al., 2016). Nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, por exemplo, Marengo (2007) destaca que a quantidade de água por habitante é insuficiente frente a demanda, condição que expõe a população a situações de escassez hídrica por longos períodos.

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013), o aquecimento adicional de 0,6°C, constatado durante a segunda metade do século XX, e o projetado até o ano de 2100 (2,6 °C a 4,8 °C), produzirá mudanças significativas na distribuição espaço-temporal da água. As implicações sobre a disponibilidade desse recurso devem variar de região para região, com potencial para agravar o problema da crise hídrica em localidades onde a demanda é superior à oferta.

No Semiárido, a presença de reservatórios nas bacias hidrográficas é fundamental para o desenvolvimento das atividades econômicas e de abastecimento humano. Todavia, a infraestrutura não é capaz de garantir a autonomia hídrica da região. Existe grande dificuldade por parte dos gestores públicos para a tomada de decisão e mitigação do problema, o que, segundo Ferreira et al. (2017), é na verdade, também, um reflexo da falta de estudos adequados à realidade da região. Quando se insere, nos debates, as questões relacionadas às mudanças climáticas, o déficit de informações é ainda maior.

Dentre as bacias hidrográficas do Semiárido, a do rio Brígida-PE, situada no trecho Submédio do rio São Francisco, vem ganhando importância na região, face às especulações econômicas resultantes do projeto de transposição do rio São Francisco. Todavia, ainda existe uma série de incertezas quanto aos conflitos envolvendo o uso da água e a resposta dos sistemas hidrológicos e socioeconômicos às mudanças climáticas.

No sentido de contribuir para a questão exposta, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas e demográficas sobre a disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Brígida está localizada no limite oeste do estado de Pernambuco (Figura 1), com área 13.495,73 km^2, o que representa 13,73% do território pernambucano. Segundo dados do último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população total na região é de 429,685 habitantes, o que corresponde a 4,8% de todo o estado. O contingente populacional encontra-se distribuído em 15 municípios, entre os quais Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Filomena, Santa Maria da Boa Vista e Serrita estão parcialmente inseridos na bacia, enquanto Araripina, Bodocó, Exu, Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Trindade e Parnamirim possuem área total dentro dos limites da unidade de planejamento hídrico (APAC, 2016; LOPES et al., 2010).

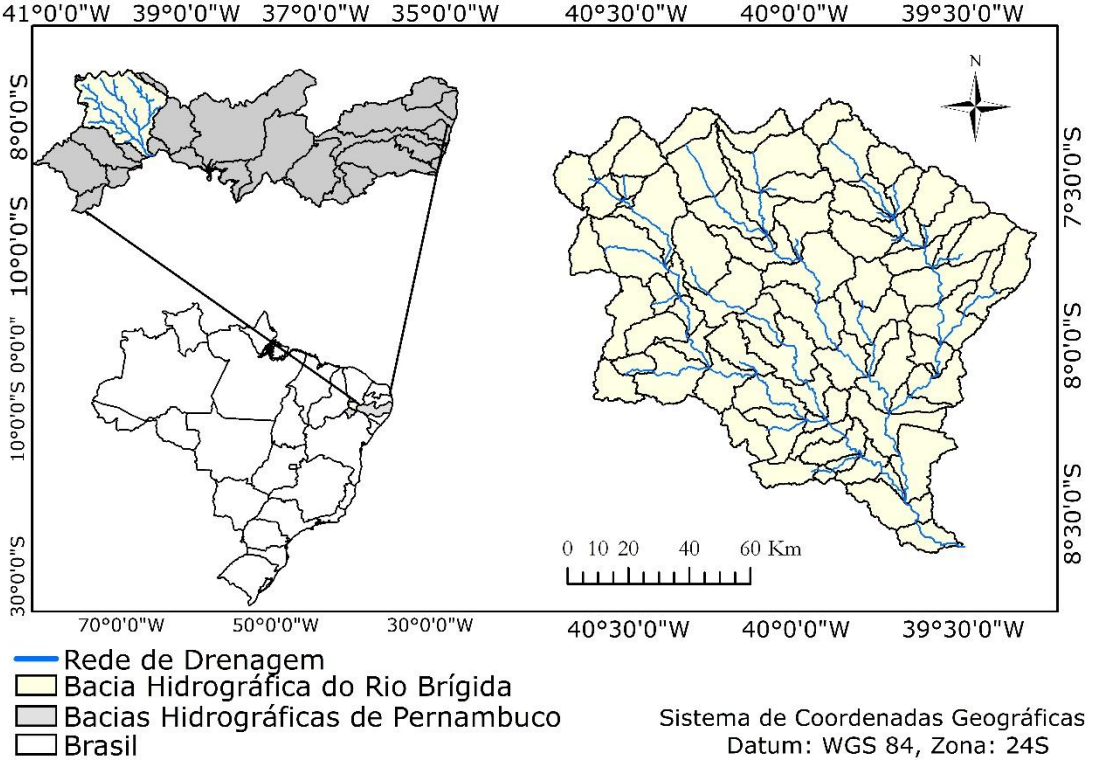

Figura 1 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Brígida, suas sub-bacias e canais principais.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para modelagem do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Brígida foi utilizado o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O mesmo foi abastecido com dados diários de precipitação pluviométrica, temperatura média do ar (máxima e mínima), velocidade do vento a 10 metros, radiação solar e umidade relativa do ar, obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC) e Agência Nacional de Águas (ANA). Também foram inseridos dados

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

correspondentes aos principais reservatórios inseridos na bacia, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidade máxima e área dos principais reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do rio Brígida.

