



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

THALES BRUNO RODRIGUES LIMA

**RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA GRANDE BACIA HIDROGRÁFICA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO DIANTE DE CENÁRIOS DE TRANSPOSIÇÃO
HÍDRICA E RACIONALIZAÇÃO DO USO DE RESERVATÓRIOS NÃO
ESTRATÉGICOS**

FORTALEZA

2020

THALES BRUNO RODRIGUES LIMA

RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA GRANDE BACIA HIDROGRÁFICA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO DIANTE DE CENÁRIOS DE TRANSPOSIÇÃO HÍDRICA E
RACIONALIZAÇÃO DO USO DE RESERVATÓRIOS NÃO ESTRATÉGICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Hidrologia e Hidrossedimentologia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L711r Lima, Thales Bruno Rodrigues.
Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos / Thales Bruno Rodrigues Lima. – 2020.
94 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.
Coorientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.
1. Infraestrutura hídrica. 2. Modelagem hidrológica. 3. Transposição de bacias. 4. Pequenos açudes . 5. Gestão dos recursos hídricos. I. Título.

THALES BRUNO RODRIGUES LIMA

RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA GRANDE BACIA HIDROGRÁFICA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO DIANTE DE CENÁRIOS DE TRANSPOSIÇÃO HÍDRICA E
RACIONALIZAÇÃO DO USO DE RESERVATÓRIOS NÃO ESTRATÉGICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Hidrologia e Hidrossedimentologia.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. George Leite Mamede (Coorientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Deborah Mithya Barros Alexandre
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmão pelos incontáveis esforços diários e por todo o carinho e atenção.

Aos meus familiares que contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

À minha companheira e seus familiares por todo o apoio e atenção.

Aos professores Pedro Henrique Augusto Medeiros e George Leite Mamede pela imensa atenção, paciência e disponibilidade para a condução do presente trabalho.

Aos membros da banca, professor José Carlos de Araújo e Dra. Deborah Mithya Barros Alexandre, por aceitarem prontamente o convite e pelas contribuições a este trabalho.

Aos professores e professoras do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial aos professores Carlos Alexandre e Adunias dos Santos Teixeira por todo o apoio ao longo do mestrado.

Aos colaboradores do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos amigos e amigas do PPGEA e do HIDROSED por toda a parceria e contribuição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Enfim, encontrar parceiros humanos e idealistas para defender medidas que estanquem êxodos desnecessários, que dignifiquem a cidadania de homens integrados em uma das mais vigorosas culturas populares conhecidas no mundo (AB' SÁBER, 2003, p. 100).

RESUMO

A escassez hídrica tem afetado um número crescente de pessoas ao redor do mundo, sendo as comunidades das regiões áridas e semiáridas as mais afetadas. No semiárido brasileiro, a construção de reservatórios foi a principal estratégia para ampliar a oferta hídrica da região, culminando com o estabelecimento de uma densa rede de reservatórios em que pequenos e grandes reservatórios desempenham papéis complementares no sistema hídrico estabelecido. Diante da ampliação de demandas e das recorrentes secas na região, outras estruturas hídricas tais como poços, cisternas de placa e recentemente canais de transposição de água têm sido direcionados para as bacias hidrográficas do nordeste setentrional para superar o déficit hídrico local. Na perspectiva de gestão hídrica, o presente trabalho buscou analisar a resposta hidrológica da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe por meio do estudo do volume armazenado em reservatórios estratégicos (Arneiroz II, Banabuiú, Benguê, Canoas, Castanhão, Cedro, Fogareiro, Orós, Pedras Brancas, Quixeramobim, Riacho do Sangue e Trussu) considerando os seguintes cenários: uso intenso da água de pequenos reservatórios e transposição do Rio São Francisco direcionada ao Açude Castanhão. Inicialmente, na etapa de calibração/validação do modelo WASA, evidenciou-se a sensibilidade deste aos parâmetros condutividade hidráulica do embasamento cristalino e condutividade hidráulica saturada dos solos. O modelo WASA simulou satisfatoriamente ($NSE > 0,5$) o volume armazenado em 4 (Açudes Cedro, Orós, Pedras Brancas e Trussu) dos 12 reservatórios avaliados. Nos demais, reproduziu a dinâmica de enchimento e esvaziamento dos reservatórios. O primeiro cenário avaliado aponta que o uso intenso da água dos pequenos reservatórios não compromete o volume acumulado nos reservatórios estratégicos. No cenário de transposição (2002-2011), verificou-se que a transferência hídrica reduziria em 247, 51, 32 e 1 dia o período em que o volume do Açude Castanhão estaria abaixo de 15%, 20%, 25% e 30%, respectivamente. Assim, o uso intenso da água de pequenos açudes e a transposição são estratégias que podem ser empregadas simultaneamente para o atendimento de demandas distintas, objetivando assegurar a segurança hídrica da região.

Palavras-chave: Infraestrutura hídrica. Modelagem hidrológica. Transposição de bacias. Pequenos açudes. Gestão dos recursos hídricos.

ABSTRACT

The water scarcity has affected an increasing number of people around the world, with communities in the arid and semi-arid regions being the most affected. In the Brazilian semi-arid, the construction of dams was the main strategy to improve the water availability of the region, culminating with the establishment of a dense reservoir network where small and big reservoirs play complementary tasks at the water arrangement established. In view of the increasing demands and recurrent droughts in the region, other water structures such as wells, cisterns and recently water transfer channels have been directed to the hydrographic basins of Northern Northeastern to overcome the local water deficit. From a water management perspective, the present work sought to analyze the hydrologic response of Jaguaribe River Basin by studying the volume stored in strategic reservoirs (Arneiroz II, Banabuiú, Benguê, Canoas, Castanhão, Cedro, Fogareiro, Orós, Pedras Brancas, Quixeramobim, Riacho do Sangue e Trussu) considering the following scenarios: intense water use from small reservoirs and transposition of the São Francisco River to the Castanhão reservoir. Initially, in the calibration/validation of the WASA model, its sensitivity to the hydraulic conductivity of the crystalline basement and saturated hydraulic conductivity of the soil was evidenced. The WASA model satisfactorily simulated ($NSE > 0.5$) the volume stored in 4 (Cedro, Orós, Pedras Brancas and Trussu reservoirs) of 12 analyzed reservoirs. In the others, it reproduced the dynamic of filling and emptying the reservoirs. The first scenario evaluated points out that the intense use of water from small reservoirs does not compromise the volume accumulated in strategic reservoirs. In the transposition scenario (2002 – 2011), it was verified that the water transfer would reduce by 247, 51, 32 and 1 day the period in which the volume of the Castanhão reservoir would be below 15%, 20%, 25% and 30%, respectively. Thus, the intense water use from small dams and the transposition are strategies that can be used simultaneously to meet different demands, aiming to ensure water security in the region.

Keywords: Hydric infrastructure. Hydrological modelling. Inter-basin transfer. Small reservoirs. Water resources management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1	Hidrologia de regiões semiáridas	13
3.2	Densas redes de reservatórios superficiais	16
3.3	Transposição de bacias hidrográficas	18
3.4	Modelagem hidrológica	24
3.4.1	<i>Modelo WASA</i>	27
4	MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1	Área de estudo	33
4.2	Modelo WASA	35
4.2.1	<i>Processos hidrológicos simulados no modelo</i>	35
4.2.2	<i>Parametrização</i>	39
4.3	Cenários	47
4.3.1	<i>Uso intenso da água de pequenos reservatórios</i>	48
4.3.2	<i>Transposição do Rio São Francisco</i>	50
5	RESULTADOS	52
5.1	Calibração/validação do modelo	52
5.2	Impacto do uso intenso da água de pequenos açudes na dinâmica hidrológica	65
5.3	Impacto da Transposição do Rio São Francisco na dinâmica hidrológica .	71
6	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A - EVOLUÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA BHJ	83

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica, em termos quantitativos e qualitativos, representa uma baixa disponibilidade de água para o atendimento das demandas sendo causada por fatores naturais e antrópicos tais como reduzida quantidade de recursos hídricos na região, incapacidade das instituições em garantir um abastecimento regular e ausência de uma adequada infraestrutura hídrica (WWAP, 2015), manifestando-se nas áreas afetadas de forma temporária ou permanente (CARRASCO *et al.*, 2013). É uma realidade verificada em muitas bacias hidrográficas ao redor do mundo, representando um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, além de constituir-se em um requisito básico a ser superado para que a sustentabilidade social, econômica e ambiental seja alcançada (RICHTER, 2015; BRAUMAN *et al.*, 2016; SALINAS *et al.*, 2019).

O incremento da população global, o crescimento econômico, a manutenção do uso de técnicas ineficientes de irrigação, a insuficiente infraestrutura hídrica para o armazenamento de água e as limitações dos sistemas de manejo hídrico têm sido considerados fatores responsáveis pela ocorrência da escassez hídrica, acentuadamente nas regiões áridas e semiáridas (CHITSAZ; AZARNIVAND, 2017). Adicionalmente, as políticas de produção agrícola e energética que favorecem grandes corporações em detrimento das comunidades subdesenvolvidas tornam o acesso à água uma realidade distante para inúmeras populações ao redor do globo (BARLOW, 2015).

O conjunto desses fatores culminam na incapacidade da oferta hídrica em suprir os múltiplos usos atuais e futuros. O crescente desajuste entre oferta e demanda tende a produzir uma ampla crise hídrica, observada não somente nas cidades de clima árido e semiárido. A grande São Paulo ilustra bem esta realidade (MARENGO *et al.*, 2015). O Fórum Econômico Global (2015) indicou que a crise hídrica é o principal risco global considerando os potenciais efeitos adversos.

Entre estes, severos impactos sobre a segurança alimentar e a prosperidade econômica já são evidenciados em diversos países (SCHEWE *et al.*, 2013; BARLOW, 2015). Numericamente, Bronstert *et al.* (2014) destacam que cerca de um terço da população mundial esteja estabelecida em países que enfrentam condições de stress hídrico. Mekonnen e Hoekstra (2016) vão adiante e apontam que cerca de 4 bilhões de pessoas, dois terços da população global, vivem sob condições de severa escassez hídrica por no mínimo um mês ao ano.

Diante desse panorama, o sucesso das comunidades estabelecidas em regiões com limitações hídricas, especialmente zonas áridas e semiáridas, está alicerçado na capacidade dessas em estabelecer eficientes sistemas de gestão e gerenciamento de recursos hídricos, possibilitando um convívio sustentável com a baixa oferta hídrica característica dessas regiões. As estratégias a serem adotadas para garantir um suprimento adequado precisam ser amplamente planejadas e discutidas considerando que as mudanças climáticas previstas tendem a exacerbar a escassez hídrica em escala regional e global (SCHEWE *et al.*, 2013).

O semiárido brasileiro (SAB), situado na região nordeste ocupando uma área de aproximadamente 1 milhão de km² com população de cerca de 30 milhões de habitantes (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; DE ARAÚJO; BRONSTERT, 2016), exemplifica uma região semiárida na qual a escassez hídrica é um relevante problema enfrentado pela sociedade. Produzindo historicamente incontáveis prejuízos econômicos, tensões sociais e desequilíbrios ambientais, amplificados nos períodos de seca. Visando superar as consequências adversas da escassez hídrica, em outras palavras, suplantar a limitação hídrica por meio da compatibilização entre a oferta hídrica e a demanda, a construção de reservatórios foi a estratégia principal implementada pelos governos da região para atender a população estabelecida nos centros urbanos e os grandes usuários. No tocante à população esparsa, cisternas, poços profundos, barragens subterrâneas e pequenos reservatórios têm sido as alternativas para sustentar as demandas hídricas das comunidades rurais. Realidade semelhante é observada em outras regiões áridas do mundo (FOWE *et al.*, 2015).

Além de serem os responsáveis diretos pela implementação dos reservatórios superficiais de grande porte, as administrações públicas estimularam a construção de médios e pequenos açudes por proprietários de imóveis rurais (SARMENTO, 2005). Como consequência dessa política de açudagem, verifica-se no SAB, mais especificamente no semiárido cearense, uma densa rede de reservatórios com significativo número de pequenos açudes (KROL *et al.*, 2011; MAMEDE *et al.*, 2018).

Se as estratégias já mencionadas não foram capazes de solucionar por completo os problemas derivados da escassez hídrica, intensificados com as recorrentes secas e as crescentes demandas, a importação de água da Bacia do São Francisco, que foi secularmente discutida e agora encontra-se em fase de implementação, representa outra estratégia para elevar a oferta hídrica no SAB. Similarmente às demais alternativas, identificar a resposta hidrológica das bacias hidrográficas é fundamental para maximizar os efeitos positivos da ampliação da disponibilidade, além de buscar arranjos hídricos que minimizem efeitos

negativos tanto na bacia doadora quanto nas bacias receptoras, bacias do nordeste setentrional.

No intuito de verificar a resposta hidrológica das bacias hidrográficas do SAB, mais especificamente a Bacia Hidrográfica do Jaguaribe, após a implantação da Transposição do Rio São Francisco, faz-se necessário o uso da modelagem hidrológica. Esta ferramenta simplificadora tem a capacidade de considerar os complexos processos do ciclo hidrológico e as alterações ambientais ocasionadas pela mudança no uso e ocupação do solo (GAYATHRI; GANASRI; DWARAKISH; 2015; HABETS *et al.*, 2018) gerando valores de variáveis hidrológicas tais como infiltração e vazão próximos aos medidos em campo. Ademais, a modelagem hidrológica é amplamente empregada por gestores hídricos como suporte para planejamento e tomada de decisões (ANDRADE *et al.*, 2017).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe diante de diferentes cenários de utilização de sistemas hídricos, utilizando o modelo hidrológico *Model of Water Availability in Semi-Arid Environments* (WASA).

– **Questões científicas**

Se todos os pequenos açudes forem operados para que sua água seja usada intensamente, conforme proposta de Brasil e Medeiros (2019), contrariando a cultura de “poupar água”, como isso impactará os grandes açudes?

Qual é o impacto da transposição do São Francisco na dinâmica hidrológica da bacia do Rio Jaguaribe, particularmente nos volumes acumulados no reservatório Castanhão?

– **Hipótese**

A Transposição do São Francisco garantirá a segurança hídrica para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), concentrando significativos volumes no reservatório Castanhão, enquanto que o uso racional dos pequenos açudes, além de não comprometer o volume a ser acumulado nos grandes reservatórios, possibilitará uma distribuição espacial da disponibilidade hídrica.

2 OBJETIVO

O estudo aqui proposto tem como objetivo geral analisar as respostas hidrológicas da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe em diferentes cenários através da aplicação do modelo hidrológico WASA. Os objetivos específicos são:

- 1 Calibrar e validar o modelo WASA para a Bacia Hidrográfica do Jaguaribe;
- 2 Avaliar a dinâmica hidrológica da bacia em condição atual;
- 3 Quantificar o impacto do uso intenso de água dos pequenos açudes sobre os volumes acumulados nos açudes estratégicos;
- 4 Quantificar o impacto da transposição do rio São Francisco sobre os volumes acumulados no açude Castanhão.

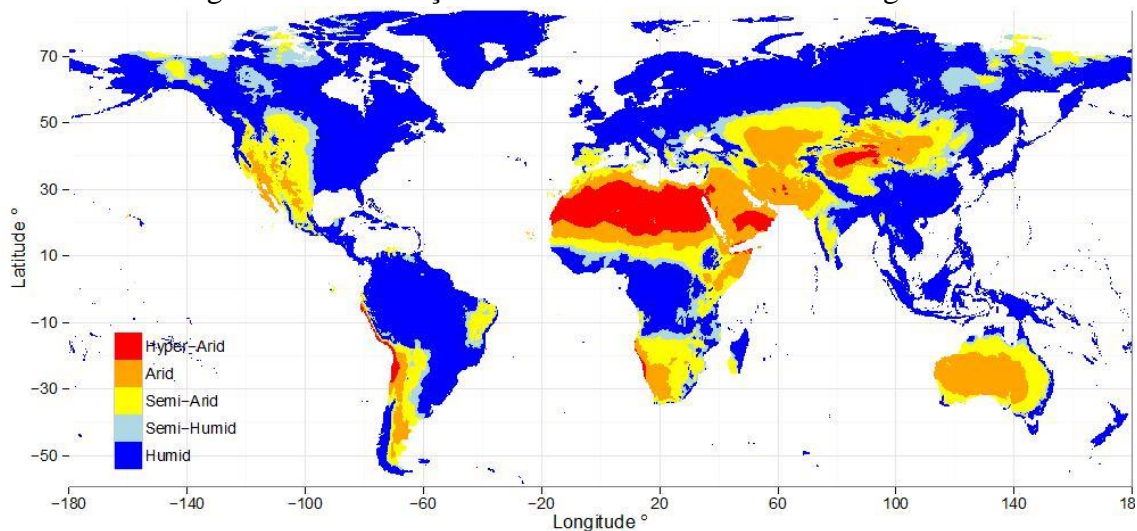
As simulações dos diferentes cenários descritos acima produzirão informações para auxiliar a política e o gerenciamento do uso da água na Bacia Hidrográfica do Jaguaribe.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Hidrologia de regiões semiáridas

As regiões semiáridas cobriam cerca de 15% da superfície terrestre e abrigavam uma parcela de aproximadamente 14,4% da população global no início deste século (SAFRIEL; ADEEL, 2005), evidenciada na Figura 1. Estudos conduzidos por Huang *et al.* (2016) apontam que a maior expansão das terras secas (que além das regiões semiáridas, incluem as regiões de clima hiperárido, árido e sub-úmido seco) em 61 anos (1948-2008) ocorreu em zonas semiáridas. Panorama que somado ao reduzido número de estudos que buscam compreender a dinâmica hidrológica das terras secas (FARRICK; BRANFIREUN, 2013) justifica a investigação dos processos atuantes sobre os escassos recursos hídricos destas regiões, os quais representam o principal obstáculo ao desenvolvimento econômico e social local (BRONSTERT *et al.*, 2000).

Figura 1 - Distribuição das zonas climáticas em escala global



Fonte: <http://ozewex.org/semi-arid-ecosystems-particularly-sensitive-to-mega-droughts/>.
Mapa produzido com base em dados disponibilizadas pelo CGIAR-CSI.

Na perspectiva hidrológica, De Araújo (2012) aponta que a contínua interrupção na disponibilidade natural de água é a característica de maior destaque nas regiões semiáridas. Contrastando com a constante indisponibilidade natural das regiões áridas e com a disponibilidade contínua nas regiões úmidas. Para compreender esta característica particular das regiões semiáridas, o entendimento da dinâmica e particularidades dos processos

hidrológicos atuantes nessas áreas, sintetizados através do conceito de ciclo hidrológico, é fundamental. Entre os principais processos inseridos no ciclo hidrológico, destacam-se: precipitação; infiltração e escoamento; evapotranspiração segmentada em evaporação, transpiração e interceptação vegetal.

Vale destacar que os aspectos qualitativos e quantitativos dos processos hidrológicos estão diretamente condicionados pelo clima da região que na zona semiárida brasileira é do tipo semiárido seco e quente (BSh) conforme o sistema de classificação de Köppen (GAISER et al., 2003), exibindo temperatura entre 24 e 27 °C e incidência solar anual superior a 2500 horas (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013).

No semiárido brasileiro (SAB), a média anual oscila entre 500 e 850 mm sendo que mais de 70% deste total ocorre no quadrimestre de janeiro-abril (DE ARAÚJO, 2012). Após o período chuvoso, um vazio de precipitações que dura de seis a sete meses é observado (AB' SÁBER, 2003). O regime de chuvas também é caracterizado por uma elevada variabilidade interanual (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013) contribuindo para a frequente ocorrência de secas na região (DE ARAÚJO; BRONSTERT, 2016), intensificando a escassez hídrica local. As chuvas convectivas são predominantes exibindo pequena duração e elevada variabilidade espacial e temporal (PILGRIM, 1988). A maior parte das precipitações tem a duração de uma hora ou frações de hora, exibindo elevadas intensidades, sendo a ocorrência de chuvas de cinco horas ou mais muito rara (GÜNTNER, 2002). Característica esta que favorece o escoamento e o posterior armazenamento de água nos reservatórios superficiais.

Por sua vez, a compactação da superfície do solo e a presença de crostas nesta superfície são fatores que contribuem para a reduzida capacidade de infiltração em ambientes semiáridos. A cobertura vegetal esparsa da região protege a superfície do solo apenas de forma parcial. Assim, a energia cinética das gotas de chuva contribuem para a compactação dos solos. A presença de fragmentos de rochas na superfície e macroporos são outros fatores que interferem no processo de infiltração (GÜNTNER, 2002), e conseqüentemente no escoamento (RODRIGUES, 2019).

O escoamento superficial do tipo Hortoniano é considerado o mecanismo predominante ocorrendo em áreas onde a intensidade de precipitação excede a taxa potencial de infiltração (PILGRIM, 1988). Estudos conduzidos na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), inserida no semiárido brasileiro, por Costa (2007), De Araújo e Piedra (2009), Medeiros (2010) e Figueiredo *et al.* (2016) confirmam a relevância deste tipo de escoamento nessas regiões. Em termos de coeficiente de escoamento (coeficiente de *runoff* – CR), o CR médio anual na BEA foi de 6,54%, apresentando um valor máximo e mínimo de 31,08 e

0,13%, respectivamente (COSTA, 2007). Um CR extremamente baixo (inferior a 0,5%) e uma vazão específica de aproximadamente 2 mm por ano é apresentada em Figueiredo *et al.* (2016).

Estes autores também enfatizaram que o número de dias com eventos de precipitação e de escoamento ao longo do ano são muito limitados. Em apenas 12 e 5 dias observou-se eventos de precipitação superior a 10 mm e escoamento, respectivamente. Não apenas a quantificação do escoamento foi abordada por Figueiredo *et al.* (2016). Estatisticamente, avaliou-se as variáveis hidrológicas de maior relevância para explicar o escoamento e o início do escoamento. As precipitações de máxima intensidade em 60 minutos (I_{60}), em 120 minutos (I_{120}) e o total precipitado foram as variáveis que melhor explicaram o escoamento enquanto que a intensidade média e a umidade antecedente do solo apresentam uma contribuição marginal. Entretanto, estudos apontam que a umidade antecedente exerce forte influência sobre a geração do escoamento em regiões semiáridas (SANTOS *et al.*, 2017). Reforçando a complexidade e dinâmica dos processos nessas regiões.

Em relação ao início do escoamento, a I_{60} foi a variável mais importante. O fato da I_{60} apresentar um valor próximo (cerca de 12 mm h^{-1}) a condutividade hidráulica saturada (K_s) observada nas margens da rede de drenagem justifica a relevância desta variável hidrológica.

Enquanto a média anual de precipitação não ultrapassa os 1000 mm no semiárido brasileiro, a evaporação potencial pode superar os 2500 mm ano^{-1} . Assim, os coeficientes de aridez (índice de aridez – IA) verificados na região variam de 0,25 a 0,35 (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013). Na BEA, o IA foi avaliado em 0,26 (DE ARAÚJO; PIEDRA, 2009). A variabilidade dos processos componentes do ciclo hidrológico, em especial precipitação e evaporação, possibilita a ocorrência de IA diferente da faixa de valores entre 0,25 a 0,35. Brasil *et al.* (2018) avaliou em 0,48 o IA em bacia experimental também situada no semiárido cearense. Em termos globais, as regiões semiáridas exibem IA variando de 0,20 a 0,50.

