

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

JULIO VITORINO DE ANDRADE NETO

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS SEMIÁRIDAS COM DENSAS REDES  
DE AÇUDES E POUCOS DADOS

PORTO ALEGRE

2022

JULIO VITORINO DE ANDRADE NETO

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS SEMIÁRIDAS COM DENSAS REDES  
DE AÇUDES E POUCOS DADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Walter Collischonn

PORTO ALEGRE

2022

Andrade Neto, Julio Vitorino de  
Simulação hidrológica de grandes bacias semiáridas  
com densas redes de açudes e poucos dados / Julio  
Vitorino de Andrade Neto. -- 2022.  
93 f.  
Orientador: Walter Collischonn.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Modelo hidrológico. 2. Reservatório. 3.  
Semiárido. I. Collischonn, Walter, orient. II.  
Título.

JULIO VITORINO DE ANDRADE NETO

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS SEMIÁRIDAS COM DENSAS REDES  
DE AÇUDES E POUCOS DADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 31 de março de 2022.

---

Prof. Dr. Walter Collischonn – UFRGS  
Orientador

---

Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins – FUNCEME  
Examinador

---

Prof. Dr. Fernando Setembrino Cruz Meirelles – UFRGS  
Examinador

---

Dr. Mino Viana Sorribas – UFRGS  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta pesquisa se deu em um contexto de muitas incertezas e mudanças no mundo. Muitas pessoas tiveram um papel essencial em seu desenvolvimento e a elas meus sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr. Walter Collischonn, orientador deste trabalho, pela disponibilidade, compreensão, incentivo e paciência em sempre ajudar e transmitir seu conhecimento.

Aos meus colegas, amigos e professores com quem convivi no Instituto de Pesquisas Hidráulicas e no grupo de Hidrologia de Grande Escala, por todos os ensinamentos e por me fazer sentir em casa sempre. Agradeço em especial à Larissa, Sofia e Thaís, pela ótima amizade e companheirismo nos nossos diversos momentos juntos.

Aos meus pais, Juarez e Marilucia, pela valorização do conhecimento e incentivo na busca dos meus sonhos. Aos meus irmãos, Diego e Matheus, pela amizade e companheirismo de sempre, especialmente na etapa final do trabalho.

Aos meus amigos Thaila, Dayanne e Jonata, por sempre estarem presentes na minha vida, mesmo com muitos quilômetros de distância, dando apoio e dividindo o peso dos infortúnios que a vida nos traz.

Às instituições UFRGS, IPH, FUNCEME e CNPq, pela estrutura física, equipamentos, disponibilidade de dados e apoio financeiro à ciência.

A todas as outras pessoas não mencionadas, mas que foram importantes no desenvolvimento do presente trabalho.

*I never lose. I either win or learn.*

Nelson Mandela

## RESUMO

A região semiárida do Brasil apresenta um regime de precipitação com alta variabilidade espacial e temporal, além de elevada evaporação potencial, o que limita a disponibilidade de água para as atividades econômicas. Uma solução historicamente adotada para este problema, tanto pelo Estado como por empreendedores individuais, foi a construção de reservatórios, estruturas capazes de transpor a disponibilidade hídrica no tempo, de um período chuvoso para um seco. No Nordeste brasileiro, o processo de construção de açudes se iniciou ainda no século XIX e hoje há mais de 105.000 barramentos apenas no estado do Ceará, com predominância dos de pequeno porte. Essa densa rede de reservatórios é de difícil gestão, pois pouco se sabe sobre as características de cada estrutura e sobre as interações e efeitos sobre a hidrologia local. Modelos hidrológicos surgem como uma solução para este problema, porém, em sua maioria, não são idealizados para incorporar estruturas antrópicas em seu escopo, a exemplo do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Assim, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um módulo de reservatórios para incorporação ao MGB-IPH visando à modelagem de bacias hidrográficas de grande escala considerando densas redes de pequenos reservatórios sobre as quais existe pouco ou nenhum dado. Para isso, foram desenvolvidas metodologias de análise e geração de dados sobre pequenos reservatórios distribuídos sobre a sub-bacia do Banabuiú, bacia adotada para estudo de caso. Primeiramente, foram investigadas as relações e a influência de diferentes formas de representação dos açudes dentro do modelo, variando-se a quantidade de açudes representados explicitamente (*on-grid*) e a quantidade utilizada para gerar os açudes equivalentes (aqueles em *sub-grid*) através da utilização de diferentes densidades de drenagem. Em relação ao reservatório equivalente, foi feita uma comparação entre a metodologia proposta da tabela incremental que considera as respectivas áreas de contribuição de cada açude, bem como as interações entre eles; com uma versão alternativa que considerava os reservatórios equivalentes no exutório de cada minibacia. Por fim, foram analisados diferentes cenários de interação entre pequenos e grandes reservatórios através de curvas de permanência de atendimento a demandas. A partir dos resultados obtidos, pode-se inferir que a utilização de maiores densidades de drenagem foi a abordagem mais adequada, apresentando os melhores resultados globais do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para a bacia. Por sua vez, na comparação entre os reservatórios equivalentes, a metodologia proposta apresentou-se a mais adequada, sendo capaz de melhorar globalmente os coeficientes do modelo. Quanto às curvas de permanência, observou-se que a presença dos pequenos reservatórios reduz a entrada de água nos reservatórios estratégicos, diminuindo a capacidade destes açudes de atender às demandas da bacia. Dessa forma, embora existam limitações quanto aos resultados apresentados, observa-se que houve um considerável avanço na modelagem desses tipos de bacias dentro do modelo MGB-IPH.

**Palavras-chave:** Modelo hidrológico. Reservatório. Semiárido.

## ABSTRACT

The semi-arid region of Brazil presents a precipitation regime with high spatial and temporal variability, in addition to high potential evaporation ratings, which limits the availability of water for economic activities. A historical solution adopted to solve this problem, both by the State and by individual entrepreneurs, was the construction of reservoirs. These structures are capable of transferring water availability over time, from a wet period to a dry one. In the Brazilian Northeast, the process of construction of these dams date back to the 19th century and nowadays there are more than 105.000 dams in the state of Ceará alone, being the small ones predominant. This dense network of reservoirs is difficult to manage, as little is known about the characteristics of each structure and the interactions and effects on local hydrology. Hydrological models emerge as a solution to this problem. However, for the most part, they are not designed to incorporate anthropic structures in their scope, such as the Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Hence, the goal of this paper is to develop a reservoir module for incorporation into the MGB-IPH aiming at modeling large-scale hydrographic basins considering dense networks of small reservoirs on which little or no data exists. On this context, a methodology for analysis and data generation was developed and applied on the group of small reservoirs distributed over the Banabuiú sub-basin, adopted as a case study. Firstly, the relationships and influence of different forms of representation of the dams within the model were investigated, varying the amount of dams represented explicitly (on-grid) and the amount used to generate the equivalent dams (those in sub-grid). These analyses were made by using different drainage densities. In relation to the equivalent reservoir, an incremental table methodology was proposed, considering the respective areas of contribution of each dam, as well as the interactions between them. Then, a comparison was made between this methodology and an alternative version that considered equivalent reservoirs at the outlet of each mini-basin. Finally, different scenarios of interaction between small and large reservoirs were analyzed through demand permanence curves. From the results obtained, it can be inferred that the use of higher drainage densities was the most appropriate approach, presenting the best overall results of the Nash-Sutcliffe coefficient. In the comparison between equivalent reservoirs, the proposed methodology was the most adequate, being able to globally improve the coefficients of the model. As for the permanence curves, it was observed that the presence of small reservoirs reduces the entry of water into strategic reservoirs, reducing their capacity to supply the basin needs. Thus, although there are limitations regarding the results presented, it is observed that there has been a considerable advance in the modeling of these types of basins within the MGB-IPH model.

**Keywords:** Hydrological model. Reservoir. Semi-arid.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Distribuição espacial de áreas homogêneas de precipitação sobre o semiárido brasileiro e seus respectivos boxplots de chuva acumulada mensal, no período de 1979 a 2014. .... 17
- Figura 2 – Impacto da presença de redes de reservatórios na descarga anual estimada durante anos úmidos, médios e secos, em que cada conjunto de barras corresponde a uma diferente bacia. .... 24
- Figura 3 – Padrão de demanda de irrigação e o impacto das redes de reservatórios no escoamento mensal em uma bacia localizada no sudeste da Austrália..... 25
- Figura 4 – Parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  de acordo com a forma do reservatório. .... 28
- Figura 5 – Exemplos de processos observados em uma bacia hidrográfica ..... 31
- Figura 6 – Balanço de água em um pequeno reservatório e suas principais forçantes. .... 34
- Figura 7 – Localização da sub-bacia do Banabuiú..... 39
- Figura 8 – Sub-bacia do Banabuiú com sua rede de drenagem e isoietas de chuva média anual ..... 40
- Figura 9 – Distribuição de açudes na área da sub-bacia do Banabuiú..... 41
- Figura 10 – Esquema conceitual do modelo MGB-IPH ..... 42
- Figura 11 – Esquema do procedimento metodológico adotado neste trabalho. Em amarelo, estão indicados dados de entrada; em azul, ferramentas já desenvolvidas que foram utilizadas; e em vermelho, estão indicadas as contribuições desta pesquisa. .... 45
- Figura 12 – Densa rede de drenagem gerada (superior esquerdo) e total de açudes analisados (superior direito) na bacia do Banabuiú; e exemplo de posicionamento dos açudes sobre a rede drenagem antes da aplicação da metodologia descrita (inferior)..... 47
- Figura 13 – Na esquerda, esquema de segmentação da rede de drenagem da bacia, partindo do exutório (quadrado laranja) em sentido contrário ao fluxo de escoamento do rio. Os trechos de rede são demarcados pelos critérios de distância máxima (riscos pretos), confluências (quadrados verdes) e presença de barramentos (quadrados vermelhos). Na direita, esquema de minibacias geradas a partir da segmentação da rede de drenagem produzida..... 49
- Figura 14 – Na esquerda, representação esquemática das possíveis direções de fluxo e seus respectivos códigos a partir de uma célula. Na direita, esquema de minibacias em que estão representados reservatórios *on-grid* e em *sub-grid*, direções de fluxo a partir de pixels (quadrados vermelhos) dentro da área de contribuição de cada açude e ANCPA (em cinza) dentro de minibacias..... 51

Figura 15 – Representação esquemática da determinação da área inundada por açude e da profundidade por pixel dada uma altura de coluna d'água H no reservatório.....	52
Figura 16 – Representação esquemática de minibacias em que estão indicados reservatórios em <i>sub-grid</i> (R1 a R6) e suas respectivas direções de fluxo até o exutório. ....	54
Figura 17 – Trecho de arquivo das tabelas incrementais para açudes em <i>sub-grid</i> com as relações entre a chuva efetiva ocorrida (R), a que chega ao exutório (R_saida), o volume armazenado (Varm) e área do espelho d'água (Aed) correspondente. ..	62
Figura 18 – Divisão da sub-bacia do Banabuiú em minibacias, localização das estações fluviométricas utilizadas para calibração do modelo e dos açudes monitorados.	64
Figura 19 – Vazões observadas (azul) e simuladas no cenário A (vermelho) para estações fluviométricas presentes na sub-bacia do Banabuiú. A referência a cada estação é feita na Tabela 2.....	65
Figura 20 – Comparação dos coeficientes de Nash-Sutcliffe entre as combinações dos diferentes cenários de densidade de drenagem e profundidade máxima. Cada gráfico representa um posto fluviométrico encontrado na bacia (Tabela 2), em que o eixo vertical apresenta os valores de NS e o horizontal, os cenários de altura da parede do açude: H3, H4, H5 e H6. As densidades de drenagem estão indicadas na legenda: STR25, STR50, STR75 e STR100; assim como o cenário de controle, indicado pela linha tracejada vermelha. ....	68
Figura 21 – Vazões observadas (em azul), simuladas com a versão original do modelo (em verde) e simuladas com o modelo modificado para inserção dos módulos de reservatórios no cenário B100_6 (em vermelho). A referência a cada estação é feita na Tabela 2.....	71
Figura 22 – Vazões observadas (em azul), simuladas com a versão original do modelo (em laranja), simuladas com açudes em <i>sub-grid</i> representados pelas tabelas incrementais no cenário B100_6 (em vermelho) e simuladas com o reservatório equivalente de <i>sub-grid</i> posicionado no exutório da minibacia (em verde). A referência a cada estação é feita na Tabela 2. ....	73
Figura 23 – Curvas de permanência de atendimento das demandas para os reservatórios monitorados nos cenários B (em azul) e D (em vermelho). ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reservatórios monitorados da sub-bacia do Banabuiú e seus respectivos volumes máximos, vazões regularizadas e vazões de demanda.....	60
Tabela 2 – Métricas de desempenho das vazões simuladas com o modelo MGB. A localização das estações fluviométricas dentro da bacia está indicada na Figura 18. NS: Coeficiente de Nash-Sutcliffe; NS-Log: Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; EV: Erro de volume. ....	66
Tabela 3 – Comparação entre os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NS-log) e erro volumétrico (EV) para as vazões simuladas com o modelo MGB-IPH nas versões do cenário B100_6 e C.....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese de trabalhos que avaliam o potencial de se utilizar imagens de satélite para estabelecer relações área-volume para determinar o volume de reservatórios de pequena dimensão.....	29
Quadro 2 – Exemplos de modelos hidrológicos com modelagem de redes de reservatórios, suas características espaciais e temporais e os processos representados. Representação espacial (RE): Agregado (A), Representação estatística (E) ou Distribuído (D). Passo de tempo (PT). Os processos estão representados pelas variáveis descritas na Equação (4). As vazões de entrada podem ser obtidas por observações (OBS), modelagem do balanço hídrico na bacia (BH) ou do balanço hídrico e energético (BHE). As vazões de saída podem ser contínuas para manter uma vazão ecológica (VE) ou ocorrerem apenas quando o reservatório atinge a capacidade máxima e verte (V).....	35
Quadro 3 – Descrição dos cenários avaliados e suas respectivas nomeações de referência. ....	44
Quadro 4 – Combinação entre diferentes cenários de profundidade máxima do reservatório e densidades de drenagem e a simbologia adotada como referência a cada caso para cenário B. ....	46