Reservatórios	**Capacidade (m^3)**	**Área (m^2)**
Algodões	54.481.874	11.574.900
Cachimbo	31.207.006	7.226.280
Chapéu	188.000.000	24.500.000
Engenheiro Camacho	27.664.500	6.391.000
Entremontes	339.333.700	46.833.000
Lagoa do Barro	22.947.850	5.750.000
Lopes II	23.935.360	7.999.600

Fonte: elaborado pelo autor a partir da base de dados da Agência Pernambucana de Água e Clima.

Em seguida, realizou-se o procedimento de calibração do modelo, que se trata de um ajuste às características físicas da bacia hidrográfica do rio Brígida, necessário devido aos possíveis erros presentes nos dados de entrada e à própria estrutura conceitual do modelo. Para isto, a série de vazão observada foi dividida em dois períodos, no qual o primeiro corresponde a fase de aquecimento (1996 a 2000), método que consiste em iniciar o modelo e dinamizar os processos hidrológicos, uma vez que não há água no sistema como um todo. O segundo período refere-se a fase de calibração do SWAT, para a escala anual (2001 a 2014). Vale ressaltar que o segundo período foi definido com base na disponibilidade de dados de vazão observada para a bacia hidrográfica do rio Brígida. Quanto a avaliação da eficiência do modelo, para simulação da vazão entre os anos de 2001 e 2014, foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), considerado mais indicado para este tipo de procedimento, e o coeficiente de determinação linear (R^2).

ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA PER CAPITA

Cenário 1

O cenário 1 corresponde a evolução da disponibilidade hídrica potencial, atual e futura, para o qual foi considerada a capacidade de armazenamento hídrico por parte das bacias hidráulicas. Também se levou em consideração as mudanças demográficas. Para projetar a população total da bacia hidrográfica do rio Brígida, utilizou-se a equação de progressão geométrica proposta por Rocha, Brito Filho e Silva (2011):

$$Ppt = p1(1 + txa)^{ia} \quad (1)$$

Onde, *p1* é a população total do ano do último censo, *txa* corresponde à taxa de crescimento geométrico anual por município (%) e *ia* representa o intervalo em anos do censo base da projeção (ano anterior) para o ano projetado.

Após a projeção da população, somou-se a capacidade máxima de todos os reservatórios e realizou-se uma razão entre o potencial total de armazenamento de água nas bacias hidráulicas e o total de habitantes da bacia hidrográfica do rio Brígida (Equação 2). Esse procedimento permitiu estimar a disponibilidade de água per capita por ano para diferentes cenários populacionais (UNESCO, 2003).

$$DHHP = \frac{RESt}{Pt} \quad (2)$$

Onde, DHHP representa a disponibilidade de água por habitante por ano, RESt corresponde ao total de água armazenado pelos reservatórios da bacia por ano e Pt é a população total da bacia para um determinado ano.

Cenário 2

Para o Cenário 2 foram incluídos os possíveis efeitos das mudanças climáticas antropogênicas. Nesse sentido, utilizou-se dois modelos climáticos, os quais foram devidamente testados para verificação da capacidade de representação do clima atual, por meio do *baseline* dos modelos. Para esta investigação, optou-se por utilizar simuladores que projetassem diferentes condições de clima futuro. Desse modo, foram selecionados os modelos *Canadian Center for Climate Modeling and Analysis* (CCCMA) e o *Model for Interdis- ciplinary Research on Climate* (MIROC). O modelo climático CCCMA conta com uma resolução oceânica de 1,8º x 1,8°, simula 29 níveis verticais da atmosfera e possui resolução espacial de 1,9° x 1,9°. Em relação ao MIROC, este possui maior detalhamento, com resolução de 0,5° - 1,4° x 1,4°, com 47 níveis verticais para componente oceânico. Outro ponto diferencial no MIROC é a inclusão dos efeitos dos gases estufa, assim como a variação da radiação solar, considerada constante no CCCMA (JIANG et al., 2012).

Foram utilizados dados diários de temperatura máxima e mínima e de precipitação pluviométrica. As informações foram devidamente organizadas e introduzidas no modelo hidrológico SWAT para simulação dos cenários. Nesse caso, optou-se por empregar o cenário B2 dos respectivos modelos, considerado mais brando quanto à intensidade do aquecimento global, para o período entre 2046 a 2064.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

TESTE DE EFICIÊNCIA DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

A Figura 2 exibe a curva comparativa entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o período de 2001 a 2014, após realização da calibração. Os diferentes coeficientes estatísticos empregados para avaliação do desempenho do modelo na simulação de vazão indicam que os resultados são consistentes. O teste de Nash-Sutcliffe (1970), por exemplo, revelou um ajuste classificado como muito bom, uma vez que

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

alcançou um valor de 0,92. Vale ressaltar que este coeficiente varia de 0 a 1, onde valores próximos de 0 representam simulações ineficientes, enquanto os valores próximos de 1 sugerem um ajuste próximo do ideal, conforme Willmott et al. (2015). O R^2 também apresentou valor de 0,92, assim como o coeficiente de Pearson, cuja correlação apresentou significância estatística com intervalo de confiança de 95%.