A análise da evapotranspiração, segmentada através dos processos de evaporação, transpiração e interceptação vegetal, constitui outro importante elemento para a compreensão do déficit hídrico nos ambientes semiáridos. Pinheiro *et al.* (2016) constatou que no Bioma Caatinga, predominante no semiárido brasileiro e exclusivo da região Nordeste, 75% ($\pm 17\%$) da precipitação anual retorna para a atmosfera sendo a evaporação, a transpiração e a interceptação vegetal responsáveis por 40% ($\pm 6\%$), 41% ($\pm 7\%$) e 19% ($\pm 3\%$) do processo, respectivamente. A variabilidade espaçotemporal é outra característica do processo de evapotranspiração em ambientes semiáridos (SOARES, 2019).

Um detalhamento sobre o processo de interceptação vegetal e os fatores que melhor explicam a magnitude deste são apresentados em Brasil *et al.* (2018).

3.2 Densas redes de reservatórios superficiais

A limitada oferta hídrica natural, superficial e subterrânea (DE ARAÚJO, 2012), no SAB é uma condição natural que historicamente tem se consolidado como um entrave ao desenvolvimento dessa região que na contramão da condição de baixa disponibilidade hídrica encontra-se densamente povoada (AB' SÁBER, 2003). As consequências ambientais, econômicas e sociais mostraram-se catastróficas e produziram impactos no uso e ocupação do solo, na demografia, nas relações de trabalho, nas estruturas políticas e de poder e em diversos outros aspectos do meio ambiente e das sociedades nordestina e brasileira (SOUSA e NEVES, 2015). A variabilidade pluviométrica interanual é outra característica hidrológica que amplia a vulnerabilidade do SAB. Os anos que apresentam índices pluviométricos inferiores aos valores médios, em diversas ocasiões ocorrem sucessivamente (MALVEIRA, DE ARAÚJO e GÜNTNER, 2012), produzem as temidas secas responsáveis pelas seculares perdas agropecuárias, além da intensificação do êxodo rural e ampliação da pobreza.

No intuito de ampliar a oferta hídrica, para atender as múltiplas e crescentes demandas, e mitigar os impactos negativos dos períodos de estiagem, a construção de reservatórios, desde o século XIX (MOLLE; CADIER, 1992), foi a principal estratégia hídrica adotada pelo poder público (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; MAMEDE *et al.*, 2012; DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013). Os governos federal e estadual foram os responsáveis pelo planejamento e construção dos grandes reservatórios, com capacidade de acumulação superior a 50.10^6 m³ (GÜNTNER, 2002). Estes atendem prioritariamente centros urbanos, distritos industriais e projetos de irrigação.

As comunidades rurais esparsamente distribuídas no SAB passaram a ser atendidas por médios, pequenos e micro reservatórios construídos por particulares. A implantação de reservatórios de forma planejada e não planejada, evidenciada nos grandes e demais categorias de reservatórios respectivamente, produziu uma densa rede de reservatórios (MAMEDE *et al.*, 2012; MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013; MAMEDE *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2019). Arranjo também observado em países como Austrália (CALLOW; SMETTEM, 2009), China (LI; WEI, 2008), Espanha (MAMEDE, 2008), Estados Unidos (MINEAR; KONDOLF, 2009), Canadá (TEGAVARAPU; SIMINOVIC, 2002) e em nações africanas (FOWE *et al.*, 2015). Habets

et al. (2018) apontam que o número de pequenos reservatórios ao redor do mundo tem aumentado devido aos reduzidos custos para implantação, à existência de diversas áreas favoráveis à instalação e à facilidade de acesso devido à proximidade das comunidades a estes equipamentos.

De Araújo e Medeiros (2013) apontam que a densidade espacial dos reservatórios estabelecida, com predomínio de pequenos reservatórios, produz impactos tanto positivos quanto negativos para a segurança hídrica local. As elevadas perdas por evaporação e a considerável complexibilidade para gerir o caótico sistema são considerados os efeitos negativos desse arranjo. Em contrapartida, verifica-se uma distribuição de água mais democrática, um uso energético mais eficiente e uma redução menos intensa da disponibilidade hídrica dos reservatórios devido ao menor aporte de sedimentos. Para ilustrar essa densidade, na região hidrográfica do Alto Jaguaribe, semiárido cearense, foram identificados mais de 4.000 reservatórios distribuídos ao longo dos 24.000 km². Indicando a presença de 1 reservatório a cada 6 km² (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2012). Arranjos ainda mais densos são observados no semiárido brasileiro (MOLLE; CADIER, 1992). Estudos de Alexandre (2012) e Silva *et al.* (2011) evidenciam uma densidade aproximada de 1 reservatório/km² na bacia hidrográfica de Sumé, no estado da Paraíba.

Ampliar os efeitos benéficos e minimizar os impactos negativos da densa rede de reservatórios é essencial para elevar a segurança hídrica nas regiões secas. A importância dos reservatórios é tão expressiva no estado do Ceará que mais de 90% da demanda atendida é proveniente dos açudes (ARAÚJO *et al.*, 2002), predominantemente pelos açudes estratégicos que acumulam grandes volumes e suportam períodos de déficit pluviométrico. Os pequenos açudes embora não sejam capazes de atender expressivas demandas, especialmente pelo fato desses reservatórios secarem completamente ao longo dos meses secos devido aos elevados índices de evaporação, cumprem um papel essencial para a sobrevivência das pequenas e esparsas comunidades rurais. Eles têm o potencial de contribuir diretamente para a segurança alimentar e econômica dessas populações (FOWE *et al.*, 2015; DE FRAITURE *et al.*, 2014; BRASIL; MEDEIROS, 2019). Entretanto, os pequenos reservatórios têm sido pouco explorados pelas pesquisas hidrológicas (FOWE *et al.*, 2015).

No semiárido brasileiro, a produção agropecuária familiar depende largamente dos pequenos açudes. Diante da intensa evaporação nos períodos secos e das recorrentes estiagens, parcela considerável da população rural do semiárido brasileiro encontra-se em situação de elevada vulnerabilidade. Além dos fatores naturais, a ineficiente utilização dos pequenos açudes tem subutilizado o potencial de irrigação destes (DE FRAITURE *et al.*,

2014). A racionalização do uso dos pequenos reservatórios tem sido apontada como estratégia essencial para reverter a variabilidade da produção no SAB (BRASIL; MEDEIROS, 2019). Estes sugerem que os pequenos açudes sejam utilizados exclusivamente para a agricultura irrigada, considerando que esta é a principal atividade da região. O abastecimento humano e animal, considerados prioritários de acordo com a política hídrica nacional (BRASIL, 1997), poderiam ser atendidos através do uso de poços profundos e cisternas.

Tal esquema merece ser avaliado considerando a necessidade de múltiplas estratégias hídricas para ampliar a oferta hídrica e conservar os escassos recursos hídricos no semiárido brasileiro. Sarmiento (2005, p. 92) aponta que:

[...] a sustentabilidade hídrica do semi-árido do nordeste não tem solução única nem universal. A solução a se adotar para o suprimento hídrico das populações urbanas concentradas – por exemplo – diferencia-se da que se adotará, com mesmos fins, para a população esparsa (rural).

A ideia de solução destacada acima poderá ser um somatório de estruturas hídricas (macro e micro) utilizadas de forma simultânea e complementar (SARMENTO, 2005). Nessa perspectiva, o entendimento do funcionamento integrado de pequenos e grandes sistemas hídricos no SAB é fundamental para a proposição de um modelo de operação racional do ponto de vista ambiental, econômico, social e técnico. Ações são requeridas especialmente diante da efetivação da transposição do Rio São Francisco, aporte hídrico para as bacias do nordeste setentrional, novas dinâmicas de uso podem ser propostas para os pequenos açudes visando incrementar a produtividade e a renda local.

3.3 Transposição de bacias hidrográficas

Em um cenário de escassez hídrica, demandas superando a oferta, o equilíbrio hídrico pode ser alcançado por meio de intervenções capazes de elevar a oferta, reduzir a demanda ou ambos simultaneamente. Os custos do projeto aliado aos impactos ambientais e sociais irão determinar qual alternativa técnica será mais viável para determinada região. Dessalinização; reúso de água; importação de água, aqui limitada a transferência física e armazenamento de água através da construção de reservatórios representam ferramentas hídricas destinadas a ampliar a oferta de água (RICHTER, 2015).

A transferência de bacias, também denominada de transposição ou integração entre bacias, ilustra a intervenção da engenharia hídrica do lado da oferta e vem sendo utilizada desde a antiguidade para atender as necessidades das populações que se aglomeravam nos centros urbanos. As civilizações situadas no oriente médio, gregas e romanas desenvolveram uma série de aquedutos que possibilitavam o transporte de água de regiões montanhosas para as zonas centrais das cidades com altas demandas humanas e agropecuárias. (MAYS; KOUTSOYIANNIS; ANGELAKIS, 2007). Richter (2015) destaca que nas cidades romanas parcela da água era proveniente de fontes situadas há quase 100 km de distância que forneciam volumes per capita diários em torno de 1.000 L. São os primeiros registros de transferência física de água ocorrendo através da gravidade, considerando que naquele período fontes de energia e tecnologias de bombeamento eram artifícios ainda indisponíveis.

Com o avanço nas tecnologias e técnicas empregadas pela engenharia hídrica, a transferência hídrica passou a ser realizada entre regiões que anteriormente era inviável devido a incapacidade da força gravitacional conduzir a água entre essas zonas. A eletricidade passou a ser um insumo primordial para a expansão dos sistemas de transferência hídrica em escala global. A intensificação da pressão sobre os recursos hídricos, situação recorrente nas regiões áridas, semiáridas e nas metrópoles, vem sendo um argumento frequentemente levantado para justificar a implantação de projetos de transposição entre bacias visando elevar a oferta de água nas bacias receptoras. Portanto, a eletricidade e amplificação da escassez hídrica foram fatores que impulsionaram e favorecem projetos de transferência hídrica que objetivam ampliar a segurança hídrica (RICHTER, 2015).

Estimativas apontam que mais de 350 sistemas de transferência de grande volume de água foram instalados nos últimos 60 anos. Los Angeles, Denver, Nova York, Mumbai, Karachi, Tel Aviv e Cidade do Cabo são exemplos de cidades que se tornaram metrópoles devido aos canais e adutoras construídos para importar água de outras bacias hidrográficas (RICHTER, 2015). Austrália, Canadá, China, Estados Unidos da América e Índia implementaram grandes projetos de transferência hídrica para suprir as crescentes demandas de água para irrigação, uso doméstico e industrial. As intervenções destinam-se a transportar água de bacias hidrográficas onde se verifica um excesso hídrico, oferta hídrica supera as demandas, para bacias onde já se verifica um déficit hídrico ou o crescimento das demandas pode conduzir a esta situação em um futuro próximo (GHASSEMI; WHITE, 2007).

As bacias receptoras, em inúmeros casos, estão situadas em regiões áridas e semiáridas que registram reduzidos índices pluviométricos ocasionando uma reduzida oferta

hídrica. As bacias doadoras apresentam realidade oposta. Nessa perspectiva, a variabilidade espacial das precipitações é realidade climática observada em regiões envolvidas em projetos de transposição. Na Índia, enquanto na região oeste de Rajasthan são registradas precipitações anuais inferiores a 100 mm, em partes de Meghalaya são verificados índices que podem superar 10.000 mm. Condição que dificulta o abastecimento humano e o cultivo de alimentos pelas comunidades situadas nas zonas onde as chuvas são escassas (JAIN; AGARWAL; SINGH, 2007). Panorama que justifica a necessidade de transferência hídrica visando equilibrar o balanço hídrico nas zonas áridas e semiáridas.

No Brasil, realidade similar, embora não tão contrastante, é observada entre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) e as Bacias Hidrográficas do Semiárido Setentrional. Enquanto na primeira as precipitações anuais oscilam de 1.100 a 2.100 mm distribuídas ao longo da bacia de drenagem de 639 000 km², abrangendo 507 municípios de sete estados brasileiros com uma população que supera os 15 milhões de habitantes (AB'SÁBER, 2006; BETTENCOURT, 2016), nas seguintes, precipitações anuais não superiores a 600 mm são observadas. O semiárido brasileiro, que engloba o semiárido setentrional, abriga mais de 25 milhões de habitantes apresentando uma densidade populacional de 25 habitantes por km² (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013).

Outro contraste climático entre essas duas regiões refere-se à variabilidade temporal das precipitações. Nas cabeceiras da BHRSF, com a ocorrência de clima tropical úmido de planalto, as precipitações de 1.100 a 1.400 mm apresentam-se de forma bem distribuída. Já no semiárido, mais de 80% da precipitação anual ocorre na estação chuvosa, de janeiro a maio (AB'SÁBER, 2006; DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013). Estas condições de baixos índices pluviométricos anuais e variabilidade temporal somadas às recorrentes secas tem inviabilizado o atendimento das demandas hídricas, em termos quantitativo e qualitativo, das comunidades do semiárido brasileiro, em especial as populações rurais do semiárido setentrional devido à maior incidência de secas nessa área (CGEE, 2012).

A extrema pobreza no SAB é uma consequência direta do déficit hídrico da região que inviabiliza as principais atividades produtivas locais, agricultura de subsistência e pecuária extensiva. Pesquisa conduzida pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) em 2014 constatou que 33% das famílias entrevistadas no SAB apresentavam renda familiar de menos da metade do salário mínimo. O subdesenvolvimento característico da região também é expresso nos elevados índices de analfabetismo (SARMENTO, 2005). Evidenciado que a escassez hídrica tem o poder de desestruturar por completo as áreas afetadas pelas secas e provocar desequilíbrios ambientais, sociais e

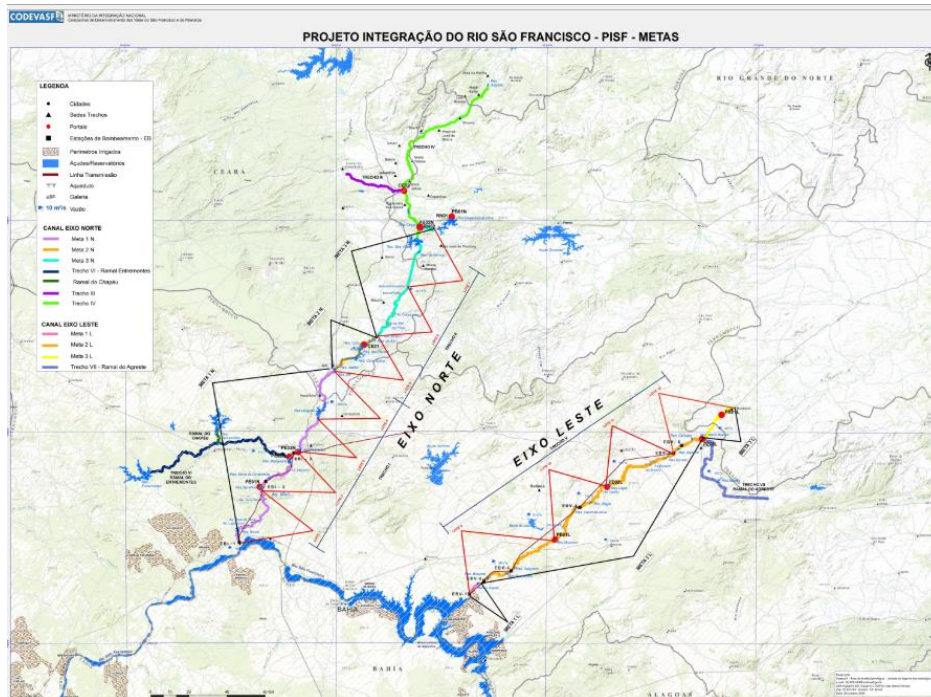
econômicos em regiões vizinhas devido ao êxodo em massa de populações (DNOCS, 2014). Realidade amplamente conhecida pelos nordestinos. Entretanto, a escassez hídrica não é o principal obstáculo para o desenvolvimento da região. Questões ligadas à renda, trabalho, políticas públicas e serviços de saneamento são os maiores desafios para o desenvolvimento do SAB. Contrariando o discurso governamental empregado para a implantação da infraestrutura hídrica (SALINAS *et al.*, 2019).

Construção de reservatórios, perfuração de poços e implantação de cisternas têm sido as principais alternativas para ampliar a oferta hídrica no semiárido brasileiro. A evolução da infraestrutura hídrica e do sistema de gestão hídrica na região ampliou a disponibilidade hídrica e tem mitigado os efeitos das secas. Entretanto, as altas taxas de evaporação, o reduzido volume de água subterrânea armazenado e a irregularidade pluviométrica (DE ARAÚJO, 2012) característicos da região impõem limitações às ferramentas hídricas empregadas. Diante dessa realidade, a transposição do Rio São Francisco para o SAB é uma alternativa que vem sendo amplamente discutida desde o século XIX e atualmente encontra-se em fase de implementação.

Os projetos de transposição de bacias hidrográficas, a transposição do Rio São Francisco não será diferente, produz impactos ambientais, sociais e apresentam custos que podem superar os valores necessários à implantação de estratégias para aumento da oferta hídrica tais como gerenciamento de bacias hidrográficas e uso racional de água (RICHTER, 2015). Devido a essa multiplicidade de fatores a serem considerados, além dos diversos entraves políticos, o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) levou um longo período para iniciar sua implementação.

O PISF objetiva incrementar a oferta e garantir a segurança hídrica para 12 milhões de habitantes em municípios dos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Terá uma extensão de 477 km segmentados em dois eixos de transferência hídrica, eixos norte e leste conforme Figura 2. Interligará o Rio São Francisco a cinco grandes bacias hidrográficas, evidenciadas na Tabela 1, através de quatro túneis, 14 aquedutos, nove estações de bombeamento e 27 reservatórios (CODEVASF, 2018; DNOCS, 2014). A vazão outorgada é de 26,4 m³/s. Desse total 16,4 m³/s serão destinados ao eixo leste e o restante ao eixo norte. A vazão máxima poderá atingir 127 m³/s (ANA, 2005). Os sistemas de abastecimento, que representam um dos 38 programas socioambientais do projeto, irão demandar um investimento federal de R\$ 285 milhões (MI, 2018).

Figura 2 – Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF)



Fonte: CODEVASF, 2018.

Tabela 1 – Bacias hidrográficas interligadas ao Rio São Francisco através do PISF

Bacia Hidrográfica	Estado
Jaguaribe	CE
Piranhas-Açu	PB/RN
Apodi	RN
Paraíba	PB
Moxotó, Terra Nova e Brígida	PE

Fonte: DNOCS, 2014.

O PISF é um projeto cercado de polêmicas, marcado por avanços e recuos (FERREIRA, 2017) e ainda muito se discute sobre a potencialidade deste em estabelecer uma nova era para os habitantes do semiárido (RIBEIRO, 2007; AB'SÁBER, 2006). Estudo conduzido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2010) aponta que os benefícios do projeto estão possivelmente superestimados pelos defensores da obra. Os debates em torno de obras de transferência hídrica são situações recorrentes ao redor do mundo devido aos múltiplos atores e interesses, além obviamente da importância da água para o desenvolvimento de toda e qualquer região. As tensões entre usuários das bacias envolvidas nas transposições e estabelecidas as margens dos canais que transportam água são um desafio a ser ministrado em obras de transposição.

O elevado consumo de eletricidade, altos custos, e os riscos de degradação ambiental, em especial o comprometimento das reservas hídricas superficiais e subterrâneas nas bacias doadoras já evidenciado em algumas regiões do mundo (RICHTER, 2015), são argumentos apresentados em oposição aos projetos de transferência de água em larga escala. De acordo com relatório apresentado pelo Ministério da Transparência e pela Controladoria-Geral da União (CGU), os gastos com energia do PISF poderão atingir as cifras de R\$ 800 milhões por ano. Montante que deverá ser pago pelos quatro estados receptores da transposição (Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte) e que poderá inviabilizar a manutenção do projeto.

Zhao *et al.* (2014) concluíram que o fluxo físico de água não atuou como um instrumento de destaque para aliviar as consequências do stress hídrico nas bacias receptoras. Em contrapartida, verificou-se uma exacerbação do stress hídrico nas bacias doadoras na China. Considerando os possíveis impactos das transposições, a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (2004) indica que as nações têm estabelecido os seguintes preceitos para assegurar que estas obras sejam justas:

- (1). A região receptora de água deve ter comprovada a escassez de água para o atendimento de suas necessidades;
- (2). Os recursos hídricos da região de origem devem ser suficientes para satisfazer a demanda da transferência sem acarretar impedimento ao desenvolvimento futuro dessa região;
- (3). Os impactos ambientais ocasionados pela transferência de água devem ser mínimos para ambas as regiões, de destino e de origem;
- (4). Os benefícios sociais para a região de destino devem ser compatíveis com o porte do empreendimento;
- (5). Os impactos positivos gerados devem ser compartilhados razoavelmente entre as regiões de origem e de destino.

Quando da implementação das obras de transferência hídrica, que deveria ocorrer somente com o atendimento das condicionantes destacadas acima, o monitoramento dos impactos causados pela obra nas bacias receptoras e doadoras, além das áreas que margeiam os canais de adução, é essencial para verificar a efetividade da estratégia em contribuir com a segurança hídrica. Ademais, é relevante a compreensão e proposição de arranjos hídricos que considerem a infraestrutura hídrica já existente, principalmente os açudes no semiárido brasileiro, para possibilitar uma sinergia hídrica (SARMENTO, 2005). As respostas hidrológicas das bacias receptoras da Transposição do Rio São Francisco fornecerão aos gestores hídricos e estudiosos representativos indicativos de como a escassez hídrica pode ser minimizada na região através de uma gestão sustentável do volume hídrico disponibilizado pela transposição.

Na perspectiva de aproveitamento da rede de reservatórios estratégicos já existentes no Estado do Ceará, o Projeto Malha d'Água propõe um adensamento da rede de adutoras e a integração desta em trechos específicos para suprir o abastecimento dos núcleos urbanos ligados ao sistema. Para minimizar as perdas por evaporação e infiltração, a implantação de Estações de Tratamento de Água (ETA) junto aos reservatórios é proposta. A partir da ETA, a água seguirá através das adutoras de água tratada até atingir os núcleos populacionais receptores. Complementarmente, carros-pipa irão captar volumes diretamente em pontos da rede de adução para atender comunidades difusas. Possibilitando um incremento qualitativo e quantitativo na oferta hídrica (SRH, 2019).

3.4 Modelagem hidrológica

Os processos que compõem o ciclo hidrológico são influenciados por uma série de fatores tais como clima, vegetação, topografia e uso e ocupação do solo, dificultando a análise dos mesmos (FILHO *et al.*, 2012).

Diante da complexidade desses processos e das alterações ambientais ocasionadas pela rápida urbanização e industrialização (GAYATHRI; GANASRI, DWARAKISH, 2015) modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para simplificar o entendimento e prever cenários no âmbito das bacias hidrográficas. Modelos constituem representações simplificadas da realidade (SHARMA; SOROOSHIAN; WHEATER, 2008). A partir da década de 1960, desde o lançamento do *Stanford Watershed Model*, tem se evidenciado uma intensa evolução na modelagem computacional destinada a compreender a dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas, intitulada de modelagem hidrológica (SINGH *et al.*, 1995). A modelagem hidrológica representa a aplicação de modelos visando a obtenção de resultados pertinentes com a realidade.