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 HIDROLOGIA DE REGIÕES SEMIÁRIDAS.....	16
3.1.1 Precipitação.....	16
3.1.2 Evaporação.....	18
3.1.3 Geração de escoamento superficial.....	19
3.1.4 Perdas de água em trânsito.....	20
3.2 AÇUDAGEM.....	21
3.2.1 Impactos na hidrologia.....	23
3.2.2 Impactos na sociedade.....	25
3.2.3 Estimação da capacidade de pequenos reservatórios.....	26
3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	30
3.3.1 Modelagem hidrológica de regiões semiáridas.....	32
3.3.2 Modelagem hidrológica de pequenos reservatórios.....	33
3.3.2.1 Características e limitações de modelos existentes.....	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.2 MODELO DE GRANDES BACIAS.....	41
4.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	43
4.3.1 Posições relativas dos açudes na rede de drenagem.....	47
4.3.2 Segmentação da rede de drenagem.....	48
4.3.3 Processamento dos dados no IPH-Hydro Tools.....	50
4.3.4 Construção de CAVs para os açudes.....	50
4.3.5 Construção da tabela incremental de chuva efetiva que chega ao exutório.....	53
4.3.6 Módulo de balanço hídrico no reservatório.....	55
4.3.6.1 Reservatórios não monitorados e <i>on-grid</i> .....	56
4.3.6.2 Reservatórios monitorados e <i>on-grid</i> .....	59
4.3.6.3 Reservatórios não monitorados e em <i>sub-grid</i> .....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5.1 MODELAGEM DA SUB-BACIA DO BANABUIÚ SEM PRESENÇA DE AÇUDES.....	64
5.2 MODELAGEM DA SUB-BACIA DO BANABUIÚ CONSIDERANDO A PRESENÇA DE AÇUDES.....	67

5.2.1 Avaliação da influência da densidade de drenagem e altura do açude .....	67
5.2.2 Avaliação do açude equivalente em <i>sub-grid</i> .....	72
5.2.3 Avaliação da capacidade de atendimento a demandas.....	75
5.2.4 Fontes de incertezas e limitações da abordagem metodológica adotada.....	77
6 CONCLUSÃO .....	80
REFERÊNCIAS .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos sempre foram fator determinante para o desenvolvimento social e econômico da humanidade. Desde a antiguidade, o estabelecimento de fontes confiáveis de abastecimento exerce um papel essencial na manutenção da comunidade e desenvolvimento da economia nesses locais. Os egípcios, por exemplo, utilizaram as margens férteis do rio Nilo para desenvolver complexos sistemas agrícolas (FAO, 2020), enquanto os romanos desenvolveram elaborados sistemas de transporte de água entre regiões (com os aquedutos), que permitiram o abastecimento de grandes centros urbanos na época (ZAFARI, 2019).

Hoje, a água é ainda um elemento essencial para diversos usos, contudo, esse recurso não é bem distribuído no tempo e no espaço. Segundo a *United Nations Statistics Division* (2011), aproximadamente 58% de toda a água que escoia superficialmente ou que provém de reservatórios subterrâneos está concentrada em apenas 10 países, sendo o Brasil o país que tem maior quantidade de água disponível, com cerca de 16% do total.

Contudo, mesmo com essa grande disponibilidade hídrica, observa-se ainda grande variabilidade espacial e temporal que causam diferenças significativas na oferta de água entre as regiões do Brasil. Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2017), do total de água em território brasileiro, 68% se encontram na região Norte, enquanto apenas 3% estão no Nordeste do país. Essa região é caracterizada ainda por um regime de chuvas com elevada variabilidade temporal, apresentando variações tanto em escala sazonal e intrassazonal, como interanual e até interdecadal (MARENCO *et al.*, 2011; MENEGHETTI; FERREIRA, 2009), representando um verdadeiro desafio para o correto gerenciamento dos recursos hídricos.

Dentro desse contexto, uma solução historicamente adotada foi a construção de reservatórios artificiais, estruturas capazes de armazenar água no período chuvoso e transpor essa disponibilidade para os períodos mais secos. Segundo de Araújo (2011), a partir do final do século XIX, o Governo Federal brasileiro iniciou um programa de “combate às secas” que consistia “na construção de uma ampla rede de reservatórios de todos os tamanhos, de modo a melhorar a oferta de água nos períodos críticos”. Após décadas seguindo esta política, a região Nordeste passou a contar com cerca de 70.000 açudes de diferentes capacidades de armazenamento,

segundo estimativas do Ministério da Integração Nacional (2005). Atualmente, estima-se que haja mais de 105.000 barramentos apenas no estado do Ceará (FUNCEME, em desenvolvimento).

Outros países também adotaram política semelhante para enfrentar a escassez em regiões semiáridas, como por exemplo, Gana (ACHEAMPONG; OZOR; SEKYE-ANNAN, 2014), Etiópia (BERHANE *et al.*, 2016) e Uganda (TUNJI; SEMPEWO; MBATYA, 2020), gerando densas redes de reservatórios superficiais. Contudo, conforme de Araújo (2011) aponta, há grandes contrastes entre o sistema de reservatórios entre os diferentes países: enquanto em alguns se observam reservatórios de grande porte, planejados e dispostos em sequência ao longo da rede de drenagem, em outros predominam pequenos açudes, construídos sem um planejamento adequado. Segundo o autor, o Brasil está no segundo grupo.

Aliado a isso, a presença de pequenos reservatórios em bacias de regiões semiáridas foi ignorada durante muitos anos pelos órgãos responsáveis pela gestão dos sistemas de recursos hídricos locais (ANNOR *et al.*, 2009; LIEBE *et al.*, 2009a; RODRIGUES *et al.*, 2012; SAWUNYAMA; SENZANJE; MHIZHA, 2006). Dentre os fatores que levaram a este cenário, pode-se destacar a pequena capacidade de armazenamento e a existência de uma grande quantidade e ampla distribuição no território, o que dificultam o monitoramento e, conseqüentemente, a sua gestão.

Contudo, atualmente, com a Lei de Segurança Hídrica de Barragens, a responsabilidade civil e criminal por estas obras recai sobre o Gestor de Recursos Hídricos, sendo, portanto, um ponto de mudança para a gestão destas estruturas. Dessa forma, fica clara a importância de se buscar entender o impacto e o papel de densas redes de pequenos reservatórios em regiões semiáridas e de se buscar ferramentas que permitam a gestão adequada desses recursos.

Modelos hidrológicos têm papel fundamental nesse contexto, servindo como instrumento para embasar decisões sobre os recursos da bacia, tendo em vista que normalmente há uma quantidade limitada de dados disponíveis nessas regiões (DE ARAÚJO, 2011; EDUARDO *et al.*, 2016). Contudo, de forma geral, modelos hidrológicos que representam processos de chuva-vazão tipicamente não são pensados para incorporar alterações humanas em bacias hidrográficas.

Pensando exclusivamente na questão da reserva de água, se na bacia houvesse apenas um pequeno número de grandes reservatórios seria relativamente simples representar estas intervenções no sistema natural através da sua incorporação na estrutura do modelo (FLEISCHMANN *et al.*, 2019a, 2019b) ou utilizando um método de substituição das vazões a partir de dados da operação dos reservatórios (PASSAIA *et al.*, 2020). Contudo, o que se observa em muitos casos são densas redes de pequenos reservatórios sobre os quais pouco se sabe, gerando uma falta de modelos adequados para tal cenário (NEAL *et al.*, 2002).

Alguns modelos foram desenvolvidos dentro desse contexto, como o WASA (GÜNTNER, 2002) e o AÇUMOD (SILANS *et al.*, 2000), apresentando limitações principalmente na representação espacial dos açudes dentro da área da bacia e quanto à necessidade de uma grande quantidade de dados para a modelagem dessas estruturas, respectivamente. O modelo MGB-IPH é outro modelo desenvolvido em território brasileiro, contudo, apesar de ter aplicação em bacias com grandes quantidades de reservatórios (COLLISCHONN *et al.*, 2011), não possui um módulo específico para este fim.

Outro ponto relevante que merece ser destacado se refere ao impacto das mudanças climáticas sobre os sistemas naturais e sobre a sociedade. Marengo e Bernasconi (2015) e Brêda *et al.* (2020) indicam projeções de diminuição na precipitação e vazão e aumento na temperatura sobre a região semiárida do Brasil, agravando o déficit hídrico que já existe normalmente.

Assim, espera-se um aumento da pressão de intervenções humanas sobre as bacias naturais nessa região, sendo que esse efeito já é observado em algumas localidades. Ribeiro Neto *et al.* (2022), em estudo realizado na bacia do Riacho do Sangue, no Ceará, indicam que pequenos reservatórios podem não apenas intensificar impactos hidrológicos de eventos de seca, como também mudar a sua duração, afetando diretamente o enchimento de grandes reservatórios estratégicos.

Dessa forma, evidencia-se uma lacuna de conhecimento a ser explorada. A gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas é de difícil solução e boa parte dos modelos hidrológicos existentes atualmente não é adequada para representação desses sistemas, que apresentam características específicas próprias e grande taxa de intervenções humanas na forma de densas redes de pequenos reservatórios.



Assim, as principais questões que surgem são: qual a magnitude do impacto dos pequenos açudes para a bacia hidrográfica? E para os reservatórios de grande porte? Há um limite a partir do qual eles passam a interferir negativamente nesse sistema? Qual o seu impacto cumulativo em períodos de seca prolongada (comuns em regiões semiáridas)? Não são questionamentos de fácil resposta, mas busca-se com este trabalho solucionar alguns deles.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e testar uma ferramenta que facilite a compreensão da influência de um grande número de pequenos reservatórios, sobre as quais existem poucos dados, sobre o comportamento hidrológico de grandes bacias e, particularmente, sobre a operação de grandes reservatórios monitorados na região semiárida do Brasil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) Investigar a influência de diferentes formas de representação dos açudes dentro do modelo;
- b) Desenvolver ferramenta para representar densas redes de pequenos reservatórios na forma de reservatório equivalente;
- c) Analisar cenários de interação entre pequenos e grandes reservatórios.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados conceitos e resultados de trabalhos prévios que embasaram o desenvolvimento desta pesquisa. Apesar de ter um maior foco na região semiárida brasileira, um esforço foi feito no sentido de apresentar dados e resultados de regiões semiáridas por todo o planeta, de forma a enriquecer a discussão sobre os temas tratados.

#### 3.1 HIDROLOGIA DE REGIÕES SEMIÁRIDAS

O grau de aridez de uma região é definido através da razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, ou seja, entre o volume precipitado e o quanto de água seria absorvida pela atmosfera caso houvesse disponibilidade. Conforme indicado na 2ª edição do *World Atlas of Desertification* (1997) apud CHERLET *et al.* (2018), o índice de aridez (IA) para regiões semiáridas tem valores na faixa de 0,2 a 0,5. Assim, os valores de evapotranspiração superam os de precipitação, indicando um déficit hídrico natural nessas regiões.

Dessa forma, nota-se que os processos de precipitação e evapotranspiração desempenham um papel importante no regime hidrológico de regiões semiáridas. Além desses processos, Renard (1970) e Güntner (2002) apontam a geração do escoamento superficial e o fenômeno da perda de água em trânsito como outros processos relevantes para se compreender a dinâmica da hidrologia local. Uma análise mais aprofundada de cada um desses processos é apresentada a seguir.