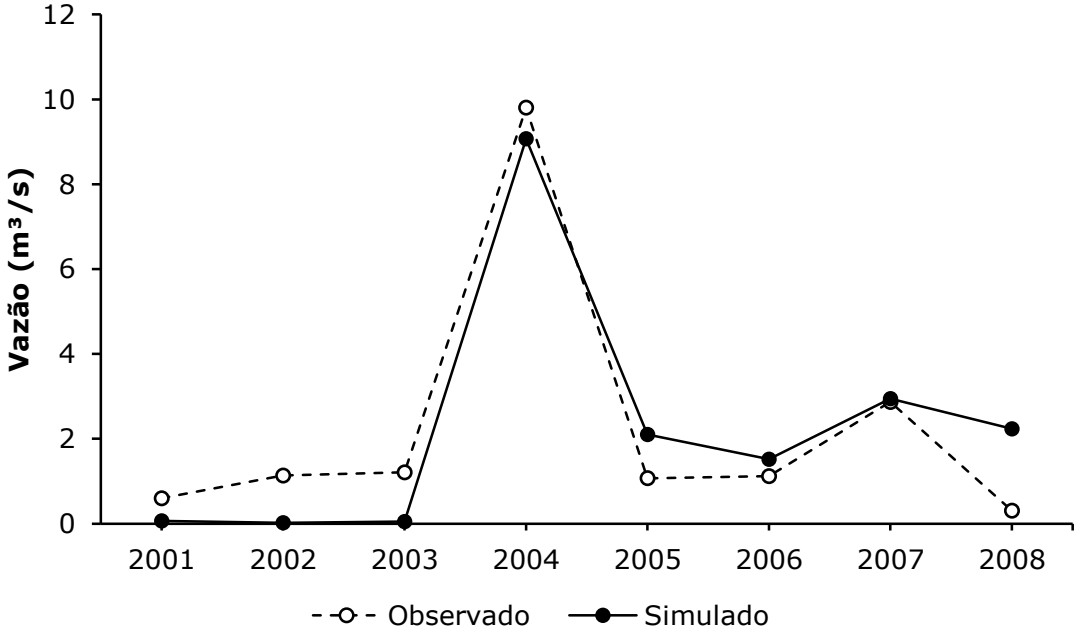

Figura 2 – Comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o rio Brígida.

Em relação ao volume de água simulado pelo SWAT para o período, comparado ao observado, este foi avaliado por meio do PBIAS, que se encontra dentro de um intervalo classificado como muito bom (0,6%). Para este teste, os valores próximos de zero são considerados ideais. Quando positivos, indicam que o modelo está superestimando o fluxo em relação ao observado, enquanto os negativos referem-se aos fluxos subestimados. Ressalta-se que a variação máxima tolerada ocorre entre -25% e 25% (LI et al., 2009).

Outro índice que atesta a eficiência do modelo SWAT para a simulação da vazão do rio Brígida é o *ratio of the root mean Square error to the standard deviation of measured data* (RSR), que variou dentro da faixa do ótimo, conforme sugerido por Moriasi et al. (2007). Os autores destacam que um modelo bem ajustado deve variar entre 0 e 0,5. Onde 0 corresponde a um ajuste perfeito e 0,5 a um bom ajuste. Esse teste obedece à razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações, sendo esta uma das estatísticas bem utilizadas nas análises de desempenho de modelos hidrológicos.

Ao analisar o comportamento da curva simulada em relação a observada, verifica-se que entre o período de 2001 a 2003 o SWAT subestima a vazão. A diferença no escoamento superficial simulado pelo modelo e o observado é de 1 m^3/s, em média. Vale ressaltar que este resultado pode ser considerado satisfatório, uma vez que os modelos tendem a encontrar dificuldades para

simular as vazões entre 0 e 1 m^3/s, conforme estudos publicados por (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; WANG et al., 2009). Isto ocorre devido as incertezas quanto a estrutura conceitual dos modelos, a forma como as variáveis são dinamizadas e os dados de entrada (ARNOLD et al., 2012).

Por outro lado, é possível observar que no período entre 2001 e 2003, a precipitação pluviométrica foi inferior aos demais anos, principalmente ao de 2004, para o qual o modelo apresentou melhor desempenho, com erro relativo de apenas 7,4%. De acordo com Ferreira et al. (2017), o referido ano é classificado como atípico, uma vez que a precipitação média na bacia alcançou 830,5 mm, cerca de 30% acima da média histórica. Este resultado, de modo geral, diverge do que normalmente é encontrado em outros estudos (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; MELO NETO et al., 2014), visto que é comum os modelos não apresentarem bom desempenho na simulação de extremos hidrológicos.