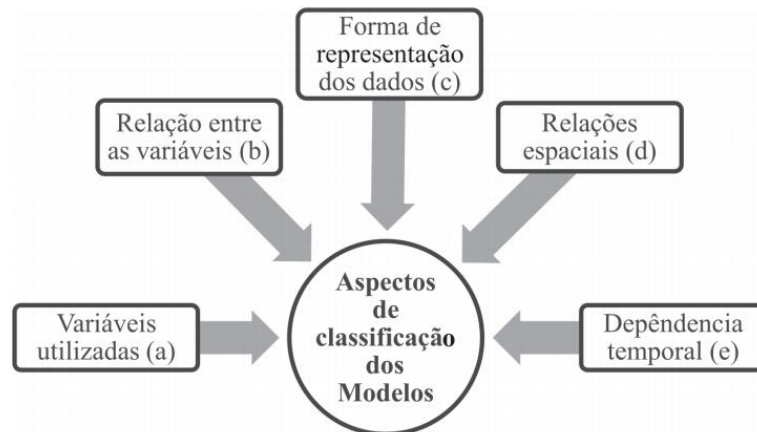
Beven (2012), em obra que enfoca a modelagem aplicada a compreender a relação da precipitação com a geração de escoamento, aponta que as limitações nas técnicas de medição das variáveis hidrológicas é a principal razão para o emprego da modelagem. Almeida e Serra (2017) destacam que a quantificação *in-loco* dos diversos fluxos hídricos nos compartimentos ambientais é uma difícil tarefa devido á expressiva variabilidade de fatores ambientais e à grande extensão das áreas de estudo. Nesse contexto, a modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial nessas quantificações.

Considerando a capacidade dos modelos hidrológicos em trabalhar com uma vasta quantidade de incertezas (SONG *et al.*, 2015) e superar algumas das limitações da ciência

hidrológica, a modelagem hidrológica tornou-se importante objeto de estudo e vem sendo amplamente empregada para a elaboração de estudos ambientais, projetos hidráulicos e hidrológicos e para a gestão de recursos hídricos, sendo o conhecimento do tema indispensável para engenheiros hidrólogos e demais profissionais atuantes na área de recursos hídricos (FILHO *et al.*, 2012).

Inúmeras agências e órgãos governamentais ao redor do mundo vêm desenvolvendo modelos hidrológicos capazes de gerar informações que dão suporte aos processos de planejamento, gestão e tomada de decisões (SINGH *et al.*, 1995). Moreira (2005) destaca que a classificação dos modelos hidrológicos é realizada segundo diferentes perspectivas, destacadas na Figura 3.

Figura 3 - Classificações dos Modelos Hidrológicos



Fonte: Filho *et al.*, 2012.

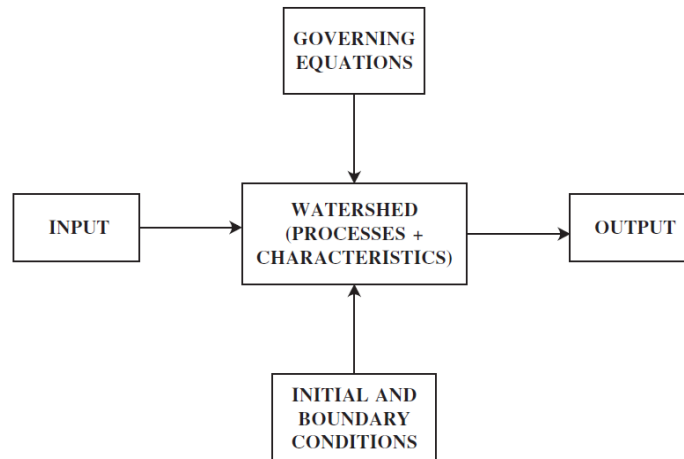
No tocante ao tipo de variável utilizada, os modelos podem ser determinísticos ou estocásticos. Conforme a relação entre as variáveis, são empíricos ou conceituais. Modelos discretos ou contínuos são obtidos segundo a forma de apresentação dos dados, enquanto modelos concentrados ou distribuídos são função de relações espaciais. Modelos estacionários ou dinâmicos expressam a existência de dependência temporal. A categorização dos modelos hidrológicos em empíricos, conceituais ou físicos é outra classificação de grande relevância e amplamente empregada para representar os processos hidrológicos (GAYATHRI; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

Independente da classificação atribuída ao modelo, Singh *et al.* (1995) apontam que os modelos hidrológicos apresentam cinco componentes, observados na Figura 4.

O melhor entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos; a análise de consistência e preenchimento de falhas; a previsão de vazão; o dimensionamento e a

previsão de cenários de planejamento e a previsão dos efeitos resultantes das alterações no uso do solo são elencados por Lou (2010) como as principais aplicações da utilização de modelos hidrológicos.

Figura 4 - Componentes dos modelos



Fonte: Singh *et al.* (1995).

Entretanto, a capacidade dos modelos hidrológicos em produzir informações precisas depende largamente da disponibilidade de dados de entrada no sistema e da habilidade do modelo em considerar as características hidrológicas da região tal como a intermitência dos rios na região semiárida. Pilgrim, Chapman e Doran (1988) apontam que a consistência dos dados apresenta um impacto superior na precisão dos resultados quando comparado a qualidade do modelo utilizado. As regiões áridas e semiáridas, são caracterizadas pela elevada vulnerabilidade hídrica, e a aplicação de modelos para a previsão de cenários e gerenciamento de recursos hídricos constitui uma excelente ferramenta. No entanto, a quantidade e a precisão dos dados de vazão nas regiões semiáridas continua a ser reduzida devido a uma série de fatores já destacados em décadas anteriores (PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Limitando a aplicação da modelagem hidrológica na região.

Visando superar essa dificuldade, novas tecnologias, com destaque para o sensoriamento remoto e demais instrumentos dos sistemas de informação geográfica (SIG), têm sido empregadas e produzido resultados animadores. Kite e Pietroniro (2009) destacam que os dados produzidos pelo sensoriamento remoto têm sido utilizados pelos modelos hidrológicos, gerando relevantes informações sobre a dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas. Realizar a simulação de cenários de uso de solo em bacias hidrográficas por meio da modelagem hidrológica tem sido apoiada com o uso do SIG (BLAINSKI, 2011). O sensoriamento remoto e o SIG de maneira geral tornaram-se bases essenciais na metodologia

de trabalhos que utilizam modelos hidráulicos e hidrológicos para compreender os fenômenos naturais.

Apesar dos grandiosos avanços na modelagem hidrológica nas últimas décadas, pesquisas continuam a ser desenvolvidas para discutir a capacidade dos modelos em representar com precisão os complexos processos do ciclo hidrológico (CLARK *et al.*, 2017), permitindo quantificar o grau de incerteza produzido pelo sistema. Beven (2009) enfatiza que a aplicação das previsões das ciências, nesse caso a hidrologia, a situações reais, lança inúmeras incertezas. A análise de sensibilidade, tópico que abarca o estudo das incertezas, identifica qual a influência dos parâmetros no desempenho do modelo (SONG *et al.*, 2015). Logo, é possível identificar as potencialidades e limitações do modelo antes de sua efetiva aplicação. A transposição do Rio São Francisco representa uma grande obra hidráulica que afetará as respostas hidrológicas de bacias hidrográficas heterogêneas, sendo a modelagem hidrológica de grande valia para a análise dos cenários criados por esse projeto.

3.4.1 Modelo WASA

Considerando o limitado número de pesquisas desenvolvidas nas regiões áridas e semiáridas, incluindo o semiárido brasileiro, objetivando compreender as especificidades ambientais nessas zonas, projetos têm sido desenvolvidos para elevar o grau de conhecimento sobre a natureza local e produzir ferramentas capazes de harmonizar a relação das populações locais com o meio ambiente, especialmente no que se refere aos recursos hídricos. As fontes de água no SAB são limitadas e as elevadas demandas não são atendidas, em diversas ocasiões, gerando uma condição de escassez hídrica que recorrentemente é agravada nos períodos de seca. Historicamente tem produzidos severos impactos sociais e, as previsões, diante de um cenário de mudanças climáticas, apontam para um agravamento da oferta hídrica.

Buscando produzir ferramentas para compreender e intervir no SAB, o projeto de pesquisa WAVES (*Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the North – East of Brazil*) começou a ser desenvolvido no final da década de 1990 através uma parceria entre pesquisadores alemães e brasileiros (GÜNTNER, 2002). Os estados do Ceará e Piauí representavam a área de interesse para estudos de macro escala enquanto os municípios de Tauá (CE) e Picos (PI) seriam abordados na meso escala. Aspectos sociais e físicos, apresentados em tópicos anteriores, seriam considerados na análise da vulnerabilidade da

região. Estudo dos impactos globais sobre a disponibilidade de água e meio ambiente; modelagem climatológica em macro e meso escala; modelagem do processo produtivo agrícola e modelagem hidrológica e de uso da água são algumas das contribuições do WAVES (DE ARAÚJO, 2002). Gaiser *et al.* (2003) apresentam um detalhamento dos estudos desenvolvidos pelo programa.

O WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*) foi o modelo hidrológico desenvolvido no âmbito do programa WAVES com a capacidade de simular a geração do escoamento e como este é distribuído ao longo da paisagem. Possibilitando assim a quantificação da disponibilidade hídrica. A rede de drenagem, os reservatórios superficiais e as vertentes são as principais estruturas espaciais do modelo (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2013). Os processos hidrológicos são simulados de forma isolada em cada elemento e as transferências de água dentro e entre os mesmos são calculadas (MEDEIROS, 2009). Trata-se de um modelo chuva-vazão determinístico e de simulações contínuas. A resolução temporal do WASA utilizada, de maneira geral, é de um dia. Estudos conduzidos em escalas menores podem fazer o uso de uma resolução temporal horária.

No que se refere à resolução espacial, é categorizado como distribuído, ou seja, a região de estudo pode ser segmentada em áreas de menor extensão possibilitando que a variabilidade dos processos hidrológicos seja captada produzindo resultados de maior compatibilidade com a realidade observada. Entretanto, a variabilidade de áreas inseridas em uma escala espacial ainda mais reduzida não é retratada. Logo, o WASA é semi-distribuído e em determinadas escalas será um modelo agrupado.

Geologia, topografia, solos, uso da terra e vegetação são componentes da paisagem que exibem uma variabilidade espacial que influencia diretamente na forma de como a precipitação incidente em uma determinada zona será convertida em escoamento e evapotranspiração, além de determinar o padrão de distribuição da umidade do solo na região em análise. A umidade do solo é fator chave no estudo de bacias hidrográficas pois influenciará a geração de escoamento e a resposta hidrológica da bacia (GÜNTNER; BRONSTERT, 2004). Portanto, o entendimento da resolução espacial do WASA na bacia a ser estudada com o auxílio do modelo é fundamental para a compreensão dos resultados obtidos.

Analisando o embasamento físico do modelo, o WASA é um modelo baseado em processo. O WASA atende aos critérios estabelecidos para os modelos conceituais. Entretanto, os parâmetros do modelo podem ser provenientes de características físicas

medidas na área de estudo. Logo, o WASA também poderá ser considerado um modelo físico (GÜNTNER, 2002).

A estrutura das unidades espaciais de modelagem é definida através de um esquema hierárquico de desagregação que parte da unidade superior para a inferior (*top-down*). Objetiva com esta abordagem compreender a variabilidade das propriedades da bacia tais como topografia, tipo de solo e cobertura vegetal e como estas impactam os padrões de umidade do solo e de geração de escoamento na vertente (MEDEIROS, 2009).

A maior escala da hierarquia, sub-bacias, é definida considerando a localização das estações de medição das vazões dos rios; dos grandes reservatórios, que apresentam capacidade de armazenamento superior a 50.10^6 m³, e das confluências dos principais rios. As sub-bacias apresentam uma área da ordem de 10^3 km². Municípios ou unidades de área definidas poderão ser utilizadas para substituir as sub-bacias. Representando assim a estrutura de maior hierarquia. Quando estas últimas apresentarem tamanho inferior ao das sub-bacias, o escoamento produzido por cada unidade que compõe a sub-bacia deverá ser considerado para produzir a resposta da sub-bacia como um todo. Nesta escala são simulados os processos de transporte na rede de drenagem e o balanço hídrico nos reservatórios.

A estrutura seguinte do modelo, unidade hidrológica (*Landscape Unit – LU*), representa a associação de vertentes demarcadas com base na aplicação do conceito de SOTER (*soil and terrain digital database – FAO, 1993*). As características geológicas, topográficas e pedológicas são os elementos básicos para a estruturação da bacia segundo o conceito de SOTER. As unidades hidrológicas compartilham características semelhantes as observadas no primeiro nível de hierarquia, especialmente no tocante aos processos laterais e na variabilidade vertical dos processos. O volume gerado nas sub-bacias representa o somatório dos volumes produzidos nas unidades hidrológicas inseridas na sub-bacia.

As unidades hidrológicas são compostas de até três componentes de terreno, que representa o terceiro nível da hierarquia. Áreas elevadas (planaltos), regiões de declive (encostas) e vales ou depressões são os componentes de terreno que buscam representar as diferentes zonas da vertente. Posteriormente, executa-se uma caracterização da declividade média das unidades de terreno. Quando não é observado diferenças topográficas significativas na unidade hidrológica, é atribuído o máximo de duas de unidades de terreno na paisagem. O modelo WASA não apresenta a exata localização geográfica dos componentes do terreno. Será determinado a fração que cada componente do terreno ocupará na unidade de paisagem. A transferência lateral de fluxo superficial e subsuperficial será simulada entre os diferentes componentes do terreno ao longo da vertente.

A fim de apresentar a heterogeneidade da umidade do solo nos compartimentos do terreno, é proposta a divisão desses compartimentos em associações de solo-vegetação, quarto nível hierárquico. Nesta escala, é considerada uma redistribuição lateral de escoamento superficial e subsuperficial. Representam unidades de modelagem sendo caracterizadas por uma associação específica entre um tipo de solo e a cobertura do terreno. A distribuição espacial dos componentes de solo e vegetação é aleatória dentro do componente de terreno.

O último nível hierárquico, a menor escala considerada, é representado pelo perfil de solo que apresentará um número de horizontes que irá variar de acordo com os componentes da associação solo-vegetação estabelecida no modelo WASA. Perfis representativos de solo em cada componente de solo e vegetação serão apresentados. Os fluxos verticais e horizontais são considerados para o cálculo do balanço hídrico nos diferentes horizontes do solo. Ao término das simulações, que seguem nas demais hierarquias considerando escoamento superficial e subterrâneo além de redistribuição e transferência lateral, tem-se o fluxo de água gerado na sub-bacia.

Resumidamente, as simulações do balanço hídrico são iniciadas no perfil do solo com as transferências de fluxo e agregação do escoamento contabilizadas até a maior escala da hierarquia, sub-bacia. Determinado o escoamento gerado na sub-bacia, este é inserido na rede de drenagem, sendo direcionado aos reservatórios superficiais (MEDEIROS, 2009; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; GÜNTNER, 2002). Estes apresentam de forma detalhada a sequência temporal do cálculo da umidade do solo e da geração de escoamento em cada intervalo de simulação. O esquema de discretização espacial utilizado pelo modelo WASA é ilustrado na Figura 5.

Perdas por interceptação; evaporação e transpiração; infiltração; escoamento gerado pela infiltração e saturação em excesso; escoamento subsuperficial; distribuição lateral do escoamento entre os componentes de solo-vegetação e do terreno e recarga da água subterrânea são processos simulados pelas rotinas hidrológicas do WASA.

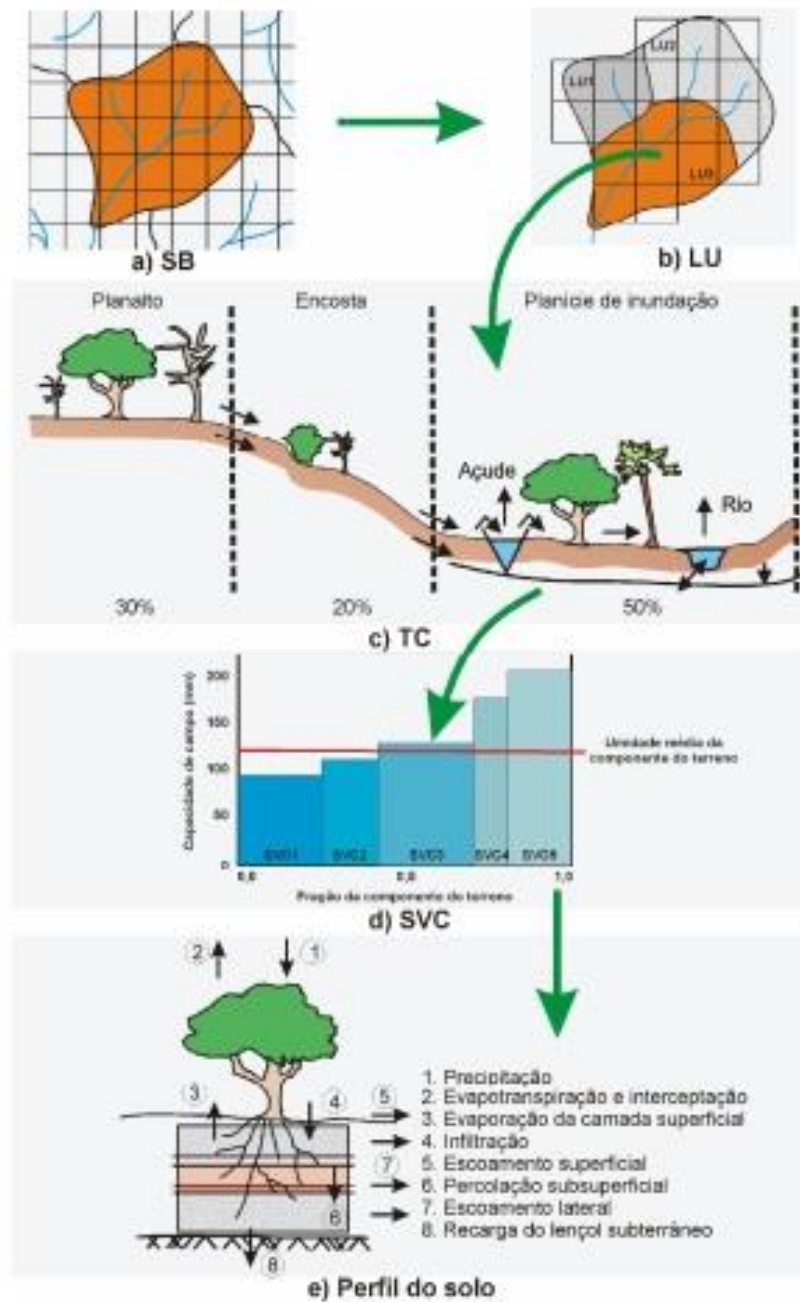
O fluxo de água ao longo da rede de rios será simulado através de componente do WASA específico para esta finalidade, *river component*. O componente de reservatório do modelo apresenta um arranjo simplificado para as simulações dos reservatórios superficiais. A simplificação, ou seja, a não consideração de todas as estruturas de forma isolada ocorre devido ao expressivo número de reservatórios em regiões secas dos quais não se dispõe de uma quantidade apropriada de informações técnicas. Nessa perspectiva, um esquema de cascata que categoriza os reservatórios com base na capacidade de acumulação é proposto. As simulações são conduzidas considerando um único reservatório hipotético de cada classe de

reservatório, estabelecida com base na capacidade de acumulação. Os resultados do reservatório modelo são aplicados aos demais pertencentes a mesma categoria.

O esquema de cascata proposto pelo modelo considera que os reservatórios de ordem inferior, com menor capacidade de acumulação, estão situados a montante dos grandes reservatórios. Rotinas hidrológicas determinam o balanço hídrico e as liberações de água dos reservatórios hipotéticos utilizados nas simulações. A quantificação da afluência para um determinado reservatório é estabelecida como a soma do volume liberado pelo reservatório de ordem inferior com o volume transportado pela rede de rios estabelecida entre os reservatórios (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER e BRONSTERT, 2004; DE ARAÚJO e MEDEIROS, 2013).

A relevância dos reservatórios superficiais, de todas as categorias, para a sustentabilidade hídrica das regiões secas, realidade semelhante no SAB, faz do WASA uma importante ferramenta para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica local. Ademais, cenários poderão ser propostos e analisados com o uso dessa ferramenta objetivando racionalizar o uso dos limitados recursos hídricos.

Figura 5 – Discretização espacial do modelo WASA: a) sub-bacia; b) unidade hidrológica (*landscape unit*); c) compartimentalização da unidade hidrológica; d) associação solo-vegetação; e) perfil do solo



Fonte: Malveira (2009) adaptado de Güntner (2002).

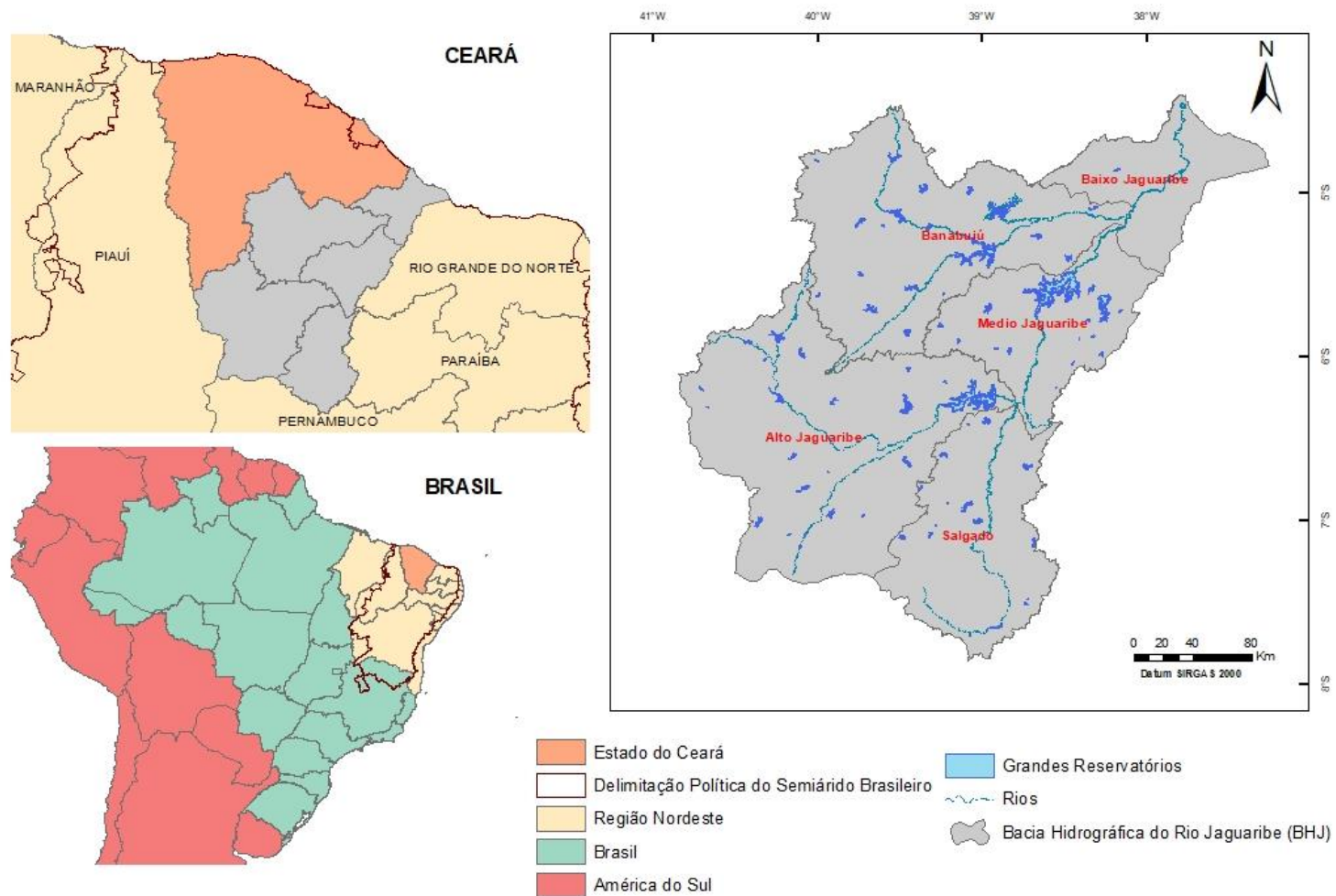
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Jaguaribe (BHJ) está inserida no Semiárido Brasileiro (SAB), apresentando uma extensão territorial de aproximadamente 75.000 km², ocupando pouco mais da metade da área do Estado do Ceará, sendo composta pelas regiões hidrográficas do Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado (Figura 6). É uma região essencial para a sustentabilidade hídrica do Estado do Ceará pois concentra mais de 70% da capacidade de acumulação do Estado através dos grandes reservatórios instalados, com destaque para os Açudes Castanhão, Orós e Banabuiú. Além de suprir a população rural da região de cerca de 2,7 milhões de habitantes, a água armazenada nos reservatórios superficiais da região é utilizada para atender as demandas da Região Metropolitana de Fortaleza que apresenta população superior a 3 milhões de habitantes (MENESCAL *et al.*, 2004; IPECE, 2017; PILZ *et al.*, 2019).