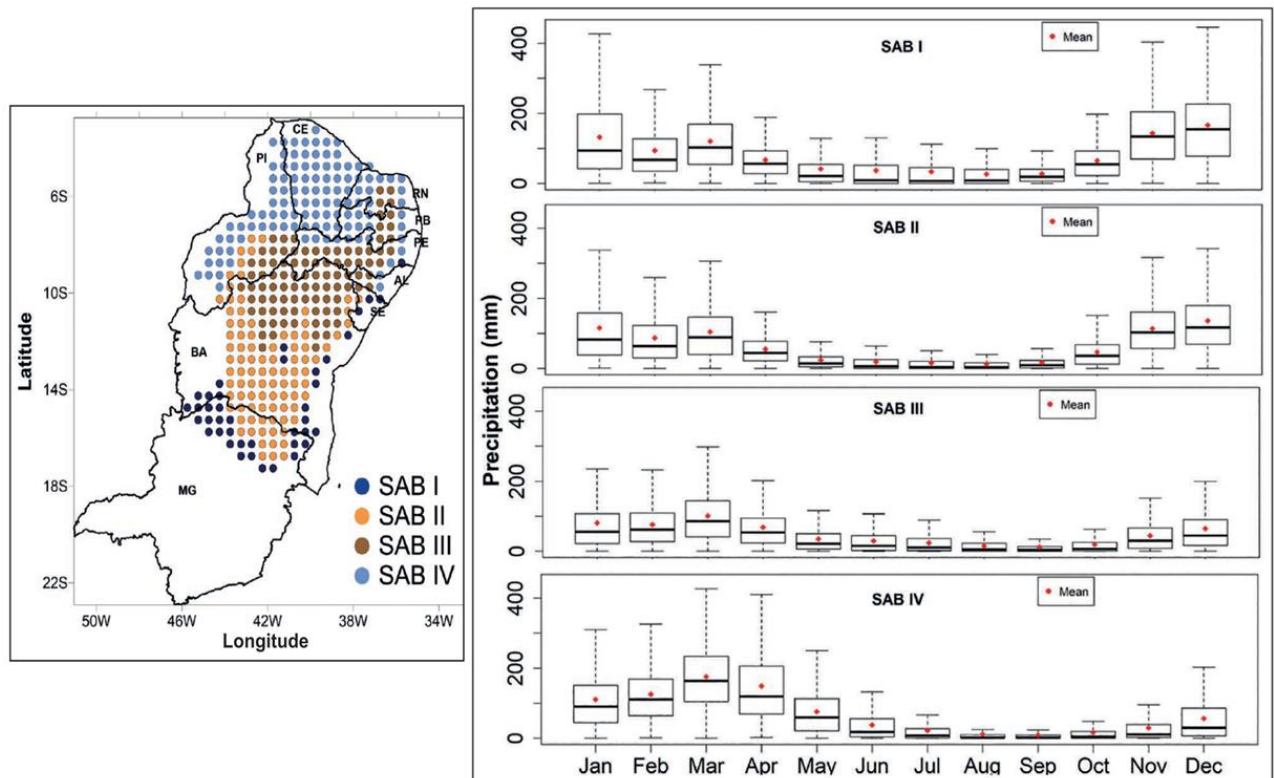
##### 3.1.1 Precipitação

O processo de precipitação em regiões semiáridas é marcado por elevadas variabilidades temporal e espacial, sendo um dos principais fatores que interferem no processo de geração de escoamento na bacia. Renard (1970) e Goodrich *et al.* (1997), por exemplo, ao estudarem a bacia experimental *Walnut Gulch*, localizada nos Estados Unidos, indicam que as precipitações se concentram em três meses do ano e são bastante localizadas, gerando grandes picos de vazão durante o período chuvoso, enquanto no resto do ano os rios secam (rios efêmeros).

Resultados semelhantes foram obtidos por Jarihani *et al.* (2017) ao estudarem uma bacia hidrográfica no semiárido australiano. Os autores identificaram que a precipitação é concentrada em quatro meses, contribuindo com 74% do total precipitado anual e gerando, conseqüentemente, 89% do escoamento anual na bacia. Por sua vez, na bacia *Yellow River*, China, Zhang *et al.* (2014) investigaram mudanças no padrão de precipitação devido à alterações climáticas e observaram diferentes comportamentos para a região: algumas áreas da bacia apresentaram tendência de diminuição na precipitação, enquanto outras apresentaram o oposto, indicando tanto um aumento no risco de secas, quanto de enchentes e *flash floods*.

No Brasil, Tinôco *et al.* (2018) buscaram caracterizar os padrões de precipitação que ocorrem na região semiárida, observando que existem 4 zonas bem definidas com volumes anuais e períodos chuvosos diferentes entre si, demonstrando a grande variabilidade espacial e temporal da precipitação nessa região (Figura 1). Estas características também foram observadas em regiões semiáridas da Espanha (ROMERO *et al.*, 1998), Iran (RAZIEI; ARASTEH; SAGHFAN, 2005) e Botsuana (BATISANI; YARNAL, 2010).

**Figura 1** – Distribuição espacial de áreas homogêneas de precipitação sobre o semiárido brasileiro e seus respectivos boxplots de chuva acumulada mensal, no período de 1979 a 2014.



Fonte: Adaptado de Tinôco *et al.* (2018).

Ainda nesse contexto, ao avaliarem a influência da distância na correlação dos dados de precipitação entre pluviógrafos no Brasil, Freitas *et al.* (2021) identificaram que é necessário uma distância de 8 km entre estações para garantir 70% de correlação em escala diária para o clima semiárido, enquanto que em clima tropical e subtropical úmido, a distância que garante esta mesma correlação é de 14 e 18 km, respectivamente.

Essas variabilidades decorrem do fato de os eventos de precipitação em regiões semiáridas serem, em maior parte, do tipo convectivo, tendo como características a curta duração, alta intensidade e grande heterogeneidade espacial (GÜNTNER, 2002; PEUGEOT *et al.*, 2003). De fato, no semiárido brasileiro observa-se que o sistema meteorológico mais importante para formação de chuvas é a Zona de Convergência Intertropical (TINÔCO *et al.*, 2018), caracterizado por gerar predominantemente eventos convectivos de alta intensidade (National Weather Service/NOAA, 2020). Contudo, esse fato por si só, apesar de ajudar a justificar a alta variabilidade, não explica o clima semiárido observado na região.

### 3.1.2 Evaporação

O processo de evaporação a partir da superfície terrestre engloba tanto os fluxos de evaporação da água presente em solos, reservatórios artificiais e da água interceptada pela vegetação quanto aquele proveniente da transpiração das plantas, que, em suma, é também um processo de evaporação (MIRALLES *et al.*, 2020). Dessa forma, os principais fatores que irão controlar esse processo serão as condições climáticas da região, as características fisiológicas da vegetação e as características do solo (GÜNTNER, 2002).

Em relação aos fatores climáticos (radiação, velocidade do vento, pressão de vapor d'água, entre outros), embora não haja uma diferença significativa entre o seu papel nos fluxos de evaporação em diferentes climas, as taxas em que esse processo irá ocorrer serão distintas em diferentes contextos climáticos (OJHA; KHOBRADE; ADELOYE, 2011). Por exemplo, de Araújo e Piedra (2009), ao estudarem comparativamente uma bacia no semiárido brasileiro e uma úmida em Cuba, identificaram que a evaporação potencial é similar em ambas, embora a evaporação real na bacia semiárida seja consideravelmente maior, consumindo 55% do volume afluente a reservatórios, enquanto consome apenas 12% na bacia úmida.

Ainda nesse contexto, Lane e Kidwell (2001) observaram que em regiões áridas e semiáridas, a evaporação potencial anual excede significativamente a precipitação, contudo a evaporação real tem praticamente valores iguais, tendo em vista que a disponibilidade de água é um fator limitante. Conforme estes autores apontam, embora num contexto anual os valores sejam semelhantes, há uma diferença significativa entre diferentes períodos do ano: a precipitação excede a evaporação real em períodos chuvosos, permitindo a recarga de reservatórios, enquanto que nos períodos secos, ocorre o inverso.

Quanto à vegetação, Pilgrim, Chapman e Doran (1988) destacam a dinâmica do seu estado como elemento fundamental para a modelagem de regiões áridas e semiáridas. Nesse contexto, o estudo de Silva *et al.* (2019) fornece informações interessantes no sentido de entender esta dinâmica. Ao estudarem uma bacia da região semiárida brasileira, os autores identificaram que a dinâmica da vegetação (caatinga) é altamente dependente dos eventos de precipitação, sendo que em períodos secos há perda das folhas e após eventos de chuva há uma rápida recuperação da biomassa. Esse processo interfere de forma significativa na interceptação e transpiração que ocorre na região, além de parâmetros como albedo e temperatura da superfície do solo (BEZERRA *et al.*, 2014).

Essas características de vegetação e clima influenciam diretamente o processo de formação dos solos e suas características (textura, porosidade, entre outros), que por sua vez tem papel importante no processo de infiltração e evaporação nesse compartimento. Assim, é perceptível que todos estes fatores estão altamente inter-relacionados.

### **3.1.3 Geração de escoamento superficial**

A geração de escoamento superficial se refere ao processo de transformação do volume precipitado sobre uma bacia em vazão, medido superficialmente até um ponto de interesse, geralmente seu exutório. Em regiões semiáridas, esse processo decorre predominantemente da superação da capacidade de infiltração do solo pela intensidade da chuva, prevalecendo, portanto, o mecanismo de escoamento do tipo hortoniano (GÜNTNER, 2002; PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988).

Nesse contexto, de Araújo e Piedra (2009), ao estudarem uma bacia no semiárido brasileiro, identificaram elevadas perdas iniciais por infiltração e que apenas eventos de grande intensidade geraram escoamento, corroborando com a ideia de que o excesso da capacidade de infiltração é o principal fator para geração de escoamento superficial. Estes autores apontam ainda que o processo de formação do escoamento está altamente relacionado à geologia da bacia, uma vez que a infiltração foi especialmente importante na região sedimentar da bacia.

Resultados semelhantes foram obtidos por de Figueiredo *et al.* (2016), ao analisarem o processo de geração de escoamento em uma bacia experimental no semiárido brasileiro. Neste trabalho, os autores identificaram que nas áreas em que predomina uma formação geológica sedimentar, o processo de infiltração tem grande relevância, enquanto em bacias predominantemente cristalinas (com camadas de solo rasas, de 1 a 2 m), esse processo é menos relevante. Assim, áreas cristalinas tiveram maiores coeficientes de escoamento superficial e picos de vazão.

Esse comportamento expressa grandes diferenças espaciais na capacidade de infiltração do solo nessas regiões. Pilgrim, Chapman e Doran (1988) ao compararem diferentes estudos em bacias semiáridas, comentam sobre o fato ao apontar que algumas regiões aluvionares com material rochoso aparente e granulometria do solo mais grosseira apresentaram menor capacidade de infiltração. Nesse caso, o solo tem menor capacidade de armazenamento e processos de saturação tornam-se importantes (GÜNTNER, 2002).

Outros fatores que influenciam a geração de escoamento superficial são ainda a cobertura vegetal e a umidade do solo prévia ao evento de precipitação. Liebe *et al.* (2009b) identificaram que os primeiros eventos de chuva que ocorrem em regiões semiáridas após a estação seca tem a função de umidificar o solo, gerando pouco escoamento superficial a princípio. Por sua vez, Andrade *et al.* (2018) identificaram que a alta densidade de vegetação herbácea causa um aumento na taxa de infiltração de água no solo, reduzindo o escoamento superficial.

### **3.1.4 Perdas de água em trânsito**

Altamente correlacionado com a geração de escoamento superficial, o processo de perdas de água em trânsito se refere à parte da vazão que não alcança

determinado ponto a jusante a partir daquele em que se inicia o escoamento superficial. Esse processo ocorre devido à infiltração da água no solo ao longo do curso do rio e tem grande importância para a conectividade hidrológica em ambientes semiáridos, podendo ser responsável pela redução de grande parte ou toda a vazão do rio (HUGHES; SAMI, 1992; TOLEDO *et al.*, 2018).

Dessa forma, esse processo é especialmente relevante para rios intermitentes e efêmeros, nos quais há formação de depósitos aluvionares nos seus leitos, que geralmente apresentam alta porosidade, facilitando a infiltração e recarga de aquíferos subterrâneos (RENARD, 1970). Na região semiárida brasileira, esses depósitos são utilizados pela população para perfuração de poços, denominados popularmente como “Poços Amazonas”, sendo utilizados em escala local para irrigação e dessedentação de animais (GHEYI *et al.*, 2012, cap. 1).

De fato, Toledo *et al.* (2018) apontam a grande quantidade de poços instalados ao longo de um trecho do rio Jaguaribe, localizado na bacia do Alto Jaguaribe no semiárido brasileiro, concluindo que este é um dos fatores que influenciaram significativamente no rebaixamento do aquífero aluvial, aumentando a perda de água em trânsito na bacia. Os autores apontam que há uma perda média de 3,1%  $\text{km}^{-1}$  de vazão decorrente de perdas em trânsito no trecho de leito estudado, correspondendo a uma quantidade significativa da vazão total que escoar pelo rio.

### 3.2 AÇUDAGEM

Açude é o nome que se dá aos reservatórios de água artificiais na região Nordeste do Brasil, assim o termo “açudagem” aqui se refere à construção e operação dessas estruturas na região em questão. Diversos estudos apontam diferentes perspectivas para a classificação da dimensão de um reservatório, baseado em características como a capacidade de armazenamento, a área superficial e a altura da parede do reservatório.

De fato, Habets *et al.* (2018) afirma que não há um consenso sobre a definição de pequeno reservatório. Para Annor *et al.* (2009), por exemplo, pequenos reservatórios são aqueles com áreas superficiais com menos de 100 hectares, enquanto para Rodrigues *et al.* (2012), pequenos reservatórios são aqueles em que a altura da parede do reservatório não ultrapassa os 15 m. Outra perspectiva é



apresentada por de Araújo (2011), ao considerar micro e pequenos açudes aqueles com capacidade de no máximo 1 e 10 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Essa variedade de classificações é resultado principalmente do objetivo do estudo realizado pelos autores citados. Enquanto os dois primeiros estavam preocupados com a identificação e dimensão dos reservatórios, o último discute sobre o papel dos pequenos açudes na hidrologia local e seus efeitos sobre a disponibilidade de recursos hídricos.