Entre 2005 e 2008, o SWAT consegue detectar bem o padrão de variação da vazão observada, ainda que superestime o volume para todos os anos. O maior erro de estimativa para este intervalo foi de 96%, isto para o ano de 2005. Apesar de parecer uma variação expressiva da estimativa, é importante ressaltar que em valores brutos a diferença entre a vazão média observada e a simulada é de apenas 1,02 m^3/s. O maior acerto foi verificado para o ano de 2007, com erro de estimativa de apenas 2%. Quando considerada a média para o período, a variação entre o observado e o simulado chega a 64%, valor inferior a 1 m^3/s. De modo geral, os resultados sugerem que o modelo SWAT demonstrou bom ajuste para simulação do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Brígida.

CENÁRIO DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA FRENTE ÀS MUDANÇAS DEMOGRÁFICAS

Inicialmente, os resultados para o cenário de disponibilidade hídrica foram baseados apenas nas mudanças demográficas e manutenção das atuais estruturas de armazenamento de água (Figura 3). Como pode ser observado, o ritmo de crescimento populacional se mantém crescente até o ano de 2040, quando a partir de então verifica-se manutenção da quantidade de habitantes na bacia até o ano de 2060. Considerou-se que o crescimento da população na bacia hidrográfica do rio Brígida é nulo a partir de 2040, devido as projeções realizadas por ONU e IBGE. Segundo estes órgãos, a partir do referido ano deve haver uma tendência de estabilização da taxa de crescimento populacional.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

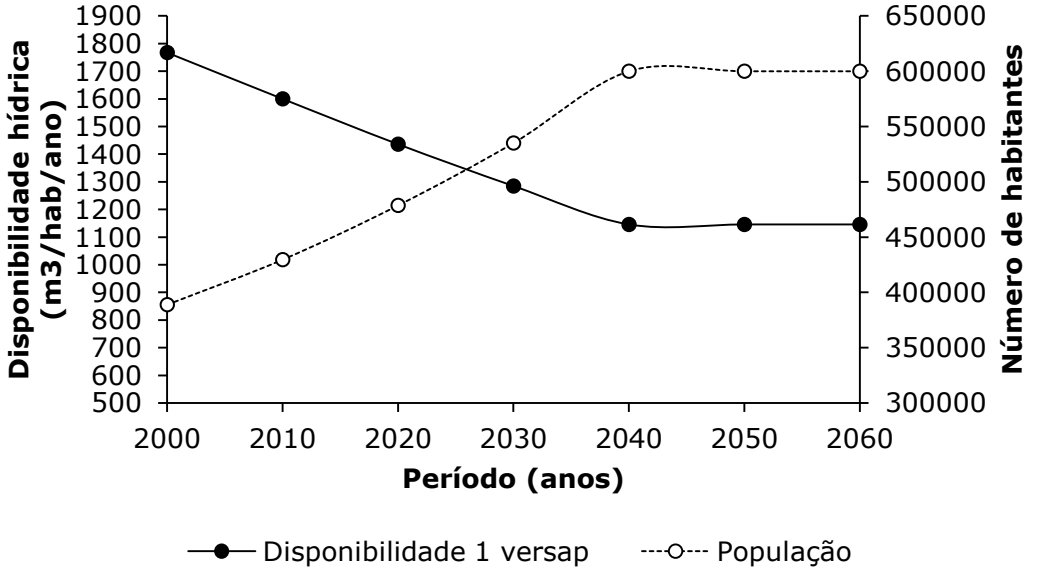

Figura 3 - Quadro de disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida frente às mudanças demográficas.

Em relação cenário de disponibilidade hídrica potencial na região, isto é, quando se considera que todos os reservatórios atingem capacidade máxima todos os anos, nota-se que em 2000 a disponibilidade per capita, por ano, era, em média, de 1767 m^3/hab/ano, o que, segundo parâmetros estabelecidos por UNESCO (2003), representa uma situação de conforto hídrico (≥1700 m^3/hab/ano). Para o ano de 2010, verifica-se redução do potencial de disponibilidade, quando as estimativas indicam que a média é aproximadamente de 1600 m^3/hab/ano, situação classificada como de Estresse Hídrico. Tal resultado deve-se ao aumento do contingente populacional para o período, desacompanhado de investimentos na infraestrutura. Segundo IBGE (2010), o número de habitantes na bacia passou de 388.979 em 2000 para 429.685 em 2010, um incremento de 10,4%.

O ano de 2010 marca uma nova perspectiva para o potencial de disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Brígida. A partir deste marco, há um persistente declínio da quantidade de água por habitante, tendência que só é modificada e estabilizada a partir de 2040, quando a taxa de crescimento é nula. Para este período, a queda da disponibilidade potencial alcança 35%, o que representa uma redução bruta de 640 m^3/hab/ano. Desse modo, a situação população é classificada como de Estresse hídrico.