O clima da região é semiárido seco e quente, conforme o sistema de classificação de Köppen (GAISER *et al.*, 2003), apresentando um potencial de evaporação ao redor de 2200 mm enquanto que a precipitação média anual oscila de 500 a 900 mm, concentrada entre os meses de janeiro a junho (DE ARAÚJO; BRONSTERT, 2016). Estes também destacam o predomínio do complexo cristalino na geologia da região e dos neossolos litólicos e fluviais. Entre outras características do SAB comuns a área da presente pesquisa, destaca-se: os rios são intermitentes ou efêmeros; as recorrentes secas intensificam a escassez hídrica local; e a construção de reservatórios como estratégia de armazenar água para os períodos secos levou ao estabelecimento de uma densa rede de reservatórios, exibindo significativa variação na capacidade de acumulação.

Figura 6 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe (BHJ)



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Modelo WASA

4.2.1 Processos hidrológicos simulados no modelo

O WASA é um modelo chuva-vazão determinístico, distribuído e semi-conceitual empregado para simulações em grande escala, sendo também utilizado na quantificação da disponibilidade hídrica em zonas semiáridas. As abordagens empregadas para a representação dos processos hidrológicos inseridos no modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Abordagens empregadas no modelo WASA

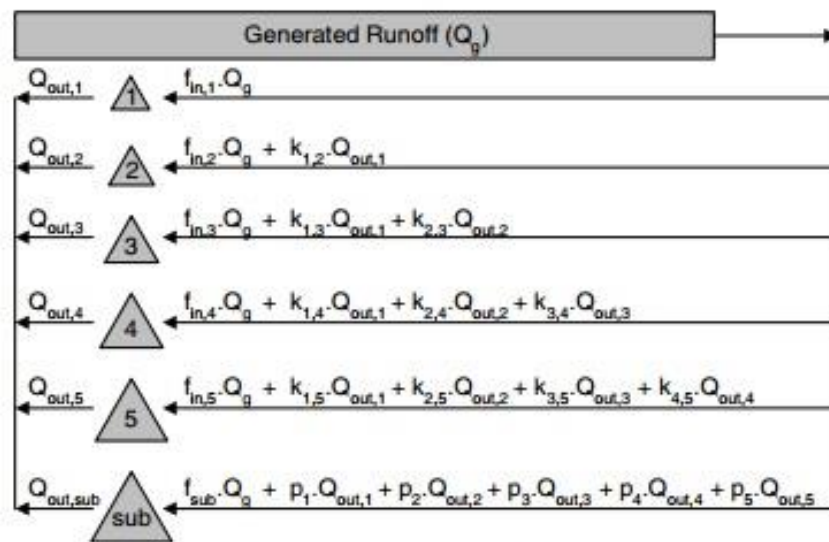
Processo	Abordagem
Interceptação	Balanco simplificado utilizando Penman (1948)-Monteith (1965)
Evapotranspiração	Penman (1948)-Monteith (1965) e Shuttleworth e Wallace (1985)
Infiltração	Green-Ampt (1911) com adaptações de Peschke (1977, 1987) e Schulla (1997)
Percolação entre horizontes do solo	Arnold <i>et al</i> (1990)
Escoamento sub-superficial	Relação simplificada para fluxo saturado baseada na equação de Darcy
Redistribuição lateral do escoamento	Verificada em nível superficial e sub-superficial. Ocorre na e entre unidades espaciais em diferentes posições topográficas
Armazenamento subterrâneo em áreas de embasamento cristalino	O volume de água percolado não irá contribuir para a dinâmica hidrológica do modelo. Volume perdido
Armazenamento subterrâneo em áreas sob influência de reservas subterrâneas	Modelagem simplificada por meio de modelo linear de armazenamento. Propõe uma constante de armazenamento (Kgw)

Fonte: Güntner, 2002.

Uma descrição detalhada da estrutura do modelo, dos processos representados, das simplificações propostas e das aplicações é apresentada em Guntner (2002), Guntner e Bronstert (2004), Medeiros (2009), Bronstert *et al.* (2014), Mamede *et al.* (2018) e outros. O manual de parametrização é apresentado por Müller *et al.* (2012), estando o código do WASA-SED (versão que também contempla uma rotina sedimentológica, não explorada no escopo desta pesquisa) disponível em <https://github.com/TillF/WASA-SED>.

No que se refere ao balanço hídrico em reservatórios, foco da pesquisa, o modelo propõe uma abordagem que diferencia os pequenos e médios (capacidade de acumulação inferior a $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) dos grandes reservatórios. Os primeiros são representados de modo agregado através da aplicação de uma rotina em cascata onde em cada sub-bacia os reservatórios são agrupados em cinco categorias de acordo com a capacidade de acumulação ($<0,1\text{M}$; $0,1\text{-}1\text{M}$; $1\text{-}3\text{M}$; $3\text{-}10\text{M}$; $10\text{-}50\text{M} \text{ m}^3$). A Figura 7 destaca a dinâmica do escoamento entre os pequenos e médios reservatórios em cada sub-bacia do WASA. Observa-se que parcela da vazão vertida pelos pequenos e médios reservatórios de classe r é destinada aos reservatórios de classe superior.

Figura 7 - Esquema de cascata empregado na simulação dos pequenos e médios reservatórios



$Q_{out,r}$ = outflow discharge from the reservoir size class r

Q_g = total sub-basin runoff within the time step

$f_{in,r}$ = weighting factor computed as a ratio between the runoff contributing area of the reservoir size class r and the total runoff contributing area of the sub-basin

f_{sub} = fraction of runoff contributing area not controlled by small reservoirs

$k_{x,r}$ = fraction of outflow discharge from the reservoir class x that flows into the reservoir class r

p_r = weighting factor computed as a ratio between the runoff contributing area not controlled by small reservoirs and the sub-basin area downstream the current reservoir class r

Fonte: Mamede *et al.* (2018).

Para cada uma dessas classes, o balanço hídrico é calculado para um reservatório representativo hipotético (rm) de características médias, exibido na Equação 1:

$$V_{t,rm} = V_{t-1,rm} + (Q_{in,r} - U_r) / n_r - Q_{out,rm} + (P - E_{pot}) \cdot A_{rm} - R_{b,rm} \quad (1)$$

Em que:

$V_{t,rm}$ = volume acumulado no reservatório de características médias rm da classe r no dia considerado [m^3]

$V_{t-1,rm}$ = volume acumulado no reservatório de características médias rm da classe r no dia anterior [m^3]

$Q_{in,r}$ = vazão afluente aos reservatórios da classe r [$m^3 \cdot d^{-1}$]

U_r = retirada de água dos reservatórios da classe r para atendimento dos diversos usos [$m^3 \cdot d^{-1}$]

n_r = número de reservatórios pertencentes a classe r

Q_{out} = vazão efluente do reservatório de características médias rm da classe r [$m^3 \cdot d^{-1}$]

P = precipitação incidente sobre a sub-bacia [m]

E_{pot} = evaporação potencial [m]

A_{rm} = área superficial do espelho d'água do reservatório rm [m^2]

$R_{b,rm}$ = perdas por infiltração através da rocha matriz [$m^3 \cdot d^{-1}$]

Este reservatório apresenta uma capacidade de acumulação ($V_{max,rm}$) igual ao valor médio da respectiva classe. O volume total armazenado pelos reservatórios de uma classe r ($V_{t,r}$) é representado na Equação 2:

$$V_{t,r} = V_{t,rm} \cdot n_r \quad (2)$$

Já o balanço hídrico dos grandes reservatórios, situados ao longo de grandes rios e a jusante dos pequenos e médios reservatórios, é calculado de forma explícita pelo modelo, também adotando um passo diário de simulação, sendo descrito na Equação 3 a seguir:

$$V_t = V_{t-1} + Q_c + Q_{in} - Q_{out} - U_{LR} + (P - E_{pot}) \cdot A_{LR} \quad (3)$$

Onde:

V_t = volume total acumulado no dia considerado [m^3]

V_{t-1} = volume total acumulado no dia anterior [m^3]

Q_c = vazão afluyente originada na sub-bacia após percorrer a cascata dos pequenos e médios reservatórios [$m^3.d^{-1}$]

Q_{in} = vazão afluyente proveniente das sub-bacias a montante através da rede de rios [$m^3.d^{-1}$]

Q_{out} = vazão efluyente dos reservatórios de forma controlada e não controlada [$m^3.d^{-1}$]

U_{LR} = vazão retirada dos grandes reservatórios para atendimento das demandas [$m^3.d^{-1}$]

A_{LR} = área da superfície hídrica dos grandes reservatórios [m^2]

Diante da indisponibilidade de informações, as perdas por percolação não são contabilizadas no balanço hídrico dos grandes reservatórios. A vazão efluyente não controlada (Q_{exc}), vazão que ultrapassa as estruturas de vertimento, é observada quando o volume acumulado no reservatório supera a capacidade de acumulação (V_{max}). Já a vazão efluyente de forma controlada (Q_{contr}) é definida por meio de regras de operação do reservatório. Na ausência de regras exatas para a determinação da Q_{contr} , o modelo aplica regras simplificadas que propõem que a Q_{contr} seja contabilizada como uma fração f_Q da vazão anual fornecida pelo reservatório com uma garantia de 90% ao longo do ano hidrológico (Q_{90}).

O valor de f_Q adotado é de 0,8 para os reservatórios denominados de estratégicos, exibem capacidade de acumulação superior a 300 milhões de m^3 e são importantes para o abastecimento hídrico da RMF, e de 0,9 para os outros grandes reservatórios representados.

Para a determinação da área da superfície hídrica (A_{LR}), uma função volume-área é adotada com base em dados derivados da geometria de cada reservatório. Quando não acessíveis, valores médios oriundos dos outros reservatórios são aplicados.

Na Figura 8, destacam-se os grandes reservatórios situados nas sub-bacias (unidades hidrológicas do modelo WASA) inseridas na BHJ.

Figura 8 – Sub-bacias e os grandes reservatórios inseridos na BHJ



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2 Parametrização

A análise da resposta hidrológica da BHJ, em termos de volume armazenado nos reservatórios estratégicos, foi conduzida através de simulações empregando o modelo hidrológico WASA. Na etapa de calibração/validação do modelo, as simulações realizadas compreenderam os períodos destacados na tabela 3 abaixo de acordo com a disponibilidade de dados medidos dos volumes dos reservatórios avaliados.

As séries históricas de volume armazenado nos reservatórios foram obtidas junto ao Portal Hidrológico do Ceará mantido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) (COGERH, 2020). Foram selecionados 12 reservatórios estratégicos inseridos na BHJ, monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), apresentando diferentes capacidades de acumulação.

Alguns dos reservatórios avaliados não dispõem de dados a partir de 1980 pois a construção ocorreu em período posterior, também apresentado na tabela 3. A escolha do ano de 1980 para o início da simulação deve-se ao fato da disponibilidade de séries históricas de umidade, radiação, precipitação e temperatura (constituem dados de entrada do modelo).

Tabela 3 - Reservatórios da BHJ e períodos das simulações.

Reservatório	Ano de Conclusão	Capacidade (hm³)	Período Calibração/Validação	Período Racionalização
Arneiroz II	2005	197,06	2008 - 2011	2004 - 2011
Banabuiú	1966	1.601,00	1986 - 2011	1980 - 2011
Benguê	2000	19,56	2004 - 2011	2000 - 2011
Canoas	1999	69,25	2004 - 2011	1999 - 2011
Castanhão	2003	6.700,00	2004 - 2011	2002 - 2011
Cedro	1906	125,69	1985 - 2011	1980 - 2011
Fogareiro	1996	118,82	2004 - 2011	1996 - 2011
Orós	1961	1.940,00	2004 - 2011	1980 - 2011
Pedras Brancas	1978	434,05	1986 - 2011	1980 - 2011
Quixeramobim	1960	54,00	2004 - 2011	1988 - 2011
Riacho do Sangue	1918	61,42	2004 - 2011	1980 - 2011
Trussu	1996	301,00	2004 - 2011	1996 - 2011

Fonte: Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH, 2020)

A parametrização inicial da BHJ foi estabelecida conforme proposta de Medeiros (2009) e Medeiros *et al.* (2010), aplicada em micro e meso escala, particularmente no tocante a condutividade hidráulica dos solos. Este parâmetro é determinado através do modelo Rosetta (SCHAAP, 1999). Proposta também empregada por Lopes (2013) em meso bacia do semiárido. Considerando que o estudo aqui proposto é desenvolvido em bacia semiárida de macro escala, extensão amplamente superior aos estudos destacados acima, faz-se necessário a condução de ajustes na parametrização a fim de compatibilizar os processos hidrológicos simulados pelo WASA com a área de estudo.

Previamente ao início das simulações, os seguintes parâmetros foram modificados:

- K_{fkorrr}

Este parâmetro é empregado para compensar a atenuação da precipitação em simulações com passo diário. Em outras palavras, minimiza o erro da concepção de que a precipitação diária é distribuída de maneira uniforme ao longo das 24 horas. Visto que no semiárido brasileiro, as precipitações convectivas são predominantes sendo caracterizadas por elevadas intensidades e curta duração, ou seja, as chuvas são restritas a frações do dia. O K_{fkorrr} é assim expresso, Equação 4:

$$K_{f\text{korR}} = a.1/R + b \quad (4)$$

Mamede (2008) ao avaliar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Benguê (área de 1000 km²) obteve uma satisfatória representatividade do processos hidrológicos, especialmente para eventos de precipitação de grande magnitude, com o valor de 122,6 para o coeficiente de ajuste a. Ao coeficiente b é atribuído o valor 1. Valor este que assegura que quando da ocorrência de precipitações extremas, estas tendem a ser distribuídas ao longo do dia.

Diante da diferença na escala espacial da região do presente estudo para a área abordada por Mamede (2008), o valor do coeficiente de ajuste a será de 111,4 conforme proposto por Lira (2014) ao avaliar série de dados pluviométricos de estações distribuídas por todo o Estado do Ceará, apresentando assim uma maior compatibilidade com a escala espacial do presente estudo. Ademais, o valor de 111,4 é considerado um valor médio para o Estado do Ceará, podendo ser aplicado quando da ausência de dados de precipitação, sendo capaz de produzir pequenos erros no cálculo da intensidade de precipitação.

– Condutividade hidráulica saturada dos solos (K_s)

Embora o modelo Rosetta (SCHAAP, 1999) também tenha sido empregado por Medeiros (2009) e Lopes (2013) para a determinação do valor de K_s (mm/d), a maior escala aqui explorada permite a apreciação das diferenças entre os valores de K_s originalmente utilizados por Güntner *et al.* (2002) e gerados pelo modelo Rosetta para um maior número de solos presentes no Estado do Ceará, Tabela 4. A relevância da K_s na geração do escoamento superficial em regiões semiáridas (FIGUEIREDO *et al.*, 2016) justifica a necessidade do emprego de valores de K_s compatíveis com os valores observados na região, quando da ausência do dado medido, a fim de evitar subestimativas/superestimativas nas variáveis hidrológicas simuladas pelo modelo.

Tabela 4 – Condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) dos solos da BHI

Solo	Horizonte	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (SHAPP, 1999)	Diferença (%)
NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico (RYve)	1	6230	813	666.25
	2	5250	255	1958.93
	3	5369	178	2916.12
	4	8344	708	1078.54
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Distrófico (RQd)	1	10192	3301	208.76
	2	8397	3664	129.16
	3	7675	2023	279.38
	4	5892	825	614.24
LATOSSOLO VERMELHO (LV)	1	2132	289	637.81
	2	629	185	239.92
	3	1788	204	776.68
	4	4421	275	1507.70
CAMBISSOLO Ta Eutrófico (Cve)	1	887	112	692.08
	2	1392	118	1080.00
	3	1793	1793	0.02
LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico (LVAd)	1	4510	551	718.50
	2	3745	499	650.44
	3	2506	483	418.82
	4	1561	460	239.38
	5	2518	448	462.13
LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico (LVAd)	1	10490	1588	560.60
	2	7753	1109	599.10
	3	6517	830	685.13
	4	5902	704	738.31
	5	6473	657	885.22
	6	8566	630	1259.63
LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico (LVe)	1	8606	3703	132.42
	2	4106	1972	108.22
	3	3757	902	316.50
LUVISSOLO (T)	1	4597	391	1075.66
	2	273	238	14.52
	3	86	57	50.82
LUVISSOLO (T)	1	5458	531	927.81
	2	171	165	3.42

Continua

Continuação

Tabela 4 – Condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) dos solos da BHJ

Solo	Horizonte	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (SHAPP, 1999)	Diferença (%)
LUVISSOLO (T)	1	2745	316	768.72
	2	270	84	221.49
	3	11	52	-79.55
	4	66	49	34.96
	5	814	189	330.60
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Eutrófico (PVAe)	1	7808	1261	519.22
	2	2057	441	366.42
	3	2266	384	490.08
	4	578	317	82.29
	5	20	158	-87.58
	6	897	281	219.06
	7	473	102	363.77
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Ta Eutrófico (PVAve)	1	2374	336	606.40
	2	1543	239	545.61
	3	16	232	-93.25
	4	14	115	-87.72
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Eutrófico (PVAbe)	1	7649	2301	232.43
	2	5810	1588	265.84
	3	4424	773	472.36
	4	2008	563	256.68
	5	1347	99	1260.43
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Eutrófico (PVAbe)	1	7171	917	682.05
	2	244	239	2.15
	3	529	222	138.29
	4	1472	256	475.16
	5	1638	309	429.98
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Eutrófico (PVAbe)	1	5480	633	765.76
	2	828	183	352.45
	3	17	57	-70.92
	4	13	99	-86.52
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Eutrófico (PVAbe)	1	26767	5391	396.51
	2	24183	4169	480.07
	3	14775	2974	396.80
	4	6779	1280	429.61
	5	628	176	256.95
	6	3208	491	553.36
	7	6	37	-84.24

Continuação

Tabela 4 – Condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) dos solos da BHJ

Solo	Horizonte	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (SHAPP, 1999)	Diferença (%)
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Eutrófico (PVAbc)	1	843	137	515.50
	2	158	83	90.11
	3	5	87	-93.74
	4	266	69	285.41
	5	416	84	395.51
PLANOSSOLO Ta Eutrófico (Sve)	1	28	2951	-99.06
	2	14	42	-67.37
PLANOSSOLO Ta Eutrófico (Sve)	1	28204	5482	414.48
	2	26009	4595	466.03
	3	481	324	48.53
	4	26	79	-67.65
	5	64	67	-4.02
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Distrófico (PVAbd)	1	2008	378	431.28
	2	1463	345	324.14
	3	571	290	96.78
	4	168	244	-30.98
	5	35	146	-75.80
	6	31	63	-51.20
	7	111	59	88.30
	8	2431	207	1074.43
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Distrófico (PVAbd)	1	22400	4558	391.43
	2	22165	3593	516.91
	3	8799	915	861.68
	4	3266	288	1034.15
ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Tb Distrófico (PVAbd)	1	13387	3418	291.67
	2	8240	1764	367.15
	3	5704	402	1318.89
	4	653	282	131.72
	5	4133	701	489.63
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico (RLd)	1	5347	343	1458.88
	2	6164	410	1403.51
NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico (RRd)	1	27800	4481	520.40
	2	17713	3139	464.29
	3	9932	1758	464.95
	4	10154	987	928.74
	5	6753	443	1424.39

Continuação

Tabela 4 – Condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) dos solos da BHJ

Solo	Horizonte	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (SHAPP, 1999)	Diferença (%)
NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico (RRe)	1	29934	6798	340.34
	2	30363	7384	311.19
	3	31219	8620	262.17
	4	16115	2652	507.67
	5	15686	275	5604.09
	6	9918	1223	710.92
NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico (RRe)	1	29934	6798	340.34
	2	30363	7384	311.19
	3	31219	8620	262.17
	4	16115	2652	507.67
	5	15686	275	5604.09
	6	9918	1223	710.92
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico (RLd)	1	23837	3864	516.89
	2	23837	3864	516.89
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico (RLd)	1	7744	1448	434.78
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico (RLd)	1	207	314	-34.00
	2	211	322	-34.62
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico (RLd)	1	3040	214	1320.77
GLEISSOLO (G)	1	0	28	-99.40
	2	0	36	-100.00
	3	0	38	-100.00
	4	0	43	-100.00
	5	0	50	-99.96
	6	24	89	-72.95
	7	10629	1153	821.87
PLANOSSOLO (S)	1	5300	1240	327.40
	2	5137	1031	398.25
	3	742	155	378.58
	4	370	113	227.84
	5	11	33	-66.53

Conclusão

Tabela 4 – Condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) dos solos da BHJ

Solo	Horizonte	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (SHAPP, 1999)	Diferença (%)
ARGISSOLO (P)	1	206	167	23.52
	2	290	218	33.03
	3	63	190	-67.03
	4	60	222	-73.19
	5	48	217	-77.98
	6	11	135	-91.77
VERTISSOLO (V)	1	1063	170	525.07
	2	39	120	-67.50
	3	3	48	-94.71
	4	523	84	522.23
	5	2649	552	379.96

Fonte: Elaborada pelo autor.