De um ponto de vista mais gerencial, Molle e Cadier (1992) classificam um açude pequeno como aquele que serve para assegurar o abastecimento durante a estação seca em um ano hidrológico, sendo pouco útil contra secas prolongadas, tendo assim um caráter intra-anual; enquanto um açude médio teria a capacidade de atravessar, no mínimo, um ano de seca fornecendo água para os usos previstos, ou seja, tendo um caráter interanual. Dessa forma, destaca-se que o foco aqui será em estruturas de relativa pequena capacidade, que comumente secam após algum período sem novos aportes de água.

A construção de açudes para abastecimento da população na região semiárida brasileira foi adotada como política pública para enfrentamento das secas recorrentes que ocorrem na região. Segundo Molle e Cadier (1992) e Cadier (1994), as primeiras secas que se tem registro datam ainda do século XVI e os primeiros registros de incentivos financeiros governamentais para construção de açudes, do século XIX. Após a grande seca de 1877-78, onde morreram cerca de 500 mil pessoas, o governo Imperial passou a investir em açudes de grande porte e em 1909 foi criado o Instituto de Obras Contra as Secas (IOCS), que passa para Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) posteriormente, atuando na construção e monitoramento de reservatórios na região.

Nesse período entre a grande seca e o início da atuação do IOCS, houve uma explosão na construção de pequenos e médios reservatórios privados na região em resposta ao evento ocorrido, havendo continuação dessa tendência mesmo após o início da atuação do governo (MOLLE, 1994a). Contudo, Toledo, Araújo e Almeida (2014) apontam que nas últimas décadas observou-se uma diminuição no ritmo de construção de novos açudes, causados por dois fatores principais: a falta de locais tecnicamente apropriados para a construção de novos reservatórios e o programa do governo brasileiro de incentivo à construção de cisternas, a partir de 2003. De

fato, Medeiros e Sivapalan (2020) indicam uma tendência de se substituir medidas estruturais (como a construção de novos reservatórios) por medidas não estruturais de gestão como resposta a eventos de seca em parte da região semiárida brasileira nas últimas décadas.

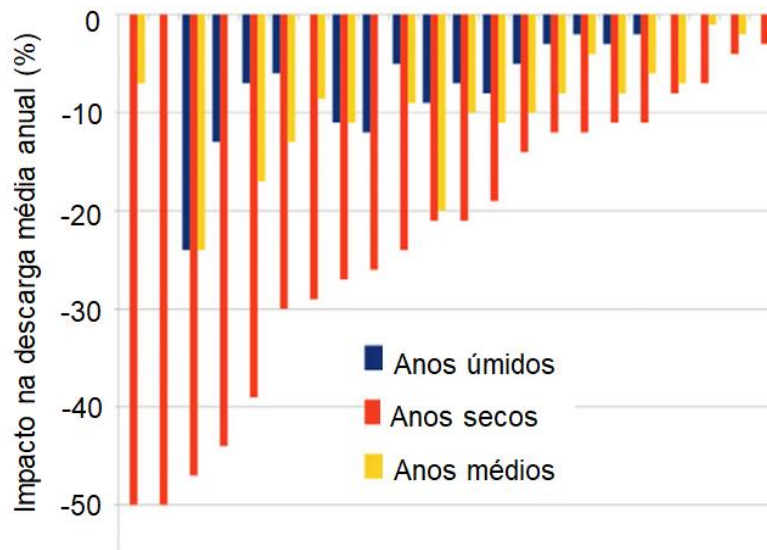
Em outros países pelo mundo, também se observam densas redes de pequenos reservatórios. Na Austrália, essas estruturas são normalmente conhecidas como “*farm dams*”, sendo utilizadas para diversos fins (NATHAN; LOWE, 2012). Nos Estados Unidos, Ayalew *et al.* (2017) apontam que apesar de uma considerável quantidade de pequenos reservatórios já existirem, em algumas regiões do país a construção dessas estruturas está se intensificando. Países do continente africano também apresentam grandes redes de pequenos açudes (BERHANE *et al.*, 2016; HUGHES; MANTEL, 2010; TUNJI; SEMPEWO; MBATYA, 2020), ressaltando a importância desse tipo de barramento e a necessidade de se entender sua dinâmica.

### **3.2.1 Impactos na hidrologia**

Enquanto é esperado que o impacto de um único pequeno reservatório seja baixo em uma bacia, a presença de densas redes de açudes tem o potencial de gerar impactos significativos. Habets *et al.* (2018) realizaram uma revisão bastante abrangente sobre o tema, apontando que os impactos mais avaliados ocorrem sobre as descargas anuais, as baixas vazões (que ocorrem em períodos de estiagem) e eventos de cheias. A maioria dos estudos revisados por estes autores trata de descargas anuais, sendo observadas reduções variando entre 0,2 e 36% nos seus valores médios totais.

Contudo, as variações nas descargas anuais não são constantes de um ano para o outro. Devido ao caráter variável da precipitação nas regiões áridas e semiáridas (Seção 3.1.1), onde está localizada a maioria dos reservatórios, há diferenças consideráveis na quantidade total de água que passa pelas bacias em anos distintos. Conseqüentemente, o impacto dos reservatórios tem magnitudes diferentes. A Figura 2 ilustra esse comportamento, ao comparar o impacto na descarga média anual entre diferentes anos climáticos para várias bacias diferentes, deixando claro que em anos secos o impacto é expressivamente maior do que aquele observado em outros anos, chegando a 50% de redução em alguns casos.

**Figura 2** – Impacto da presença de redes de reservatórios na descarga anual estimada durante anos úmidos, médios e secos, em que cada conjunto de barras corresponde a uma diferente bacia.

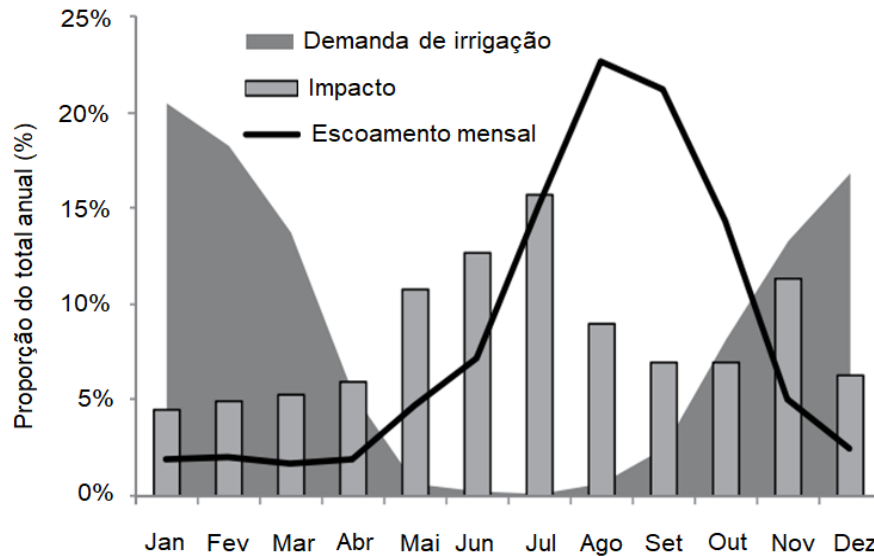


Fonte: Adaptado de Habets *et al.* (2018).

Ainda segundo Habets *et al.* (2018), é consenso que pequenos reservatórios causam atenuação de picos de cheia, chegando a valores de até 45% de redução. Contudo, esse tipo de estrutura também está mais susceptível a rupturas, podendo gerar grandes inundações e causar um efeito de rompimentos em cascata. Quanto às baixas vazões, os autores observam que é frequentemente relatada uma diminuição no seu total devido à presença dos reservatórios, tendo uma grande amplitude de impacto, variando de 0,3 a 60% na redução da vazão entre diferentes bacias.

Nathan e Lowe (2012), ao estudarem o impacto de densas redes de reservatórios no sudeste da Austrália, identificaram o seu comportamento médio anual e como ele se relaciona com a demanda hídrica e o escoamento superficial mensal (Figura 3). Nos meses de maior demanda, os reservatórios estão com a sua capacidade máxima (vindo do período chuvoso anterior) e o impacto sobre o escoamento será baixo. Conforme a água armazenada é utilizada, o volume dos reservatórios cai e há um aumento do impacto sobre o escoamento superficial, uma vez que a vazão gerada será retida no reservatório até que ele atinja sua capacidade máxima. Dessa forma, fica claro também como a ocorrência de anos com baixo volume de chuva geram impactos acima da média no escoamento da bacia.

**Figura 3** – Padrão de demanda de irrigação e o impacto das redes de reservatórios no escoamento mensal em uma bacia localizada no sudeste da Austrália.



Fonte: Adaptado de Nathan e Lowe (2012).

### 3.2.2 Impactos na sociedade

A proximidade dos pequenos reservatórios aos pontos de demanda faz deles boas opções para mitigar os efeitos de secas nas regiões áridas e semiáridas, uma vez que permite o acesso imediato à população e barateia os custos de transporte e distribuição (LIEBE; VAN DE GIESEN; ANDREINI, 2005). Sendo assim, do ponto de vista social, os pequenos reservatórios incorporam grandes benefícios na vida da população que vive em torno deles.

Berhane *et al.* (2016), por exemplo, identificaram algumas mudanças positivas a partir da construção de pequenos reservatórios em um estudo composto por observações de campo e entrevistas com fazendeiros em uma bacia no semiárido da Etiópia. Segundo os autores, houve aumento da renda dos fazendeiros com o cultivo de culturas mais valiosas para o mercado e com a difusão de usos múltiplos da água, permitindo criação de gado, peixes e abelhas na região. Benefícios econômicos semelhantes também foram observados em bacias de Gana por Acheampong, Ozor e Sekyi-Annan (2014), onde a gestão dos pequenos reservatórios tem grande influência dos usuários locais.

No Brasil, Silva *et al.* (2009) realizaram questionários com diversos segmentos da população que utilizam direta e indiretamente as águas de pequenos açudes na bacia do açude Sumé (PB) e identificaram que essas construções permitem o

desenvolvimento de diversas atividades que são base da renda e subsistência daquela população, como criação de peixes, dessedentação animal e agricultura.

Em outro estudo realizado no semiárido brasileiro, na bacia do Banabuiú (CE), Nascimento *et al.* (2019) avaliaram diferentes cenários de atendimento de demandas difusas na bacia a partir de reservatórios superficiais, identificando que o cenário atual (com densa rede de reservatórios de variados tamanhos) gera uma demanda de energia para o sistema de 6,5 GWh/ano, enquanto que ao considerar apenas os 12 reservatórios estratégicos essa demanda é sete vezes maior (45,4 GWh/ano). Assim, fica evidente que a presença de pequenos açudes gera benefícios tanto sociais, com a capilarização das redes de acesso à água, quanto econômicos.

Dentro desse contexto, Liebe, Van de Giesen e Andreini (2005), argumentam que a ocorrência de reservatórios em regiões semiáridas pode ser dita “seminatural”, no sentido de que a sua existência depende da decisão de pessoas de onde ele deve ser construído para obter os maiores benefícios (maior volume armazenado, menor custo com transporte e distribuição, entre outros), mas também depende das características naturais e da geomorfologia da região. Nesse sentido, fica claro que a açudagem é um processo complexo e que expressa a interdependência do sistema água-homem na sociedade atual.

### **3.2.3 Estimação da capacidade de pequenos reservatórios**

A estimação da capacidade de reservatórios é um elemento essencial para a gestão dos recursos hídricos em uma bacia. Esse tópico se torna ainda mais importante para reservatórios de pequena dimensão, que muitas vezes são construídos sem um projeto adequado ou mesmo um estudo técnico adequado previamente à inundação da área ocupada (LAWRENCE; LO CASCIO, 2004; MOLLE; CADIER, 1992). Assim, relações de cota-área-volume para estes tipos de reservatórios são normalmente desconhecidos, dificultando sua gestão.

Nesse sentido, diversos estudos apresentam métodos diretos e indiretos para definição dessas relações. Lawrence e Lo Cascio (2004) e Sawunyama, Senzanje e Mhizha (2006) apresentam a existência de uma equação geral para estimar a capacidade de reservatórios com base em medições de campo:

$$C = K * H * L * D \quad (1)$$

Onde C é a capacidade do reservatório em m<sup>3</sup>, K é uma constante, H é a altura da parede do reservatório (profundidade máxima observada) em m, L é o comprimento da parede do açude (largura máxima observada) em m, e D é a distância, ao longo do eixo do reservatório, entre a parede e o principal ponto de entrada do reservatório, usualmente seguindo a rede de drenagem do rio.

Com base nessa formulação geral, diversas metodologias foram geradas para estimar a capacidade de reservatórios. Lawrence e Lo Cascio (2004) utilizaram 4 diferentes equações, baseadas na Equação (1), para avaliar a capacidade de 9 reservatórios localizados na região semiárida do Zimbábue, comparando-os com dados de volume obtidos a partir de pesquisas de campo, obtendo resultados que variaram de 43% de subestimação a 36% de superestimação do seu real volume.