Neste caso, o déficit hídrico geral na região, para o futuro, pode ser de em torno de 380.000.000 m^3. Este seria o volume necessário para que o limiar mínimo recomendo pela ONU fosse alcançado. É importante reforçar que estas estimativas são baseadas no potencial de armazenamento dos reservatórios atuais, ou seja, é preciso que todos atinjam capacidade máxima todos os anos, cenário extremamente raro dada as características climáticas da região. Outro agravante refere-se aos conflitos pelo uso na água bacia hidrográfica do rio Brígida. Segundo dados de APAC (2018), dentre os reservatórios empregados na simulação, os dois maiores, Entremontes e Chapéu, que juntos podem reter 527.000.000 m^3 de água, são utilizados para irrigação, enquanto os demais

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

possuem uso misto (abastecimento/irrigação). O único açude utilizado exclusivamente para o abastecimento humano é Lagoa do Barro, que é capaz de armazenar apenas 3,3% de toda a água retida nos reservatórios da bacia hidrográfica do rio Brígida.

Uma das alternativas para minimizar o problema seria a construção de novas bacias hidráulicas, que conforme os dados expostos aqui, já eram necessárias a partir do ano de 2010. Para que o potencial de disponibilidade hídrica per capita na região alcance um limiar considerado ideal, é necessário um incremento de 54,1% no volume de água potencialmente armazenável nos reservatórios da bacia do rio Brígida, o que representa a construção de uma ou mais bacias hidráulicas com capacidade de armazenamento de 379.547.967 m^3. Todavia, isto dependeria de fatores ambientais, condições técnicas e recursos financeiros.

É notório que o desafio vai além do aumento da oferta de água na região. A gestão dos conflitos pelo uso e reaproveitamento da água é algo imprescindível, principalmente em um país como o Brasil, de vocação agrícola e vasto histórico de desperdício. Ressalta-se que esta realidade é observada em outras localidades com características físicas semelhantes. No México, por exemplo, a média de consumo per capita é análoga à situação brasileira quanto às retiradas para o abastecimento urbano e rural (355 m^3/s), frente a uma disponibilidade hídrica total de 1.449 $m^3/s/hab$, o que representa uma disponibilidade per capita de 270 litros/hab/dia (FAO, 2010). Apesar do volume encontra-se acima do recomendado pela ONU (110 litros/hab/dia), ressalta-se que não é descontado deste valor os múltiplos usos da água, desperdício e contaminação, o que acaba por reduzi-lo de maneira importante, principalmente em área onde o referido recurso é naturalmente escasso devido as condições físico-naturais. Acrescenta-se que, atualmente, as estimativas ainda são imprecisas em função da escassez de dados, sobretudo em países em desenvolvimento, onde, segundo Rego Filho et al. (2014), há uma grande demanda hídrica para irrigação, acompanhada de um baixo índice de distribuição de abastecimento humano.

Na Figura 3, observa-se o padrão pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Brígida, assim como a curva da temperatura, ambos baseados na normal climatológica computada entre 1961 e 1991. Encontram-se expostos, também, os dados de temperatura e precipitação simulados pelo modelo CCCMA e MIROC, que simulam o clima atual (1961 a 2000) e cenário futuro (2046 a 2064). Vale ressaltar que o cenário projetado corresponde ao B2, considerado mais moderado. Em relação ao CCCMA, observa-se que o mesmo consegue representar bem o padrão de distribuição da precipitação pluviométrica ao longo do ano. A análise estatística realizada a partir da comparação entre o *baseline* do modelo e a normal climatológica indica que o CCCMA obteve um índice de acerto de 70%, estimativa obtida a partir do coeficiente de Pearson, o qual indicou significância estatística para a correlação.

O volume de chuvas para período correspondente a pré-estação chuvosa e estação chuvosa, é superestimado para a maioria dos meses, o qual março e abril são as únicas exceções, uma vez que o CCCMA subestima o volume de chuvas em cerca de 60 e 70 mm, respectivamente. Em relação a estação seca, os valores simulados encontram-se mais próximos ao observado. Ainda assim, entre maio e agosto, é possível observar que houve subestimativa da

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

precipitação pluvial, resultado que está alinhado ao estudo conduzido por Marengo (2007) para o Nordeste. O autor testou para uma série de modelos para simulação do clima futuro da região, entre eles, o CCCMA. Os resultados indicaram, também, que o modelo superestima principalmente o volume de chuvas correspondente a transição da primavera para a pré-estação chuvosa.

Quanto ao cenário projetado para 2046 e 2064, quando são esperadas mudanças mais significativas, para o período que compreende a estação seca, de maio a outubro, verifica-se que nos meses iniciais (maio e julho) a precipitação projetada pelo modelo CCCMA é inferior ao observado, em média 39,3%. De agosto a dezembro, período referente ao final da estação seca (agosto a outubro) e pré-estação chuvosa (novembro a dezembro), o modelo aponta aumento sistemático da precipitação. Conforme a base de dados, esta variação é em torno de 56% (agosto), 671% (setembro), 378% (outubro) 209% (novembro) e 108% (setembro). O período mencionado é o que mais contribui para o incremento total na precipitação. Ainda que se verifique reduções para alguns meses, principalmente para o período seco, o aumento total da chuva é da ordem de 21%.