Posteriormente, os parâmetros condutividade hidráulica do embasamento cristalino ($K_{S,LU}$), desnível entre vertentes e rede de drenagem (*Riverbed*) e fator de escala (S_F) foram selecionados para o processo de calibração manual considerando a análise de sensibilidade previamente conduzida por Güntner (2002). Este último é descrito a seguir:

– Fator de Escala (S_f)

A introdução do fator de escala (S_f) objetiva primeiramente compensar a subestimativa da intensidade da precipitação quando a resolução temporal do modelo é inferior aos eventos de precipitação e a variabilidade interna apresentada por estes. Ademais, o fator S_f também pode ser empregado visando o ajuste da rotina de infiltração quando as condições superficiais do solo não são explicitamente representadas. O encrostamento superficial, os macroporos e a variabilidade espacial em reduzida escala são processos e características do solo responsáveis por alterações nas rotinas de infiltração. Podendo o S_f ser empregado para ajustar a infiltração alterada por estas condições (GÜNTNER, 2002). Este fator é inversamente proporcional a condutividade hidráulica saturada dos solos. Logo, valores superiores a unidade conduzem a uma redução na infiltração, e conseqüentemente, elevação da lâmina de escoamento.

Finalmente, empregou-se o coeficiente Nash e Sutcliffe (E_{NS}) (1970), dado na Equação 5, para avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo modelo. O coeficiente E_{NS} é amplamente empregado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{med_i} - V_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{med_i} - \bar{V}_{med})^2} \quad (5)$$

Em que:

V_{med_i} = volume medido no dia i (hm^3)

V_{sim_i} = volume simulado no dia i (hm^3)

V_{med} = volume médio medido no período (hm^3)

O valor de E_{NS} varia de menos infinito ($-\infty$) a 1, sendo o valor ótimo obtido quando E_{NS} é igual a 1. Valores de E_{NS} situados de 0 a 1 são considerados aceitáveis, enquanto que valores negativos indicam que o valor médio observado é um preditor melhor que o valor simulado. Sugerindo assim uma performance insatisfatória do modelo (MORIASI *et al.*, 2007).

4.3 Cenários

O negativo balanço hídrico evidenciado na maioria dos meses do ano no semiárido cearense (DE ARAÚJO, 2012) é um fator que contribui decisivamente para a condição de escassez hídrica na região, ou seja, a limitada oferta hídrica não é capaz de atender as demandas dos diversos setores tais como agricultura, pecuária, indústria e abastecimento humano. A situação é agravada nos períodos de precipitações abaixo da média histórica, como o evidenciado de 2012 a 2017, e os já recorrentes conflitos em torno do uso da água são intensificados.

Historicamente, as medidas emergenciais tais como abastecimento de água através de carros pipas; perfuração de poços profundos; instalação de dessalinizadores e implantação de adutoras de rápida montagem vêm sendo adotados pelo poder público para assegurar o abastecimento humano, uso prioritário conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997). Entretanto, os prejuízos econômicos e sociais advindos com a paralisação das principais atividades produtivas da zona rural cearense (agricultura e pecuária) têm amplificado o subdesenvolvimento nos já carentes municípios do semiárido cearense.

Nessa perspectiva, a busca pela sustentabilidade hídrica é questão urgente e a proposição de arranjos de uso eficiente de água e de ampliação da oferta hídrica são fundamentais para a gestão dos escassos recursos hídricos. No Estado do Ceará, a BHI assume papel de destaque na análise dos arranjos propostos pois drena praticamente metade da área do estado abrigando parcela considerável da população cearense e os principais reservatórios estratégicos cearenses, açudes Castanhão, Orós e Banabuiú.

Assim, o presente trabalho emprega o modelo hidrológico WASA para a proposição e análise dos seguintes cenários:

1. Uso intenso da água de pequenos açudes. Objetivando assim responder o questionamento proposto por Brasil e Medeiros (2019): Qual o impacto sobre as aflúncias aos reservatórios estratégicos quando se promove o uso intenso da água dos pequenos reservatórios situados a montante?
2. Direcionamento da vazão (m^3s^{-1}) destinada ao Estado do Ceará através da Transposição do Rio São Francisco ao Açude Castanhão, aplicando o cenário 1 proposto simultaneamente.

4.3.1 Uso intenso da água de pequenos reservatórios

Os pequenos e médios reservatórios no semiárido, exibindo uma elevada densidade nas bacias hidrográficas cearenses (PEREIRA *et al.*, 2019), não apresentam a capacidade de garantir vazões regularizadas com elevados níveis de garantia para o atendimento dos múltiplos usos ao longo do ano. A irregularidade temporal e espacial das precipitações na região associada a elevadas perdas por evaporação nos reservatórios e a reduzida capacidade de acumulação destes conduz a um quadro recorrente de esvaziamento total dos pequenos corpos d'água no período seco.

Embora os pequenos açudes não representem fontes perenes de água para as populações rurais esparsas, são uma fonte hídrica essencial para a fixação das comunidades rurais no campo e para o desenvolvimento de atividades produtivas. Alexandre (2012), analisando pequenos reservatórios no semiárido nordestino, elencou os principais usos e arranjos de utilização dos pequenos reservatórios: uso doméstico (28,8%); uso doméstico, pesca e dessedentação animal (18,5%); uso doméstico e dessedentação animal (18,3%); uso doméstico e pesca (13,9%); uso doméstico, dessedentação humana, irrigação, dessedentação animal (11,1%); uso doméstico, dessedentação humana, irrigação (6,5%) e outros (2,9%). Além destes números, o estudo constatou que apenas 16% da população utiliza a água dos

pequenos açudes para beber. O crescente número de cisternas de placa para capturar águas pluviais e de poços profundos instalados na região têm contribuído para reduzir a importância dos pequenos açudes para o abastecimento humano.

Considerando a ampliação do número de dispositivos hídricos para garantir o abastecimento humano das populações rurais, os pequenos açudes podem ser explorados de forma mais intensa para atender às demandas de outros usos como a irrigação das principais culturas desenvolvidas pelos agricultores familiares. Tradicionalmente, os agricultores familiares têm cultivado através de um regime de sequeiro, ou seja, um sistema de cultivo que depende do regime chuvoso. Entretanto, a irregularidade espacial e temporal das precipitações no semiárido, somada às recorrentes secas, inviabiliza em vários anos a produção. Gerando assim inúmeros prejuízos econômicos e sociais.

Nesse contexto, a substituição da agricultura de subsistência por uma agricultura irrigada através do uso da água dos reservatórios não estratégicos, exclusivamente para esta finalidade, é apontada como ferramenta para maximizar a produtividade agrícola dos agricultores familiares e minimizar as elevadas perdas de água por evaporação (BRASIL; MEDEIROS, 2019).

Essa regra de operação proposta, também denominada de racionalização do uso da água dos reservatórios não estratégicos, para os pequenos açudes visa minimizar de forma simultânea os prejuízos sociais e econômicos da baixa produtividade e da subutilização de considerável parcela da água retida nos reservatórios que é perdida por evaporação, representando uma água improdutiva.

A análise desse cenário de uso de água é relevante não apenas para o entendimento da dinâmica de disponibilidade hídrica das comunidades rurais, mas também para compreender como essa regra de operação impactará nos grandes reservatórios, e conseqüentemente na disponibilidade hídrica para os centros urbanos e demais setores usuários, pois sabe-se que de forma combinada, os pequenos reservatórios afetam a dinâmica hidrológica nas bacias hidrográficas (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GUNTNER, 2012; DE ARAÚJO e MEDEIROS, 2013; MAMEDE *et al.*, 2018).

Para avaliar o efeito do uso intenso (racional), o componente de reservatórios do modelo foi alterado para assegurar que todos os reservatórios não estratégicos estariam completamente secos no fim dos anos do período de simulação. Assim, quando do início do período chuvoso do ano seguinte, os pequenos reservatórios estarão completamente secos podendo armazenar todo o volume de água correspondente à sua capacidade.

Embora o completo esvaziamento dos pequenos reservatórios seja um processo característico do semiárido em virtude da intensa evaporação no período seco, no segundo semestre do ano, a abordagem aqui empregada objetiva avaliar o impacto desse processo sendo originado não pela evaporação, e sim pelo uso intenso dessa água para atendimento de demandas de comunidades rurais difusas, em especial as demandas da atividade agrícola.

Resumidamente, a Equação 6 que descreve o volume armazenado nos reservatórios representativos de cada classe de reservatório não estratégico será nula ao final do ano de simulação, Equação 6.

$$V_{t,rm} = V_{t-1,rm} + (Q_{in,r} - U_r) / n_r - Q_{out,rm} + (P - E_{pot}) \cdot A_{rm} - R_{b,rm} = 0 \quad (6)$$

4.3.2 Transposição do Rio São Francisco

Conforme a Resolução nº 411/2005 da Agência Nacional das Águas (ANA), alterada pela Resolução nº 1133/2005, a vazão outorgada para a execução do PISF será de:

1. 26,4 m³s⁻¹ nos dois eixos: representando a vazão firme correspondente à demanda projetada para o ano de 2025 para consumo humano e dessedentação animal na região;

Excepcionalmente, a captação permitida será de:

2. 114,3 m³s⁻¹ e 127 m³s⁻¹ de vazão máxima diária e instantânea, respectivamente. Esta captação será permitida quando o nível de água do Reservatório de Sobradinho estiver acima do menor valor entre:

- a. nível correspondente ao armazenamento de 94% do volume útil; e
- b. nível correspondente ao volume de espera para controle de cheias

A fração, em termos de vazão, destinada ao Estado do Ceará, diante dos possíveis cenários destacados acima, será definida pelo Plano de Gestão Anual (PGA) em consonância com o Art. 2º da Resolução nº 411/2005. A Tabela 5 apresenta a alocação de água para os Estados contemplados pela transposição.

Tabela 5 – Alocação da vazão firme do PISF

Estado	Vazão (m³/s)	%
CE	11,41	43,22
PE	6,09	23,07
PB	5,95	22,54
RN	2,95	11,17
-	26,40	100

Fonte: ANA, 2018

A partir do percentual destinado a cada Estado na condição de vazão firme disponível para bombeamento (26,4 m³s⁻¹), é possível estimar as vazões a serem transpostas na condição de vazão máxima.

Para o Estado do Ceará, na condição de vazão máxima (114,3 m³s⁻¹), o aporte será de 49,40 m³s⁻¹ adotando o percentual estabelecido considerando a vazão firme. Através da análise da série histórica do Reservatório de Sobradinho (ANA, 2019), foram determinadas as vazões afluentes (11,41 ou 49,40 m³/s) ao Reservatório Castanhão. Assim, o balanço hídrico no Castanhão é equacionado no modelo WASA conforme Equação 7:

$$V_t = V_{t-1} + Q_c + Q_{in} - Q_{out} - U_{LR} + (P - E_{pot}) \cdot A_{LR} + Q_{trans} \quad (7)$$

Onde:

$$Q_{trans} = \text{vazão afluente ao reservatório oriunda da transposição [m³/s]}$$

Logo, o balanço hídrico do reservatório Castanhão assumirá os seguintes equacionamentos (Equações 8 e 9) em situação de vazão firme e máxima, respectivamente:

$$V_t = V_{t-1} + Q_c + Q_{in} - Q_{out} - U_{LR} + (P - E_{pot}) \cdot A_{LR} + 11,41 \quad (8)$$

$$V_t = V_{t-1} + Q_c + Q_{in} - Q_{out} - U_{LR} + (P - E_{pot}) \cdot A_{LR} + 49,40 \quad (9)$$

5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados das etapas de: calibração/validação do modelo WASA através da comparação dos volumes medidos e simulados dos Reservatórios Arneiroz II, Banabuiú, Benguê, Canoas, Castanhão, Cedro, Fogareiro, Orós, Pedras Brancas, Quixeramobim, Riacho do Sangue e Trussu; cenário de uso intenso da água dos pequenos e médios reservatórios, no período de julho a dezembro, sobre o volume armazenado nos reservatórios estratégicos (são avaliados os mesmos reservatórios da etapa de calibração/validação) e; cenário de transposição sobre o volume armazenado no Reservatório Castanhão.

5.1 Calibração/validação do modelo

Ao longo da presente pesquisa foram realizadas cerca de 80 simulações com diferentes parametrizações do modelo, visando identificar o conjunto de parâmetros que melhor representa a dinâmica hidrológica na região. Buscou-se, com isso, oferecer uma visão objetiva da sensibilidade do modelo aos principais parâmetros aqui explorados para verificar o desempenho deste na determinação dos volumes armazenados nos reservatórios distribuídos na área de estudo. A Tabela 6 apresenta 10 relevantes parametrizações adotadas.

Tabela 6 – Parametrizações empregadas nas simulações

Parametrização	Parâmetro		
	$K_{S,LU}^1$	<i>Riverbed</i> ²	S_F^3
1	0,1	1500	-
2	10,0	1500	-
3	1,0	1500	-
4	1,0	500	-
5	3,5	500	-
6	2,0	500	-
7	3,5	500	S_F
8	1,0	100	S_F
9	3,5	500	S_F
10	3,5	500	S_F

¹ $K_{S,LU}$ = condutividade hidráulica do embasamento cristalino ($mm.d^{-1}$);

²*Riverbed* = profundidade do solo que é capaz de contribuir com fluxo subsuperficial para os rios (mm);

³ S_F = parâmetro que corrige a relação entre a intensidade da chuva e a capacidade de infiltração do solo (adimensional)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da sétima simulação (parametrização 7) é possível observar a introdução do S_F nas parametrizações. Os valores de S_F atribuídos as sub-bacias à montante dos reservatórios aqui explorados são exibidos na Tabela 7. Observa-se que o valor de S_F para alguns dos reservatórios não foi alterado entre algumas parametrizações, por exemplo o Açude Arneiroz II nas duas últimas simulações. A manutenção do valor de S_F foi realizada considerando que o valor mantido produziu o melhor desempenho do modelo nas condições avaliadas.

Tabela 7 – Valores de S_F nas sub-bacias a montante dos reservatórios

Reservatório	S_F				Máximo
	S7	S8	S9	S10	
Arneiroz II	0,05	0,7	1,0	1,0	1,0
Banabuiú	1,0	0,8	0,5	0,5	1,0
Benguê	1,5	0,8	1,2	1,2	1,5
Canoas	1,2	1,2	2,0	2,3	2,3
Castanhão	1,2	0,7	2,2	2,5	2,5
Cedro	0,1	0,5	1,2	0,8	1,2
Fogareiro	0,2	0,7	2,0	2,5	2,5
Orós	1,5	0,8	1,8	2,0	2,0
Pedras Brancas	9,0	1,1	9,5	9,8	9,8
Quixeramobim	2,0	1,2	3,0	3,5	3,5
Riacho do Sangue	1,5	0,8	2,0	2,3	2,3
Trussu	6,0	5,0	5,0	5,5	6,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

O desempenho do modelo avaliado pelo coeficiente E_{NS} para as parametrizações aqui exploradas está resumido na Tabela 8. O resumo gráfico de todas as parametrizações (simulações) é apresentado no ANEXO, com destaque para os volumes medidos e os volumes obtidos na parametrização 10.

Tabela 8 – Desempenho do modelo WASA ao longo das parametrizações

Reservatório	Coeficiente de Eficiência ENS									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Arneiroz II	-1,01	-4,67	-0,96	-0,97	-0,93	-0,94	-0,98	-0,63	-0,67	-0,67
Banabuiú	-0,07	-1,10	-0,19	-0,19	-0,44	-0,29	-0,46	-0,23	-0,37	-0,31
Benguê	-1,05	-4,60	-1,76	-1,90	-3,70	-3,34	-0,61	-1,00	-1,07	-1,07
Canoas	-7,50	-20,89	-9,10	-9,26	-15,74	-12,28	-1,63	-0,41	0,03	0,01
Castanhão	-5,99	-21,37	-0,86	-0,87	-9	-2,12	-4,76	-0,93	-0,26	-0,93
Cedro	0,17	0,29	0,33	0,33	0,6	0,51	0,45	0,37	0,52	0,60
Fogareiro	-3,39	-4,80	-3,72	-3,74	-4,19	-3,99	-2,80	-2,16	-0,64	-0,05
Orós	0,51	-11,46	0,01	-0,01	-2,77	-0,61	0,36	0,61	0,67	0,70
Pedras Brancas	0,64	-0,66	0,64	0,64	0,32	0,54	0,60	-44,31	0,62	0,62
Quixeramobim	-6,47	-7,31	-7,04	-7,1	-7,28	-7,3	-0,55	-5,88	-0,26	-0,27
Riacho do Sangue	0,01	-4,89	-0,59	-0,65	-1,99	-1,38	-0,34	0,33	0,31	0,09
Trussu	-8,05	-12,44	-8,75	-8,76	-10,25	-9,42	0,59	0,50	-0,06	0,50

As cores indicam a qualidade da simulação: azul-satisfatória; verde-aceitável e vermelho-insatisfatória.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de sensibilidade previamente conduzida por Güntner (2002) destacou que a sensibilidade do modelo aos parâmetros do solo e do terreno, os explorados nesta pesquisa estão enquadrados nesta categoria, varia consideravelmente entre estes. A natureza geológica da área de estudo (cristalina ou sedimentar) é outro aspecto que influencia diretamente a sensibilidade do modelo às alterações no valor do parâmetro, particularmente a condutividade hidráulica do embasamento cristalino ($K_{S,LU}$).

Este parâmetro influencia a geração do escoamento exclusivamente em áreas cristalinas apresentando solos rasos, característica predominante da área da BHJ. Fato que conduziu para a adoção de valores com faixa de variação de 0,001 a 1,2 mm.dia⁻¹ (condição próxima a impermeabilidade) em parametrização conduzida por Mamede (2008) na sub-bacia do Benguê, inserida na BHJ.

Já Medeiros (2009), também utilizando o modelo WASA, obteve um excelente desempenho do modelo ($E_{NS} > 0,9$) estimando o volume armazenado nos reservatórios Benguê e Boqueirão, situados na sub-bacia do Benguê, aplicando um valor de 10 mm.dia⁻¹. Mamede *et al.* (2018), avaliando o efeito de múltiplos reservatórios na dinâmica hídrica da sub-bacia do Benguê, aplicou esta última parametrização obtendo também um desempenho excelente do modelo para um maior período de análise. A aplicação de um valor superior ao comumente atribuído ao nordeste brasileiro, notadamente a região semiárida, foi baseada em observações de campo apontando um comportamento diferenciado, por exemplo infiltração excessiva evidenciada por Costa (2007).

Assim, e somado ao fato da escassez de dados na área de estudo, as parametrizações empregadas variaram a $K_{S,LU}$ de 0,1 a 10 mm dia⁻¹. Já o desnível entre vertentes e rede de drenagem (*riverbed*) que indica a profundidade do solo que é capaz de contribuir com fluxo subsuperficial para os rios variou de 0,5 a 1,5 m.

O outro parâmetro explorado, o S_F objetiva primeiramente compensar a subestimativa da intensidade da precipitação quando a resolução temporal do modelo é inferior aos eventos de precipitação e a variabilidade interna apresentada por estes. Ademais, o S_F também pode ser empregado visando o ajuste da rotina de infiltração, afeta exclusivamente esta rotina, quando as condições superficiais do solo não são explicitamente representadas.

O encrostamento superficial, os macroporos e a variabilidade espacial em reduzida escala são processos e características do solo responsáveis por alterações nas rotinas de infiltração. Podendo o S_F ser empregado para ajustar a infiltração alterada por estas condições (GÜNTNER, 2002). Este fator é inversamente proporcional a condutividade

hidráulica saturada dos solos. Logo, valores superiores à unidade conduzem a uma redução na infiltração, e conseqüentemente, elevação da lâmina de escoamento.

Parametrizações

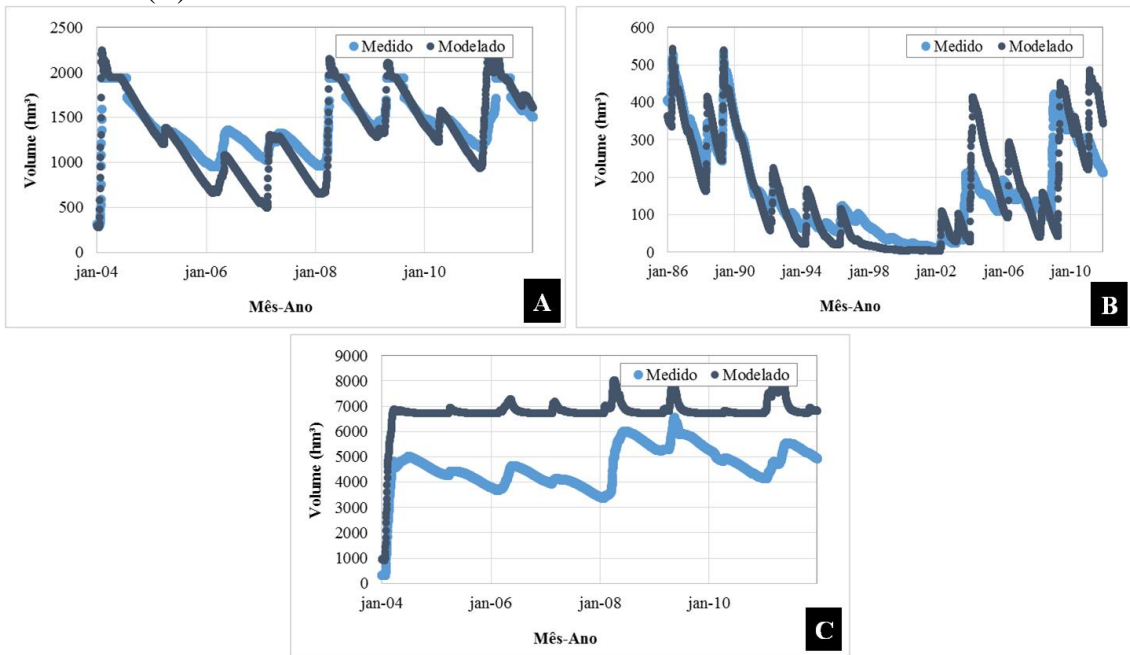
Os resultados gráficos das simulações apresentados a seguir descrevem o avanço da parametrização que buscou maximizar o desempenho do modelo.

Parametrização 1

Embora a parametrização 1 tenha possibilitado resultados dos níveis dos reservatórios satisfatórios para os Açudes Orós e Pedras Brancas (conduzindo a valores de E_{NS} de 0,51 e 0,64 respectivamente), Figura 9 (A) e (B), o volume simulado no reservatório Castanhão superestimou o volume medido durante todo o período analisado. É possível constatar volumes simulados superando a capacidade de acumulação do reservatório, Figura 9 (C). A aplicação de $K_{S,LU}$ de 0,1, condição próxima da impermeabilidade, e *riverbed* de 1,5 m produziu lâminas elevadas de escoamento que resultaram na superestimativa observada no reservatório Castanhão.

Admitir que a fração do solo que irá contribuir com o escoamento é de 1,5 m acentua a contribuição deste elemento na geração do escoamento pois em ambientes semiáridos os solos rasos e as precipitações de elevada intensidade tornam o escoamento Hortoniano dominante (DE ARAÚJO, 2012; PILGRIM *et al.*, 1988). Assim, o solo, através do escoamento sub-superficial, apresenta de modo geral uma participação limitada na transferência de água em zona semiárida.