Em contrapartida, métodos indiretos utilizam dados de sensoriamento remoto para estimar o volume de reservatórios a partir da sua área superficial. Esses métodos geralmente se baseiam no pressuposto que a forma do reservatório pode ser assumida como uma pirâmide quadrada cortada diagonalmente ao meio (LIEBE, 2002) obtendo, em geral, relações do tipo:

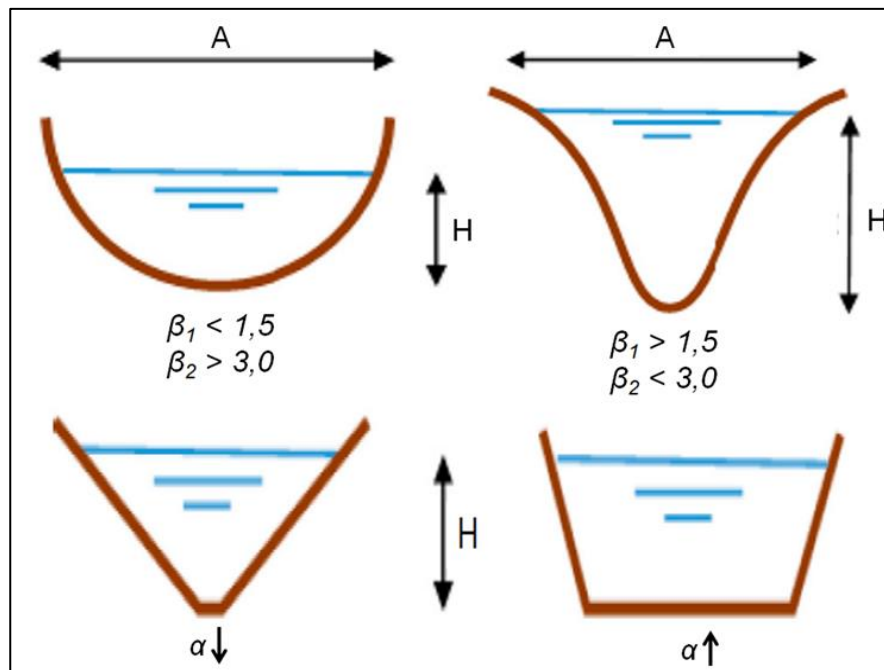
$$V = \alpha_1 * A^{\beta_1} \quad (2)$$

$$V = \alpha_2 * H^{\beta_2} \quad (3)$$

Onde V é o volume do reservatório em m<sup>3</sup>, A é a área da superfície em m<sup>2</sup>, H é a profundidade do reservatório em m,  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  são constantes associadas com a forma do reservatório.

A constante  $\beta$  está diretamente relacionada com a concavidade das encostas do reservatório. Para encostas côncavas,  $\beta_1$  apresenta valores menores que 1,5 e  $\beta_2$  apresenta valores maiores que 3,0; enquanto que para encostas convexas, observa-se o comportamento oposto. Já o coeficiente  $\alpha$  representa a abertura da pirâmide. Quanto mais aberto e plano for o fundo do reservatório, maior o valor deste coeficiente (ANNOR *et al.*, 2009; GRIN, 2014; RODRIGUES; LIEBE, 2013; TUNJI; SEMPEWO; MBATYA, 2020). A Figura 4 ilustra a relação destes parâmetros com as suas respectivas formas.

**Figura 4** – Parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  de acordo com a forma do reservatório.



Fonte: Adaptado de Grin (2014).

Diversos autores investigaram relações área-volume para bacias localizadas em regiões semiáridas ocupadas por pequenos reservatórios tendo como base o cálculo da área do espelho d'água do reservatório a partir de imagens de satélite. Alguns destes trabalhos são apresentados no Quadro 1, explicitando-se as áreas de estudo, os satélites utilizados, as relações obtidas e suas métricas de avaliação.

Comparando-se as equações área-volume, nota-se que há grande variabilidade nos coeficientes  $\alpha_1$  e  $\beta_1$ , indicando que há grandes variações na forma dos reservatórios em diferentes regiões. Para os reservatórios investigados por Grin (2014) no semiárido brasileiro, o coeficiente exponencial ficou próximo do valor teórico 1,5, apresentando um formato levemente convexo de suas encostas em dois dos casos. Em Gana e Zimbábue, o coeficiente exponencial também se aproxima do valor teórico, mas nesse caso indicam um formato arredondado côncavo. Já na Bacia do Rio Preto, Brasil, o valor de  $\beta_1$  ficou próximo de 1, indicando baixa declividade da região estudada (RODRIGUES *et al.*, 2012). Por fim, para o reservatório Namadope, o coeficiente apresentou valor bem acima de 1,5, indicando um formato convexo de suas encostas.

**Quadro 1** – Síntese de trabalhos que avaliam o potencial de se utilizar imagens de satélite para estabelecer relações área-volume para determinar o volume de reservatórios de pequena dimensão.

Referência	Área de estudo	Satélite	$\alpha_1^*$	$\beta_1^*$	R <sup>2</sup>
Liebe, Van de Giesen, Andreini (2005)	Centro da Bacia Volta, Gana	Landsat 7	0,00857	1,4367	0,98
Sawunyama, Senzanje e Mhizha (2006)	Bacia Mzingwane, Zimbábue	Landsat 5	0,023	1,33	0,95
Annor <i>et al.</i> (2009)	Centro da Bacia Volta, Gana	ENVISAT ASAR	0,00875	1,44	0,98
Rodrigues <i>et al.</i> (2012)	Bacia do Rio Preto, Brasil	Landsat 6	0,45	1,11	0,83
Grin (2014)	Reservatório São Nicolau, Brasil	Landsat 5	0,00336	1,49	0,994
	Reservatório Raiz, Brasil	Landsat 5	0,00172	1,61	0,999
	Reservatório Marengo, Brasil	Landsat 5	0,00181	1,54	0,998
Tunji, Sempewo, Mbatya (2020)	Reservatório Namadope, Uganda	Landsat 7 e 8	0,0000173	2,1799	0,99

**Fonte:** Autor.

\* Os parâmetros se referem àqueles encontrados na Equação (2).

Dessa forma, fica claro que os parâmetros da equação são bastante dependentes do terreno onde estão localizados os reservatórios, sendo específicos de cada região. Outro fato que merece destaque é que Liebe, Van de Giesen e Andreini (2005) e Annor *et al.* (2009) estudaram a mesma região utilizando diferentes satélites e obtiveram resultados bastante semelhantes, indicando que ambos os sensores (óptico e radar) são adequados para realizar esse tipo de análise.

Pereira *et al.* (2019) também investigaram a utilização de parâmetros baseados na forma do reservatório de forma semelhante ao descrito anteriormente. Os autores propuseram uma modificação na equação desenvolvida por Molle (1994b), utilizando também parâmetros baseados no terreno e na área máxima inundada, resultando em quatro diferentes abordagens. Ao fim, eles concluem que a abordagem que utiliza apenas coeficientes de forma do reservatório é a mais econômica, tendo em vista que utiliza menos parâmetros e tem resultados



semelhantes àquela que também utiliza parâmetros de terreno. A abordagem que utiliza áreas do espelho d'água para classificar os reservatórios também apresentou bons resultados, sendo comparável com os outros métodos.

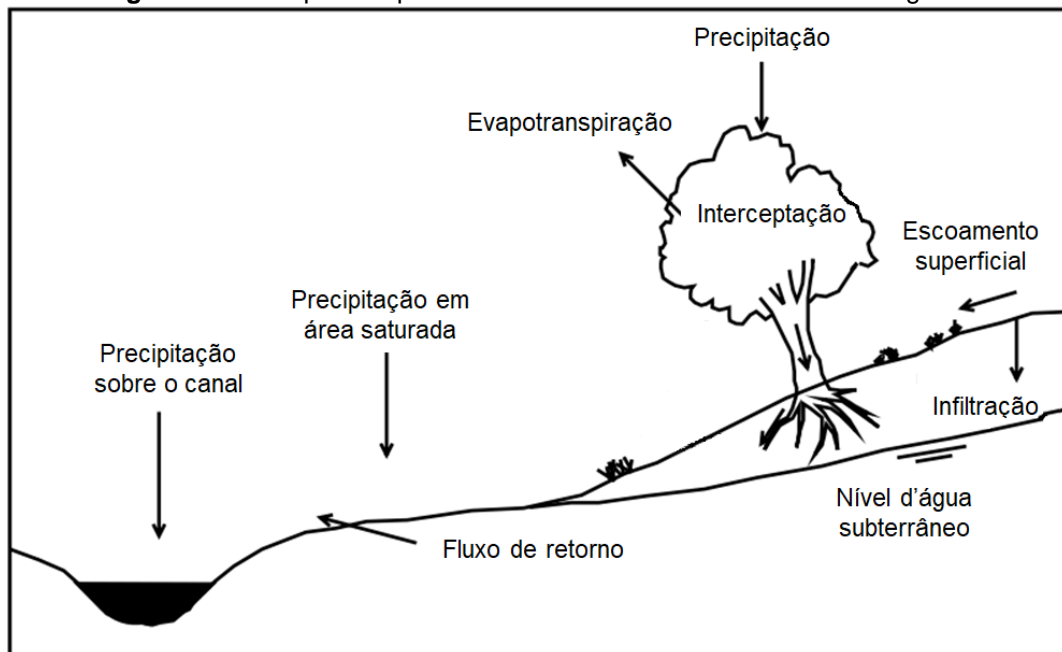
Outra linha de estudo foi empregada por Zhang *et al.* (2016), ao utilizar dados do satélite TanDEM-X para gerar um modelo digital de elevação (MDE) e imagens do RapidEye para extrair as relações de área-volume na forma de equações do segundo grau de reservatórios localizados na bacia Madalena, que faz parte da Sub-bacia do Banabuiú, região central do Ceará no semiárido brasileiro. Os autores indicam que os MDEs gerados apresentaram boa acurácia e as relações obtidas apresentaram-se mais confiáveis que aquelas derivadas a partir de mapas batimétricos obtidos com visitas a campo, concluindo que esta metodologia permite uma análise eficiente de reservatórios.

Por sua vez, Fassoni-Andrade, Paiva e Fleischmann (2020) propõem outra metodologia que envolve a utilização da relação de frequência de inundação e séries de níveis para definir a topografia e o volume ativo de corpos d'água. Contudo, apesar dos bons resultados na aplicação inicial, os autores indicam que ainda são necessárias maiores investigações quanto à aplicação deste método para pequenos lagos e reservatórios. Uma limitação seria a necessidade de imagens de alta resolução da área para definir com precisão a área inundada de pequenos açudes e a necessidade de séries de nível de cada reservatório, limitados *in situ* por questões práticas e sem cobertura suficientemente ampla de satélites para criação de estações virtuais.

### 3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas pelo homem que são capazes de representar os processos do ciclo hidrológico, buscando quantificá-los através de equações. Dessa forma, a etapa de decisão na qual se definem quais processos são relevantes em determinada bacia hidrográfica é um elemento crucial na construção desses modelos (BEVEN, 2012). A Figura 5 apresenta alguns dos processos que ocorrem em uma bacia. Contudo, dependendo das características climatológicas e geomorfológicas da região, alguns deles não terão relevância para o objetivo desejado, podendo ter seu efeito desprezado dentro do modelo. Da mesma forma, outros processos podem ser considerados.

**Figura 5** – Exemplos de processos observados em uma bacia hidrográfica



Fonte: Adaptado de Beven (1991) *apud* Beven (2012).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com diferentes aspectos. Quanto ao tipo de variáveis, um modelo pode ser dito estocástico, quando a variável possui comportamento aleatório (possuindo uma distribuição de probabilidade), ou determinístico, quando um mesmo conjunto de parâmetros de entrada gera sempre a mesma saída. Outra classificação refere-se às relações espaciais na bacia. Sob esta ótica, um modelo é dito concentrado quando a área da bacia é representada de forma homogênea, sendo normalmente atribuídos valores médios para toda a área; e é classificado como distribuído quando a variabilidade espacial da bacia é considerada (ALMEIDA; SERRA, 2017; BEVEN, 2012).

Os modelos hidrológicos normalmente se preocupam em representar os processos envolvidos na transformação da precipitação que ocorre sobre uma bacia em vazão. Comumente, também há interesse em se saber qual a vazão que passa em determinado ponto de interesse, fazendo-se necessário que a vazão seja propagada através dos rios. Segundo Beven (2012), os cálculos desse processo baseiam-se nas Equações de Saint-Venant, podendo ser resolvidas de forma completa ou com adoção de simplificações. Esse processo é conhecido como modelagem hidrodinâmica e normalmente encontra-se associado com a modelagem hidrológica.

### 3.3.1 Modelagem hidrológica de regiões semiáridas

As características hidrológicas de regiões semiáridas (ver Seção 3.1) destacam a necessidade de se desenvolverem modelos específicos para essas áreas, como destacado por Pilgrim, Chapman e Doran (1988) e Güntner (2002). Dessa forma, diversos modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos, variando quanto a processos representados, tipo de representação (empírico ou conceitual), conjunto de variáveis empregadas e variabilidade espacial.

Doherty, Araújo Filho e Cadier (1994), por exemplo, desenvolveram um modelo com base na região semiárida brasileira. Os autores identificaram que a maior parte da vazão nessa área é proveniente do escoamento superficial, que por sua vez, depende fortemente dos picos de intensidade e total pluviométrico em 24 horas. Assim, o modelo SUDENE/ORSTOM foi desenvolvido considerando-se estas características, tendo um intervalo de simulação diário e adaptado às características de pequenos rios intermitentes.