Em relação a temperatura, o CCCMA projetou incremento médio em torno de 2,1 °C. Os meses de julho, agosto e setembro chamam atenção devido ao aumento de 4,1, 5,1 e 3,6 °C, respectivamente. Também é possível notar significativa mudança no padrão de distribuição anual. No cenário atual, os meses que registram temperaturas mais baixas ao longo do ano são junho, julho e agosto, diferente do que ocorre quando se leva em consideração as projeções para período entre 2046 e 2064, para o qual é possível verificar que as temperaturas mais baixas passam a se concentrar no final da estação chuvosa (abril e maio).

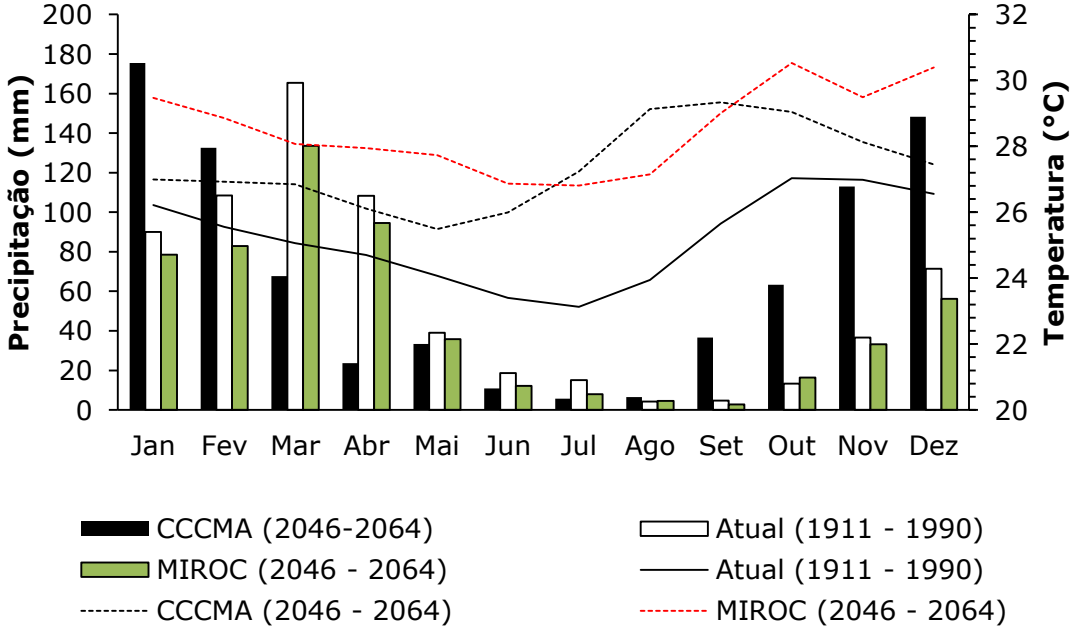

Figura 3 - Padrão da precipitação pluviométrica e temperatura média do ar atual e projetada para a bacia hidrográfica do rio Brígida.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Quanto ao cenário climático projetado pelo modelo MIROC, para a precipitação pluviométrica, os dados indicam redução sistemática para a maior parte do ano, cuja única exceção é o mês de outubro. Em termos brutos, a maior redução da pluviosidade é constatada para os meses de fevereiro (25,5 mm) e março (31,8 mm). Proporcionalmente, a maior queda no volume de chuvas é para o mês de julho, cerca de 90%. Quando considerado o volume anual para o cenário atual e o projetado pelo modelo, a redução alcançou 17%.

Para a temperatura média do ar, é verificou-se que a curva térmica é bastante semelhante a observada para o século passado, porém segue a tendência de aumento constatada a partir dos dados do CCCMA. Por outro lado, existem diferenças importantes em relação ao que foi simulado por cada modelo. Enquanto o CCCMA aponta um aumento médio de temperatura da ordem de 2,1 °C, o MIROC indica variação positiva de 3,3 °C.

Em relação aos meses proporcionalmente mais quentes, ou seja, aqueles para os quais se constatou maior aumento de temperatura, o CCCMA indica ocorrência em agosto (5,1 °C), mês com menores temperaturas no cenário atual, enquanto para o MIROC o mês que deve receber maior incremento térmico é o de dezembro (3,8 °C), que corresponde ao período que apresenta maiores temperaturas longo ano.

De maneira geral, os resultados encontrados a partir das simulações do CCCMA e MIROC corroboram Marengo (2007). O autor desenvolveu um amplo estudo para todo o Brasil, onde foram testados vários modelos de predição do clima futuro. Em relação à temperatura, os modelos CCCMA e MIROC apontaram tendência de aquecimento para a maior parte da região Nordeste do Brasil durante a segunda metade do presente século, com anomalias que variaram, em média, de 1 a 2° C, isto para o cenário B2.

Quanto a precipitação pluviométrica, o autor identificou tendência de aumento da ordem de 1 a 1,5 mm para o CCCMA, enquanto o MIROC projetou anomalias negativas em torno de 0,5 mm. Outros modelos testados por Marengo (2007), como GDFL e HadCM3, também divergiram quanto as estimativas para diferentes áreas do Brasil e do Nordeste. Este resultado é compreensível na medida em que os simuladores climáticos tendem a evoluir e se tornam mais complexos, apresentando estrutura técnica e conceitual distintas.