Figura 9 - Resultado da simulação 1 para os reservatórios Orós (A), Pedras Brancas (B) e Castanhão (C)



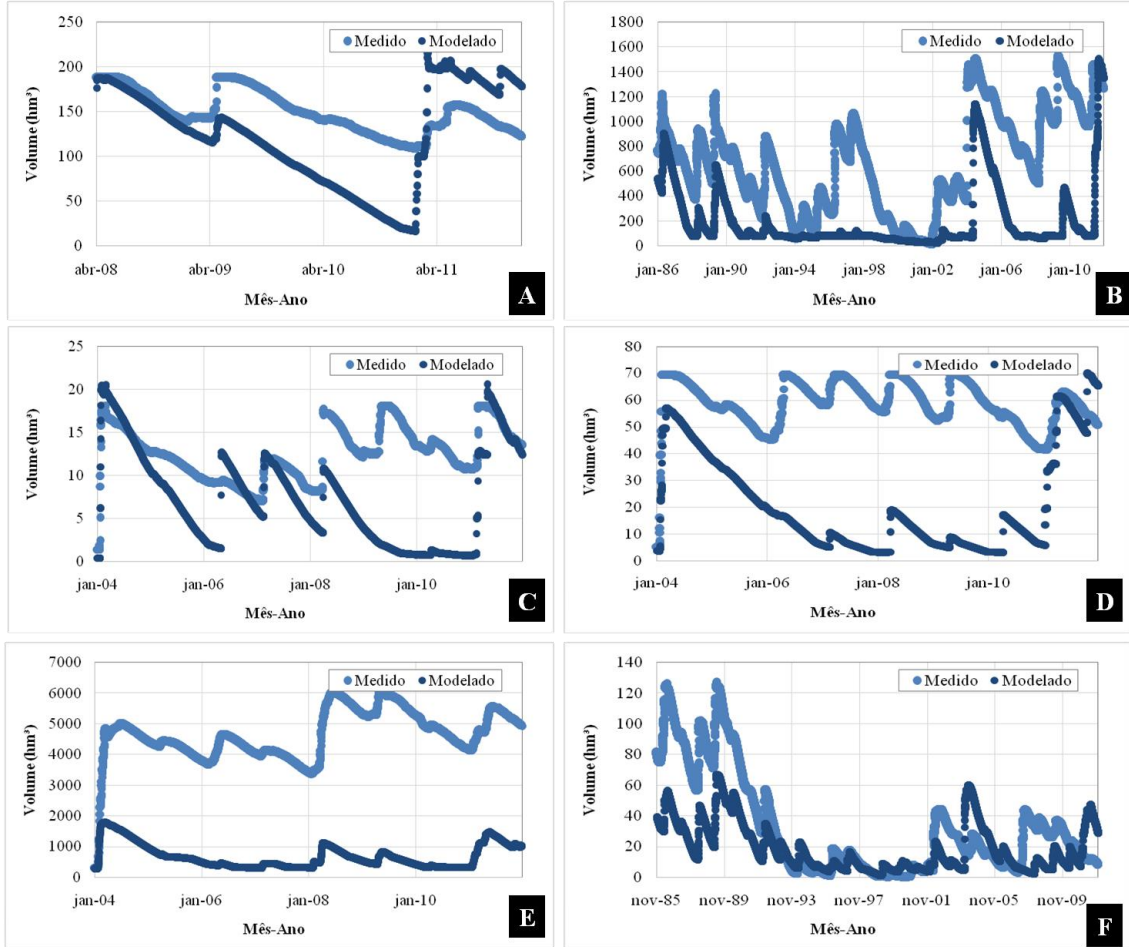
Fonte: Elaborada pelo autor.

Entretanto o valor de *riverbed* de 1,5 m não produziu superestimativas nos reservatórios Orós e Pedras Brancas como exibido acima. E a condição de impermeabilidade ($K_{S,LU}$ de 0,1) aplicada reproduziu de forma satisfatória os volumes destes reservatórios.

Parametrização 2

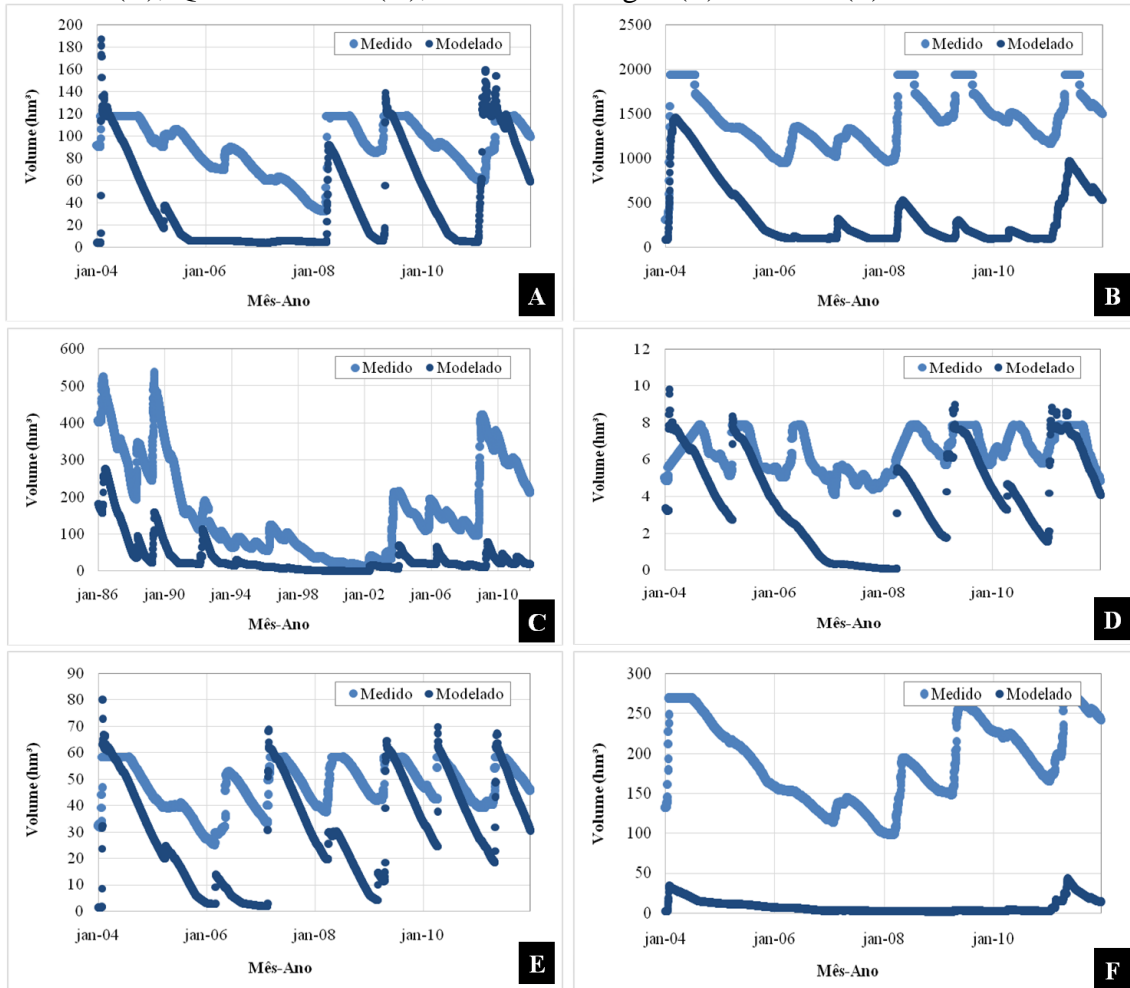
A manutenção do valor de *riverbed* em relação à parametrização inicial permitiu uma análise restrita ao parâmetro $K_{S,LU}$. O valor empregado na segunda parametrização foi aumentado por um fator de 100. As Figuras 10 e 11 ilustram o resultado da parametrização para os reservatórios analisados: Arneiroz II, Banabuiú, Benguê, Canoas, Castanhão, Cedro, Fogareiro, Orós, Pedras Brancas, Quixeramobim, Riacho do Sangue e Trussu.

Figura 10 - Resultado da simulação 2 para os reservatórios Arneiroz II (A), Banabuiú (B), Benguê (C), Canoas (D), Castanhão (E) e Cedro (F)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11: Resultado da simulação 2 para os reservatórios Fogareiro (A), Orós (B), Pedras Brancas (C), Quixeramobim (D), Riacho do Sangue (E) e Trussu (F)



Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 10 e 11 destacadas acima apontam uma subestimativa do volume armazenado, embora a fração do solo capaz de contribuir para o escoamento tenha se mantido elevada (1,5 m). Esta mudança no padrão observado, com destaque para o Açude Castanhão (Figura 10E) destaca a sensibilidade do modelo ao parâmetro $K_{S,LU}$ que além de influenciar a resposta do modelo exclusivamente em zonas de cristalino, exibe reduzida influência no escoamento durante anos secos (GÜNTNER, 2002). Tal constatação deve-se ao fato de que em períodos de precipitações abaixo da média, a lâmina de água que ultrapassa a superfície e os horizontes do solo (processos de infiltração e percolação, respectivamente) e atinge o embasamento cristalino é reduzida.

Assim, no período de análise da maioria dos reservatórios (2004-2011), o $K_{S,LU}$ apresentou forte influência sobre a geração do escoamento pois o período analisado apresentou precipitações em torno da média e/ou superiores. Os volumes armazenados

medidos nos Reservatórios Castanhão (Figura 10E) e Orós (Figura 11B) no período são indicativos.

Parametrizações 3 e 4

Nestas simulações foram empregadas parametrizações com valor de $K_{S,LU}$ (1 mm.dia⁻¹) situado entre o valor atribuído nas primeiras duas simulações. Em relação ao *riverbed*, na quarta simulação foi aplicado um valor de 0,5 m (500 mm), equivalente a um terço do valor aplicado na terceira simulação (1,5 m ou 1500 mm). Os resultados do coeficiente E_{NS} apresentados na Tabela 8 indicam que a resposta do modelo em termos de volume armazenado nos reservatórios não foi influenciada pela redução deste parâmetro. Assim, as parametrizações seguintes adotaram o valor de *riverbed* de 0,5 m considerando que este valor é mais próximo das características físicas dos solos predominantes na BHJ, (DE ARAÚJO, 2012; FIGUEIREDO *et al.*, 2016)

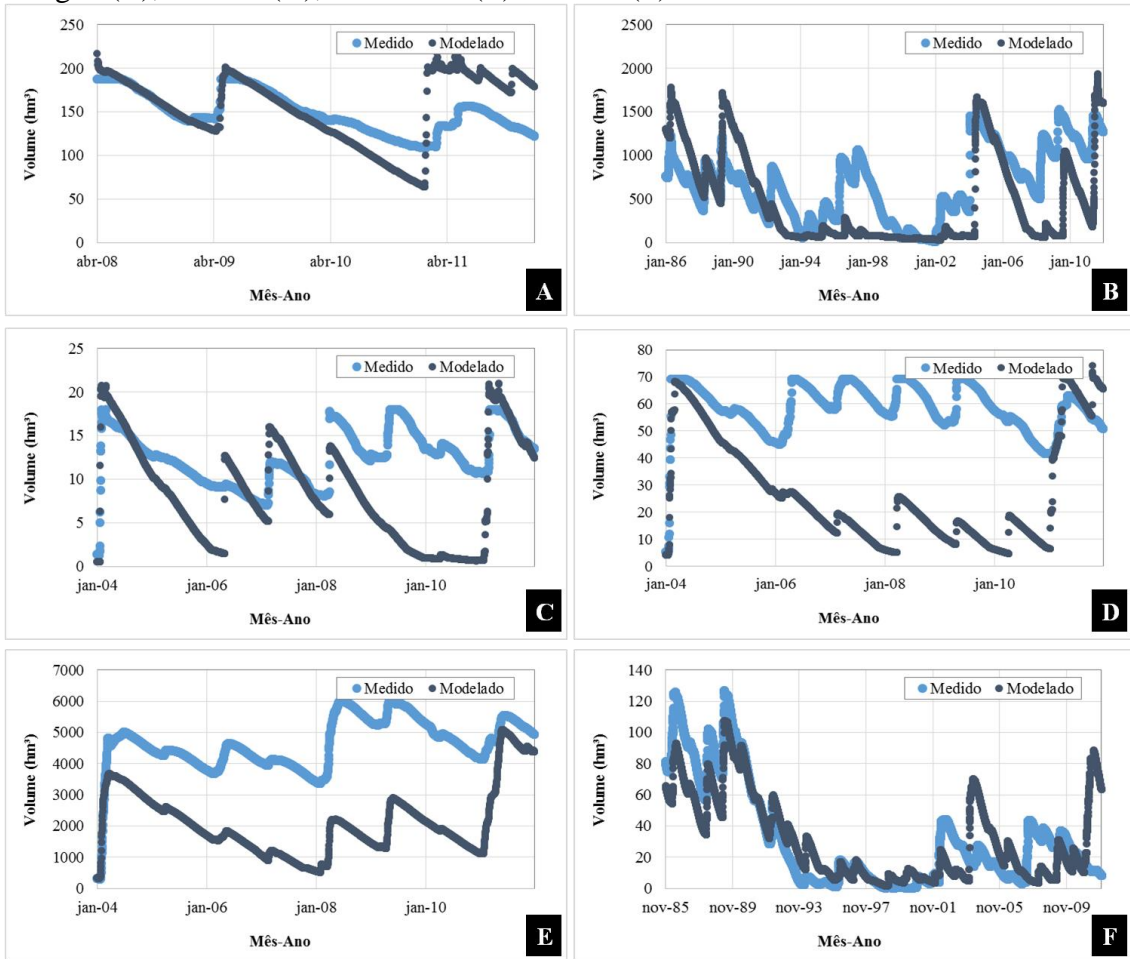
Parametrização 5

Nesta parametrização, o valor atribuído a $K_{S,LU}$ foi de 3,5 mm.dia⁻¹. As Figuras 12 e 13 exibem os volumes medidos e modelados nos reservatórios. Conforme é apresentado na Tabela 8, para esta parametrização apenas o Reservatório Cedro exibiu um desempenho satisfatório ($E_{NS} = 0,6$).

Parametrizações 6,7,8 e 9

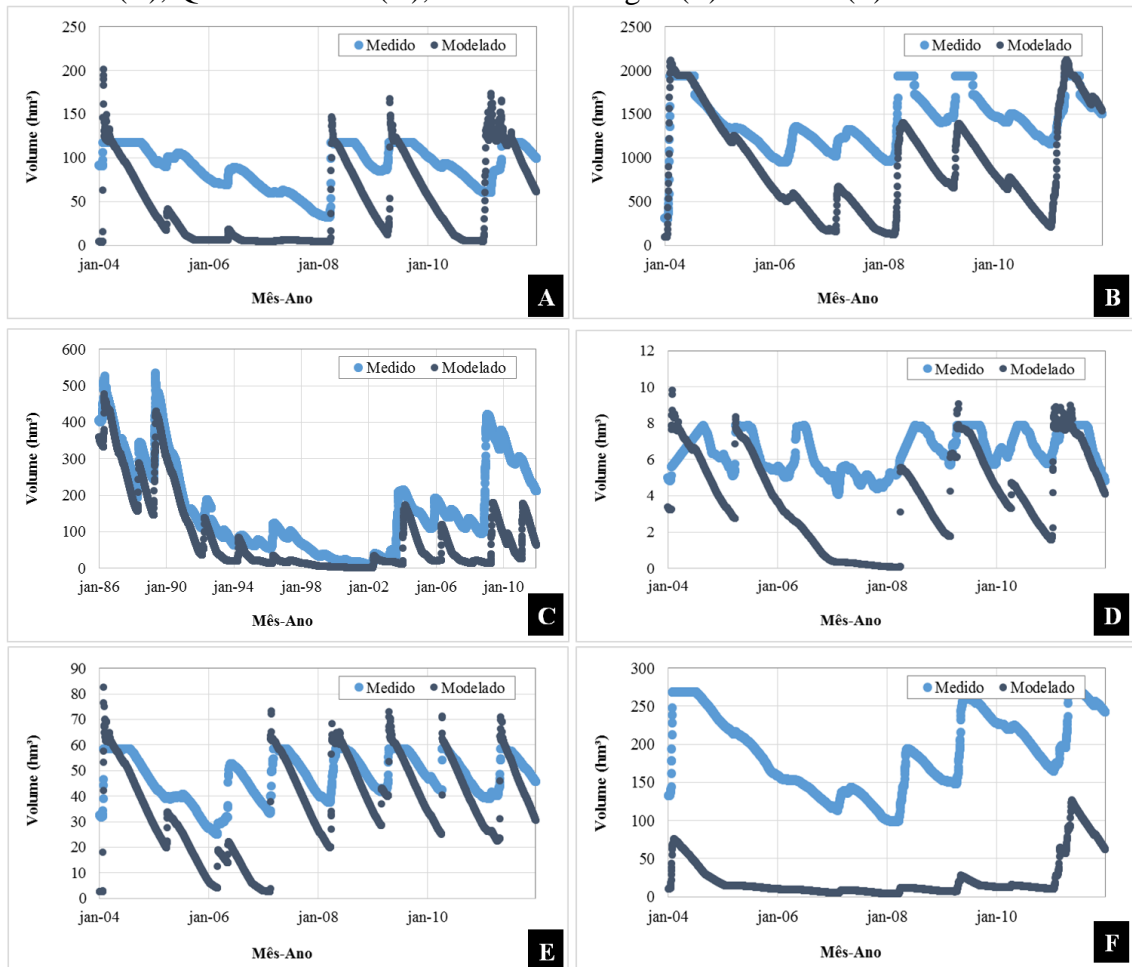
Os valores dos parâmetros empregados nestas simulações são exibidos na Tabela 6. A partir da simulação de número sete (7) foi introduzido o parâmetro S_F modificando o valor de K_S . Os valores de S_F em cada simulação foram apresentados na Tabela 7.

Figura 12 - Resultado da simulação 5 para os reservatórios Arneiroz II (A), Banabuiú (B), Benguê (C), Canoas (D), Castanhão (E) e Cedro (F)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13: Resultado da simulação 5 para os reservatórios Fogareiro (A), Orós (B), Pedras Brancas (C), Quixeramobim (D), Riacho do Sangue (E) e Trussu (F)



Fonte: Elaborada pelo autor.

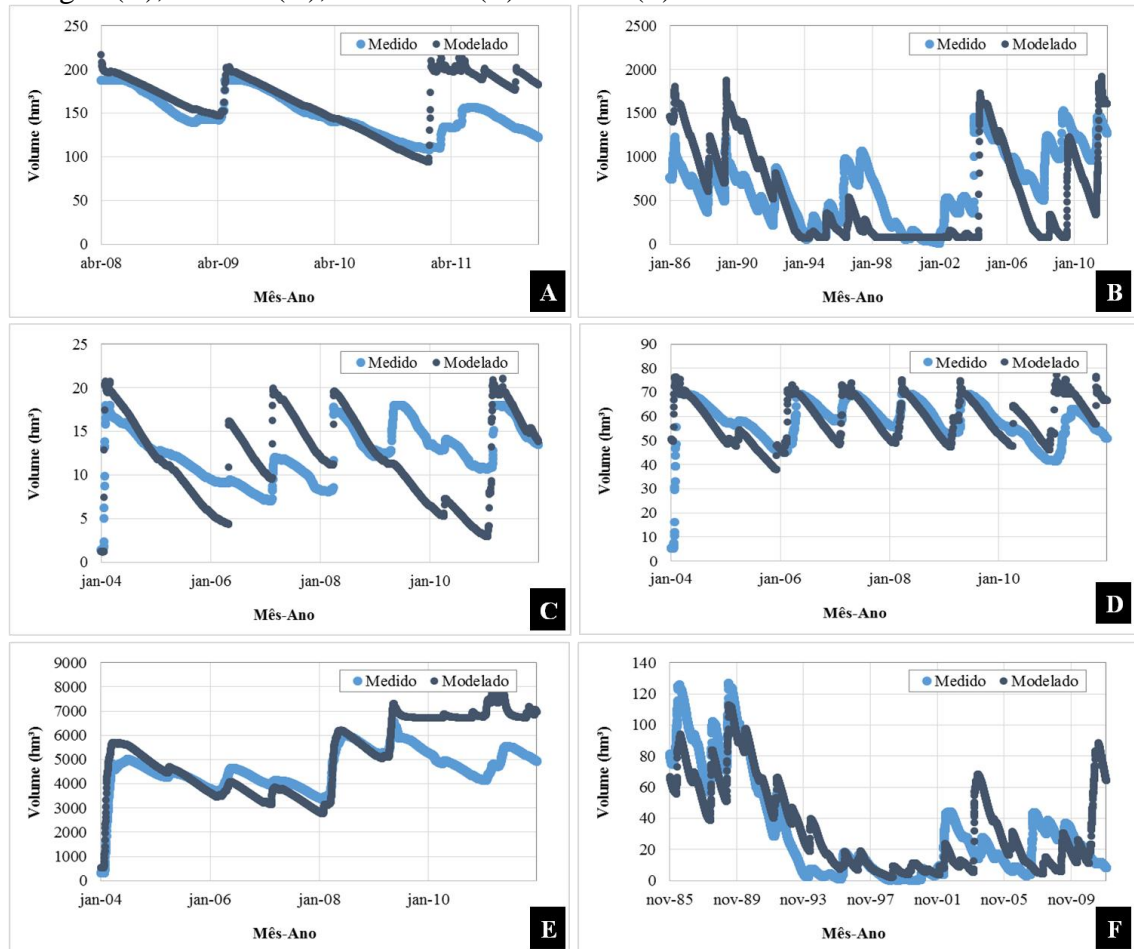
Parametrização 10

Os resultados da parametrização 10 nos reservatórios analisados são apresentados nas Figuras 14 e 15 a seguir. O desempenho do modelo foi satisfatório para os reservatórios Cedro, Orós, Pedras Brancas e Trussu ($E_{NS} = 0,60; 0,70; 0,62$ e $0,50$, respectivamente), destacando assim a melhoria do desempenho do modelo após a inserção do parâmetro S_F . O valor de E_{NS} de $0,50$ para o reservatório Trussu supera o valor de $0,080$ obtido por Malveira (2009) para um período de 1961 a 2005. Já para o reservatório Canoas, a autora obteve um valor de E_{NS} de $0,50$ enquanto que o máximo valor obtido foi de $0,03$, embora reproduza a dinâmica de enchimento e esvaziamento do reservatório. Já para o reservatório Orós, os melhores resultados em ambas as pesquisas foram da ordem de $0,7$.

Diante da melhoria do desempenho do modelo com a inserção de S_F , evidencia-se que a condutividade hidráulica saturada do solo (K_S) proposta através do modelo Rosetta tem

forte influência sobre o desempenho do modelo corroborando com a parametrização de Medeiros (2009) e estudo de Figueiredo *et al.*(2016), existindo assim a necessidade do desenvolvimento de estudos capazes de determinar com maior precisão o valor desta propriedade do solo.