Outro exemplo de modelo é o WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*), desenvolvido por Güntner (2002). O WASA é um modelo determinístico de simulação contínua com passo de tempo diário, sendo também possível aplicar em escala horária para pequenas áreas. Quanto à resolução espacial este modelo é dito semi-distribuído, uma vez que a área de estudo pode ser subdividida em áreas menores, nas quais algumas variáveis são consideradas como valores médios. Neste modelo, o autor busca representar de maneira adequada os processos de superfície (infiltração, evaporação, presença de reservatórios, entre outros), reconhecidamente mais relevantes para a geração de vazão em bacias semiáridas.

Por sua vez, o modelo CAWM IV (*Campus do Agreste Watershed Model version IV*), desenvolvido por Cirilo *et al.* (2020) para regiões semiáridas no Brasil, é um modelo conceitual e concentrado que foi formulado com o objetivo de simular o escoamento sobre bacias de solos rasos com baixa capacidade de acumulação. Assim, este modelo prioriza o escoamento superficial, não representando em detalhes os processos que ocorrem dentro do solo.

Outros exemplos de modelo desenvolvidos para regiões semiáridas brasileiras são descritos por Moura *et al.* (2007). Dentre os modelos citados temos o

MODHISA (Modelo Hidrológico para o Semi-Árido), modelo concentrado usado para modelar o processo chuva-vazão em escala mensal em bacias com grande número de açudes; o MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável), modelo com calibração automática de seus parâmetros; e o AÇUMOD, modelo distribuído que tem como objetivo efetuar o balanço hídrico entre reservatórios presentes na rede de drenagem da região.

### 3.3.2 Modelagem hidrológica de pequenos reservatórios

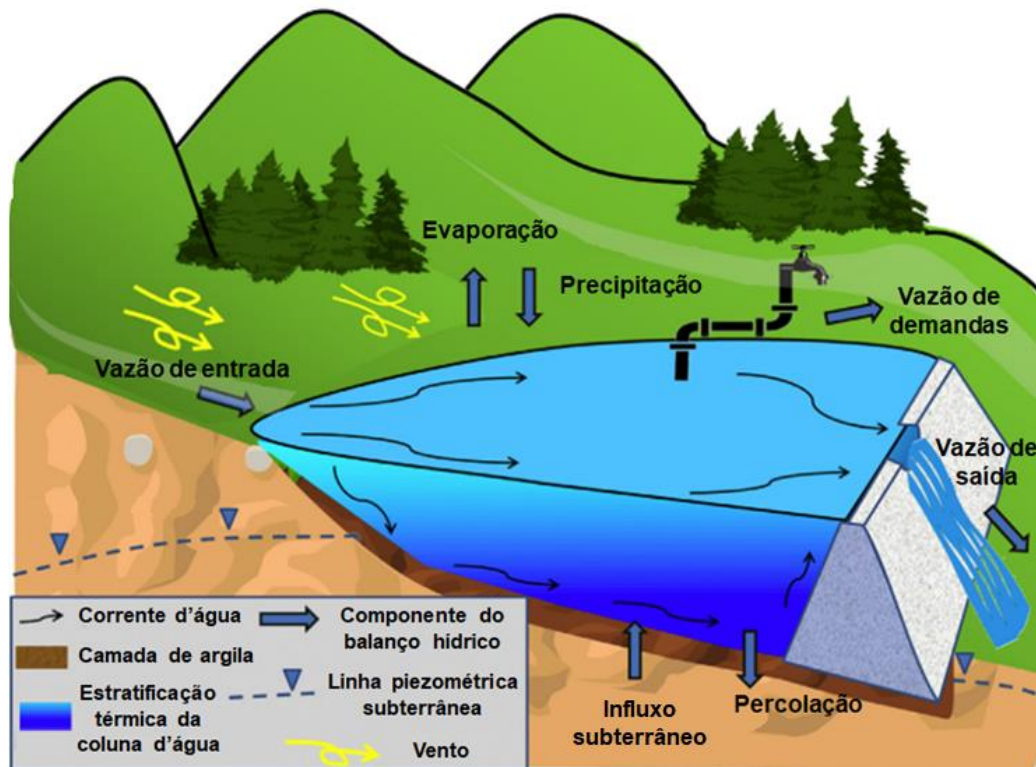
Os reservatórios alteram o ciclo da água dentro de uma bacia, modificando o regime de vazão natural nos canais de drenagem e gerando impactos diversos (ver Seção 3.2.1). Assim, a representação desses tipos de estruturas em modelos hidrológicos torna-se essencial para a correta modelagem dos fenômenos que ocorrem em bacias em que eles estão presentes. Segundo Habets *et al.* (2018), o balanço hídrico de um reservatório pode ser expresso pela equação:

$$\frac{dV}{dt} = Q_E + P + Q_{Sub} - Q_S - E - P_C - Q_{Dem} \quad (4)$$

Onde  $dV$  é a variação de volume ( $m^3$ ) sobre um de tempo  $dt$  (s),  $Q_E$  é a vazão de entrada no reservatório ( $m^3/s$ ),  $P$  é a taxa de precipitação sobre o reservatório ( $m^3/s$ ),  $Q_{Sub}$  é a vazão de influxo a partir do reservatório subterrâneo ( $m^3/s$ ),  $Q_S$  é a vazão de saída do reservatório ( $m^3/s$ ),  $E$  é a taxa de evaporação sobre o reservatório ( $m^3/s$ ),  $P_C$  é a taxa de perda de água por percolação ( $m^3/s$ ) e  $Q_{Dem}$  é a vazão retirada do reservatório para atender as demandas ( $m^3/s$ ).

Dessa forma, nota-se que as possíveis entradas de água no reservatório são provenientes da vazão afluente através do canal de drenagem, da geração de escoamento superficial na bacia, da precipitação direta sobre a área do reservatório e de contribuições de aquíferos subterrâneos. Em contrapartida, as possíveis saídas de água se dão através da evaporação direta a partir do espelho d'água, da percolação de água no leito do reservatório, da vazão liberada para jusante e da vazão utilizada para atender os usos previstos. A Figura 6 apresenta um esquema desses componentes.

**Figura 6** – Balanço de água em um pequeno reservatório e suas principais forçantes.



Fonte: Adaptado de Habets *et al.* (2018)

Contudo, nem todos os termos do balanço hídrico indicados na Equação (4) são necessariamente obrigatórios. O Quadro 2 apresenta uma síntese de diferentes modelos hidrológicos que contam com módulos para representar redes de reservatórios em bacias hidrográficas. Nota-se que nenhum dos modelos inclui todos os componentes do balanço hídrico indicados, e isso se dá pela identificação da relevância de determinado processo dentro da bacia e pelos pressupostos adotados pelo hidrólogo no momento de concepção do modelo.

Percebe-se ainda que a evaporação direta a partir do espelho d'água do reservatório e a vazão retirada para atender as demandas são os principais processos incluídos nos modelos citados (além da vazão de entrada e de saída). Essa característica pode ser justificada pelo fato de regiões semiáridas apresentarem elevada taxa de evaporação potencial e a principal função dos reservatórios ser o atendimento das demandas da população. Assim, esses componentes tem grande influência dentro do balanço hídrico regional.

**Quadro 2** – Exemplos de modelos hidrológicos com modelagem de redes de reservatórios, suas características espaciais e temporais e os processos representados. Representação espacial (RE): Agregado (A), Representação estatística (E) ou Distribuído (D). Passo de tempo (PT). Os processos estão representados pelas variáveis descritas na Equação (4). As vazões de entrada podem ser obtidas por observações (OBS), modelagem do balanço hídrico na bacia (BH) ou do balanço hídrico e energético (BHE). As vazões de saída podem ser contínuas para manter uma vazão ecológica (VE) ou ocorrerem apenas quando o reservatório atinge a capacidade máxima e verte (V).

Modelo	RE	PT	Processos incluídos							
			Q <sub>E</sub>	Q <sub>S</sub>	P	Q <sub>Sub</sub>	E	P <sub>C</sub>	Q <sub>Dem</sub>	
ACRU	A	Diário	BH	VE, V	x			x	x	x
GR4J	A	Diário	BH							
HYDROMED	A	Diário	BH	V	x			x		x
ISBA-Rapid	A	Horário	BHE	V				x		x
SWAT	A, E	Diário	BH	V	x	x		x		x
TEDI	E	Diário/ Mensal	OBS	V	x			x		x
WASA	E	Diário	BH	V				x	x	x
WaterCAST	E	Diário	BH	V	x			x		x
CASCADE	D	Diário	BH	V				x	x	x
CHEAT	D	Mensal	OBS	V	x			x		x
Deitch	D	Diário	OBS	V						
PITMAN	A	Mensal	BH	V				x		x
AÇUMOD	D	Diário	BH	VE, V	x			x	x	x

Fonte: Adaptado de Habets *et al.* (2018)

No que se refere à representação espacial da rede de reservatórios dentro do modelo, Habets *et al.* (2018) apresenta três métodos possíveis. Uma opção é representar todos os reservatórios na área da bacia como um único reservatório equivalente, correspondendo ao tipo “Agregado” (A) no Quadro 2. Neste tipo de representação, as capacidades e áreas de superfície de cada reservatório individual presente na bacia são agregadas de forma a se obter um único reservatório equivalente com área de drenagem igual à soma das áreas de drenagens individuais. Segundo Habets *et al.* (2018), uma vantagem dessa abordagem é a necessidade apenas de dados globais dos reservatórios, porém tem limitações quanto à capacidade de avaliar impactos cumulativos ao longo da rede de drenagem da bacia.

Outra opção possível é representar cada reservatório explicitamente dentro do modelo, com seu próprio balanço hídrico e área de contribuição individual,

correspondendo ao tipo “Distribuído” (D, no Quadro 2). Nesse tipo de representação, a vazão liberada por cada reservatório contribui como vazão de entrada para o que está a jusante, permitindo avaliar as interações entre reservatórios e com os diferentes compartimentos da bacia (rio, solo, aquífero). Contudo, usualmente são requeridas grandes quantidades de dados sobre a localização e características dos reservatórios, bem como dos seus usos, representando uma limitação a este tipo de abordagem (HABETS *et al.*, 2018).

Por fim, uma alternativa intermediária às duas outras formas de representação corresponde a simular os reservatórios por meio de grupos de classes, de forma que cada classe é representada por um reservatório equivalente, correspondendo ao tipo “Representação estatística” (E, no Quadro 2). Como vantagens dessa abordagem, Habets *et al.* (2018) citam o fato de que processos chave que ocorrem em reservatórios conseguem ser representados e quantificados, uma vez que eles tendem a ser variáveis entre reservatórios, mas parecidos entre aqueles de porte similar. Contudo, uma desvantagem citada é que o impacto cumulativo ao longo da rede de drenagem não pode ser avaliado.

### 3.3.2.1 Características e limitações de modelos existentes

Nesta seção serão apresentadas características de alguns dos modelos que contam com módulos específicos para representação de redes de reservatórios presentes na bacia, buscando-se com isso identificar lacunas de conhecimento que possam ser investigadas.

O modelo GR4J é um modelo chuva-vazão concentrado com passo de tempo diário que conta com um módulo de determinação da umidade do solo, permitindo também contabilizar possíveis interações com aquíferos subterrâneos. Payan *et al.* (2008) desenvolveram um método para incorporar um módulo de reservatórios a este modelo, utilizando a representação espacial do tipo agregado e informações da variação de volume armazenado na bacia. Os autores obtiveram resultados satisfatórios, contudo não foram feitas investigações em bacias de regiões semiáridas e os processos que ocorrem nos reservatórios não foram representados explicitamente, devido à natureza concentrada do modelo.

Outro modelo que foi adaptado para representar conjuntos de açudes na bacia de forma agregada foi o ISBA-Rapid, em um trabalho desenvolvido por Habets *et al.* (2014) na França. Alguns dos pressupostos assumidos pelos autores incluem o fato de que os reservatórios tem baixa capacidade de armazenamento (menos de 20.000 m<sup>3</sup>) e estão uniformemente distribuídos no território, resultando em um açude agregado a cada célula de 8 x 8 km<sup>2</sup>. Para estimar o volume armazenado nos reservatórios, assumiram-se pressupostos quanto à profundidade média, à área de superfície do espelho d'água e área de contribuição do reservatório, resultando na construção de diferentes cenários. Pressupostos também foram assumidos quanto à operação dos reservatórios e à evaporação a partir do espelho d'água, resultando em uma grande quantidade de influências sobre o resultado final.

Com outra abordagem, o modelo WASA foi desenvolvido para regiões semiáridas e representa os reservatórios de pequeno e médio porte de forma que grupos de reservatórios de capacidade similar sejam agregados em classes, dispostas em cascata para cada unidade de sub-bacia, enquanto que os de grande porte são representados explicitamente. Nessa abordagem, Güntner *et al.* (2004) assumem que as classes de reservatórios de menor capacidade sempre estão localizados a montante dos de maior capacidade no sistema de cascata e a área de contribuição para cada classe é uma fração da área total da sub-bacia em questão. Para cada grupo de reservatórios, o balanço hídrico é calculado considerando valores médios correspondentes a cada classe e a vazão liberada segue a cascata até atingir o exutório da sub-bacia.