CENÁRIO DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA FRENTE ÀS MUDANÇAS DEMOGRÁFICAS

No que se refere a disponibilidade hídrica per capita, ainda há uma intensa discussão quanto ao peso do clima e do crescimento populacional para a configuração de cenários adversos, na qual a escassez é frequentemente associada a uma possível redução das chuvas. Por outro lado, os resultados encontrados no presente estudo sugerem que o crescimento demográfico é uma variável de extrema importância para os prognósticos futuros. Isto fica mais evidente quando analisados os resultados expostos na Figura 4, que apresenta o quadro de disponibilidade hídrica per capita da bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na evolução populacional e cenários climáticos projetados a partir do CCCMA e MIROC.

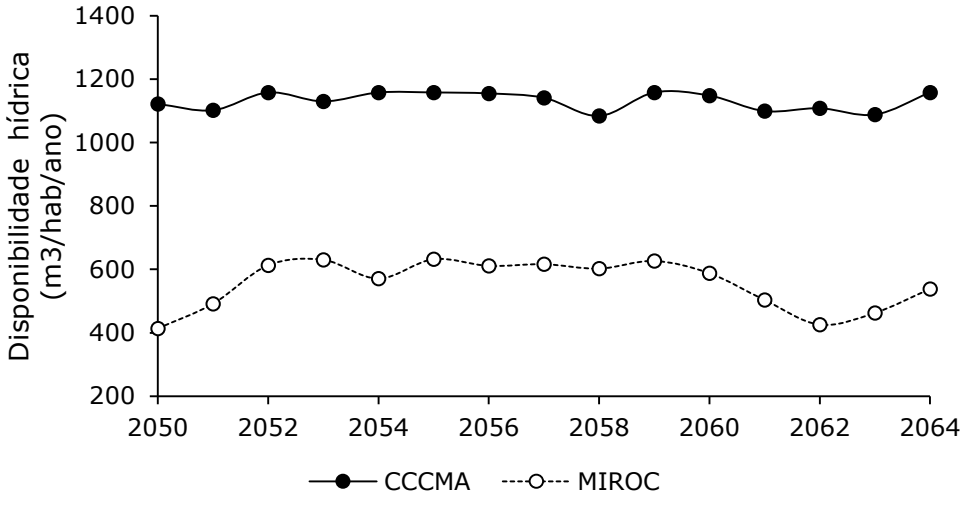

Figura 4 – Disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida com base nas projeções dos modelos climáticos CCCMA e MIROC para o período de 2046 a 2064.

Em condições de aumento da umidade, a disponibilidade hídrica per capita se mantem em um intervalo classificado como de Estresse Hídrico (< 1700 m^3/hab/ano) para toda a série temporal analisada. No período entre 2050 e 2064, a quantidade média de água por habitante é de 1130 m^3/hab/ano, o que equivale a 94,2 m^3/mês e 3 m^3/dia, limiar inferior ao recomendo pela ONU.

A disponibilidade hídrica baseada na projeção do modelo climático CCCMA reflete uma condição onde há um incremento de 21% na quantidade de chuvas e menor incidência de eventos de seca, conforme pode ser observado no próprio comportamento da curva de disponibilidade. Isto indica que o crescimento da população, desacompanhado de investimentos na construção de novas estruturas para armazenar água, é decisivo para a consolidação desta situação.

Quanto ao cenário modelado a partir dos dados do MIROC, estes são ainda mais preocupantes. A combinação entre a redução da precipitação e incremento no contingente populacional sugere a configuração de um quadro de disponibilidade hídrica que varia entre 400 e 600 m^3/hab/ano para a segunda metade do presente século. Os primeiros anos da década de 2050 estão entre os que refletem uma situação mais grave. Neste intervalo, o total de habitantes na bacia é de 600 mil, 39,6% superior ao contingente estimado em 2010. A situação hídrica da população para este cenário, com manutenção da atual infraestrutura e uso e cobertura da terra, é classificada como de Escassez Hídrica. A condição apresenta uma ligeira melhora a partir de 2052, quando a curva da disponibilidade ultrapassa 500 m^3/hab/ano e se mantém até assim até 2060, expondo a população a uma situação de Estresse Hídrico. Nos anos finais, verifica-se piora da situação, amenizada apenas no último ano da série.

Outros resultados semelhantes foram encontrados por Montenegro e Ragab (2010) em estudo no Riacho Mimoso (PE), que pertence à Sub-bacia do Rio Ipanema. A partir da simulação de três cenários hipotéticos, nos períodos entre 2010 e 2039, 2040 e 2069, e de 2070 a 2099, com base em projeções de precipitação do modelo CSMK3 e HadCM3, os autores identificaram que, em um

cenário seco, o escoamento superficial poderia ser reduzido em até 34% de 2010 a 2039, até 65% de 2040 a 2069, e, até 72% de 2070 a 2099.