Figura 14 - Resultado da simulação 10 para os reservatórios Arneiroz II (A), Banabuiú (B), Benguê (C), Canoas (D), Castanhão (E) e Cedro (F)

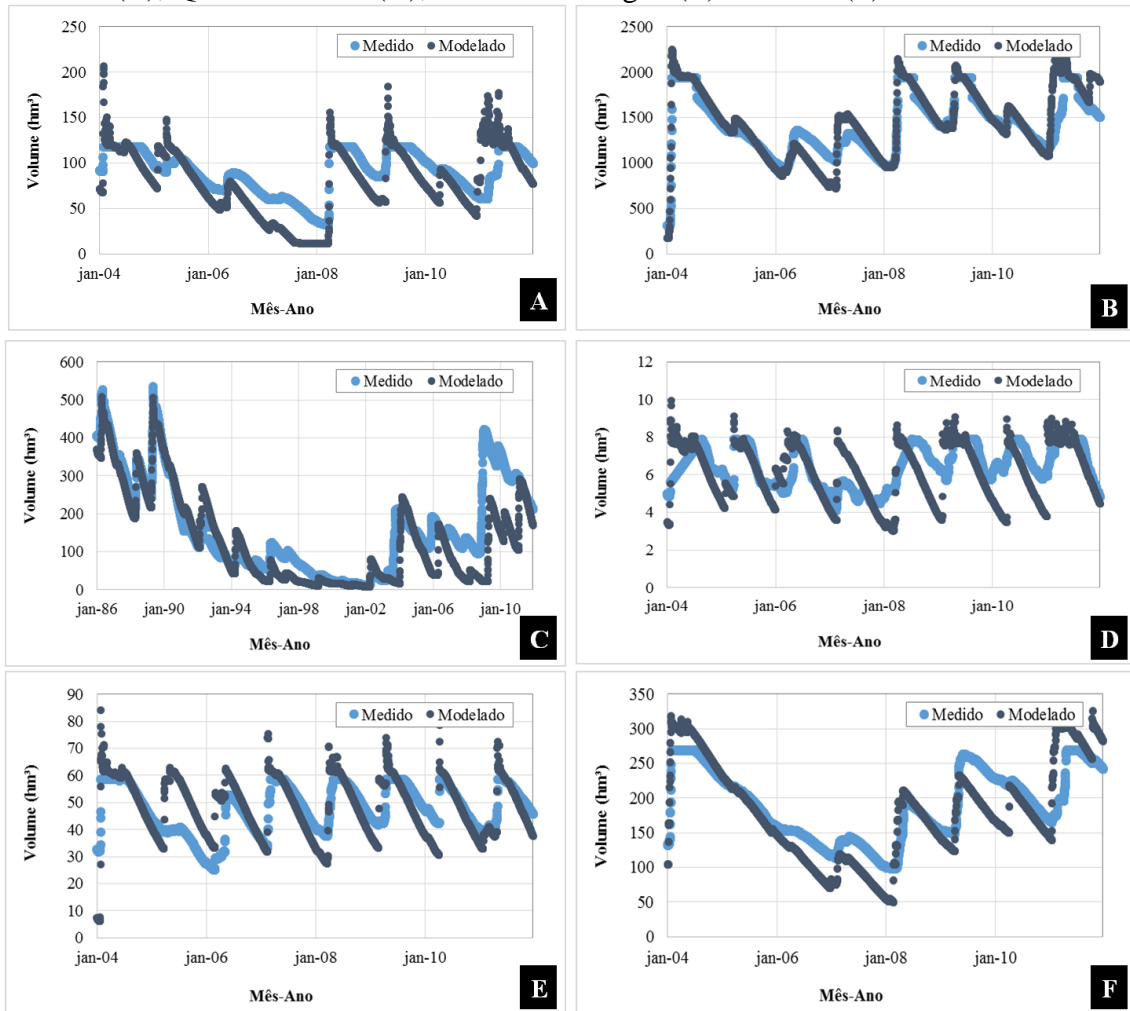


Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro aspecto abordado nos trabalhos de Medeiros (2009) e Malveira (2009) é a variação do desempenho do modelo (avaliado através do coeficiente E_{NS}) em função da escala, área de drenagem do reservatório. Enquanto Medeiros (2009) obteve resultados satisfatórios em micro (4,7 km²) e meso (933 km²) escalas, Malveira (2009) obteve resultados satisfatórios apenas quando a área de drenagem dos reservatórios avaliados superou os 1000 km², sendo o melhor desempenho obtido para o reservatório Orós (área de drenagem de 2.870 km²) situado no exutório da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe. Na presente pesquisa foi

possível obter resultados satisfatórios tanto para o açude Trussu (área de drenagem de 718 km), inserido na área de drenagem do açude Orós, e Orós (2.870 km²), Figura 15.

Figura 15 - Resultado da simulação 10 para os reservatórios Fogareiro (A), Orós (B), Pedras Brancas (C), Quixeramobim (D), Riacho do Sangue (E) e Trussu (F)



Fonte: Elaborada pelo autor.

O desempenho satisfatório para o Reservatório Orós valida a aplicabilidade do modelo em grande escala como já atestado em Güntner (2002), Güntner e Bronstert (2004) com a parametrização proposta. Contudo os resultados aceitáveis e não satisfatórios reafirmam a necessidade da compatibilização da parametrização com a escala de representação dos processos (MEDEIROS, 2009).

Outros fatores, além das incertezas ligadas a K_s , podem contribuir para um desempenho não satisfatório do modelo quando da simulação do volume armazenado em grandes reservatórios. A indisponibilidade de informações sobre a estrutura e as regras de operação de alguns dos grandes reservatórios foi responsável pela proposição de

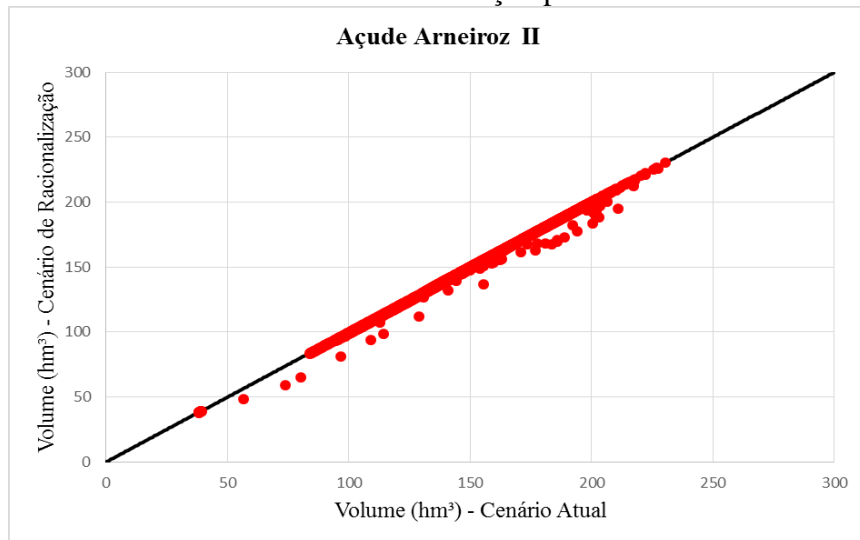
simplificações na concepção do modelo que conduzem a incertezas na predição dos volumes (GÜNTNER, 2002).

Imprecisões na determinação das perdas por evaporação; possível perdas por percolação pelo embasamento cristalino; o emprego de regras de operação simplificadas para determinar o vertimento de forma controlada e a aplicação de coeficientes médios para determinar a área da bacia hidráulica de reservatórios que não dispõem de dados geométricos são alguns dos fatores listados por Güntner *et al.* (2004) que conduzem a incertezas.

5.2 Impacto do uso intenso da água de pequenos açudes na dinâmica hidrológica

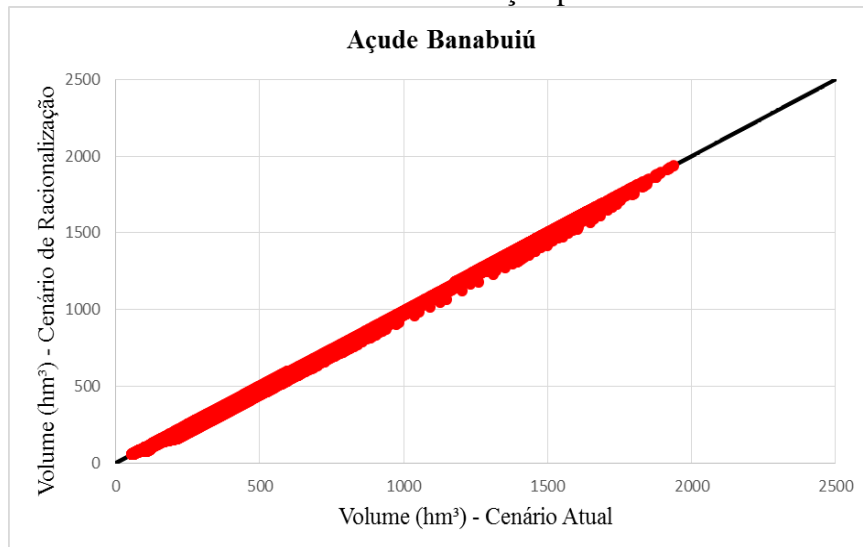
Após a etapa de calibração/validação, a parametrização 10, simulação esta que representa a condição atual do uso da água dos pequenos reservatórios, foi empregada para a comparação com a simulação que propôs o uso intenso da água dos pequenos e médios reservatórios no período seco, segundo semestre do ano. Assim, é possível observar nas Figuras 16 a 27 a evolução dos volumes dos grandes reservatórios explorados nesta pesquisa diante da racionalização do uso da água dos reservatórios não estratégicos e do uso atual.

Figura 16 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Arneiroz II



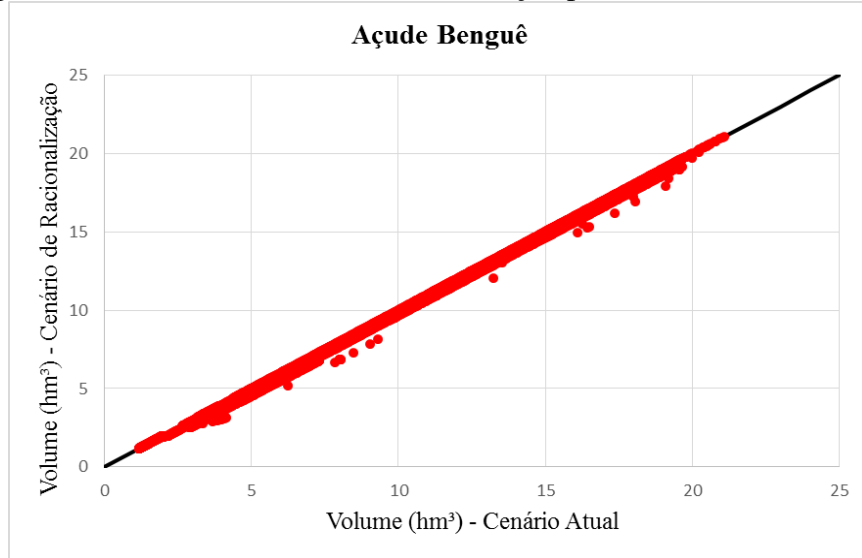
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Banabuiú



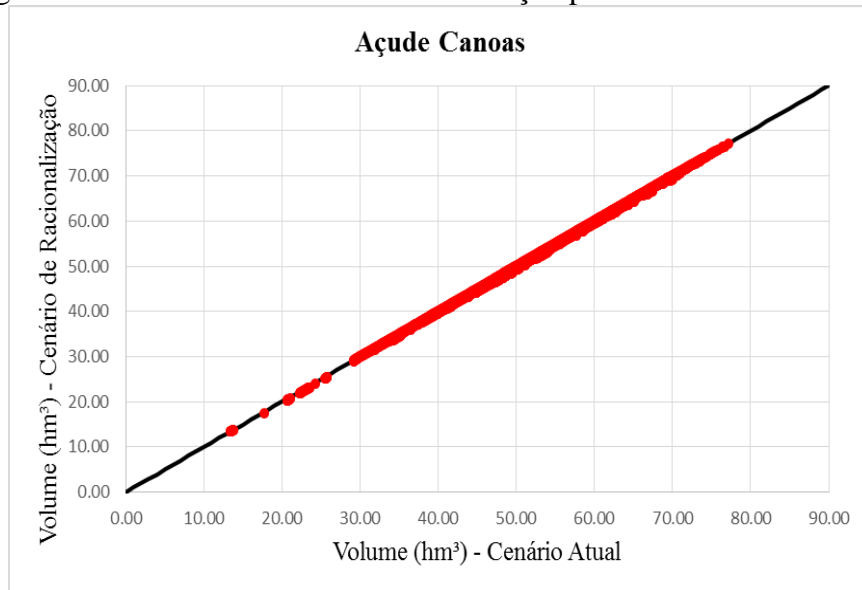
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Benguê



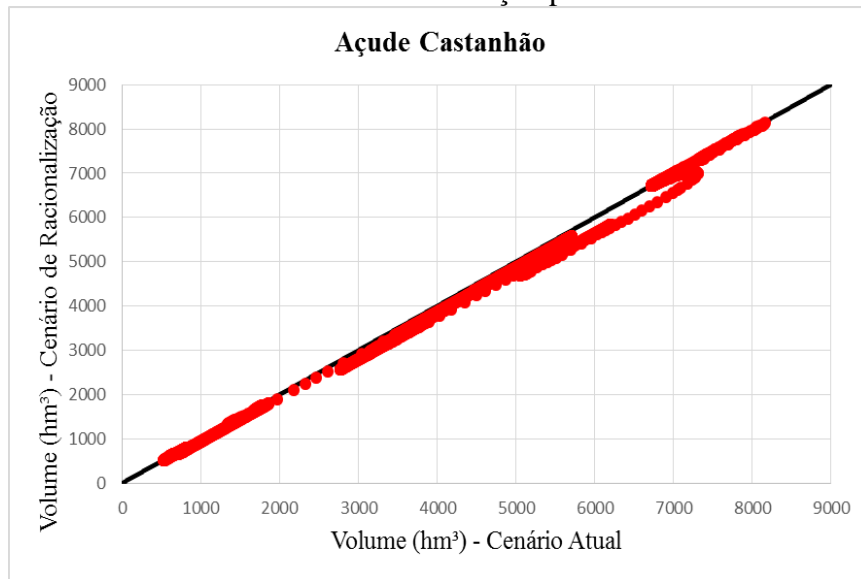
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Canoas



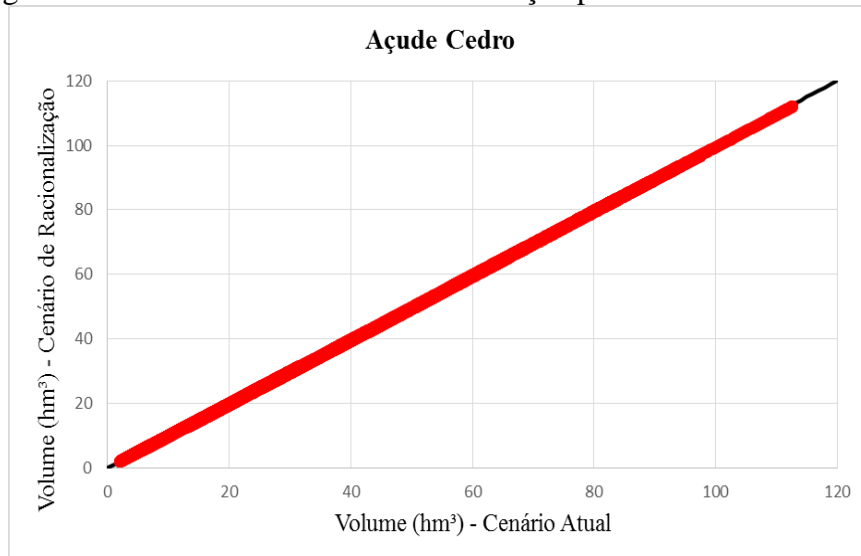
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Castanhão



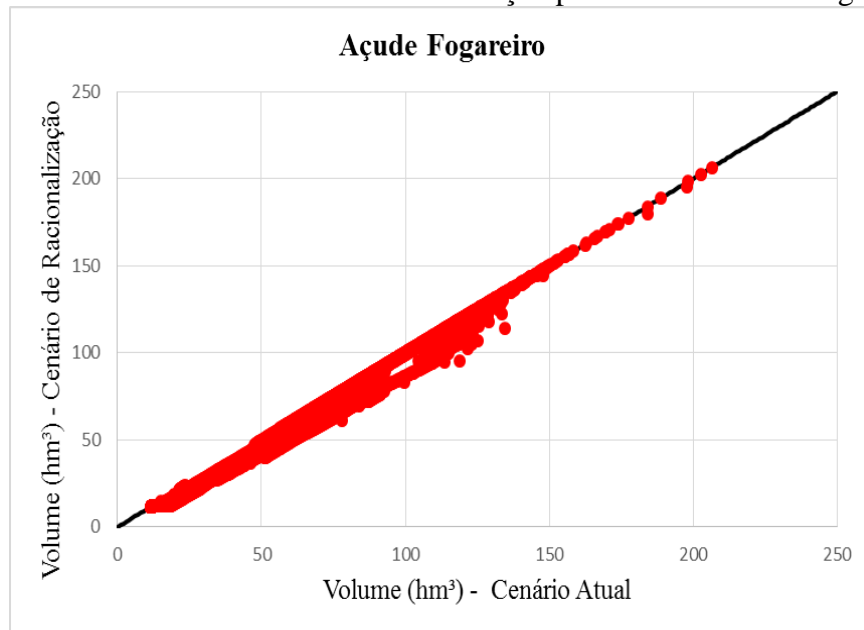
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Cedro



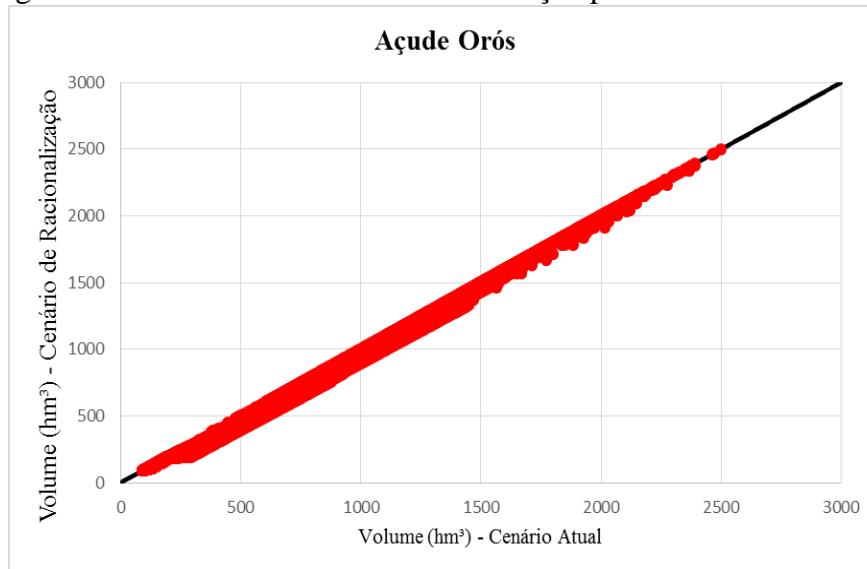
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Fogareiro



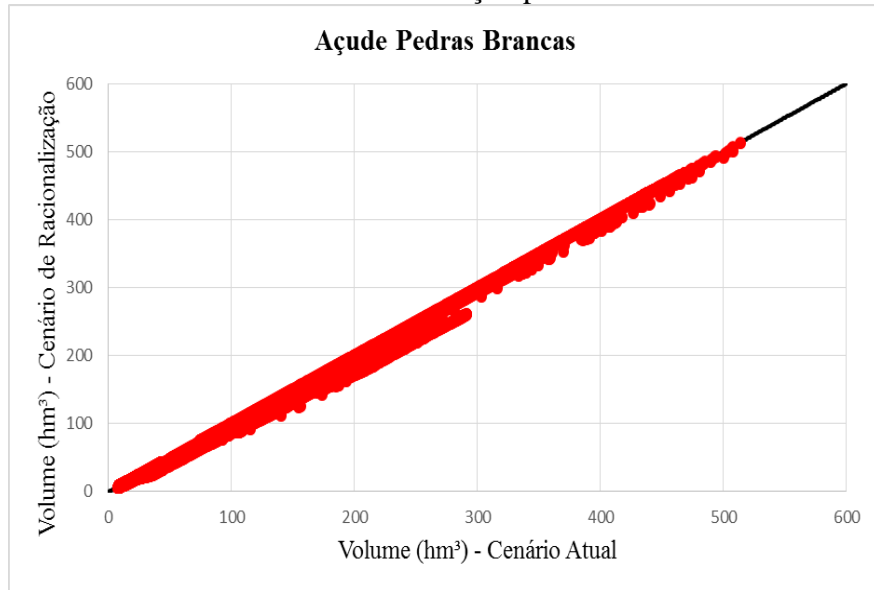
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Orós



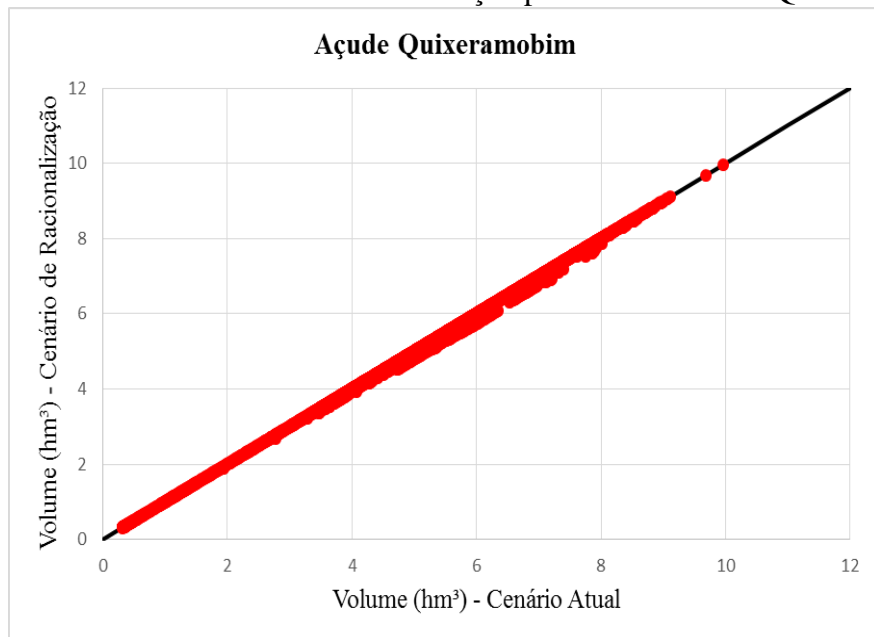
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Pedras Brancas



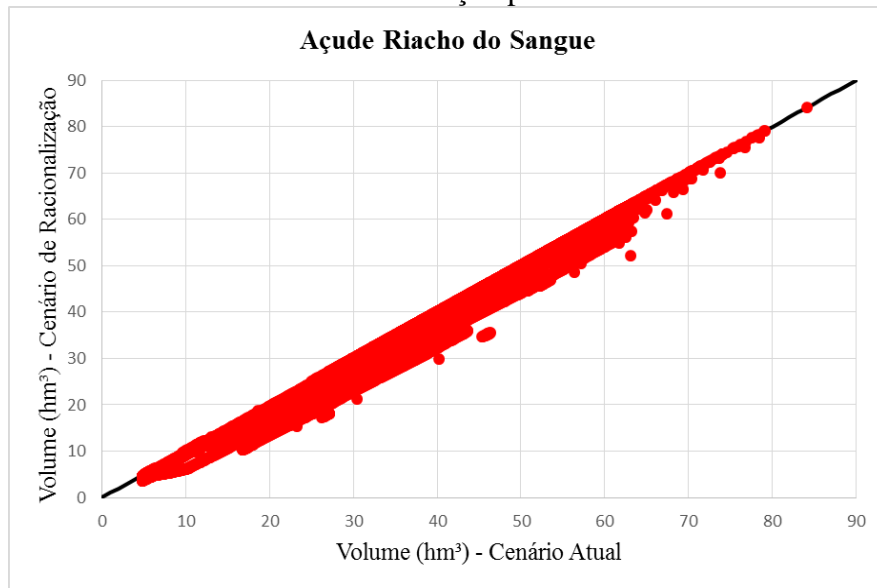
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Quixeramobim



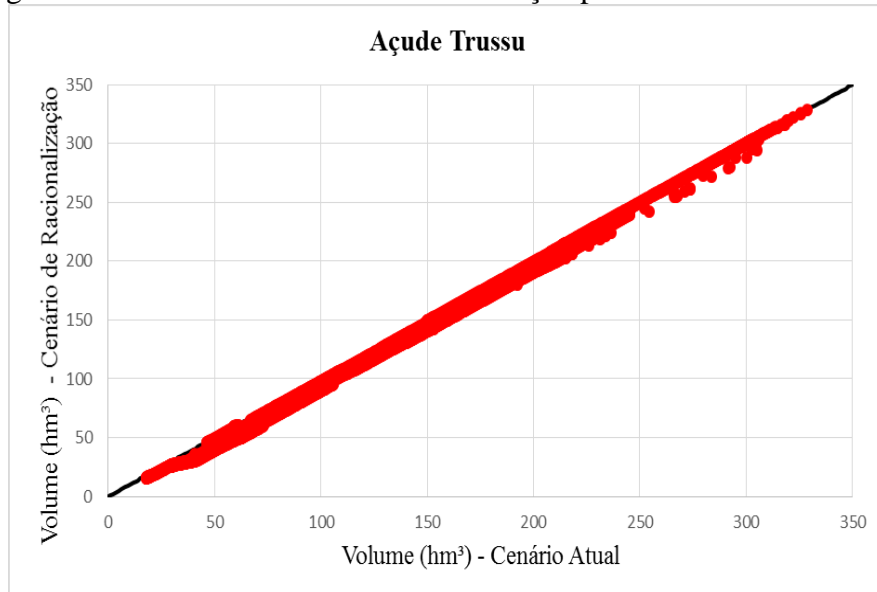
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Riacho do Sangue



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Cenários atual e de racionalização para o reservatório Trussu



Fonte: Elaborada pelo autor.