Além disso, é pressuposto pelos autores que não há contribuição de sub-bacias a montante para a vazão que chega às classes de reservatórios, ou seja, as diferentes classes de reservatórios recebem o escoamento gerado apenas da área de drenagem de sua sub-bacia. Dessa forma, o modelo apresenta limitações principalmente quanto à definição das áreas de contribuição, tendo espaço para melhorias no posicionamento dos açudes na rede de drenagem a partir de dados mais detalhados de topografia (ZHANG *et al.*, 2012).

Outro modelo desenvolvido para a região semiárida brasileira foi o AÇUMOD (SILANS *et al.*, 2000), modelo distribuído que foi pensado com o objetivo de incorporar estruturas hidráulicas, em especial os açudes, em bacias da região. Neste modelo, a área da bacia é discretizada em células quadradas subdivisíveis e os



reservatórios são explicitamente representados, sendo necessários dados da curva cota-área-volume, da cota do vertedouro e da cota do porão para realizar o balanço hídrico a cada passo de tempo.

Segundo os autores, os açudes são classificados como de ordem 1 ou 2. Aqueles de ordem 1 apresentam pequena dimensão em geral, não tendo outro açude a montante e sendo desconsideradas retiradas significativas de água para atendimento de demandas. Já os de classe 2 são aqueles que não se encaixam na categoria anterior. Este modelo também é capaz de representar pontos de transposição de vazões, sendo bastante representativo das práticas observadas em bacias da região. Contudo, uma limitação importante na sua abordagem é a necessidade de uma quantidade de dados que não se tem na grande maioria das vezes, principalmente para os reservatórios de pequena dimensão.

Por sua vez, Deitch, Merenlender e Feirer (2013) propõem uma metodologia para avaliar o impacto temporal e espacial de pequenos reservatórios em uma bacia da Califórnia, baseando-se em um modelo construído com ferramentas SIG (Sistemas de Informações Geográficas). Nesta abordagem, os autores identificam cada reservatório na rede de drenagem e definem sua capacidade a partir de uma relação linear com a área do espelho d'água. Apesar de permitir análises sobre os impactos dos reservatórios sobre a rede da bacia, este modelo é bastante simplificado do ponto de vista hidrológico, tendo em vista que nenhum processo (além da entrada e saída de vazão) é contabilizado.

Outro trabalho que representou os reservatórios de forma distribuída foi desenvolvido por Collischonn *et al.* (2011) na bacia do rio Quaraí, localizado na fronteira do Brasil e do Uruguai, utilizando o modelo MGB. Os autores identificaram reservatórios e lavouras de arroz a partir de imagens de satélite e estabeleceram uma relação linear entre a área de superfície com o volume dos reservatórios, sendo realizado o balanço hídrico de forma individual. Contudo, este trabalho foi gerado a partir de modificações pontuais no modelo e este tipo de análise não consta como opção na sua versão atual, além de ter sido realizado em um clima subtropical significativamente mais úmido do que o semiárido brasileiro.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, explicitando-se e caracterizando o modelo e a região estudados, bem como a metodologia desenvolvida para alcançar os objetivos propostos.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho foi a sub-bacia do rio Banabuiú, localizada no estado do Ceará (CE), fazendo parte da região semiárida brasileira (Figura 7). Essa sub-bacia compõe a bacia do Jaguaribe, tendo 19.810 km<sup>2</sup> de área de drenagem, o que corresponde a 13% do território do estado. Ela é composta por 15 municípios, tendo um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) variando de 0,604 a 0,673 entre os municípios (CEARÁ, 2009).

**Figura 7 – Localização da sub-bacia do Banabuiú**



**Fonte:** Autor

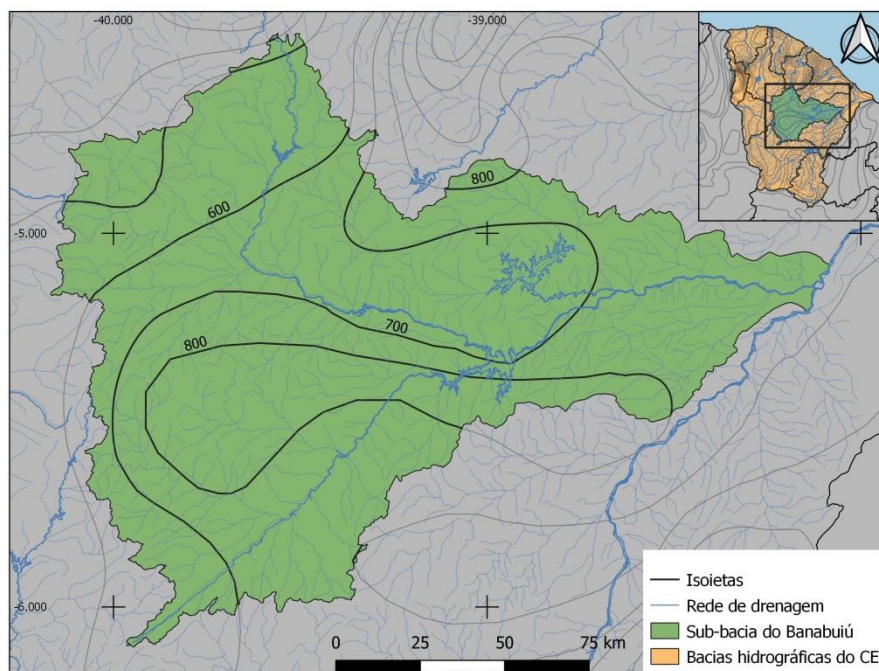
Segundo Fuck Júnior (2008), a vegetação predominante nesta região é a caatinga arbustiva aberta no centro da bacia e a caatinga arbustiva densa nas áreas leste e oeste. Já no que se refere à geologia, observa-se um predomínio de rochas do embasamento cristalino, correspondendo a um total de 96,53% do território da

região, sendo o restante formado por sedimentos sob a forma de manchas esparsas e depósitos aluviais encontrados ao longo dos rios (CEARÁ, 2009).

Na região do embasamento cristalino podem ser encontrados solos com profundidade variando de rasa – Planossolos Solódicos – a medianamente profundos – Luvisolos (que apesar de razoavelmente profundos, são pedregosos) e Argissolos Eutróficos (na forma de manchas pela região); enquanto que na região sedimentar, os solos são predominantemente rasos com ocorrência de Neossolos Litólicos, Planossolos, Vertissolos e Neossolos Flúvicos (aluviões) (CEARÁ, 2009; FUCK JÚNIOR, 2008).

O clima da região é do tipo Tropical Quente Semiárido, com temperaturas médias variando de 26°C a 28°C no ano, precipitação média anual de 725,4 mm (com estação chuvosa entre os meses de fevereiro e maio) e evaporação potencial média de 1982,6 mm por ano (CEARÁ, 2009). Dessa forma, a sub-bacia do Banabuiú possui elevado déficit hídrico, tendo predominantemente rios intermitentes e efêmeros na sua região. A Figura 8 apresenta a rede de drenagem observada nesta sub-bacia (com destaque para os principais cursos d'água), bem como as isoietas de precipitação média anual que ocorrem na região.

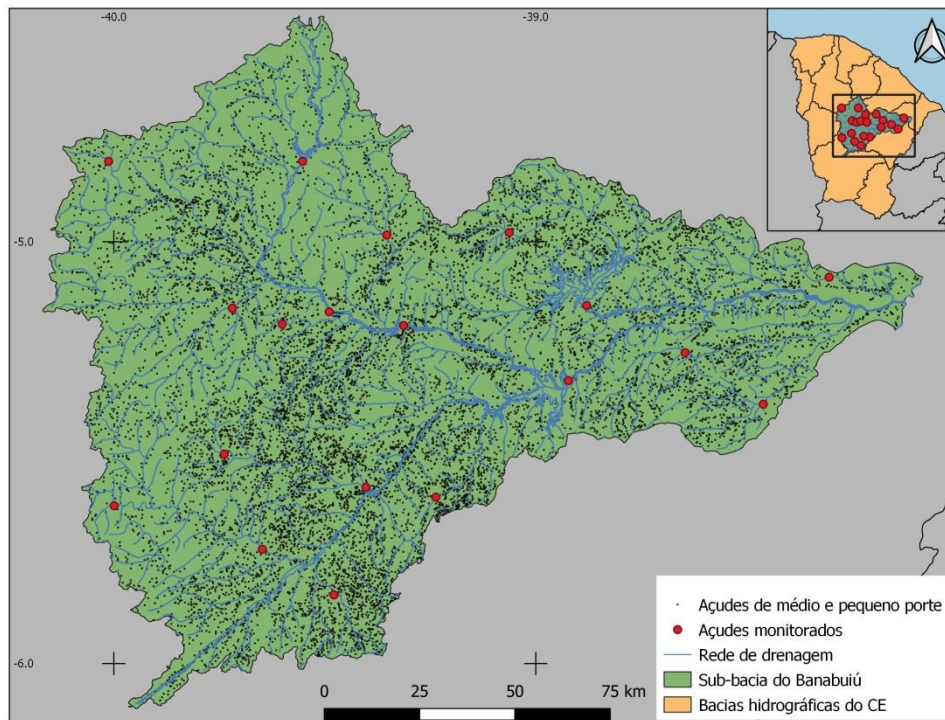
**Figura 8** – Sub-bacia do Banabuiú com sua rede de drenagem e isoietas de chuva média anual



**Fonte:** Autor. Baseado em dados de CPRM e MME (2011).

Essas características justificam o alto nível de açudagem que se observa nesta bacia, onde foram identificados 13.097 reservatórios (FUNCEME, 2020 – em desenvolvimento), sendo que, dentre estes, 19 são utilizados como principal fonte hídrica da bacia, sendo regularmente monitorados pelas agências do Estado (Figura 9), e apenas 14 possuem capacidade maior que 10 milhões de metros cúbicos (CEARÁ, 2009). Esta sub-bacia caracteriza-se ainda pelo elevado uso de águas subterrâneas. Segundo Ceará (2009), existiam 2624 poços tubulares na região até o ano de 2006, sendo que 1169 estavam locados em aquíferos aluviais e 1455 em aquíferos fissurais de rochas cristalinas.

**Figura 9** – Distribuição de açudes na área da sub-bacia do Banabuiú



Fonte: Autor

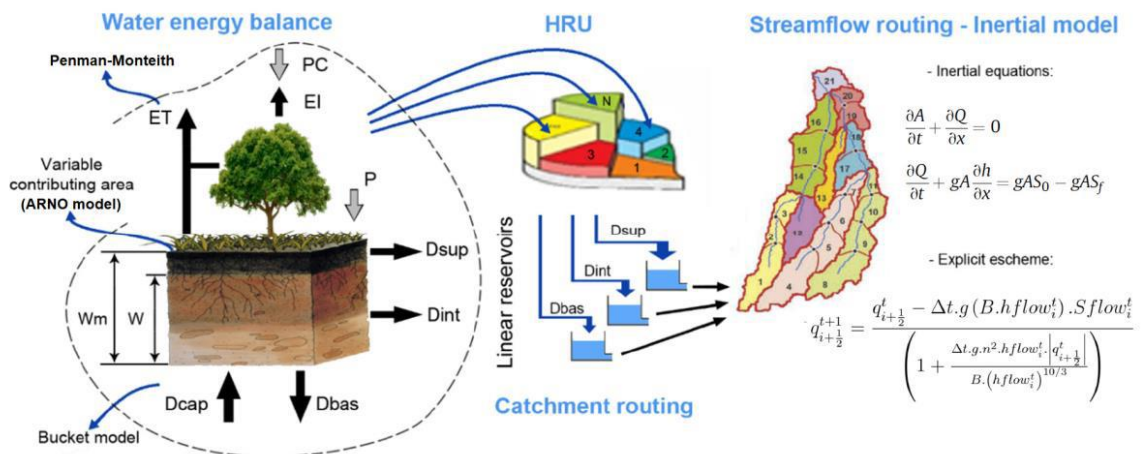
## 4.2 MODELO DE GRANDES BACIAS

O modelo utilizado neste trabalho foi o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), que consiste em um modelo hidrológico-hidrodinâmico determinístico, semi-distribuído e baseado em processos, que realiza a transformação de chuva em vazão e propaga o escoamento através da rede de drenagem (COLLISCHONN *et al.*, 2007; COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Na primeira versão deste modelo, a bacia era subdividida em células quadradas ligadas entre si por canais de drenagem, sendo que cada célula era novamente subdividida em blocos de uso com base no tipo de solo e vegetação (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Na versão mais atual, o modelo conta com uma subdivisão em minibacias irregulares com base na confluência dos rios e sua extensão e cada minibacia é novamente subdividida em diferentes unidades de resposta hidrológica (URHs), definidas a partir da combinação de mapas de tipos de solo e vegetação (PONTES *et al.*, 2017).

Segundo Collischonn e Tucci (2001) e Collischonn *et al.* (2007), o MGB-IPH é composto por 4 módulos específicos (Figura 10), sendo o primeiro deles correspondente ao de balanço de água no solo. Esse módulo consiste em um balanço vertical da água presente na camada do solo, sendo realizado para cada URH presente em cada minibacia. Nesta etapa são contabilizados o armazenamento de água no solo (capacidade máxima e estado atual), a precipitação que atinge o solo (precipitação menos interceptação), a evaporação e a geração de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo.