É importante frisar que apesar dos estudos sobre a relação entre quantidade e qualidade dos recursos hídricos, e os possíveis cenários de mudanças climáticas ao redor do mundo, darem maior ênfase às bacias hidrográficas na América do Norte, Europa e Austrália, segundo o Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), as conclusões gerais a respeito dos impactos possíveis sobre as bacias localizadas em regiões semiáridas, como um todo, parecem se aplicar também ao Nordeste brasileiro, como demonstrado na presente pesquisa.

CONCLUSÕES

Em relação a calibração do SWAT, os três métodos estatísticos empregados para avaliação de seu desempenho, em escala anual, demonstraram resultados positivos. Estes, indicaram que o modelo é capaz de simular, com alto grau de confiabilidade, os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Brígida.

Quanto aos modelos climáticos empregados na projeção da precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, as análises estatísticas permitiram concluir que a capacidade dos mesmos de representar o clima atual varia de regular a boa. Entretanto, em relação ao CCCMA, o modelo MIROC apresentou resultados mais consistentes e mais próximos que é projetado pelo IPCC.

Quanto aos cenários de disponibilidade hídrica per capita, estes responderam, até certo ponto, ao padrão climático modelado por cada simulador. Verificou-se que o crescimento populacional foi decisivo para a configuração de situação de Estresse Hídrico e Escassez Hídrica. Mesmo com o aumento das condições de umidade indicadas através do CCCMA, as projeções revelaram situação desfavorável para praticamente todo o período, condição que só se agravou a partir quando considerados os resultados gerados pelo MIROC.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de estudos concedida ao autor principal da presente pesquisa. À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela estrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

AHMED, Y. et al. **Assessment of the relation between water quality and water quantity for international metropolitan cities**. World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems. **Anais**...Austin: 2015Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84935142104&partnerID=40&md5=bd6a8fd45f267f0a08bbce38cd9d3f05>

APAC. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=13>. Acesso em: 4 abr. 2018.

ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 100–111, 2013.

BOSSIO, D.; GEHEB, K.; CRITCHLEY, W. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 536–542, 2010.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

DAVIES, E. G. R.; SIMONOVIC, S. P. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. **Advances in Water Resources**, v. 34, n. 6, p. 684–700, 2011.

FERREIRA, P. DOS S. et al. AVALIAÇÃO DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM UMA REGIÃO SEMIÁRIDA DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 113–134, 2017.

IBGE. Manual Técnico da Vegetação BrasileiraInstituto Brasileiro de Geografia e

Estatística - IBGE. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>.

JIANG, J. H. et al. Evaluation of cloud and water vapor simulations in CMIP5 climate models Using NASA "A-Train" satellite observations. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 14, 2012.

LI, Z. et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 35–42, 2009.

LOPES, H. L. et al. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1210–1219, 2010.

MARENGO, JOSÉ A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo – Brasília: MMA, 2007. 2ª edição.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31–44, 2015.

MELO NETO, J. O. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2003, p. 177–188, 2014.

MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: A modelling study. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 19, p. 2705–2723, 2010.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.E. River flow forecasting through conceptual models - Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10, (3), 1970, p.282-290.

REGO FILHO, M. T. N.; BRAGA, A. C. R.; CURI, R. C. A dimensão da disponibilidade hídrica: uma análise entre a conjuntura brasileira e o relatório de desenvolvimento mundial da água. **Ambiência Guarapuava**. Paraná, v.10 n.1 p. 111 - 124 Jan./Abr. 2014 ISSN 1808 – 0251 DOI:10.5935/ambiencia.2014.01.09

ROCHA, C.H.B.; BRITO FILHO, L.F.B.; SILVA, J.X. Geoprocessamento aplicado a

relação de locais para implantação de aterros sanitários: o caso de Mangaratiba – RJ. In. SILVA, J.X.; ZAIDAN, R.T. (Orgs.). **Geoprocessamento e análise**

ambiental. 5ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. P.179-216.

SILVA, E. R. A. C.; MIRANDA, R. de Q.; FERREIRA, P. dos S.; GOMES, V. P.; GALVÍNCIO, J. D. Estimativa do Estresse Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Riacho do Pontal-PE. ***Caderno de Geografia***, v.26, n.47, 2016. DOI 10.5752/p.2318-2962.2016v26n47p844

SORENSON, S. B.; MORSSINK, C.; CAMPOS, P. A. Safe access to safe water in low income countries: Water fetching in current times. **Social Science and Medicine**, v. 72, n. 9, p. 1522–1526, 2011.

UNESCO. **Água para todos, água para la vida**. Paris, 2003.

WILLMOTT, C. J., Robeson, Scott M., Matsuura, Kenji., Ficklin, Darren L. Assessment of three dimensionless measures of model performance. **Environmental Modelling and Software**, v. 73, p. 167–174, 2015.

WANG, J., Huang, Jikun., Rozelle, Scott., Huang, Qiuqiong., Zhang, Lijuan. Understanding the Water Crisis in Northern China: What the Government and Farmers are Doing. **International Journal of Water Resources Development**, v. 25, n. 1, p. 141–158, 2009.