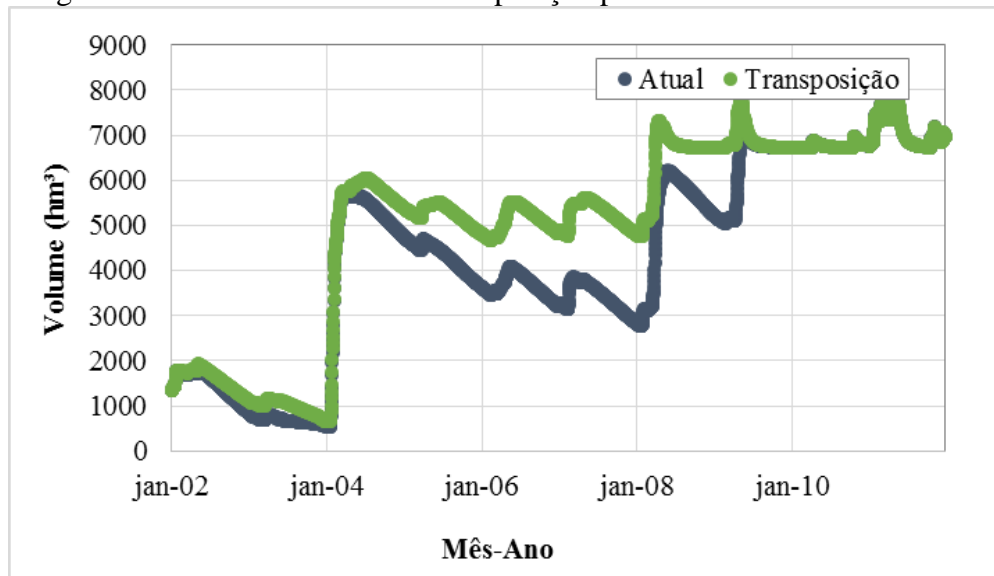
Observa-se em todos os reservatórios analisados uma reduzida diferença entre os volumes armazenados diante dos cenários atual e de uso intenso da água dos pequenos e médios reservatórios. Os volumes armazenados quando da aplicação dos diferentes cenários (pontos em vermelho) aproximam-se de uma função identidade (reta $y = x$ das figuras), corroborando com a hipótese de que o uso intenso da água não compromete o volume armazenado nos grandes reservatórios.

Estes resultados também enfatizam que a mudança de paradigma no uso da água de pequenos reservatórios levantada por Brasil e Medeiros (2019), adoção de um uso intenso em substituição á secular prática de poupar água, não comprometerá o atendimento das demandas dos grandes centros urbanos que são supridos pelos reservatórios estratégicos visto que o volume armazenado nestes não sofrerá reduções significativas. Adicionalmente, as populações rurais que encontram na agricultura a principal atividade econômica para a sobrevivência serão beneficiadas diante dessa nova regra de utilização da água que representa um aumento da oferta hídrica por meio da racionalização do uso da água.

5.3 Impacto da Transposição do Rio São Francisco na dinâmica hidrológica

Diante da série histórica de volume do Reservatório de Sobradinho (ANA, 2019) (volume útil de 28.669 hm³) e das regras de operação apresentadas anteriormente, foi possível estabelecer as vazões transpostas (m³s⁻¹) para o Reservatório Castanhão considerando a transposição. O período de simulação foi de 2002 a 2011, totalizando 3.652 dias. Desse total, em 3.273 dias (90%) a vazão transposta foi de 11,41 m³s⁻¹. Enquanto que em 379 dias (10%), a vazão transposta foi de 49,40 m³s⁻¹. Na Figura 28 é apresentado o resultado da comparação entre as simulações do cenário de uso atual (simulação 10) e do cenário da transposição do açude Castanhão. No cenário de transposição, as rotinas hidrológicas do modelo também estão considerando o uso racional da água dos reservatórios não estratégicos, cenário discutido no item anterior.

Figura 28 - Cenários atual e de transposição para o reservatório Castanhão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da Figura 28 é possível verificar que o aporte hídrico oriundo da transposição foi capaz de aumentar o volume armazenado no reservatório, destacadamente de meados de 2004 a 2009. Considerando que o Reservatório Castanhão é um açude estratégico, maior açude público para múltiplos usos do Brasil, a quantificação do volume é essencial para o planejamento da alocação de água no Estado do Ceará.

Nesta perspectiva, foi avaliado o número de dias em que o Castanhão (capacidade de 6.700 hm³) apresentava volume inferior a 15 (1.005 hm³), 20 (1.340 hm³), 25 (1.675 hm³) e 30% (2010 hm³) da sua capacidade respectivamente em ambos os cenários avaliados.

Os resultados apontam que o cenário de transposição aqui empregado (também considerando a racionalização) reduziu em 247, 51, 32 e 1 dia o período em que o Castanhão apresentou volume inferior a 15, 20, 25 e 30% respectivamente. Estes números sugerem que restrições ao atendimento das demandas (reduções das vazões de retirada para atendimento dos múltiplos usos) poderão ser evitadas com o aporte hídrico oriundo da transposição. Benefício este potencializado em virtude da destacada infraestrutura física e de gestão apresentada pelo Estado do Ceará (MOLINAS, 2019).

Entretanto, a oferta hídrica oriunda da transposição não deve ser considerada como uma solução prontamente disponível e facilmente aplicável. A complexidade da gestão do projeto e os altos custos das águas a serem transpostas já sinalizam que ações para reduzir o consumo, minimizar as perdas, implementar o reuso e até mesmo produzir água em plantas de dessalinização podem apresentar uma maior viabilidade econômica e técnica. Adicionalmente, o alto custo da água da transposição tornaria este recurso viável somente para os usuários urbanos, preferencialmente em períodos de estiagem. Assim, restaria ao PISF a função de garantir a segurança hídrica dos centros urbanos nos períodos de seca (MOLINAS, 2019). Condição que reforça a necessidade de soluções locais tais como a racionalização do uso da água dos reservatórios não estratégicos.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos na presente pesquisa, destacam-se as seguintes conclusões:

Através do emprego do fator de escala S_F , o modelo hidrológico WASA apresentou desempenho satisfatório ao simular o volume armazenado nos Açudes Cedro, Orós, Pedras Brancas e Trussu indicando assim a validade do modelo em diferentes escalas e a sensibilidade deste ao parâmetro condutividade saturada dos solos. Outro parâmetro que produziu melhorias no desempenho do WASA ao longo das parametrizações foi a condutividade hidráulica do embasamento cristalino, enquanto que mudanças no *riverbed* não produziram alterações nos volumes armazenados nos reservatórios avaliados;

O desempenho insatisfatório do modelo nos Açudes Arneiroz II, Benguê, Banabuiú, Canoas, Castanhão, Fogareiro, Quixeramobim e Riacho do Sangue sugere que as simplificações propostas diante da escassez de dados ampliem as incertezas nas simulações;

Avanços na determinação da condutividade hidráulica dos solos e a ampliação do período de análise permitirá uma melhor análise sobre o desempenho do modelo, especialmente pelo fato de que a sensibilidade do WASA a alguns dos parâmetros tais como a condutividade hidráulica do embasamento cristalino é diferenciada durante períodos secos e úmidos;

O insignificante impacto do uso intenso da água dos pequenos e médios reservatórios no período seco sobre o volume armazenado nos reservatórios estratégicos aponta que a sustentabilidade hídrica da agricultura em comunidades esparsas requer uma mudança de paradigma, sendo fundamental o engajamento dos órgãos de gestão;

A ampliação da oferta hídrica através da Transposição do Rio São Francisco é capaz de minimizar as restrições ao abastecimento da RMF. Entretanto, a complexidade de gestão da obra e os altos custo da água são elementos que reduzem a aplicabilidade desta solução

REFERÊNCIAS

- AB’SÁBER, A. A transposição de águas do São Francisco: análise crítica. **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 6-13, 2006.
- AB’SÁBER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ALEXANDRE, Deborah Mithya Barros. **Gestão de pequenos sistemas hídricos no semiárido nordestino**. 2012. 146 f. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2012.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Nota Técnica nº 390**, de 19 de setembro de 2005. Brasília, 2005.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Resolução nº 1133**, de 19 de setembro de 2016. Brasília, 2016.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Resolução nº 411**, de 22 de setembro de 2005. Brasília, 2005.
- ANDRADE, E. M. et al. Land Use Effect on the CN Model Parameters in a Tropical Dry Environment. **Water Resources Management**, v. 31, n. 13, p. 4103-4116, 2017.
- BARLOW, M. **Água – Futuro Azul**: como proteger a água potável para o futuro das pessoas e do planeta para sempre. São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda, 2015.
- BETTENCOURT, P. et al. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco. **Revista Recursos hídricos**, v. 37, n. 1, p. 73-80, 2016.
- BEVEN, K. **Environmental Modelling: Na Uncertain Future?** New York: Routledge, 2009.
- BEVEN, K. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer**. 2. ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2012.
- BLAINSKI, E. et al. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.
- BRASIL, J. B. et al. Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, p. 307-317, 2018.
- BRASIL, P.; MEDEIROS, P. NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands: Model Description and Application to a Semiarid Basin. **Water Resources Management**, 2019.

BRASIL. Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BRAUMAN, K. A. et al. Water depletion: An improved metric for incorporating seasonal and dry-year water scarcity into water risk assessments. **Elementa Science of the Anthropocene**, v. 4, n. 83, p. 1-12, 2016.

BRONSTERT, A. et al. Integrated Modelling of Water Availability and Water Use in the Semi-Arid Northeast of Brazil. **Physical, Chemical and Earth Sciences Research Report**, v. 25, n. 3, p. 227-232, 2000.

BRONSTERT, A. et al. Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. **Journal of Soils and Sediments: Assessment, Protection and Remediation**, v. 14, n. 12, p. 2001-2018, 2014.

CALLOW, J. N.; SMETTEM, K. R. J. The effect of farm dams and constructed banks on hydrologic connectivity and runoff estimation in agricultural landscapes. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, n. 8, p. 959-968, 2009.

CARRASCO, F. M. et al. Diagnosing Causes of Water Scarcity in Complex Water Resources Systems and Identifying Risk Management Actions. **Water Resources Management**, v. 27, n. 6, p. 1693-1705, 2013.

CASTRO, C. N. Transposição do Rio São Francisco: análise de oportunidade do projeto. In: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Brasil em Desenvolvimento 2010: Estado, Planejamento e Políticas Públicas**. Brasília: IPEA, 2010.

CEARÁ **Caderno regional da sub-bacia do Alto Jaguaribe**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 13 maio 2018.

CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Baixo Jaguaribe**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Médio Jaguaribe**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Salgado**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH). **Projeto Malha d'Água**. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/projeto-malha-dagua/>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

CEARÁ. **Cenário Atual dos Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza: INESP, 2008. 174 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Agência Nacional de águas. **A questão da água no Nordeste**. Brasília, DF: CGEE, 2012.

CHITSAZ, N.; AZARNIVAND, A. Adaptive policy responses to water shortage mitigation in the arid regions—a systematic approach based on eDPSIR, DEMATEL, and MCDA. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 23, p. 1-15, 2015.

CHITSAZ, N.; AZARNIVAND, A. Water Scarcity Management in Arid Regions Based on an Extended Multiple Criteria Technique. **Water Resources Management**, v. 31, n. 1, p. 233-250, 2017.

CLARK, M. P. et al. The evolution of process-based hydrologic models: historical challenges and the collective quest for physical realism. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 3427-3440, 2017.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). **O que é PISF?** Disponível em: http://www2.codevasf.gov.br/programas_acoes/pisf/introducao.

Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). **Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe**. Fortaleza: ENGESOFT, 1997. 97 p. Disponível em: <https://www.cogerh.com.br/planos-de-bacias/category/357-fase-i-diagnostico.html>. Acesso em: 3 maio 2018.

COSTA, Alexandre Cunha. **Hidrologia de uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semi-Árido Brasileiro**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2007.

DE ARAÚJO, J. C. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H. R. et al. **Recursos hídricos em regiões semiáridas**. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2012, p. 29-43.

DE ARAÚJO, J. C. Variações climáticas e suas implicações para o semi-árido brasileiro – a contribuição do programa WAVES. In: HOFMEISTER, W. **Água e desenvolvimento sustentável no semi-árido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002.

DE ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. **Water International**, v. 41, n. 2, p. 213-230, 2016.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

DE ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169-1178, 2009.

DE ARAÚJO, JC; MEDEIROS, P. H. A. Impact of Dense Reservoir Networks on Water Resources in Semiarid Environments. **Australasian Journal of Water Resources**, v. 17, n. 1, p. 87-100, 2013.

DE FRAITURE, C. et al. Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 212-220, 2014.

Delimitação do semiárido. SUDENE. Disponível em: <https://portal.insa.gov.br/noticias/760-populacao-do-semiarido-brasileiro-ultrapassa-23-5-milhoes-de-habitantes>. Acesso em: 25 maio 2018.

DNOCS IEPRO. **Comunidades beneficiadas pela transposição do Rio São Francisco: sistemas produtivos para geração de emprego e renda. volume 1.** Fortaleza: DNOCS IEPRO, 2014.

DNOCS IEPRO. **Comunidades beneficiadas pela transposição do Rio São Francisco: atlas dos sistemas de abastecimento de água para as comunidades. volume 2.** Fortaleza: DNOCS IEPRO, 2014.

FARRICK, K. K.; BRANFIREUN, B. A. Left high and dry: a call to action for increased hydrological research in tropical dry forests. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 3254-3262, 2013.

FERREIRA, J. G. A transposição das águas da bacia do rio São Francisco no contexto da resposta à seca do Nordeste. In: **VIII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE**, 2017, Natal.

FIGUEIREDO, J. V. et al. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 2390-2400, 2016.

FILHO, G. M. M. et al. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

FOWE, T. et al. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 99-109, 2015.

FRISCHKORN, H.; DE ARAÚJO, J. C.; SANTIAGO, M. M. F. Water resources of Piauí and Ceará. In: GAISER, T. et al. **Global change and regional impacts**. Berlin: Springer Verlag, 2003, p. 87-94.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Manual do SIGA. Disponível em: http://www.funceme.br/siga/uploads/documentos/SIGA-Manual-v1.5.2.2v1_28_02_2018.pdf . Acesso em: 24 de ago. 2018.

GAISER, T. et al. **Global Change and Regional Impacts: Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brazil**. Berlin: Springer, 2003.

GAYATHRI, K. D.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

GHASSEMI, F.; WHITE, I. **Inter-basin water transfer: case studies from Australia, United States, Canada, China and India**. New York: Cambridge University Press, 2007.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics: 1. Flow of water and air through soils. **J. Agric. Sci.**, v. 4, p. 1-24.

GÜNTNER, A. et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Sciences**, v. 49, n. 5, p. 901-918, 2004.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid áreas. **Journal of Hydrology**, v. 297, p. 136-161, 2004.

GÜNTNER, Andreas. **Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil**. 2002. 128 f. Dissertation (Doctor of Natural Sciences) – Department of Geocology, University of Potsdam, Potsdam, 2002.

HABETS, F. et al. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: a review. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 850-867, 2018.

HUANG, J. et al. Global semi-arid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 3-4, p. 1131-1150, 2016.

Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). Anuário Estatístico do Ceará. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/anuario-estatistico-do-ceara/>. Acesso em: 17 de novembro de 2019.

JAIN, S. K.; AGARWAL, P. K.; SINGH, V. P. Inter-basin water transfer. **Hydrology and Water Resources of India**, v. 57, p. 1065-1109; 2007.

KITE, G. W.; PIETRONIRO, A. Remote sensing applications in hydrological modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 41, n. 4, p. 563-591, 2009.

KROL, M. S. et al. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. **Water Resources Management**, v. 25, n. 12, p. 3017-3026, 2011.

LI, X. G.; WEI, X. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. **Water Resources Management**, v. 22, n. 8, p. 1031-1049, 2008.

LIRA, Camila Cristina Souza. **Determinação do fator de escala temporal da precipitação para modelagem do escoamento hortoniano no Ceará**. 2014. 44 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Maracanaú, 2014.

LOPES, José Wellington Batista. **Modelagem hidrossedimentológica em meso-bacia do semiárido**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2013.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MA, X. et al. Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, p. 2036-2052, 2015.

MALVEIRA, V. T. C.; DE ARAÚJO; J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.

MALVEIRA, Vanda Tereza Costa. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do açude Orós**. 2009. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE, G. L. et al. Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 12, p. 1-13, 2018.

MAMEDE, G.L.; ARAÚJO, N.A.M; SCHNEIDER, C.M.; de ARAÚJO, J.C.; HERRMANN H.J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 19, p. 7191-7195, 2012.

MAMEDE, George Leite. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management**. 2008. Tese (Doutorado) – Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2008.

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.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MAYS, L. W.; KOUTSOYIANNIS, D.; ANGELAKIS, A. N. A brief history of urban water supply in antiquity. **Water Science and Technology: water supply**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2007.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, p. 636-648, 2010.

MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 165 f. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2009.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, v. 2, n. 2, p. 1-6, 2016.

MINEAR, J. T.; KONDOLF, G. M. Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: a case study of Califórnia. **Water Resources Research**, p. 1-8, 2009.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). **Água para 12 milhões de pessoas**. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/agua-para-12-milhoes-de-pessoas> . Acesso em: 17 de ago. 2018.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Brasília, 2012.

Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União. **Tranposição do Rio São Francisco não tem garantia de operação e manutenção, diz CGU**. Disponível em: <http://www.cgu.gov.br/noticias/2018/04/transposicao-do-rio-sao-francisco-nao-tem-garantia-de-operacao-e-manutencao-diz-cgu> . Acesso em: 4 de ago. 2018.

MOLINAS, P. A. **Gestão e operação do projeto de integração do Rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional**. 1 ed. [s.l.]: [s.n.], 2019.

MOLLE, F. **Geometria dos pequenos açudes**. 3. ed. Recife: SUDENE, 1994.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. Recife: SUDENE/Cooperación Française/ORSTON, 1992.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symo. Soc. Exp. Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Watershed Simulations**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MÜLLER, E. N. et al. **WASA-SED Parameterisation Manual**. Potsdam: Institute of Geocology University of Potsdam, 2012.

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

Nordeste sertanejo: a região semi-árida mais povoada do mundo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 13, n. 35, p. 60-68, 1999.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society London**, v. A 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, B. et al. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p. 66-79, 2019.

PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 33, n. 4, p. 379-400, 1988.

PILZ, T. et al. Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil: what is the added value of a process-based hydrological model? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, p. 1951-1971, 2019.

PINHEIRO, E. A. R. et al. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, v. 9, p. 1313-1327, 2016.

RIBEIRO, M. B. Transposição-uma análise cartesiana. **Revista crítica de humanidades**, n. 228, p. 1-7, 2007.

RICHTER, B. D. **Em busca da água: um guia para passar da escassez á sustentabilidade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

RODRIGUES, Gláuber Pontes. **Incertezas em modelos hidrológicos: o caso do modelo SCS/CN aplicado à Bacia Experimental de Aiuaba**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SAFRIEL, U.; ADEEL, Z. Dryland systems. In: HASSAN, R.; SCHOLE, R.; ASH, N. **Ecosystems and human well-being: current state and trends**. Washington, DC: Island Press, p. 625-662, 2005.

SALINAS, C. E. T. et al. Social impacts of a large-dam construction: the case of Castanhão, Brazil. **Water International**, v. 44, n. 8, p. 871-885, 2019.

SANTOS, J. C. N. et al. Effect of Rainfall Characteristics on Runoff and Water Erosion for Different Land Uses in a Tropical Semiarid Region. **Water Resources Management**, v. 31, p. 173-185, 2017.

SARMENTO, F. J. **Transposição do Rio São Francisco: realidade e obra a construir**. Brasília: Do autor, 2015.

SBPC. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - Secretaria Regional Pernambuco. Relatório das discussões. In: **ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE TRANSFERÊNCIA DE ÁGUAS ENTRE GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS. WORKSHOP SOBRE A TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**. Recife. 2004.

SCHAAP, M. G. (1999). **Rosetta Model**. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/model/rosetta-model/>. Acesso em: 18 de julho de 2018.

SCHEWE, J. et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **PNAS**, n. 111, v. 9, p. 3245-3250, 2013.

SHARMA, K. D.; SOROOSHIAN, S.; WHEATER, H. **Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**. New York: Cambridge University Press, 2008.

SILVA, G. S. et al. Development and evaluation of a rainfall runoff model using regionalization data as a model input. **IAHS-AISH Publication**, v. 345, p. 106-112, 2011.

SINGH, V. P. et al. **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995.

SOARES, Nazaré Suziane. **Variabilidade espaçotemporal da evapotranspiração em vegetação do bioma caatinga com uso do modelo dicasm**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SONG, X. et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 739-757, 2015.

SOUZA, S.; NEVES, F. C. **Seca**. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2015.

TEEGAVARAPU, R. S. V.; SIMONOVIC, S. P. Optimal operation of reservoir systems using simulated annealing. **Water Resources Management**, v. 16, n. 5, p. 401-428, 2002.

World Economic Forum (WEF). **Global Risks 2015**. Geneva: WEF, 2015. 69 p.

ANEXO A– EVOLUÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA BHJ