**Figura 10** – Esquema conceitual do modelo MGB-IPH



Fonte: Paiva *et al.* (2017)

O segundo módulo, por sua vez, consiste no balanço de energia utilizado no processo de evaporação. Esta etapa do modelo é calculada através da equação de Penman-Monteith, de forma que a energia é utilizada em primeira instância para

evaporar a água interceptada pela vegetação e, caso haja excedente, ela é utilizada para calcular a transpiração proveniente da vegetação.

Ainda segundo estes autores, o terceiro módulo consiste no escoamento através da minibacia. O modelo foi construído de forma a considerar que os escoamentos gerados em cada URH sofrem retardo e amortecimento ainda no interior de cada minibacia, sendo assim necessário que essa vazão gerada passe por unidades de reservatórios lineares. Dessa forma, o escoamento superficial segue para o reservatório superficial e assim sucessivamente, sendo que a soma da saída dos três reservatórios lineares é a vazão resultante da minibacia.

Por fim, temos o módulo de propagação do escoamento na rede de drenagem. Inicialmente a propagação nos rios era feito exclusivamente através do método de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN; TUCCI, 2001) e mais recentemente também há disponível o método inercial, que consiste na resolução das equações de Saint-Venant desconsiderando-se o termo de inércia advectiva (PONTES *et al.*, 2017). Uma descrição mais detalhada de cada módulo, bem como seus cálculos, pode ser encontrada em Collischonn e Tucci (2001) e Collischonn *et al.* (2007).

Este modelo conta ainda com um pacote de ferramentas, denominado IPH-Hydro Tools, que são destinadas ao processamento do MDE previamente à modelagem hidrológica, permitindo a obtenção de direções de escoamento com base na declividade do terreno, rede de drenagem, delimitação da bacia até o ponto de interesse, assim como a sua subdivisão em minibacias (SIQUEIRA, *et al.*, 2016).

#### 4.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para alcançar os objetivos propostos, foram estabelecidos diferentes cenários de testes a serem avaliados, comparando-os entre si para investigar qual a influência que um grande número de pequenos reservatórios pode ter sobre a bacia e como a sua representação dentro do modelo interfere nestes resultados. O Quadro 3 apresenta a descrição sucinta destes cenários, bem como a sigla que será utilizada daqui em diante para se referir a cada um deles.



**Quadro 3** – Descrição dos cenários avaliados e suas respectivas nomeações de referência.

Cenário	Descrição
A	MGB original
B	MGB modificado para representar uma densa rede de reservatórios
C	MGB com reservatório equivalente no exutório das minibacias
D	MGB considerando apenas reservatórios monitorados

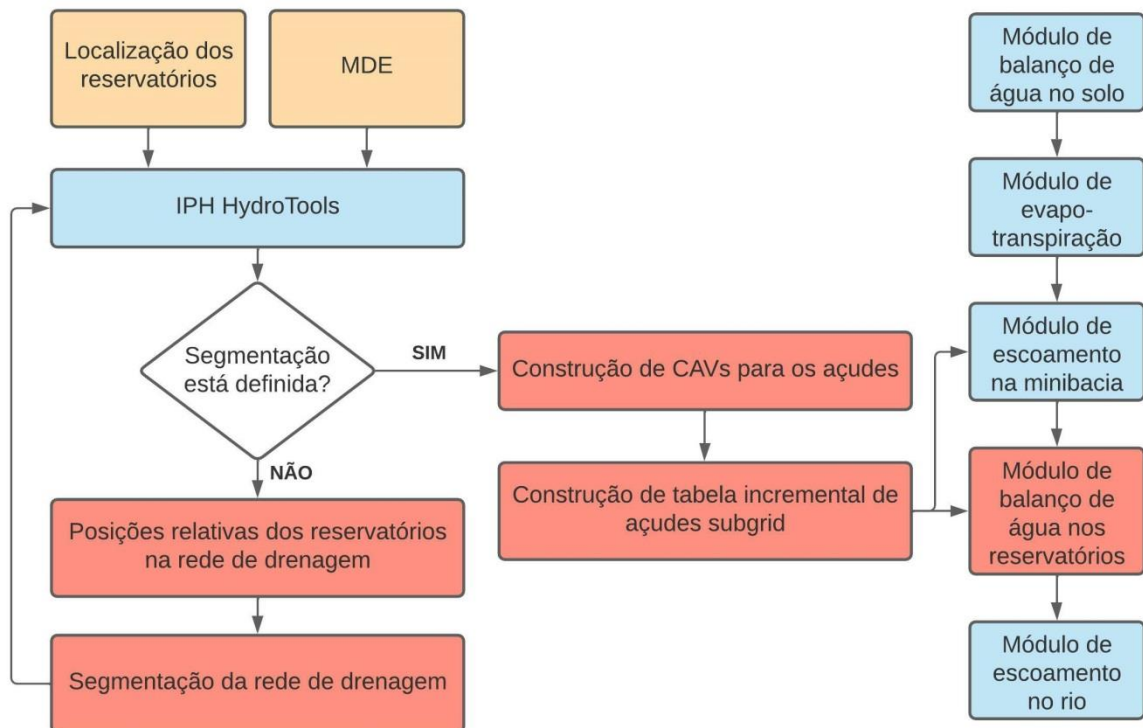
Fonte: Autor.

Para o cenário A, o modelo MGB foi utilizado em sua forma original, ou seja, sem nenhum tipo de modificação referente à presença de reservatórios na bacia, servindo como um controle para a análise dos resultados obtidos nos cenários seguintes. Nesse cenário foi realizada a calibração do modelo que foi utilizada em todos os outros cenários, de forma que as mudanças no comportamento dos hidrogramas e nas métricas de desempenho são decorrentes apenas das alterações propostas, sendo estes os critérios para comparação entre cenários.

Por sua vez, para o cenário B, o MGB foi modificado de forma a incluir a densa rede de reservatórios presentes na bacia através de um conjunto de seis etapas, que estão apresentadas na Figura 11, sendo desenvolvidas em linguagem FORTRAN90. A primeira delas refere-se à definição das posições dos açudes na rede de drenagem gerada a partir de ferramentas do IPH-Hydro Tools e do MDE adotado. Em seguida, foi feita a segmentação da rede de drenagem com base nos açudes localizados diretamente sobre ela, de forma que cada açude representasse um ponto de exutório, gerando assim uma minibacia. Após essa etapa, voltou-se a utilizar as ferramentas do IPH-Hydro Tools para geração das minibacias e dos dados de entrada necessários para as etapas seguintes da metodologia.

A quarta etapa, por sua vez, consistiu na definição de curvas cota-área-volume (CAVs) para cada açude presente na bacia a partir do MDE adotado, fazendo-se também uma relação entre as minibacias e os açudes presentes em cada uma delas. Em seguida, foram definidas tabelas incrementais para eventos de chuva efetiva simulada sobre a área de cada minibacia, de forma a se obter uma relação entre o *runoff* gerado e o liberado em cada uma delas, sendo a diferença entre esses valores o total acumulado na minibacia devido à presença dos açudes fora da rede de drenagem principal, ou seja, em *sub-grid*.

**Figura 11** – Esquema do procedimento metodológico adotado neste trabalho. Em amarelo, estão indicados dados de entrada; em azul, ferramentas já desenvolvidas que foram utilizadas; e em vermelho, estão indicadas as contribuições desta pesquisa.



Fonte: Autor

Por fim, todos os dados gerados anteriormente foram então utilizados como dados de entrada para o módulo de balanço hídrico no reservatório, que foi inserido no modelo MGB-IPH (ver seção 4.2) de duas maneiras distintas:

- i. Açudes em *sub-grid* foram inseridos dentro do módulo de escoamento na minibacia de forma semelhante a um reservatório equivalente com área de drenagem igual à soma das áreas de contribuição de cada açude individualmente, de forma que parte do *runoff* gerado por um dado evento de precipitação fica retida e não contribui para o efetivo escoamento na minibacia;
- ii. Açudes diretamente sobre a rede de drenagem, ou seja, aqueles *on-grid* foram representados explicitamente, de forma que a vazão que sairia de cada minibacia passe primeiro pelo módulo do reservatório e a vazão resultante desta etapa é a que segue para o módulo de escoamento no canal de drenagem.



Assim, para este cenário, foram definidas quatro densidades de drenagem, geradas a partir da ferramenta *Stream definition* do IPH-Hydro Tools, adotando-se as áreas de 25, 50, 75 e 100 km<sup>2</sup> (STR25, STR50, STR75 e STR100, respectivamente) como critério limite dentro desta ferramenta. Por sua vez, foram também avaliadas diferentes alturas da parede do açude, totalizando quatro diferentes cenários: H3, H4, H5 e H6, que possuem 3, 4, 5 e 6 m de altura, respectivamente. Dessa forma, foi avaliado um total de 16 cenários de testes (Quadro 4), em que foi possível avaliar a influência de diferentes partes da metodologia proposta na modelagem da bacia em questão. Todas estas etapas estão mais bem descritas nas seções a seguir.

**Quadro 4** – Combinação entre diferentes cenários de profundidade máxima do reservatório e densidades de drenagem e a simbologia adotada como referência a cada caso para cenário B.

Cenários de densidade da rede de drenagem	Cenários de profundidade máxima (m)			
	H3	H4	H5	H6
<b>STR25</b>	B25_3	B25_4	B25_5	B25_6
<b>STR50</b>	B50_3	B50_4	B50_5	B50_6
<b>STR75</b>	B75_3	B75_4	B75_5	B75_6
<b>STR100</b>	B100_3	B100_4	B100_5	B100_6

Fonte: Autor.

Já para o cenário C, foi realizada uma modificação na metodologia proposta anteriormente, passando-se a considerar um reservatório equivalente correspondente aos açudes em *sub-grid* no exutório das respectivas minibacias em que eles se encontram, sendo operado de forma igual aos açudes *on-grid*. Essa agregação se deu por meio da soma direta dos volumes e das áreas do espelho d'água de cada reservatório em *sub-grid*, tendo o objetivo de avaliar o impacto que a proposta de representação dos açudes por meio das tabelas incrementais tem frente a uma versão simplificada deste tipo de representação.

Por fim, no cenário D, a simulação da bacia foi realizada considerando a presença apenas dos reservatórios monitorados (Figura 9), ou seja, a densa rede de pequenos açudes não foi considerada neste cenário. Essa simulação teve como objetivo a avaliação da influência dos pequenos e médios reservatórios sobre os açudes monitorados através da análise da sua capacidade de atendimento das

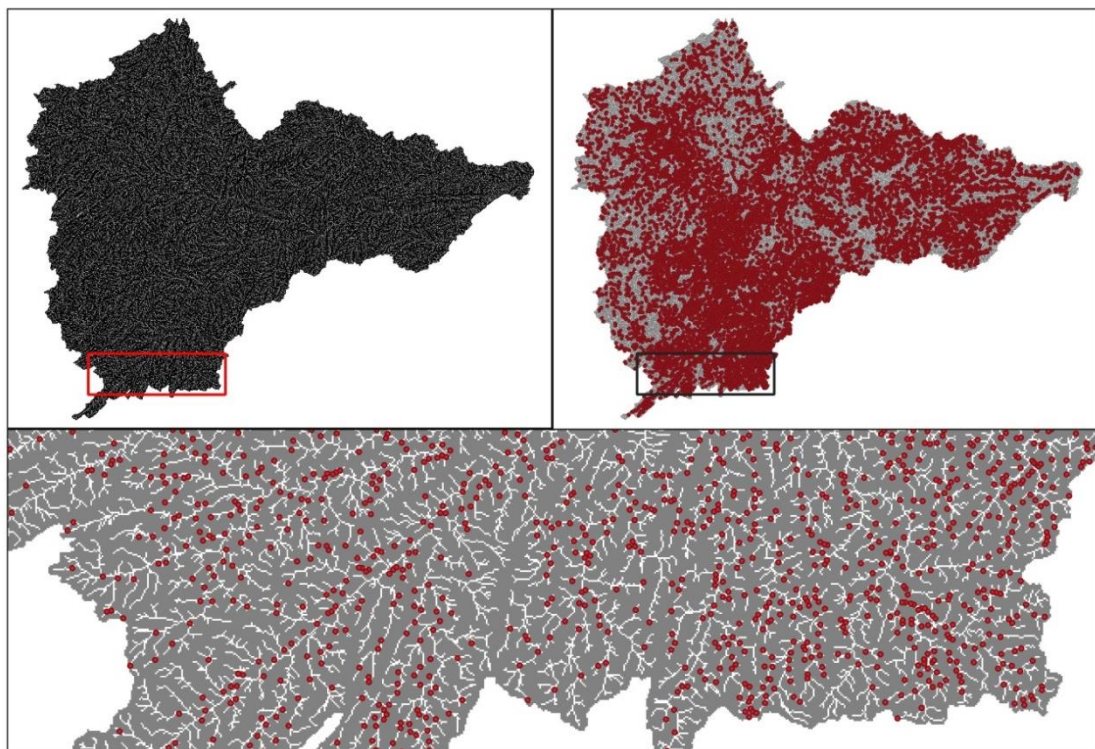
demandas, comparando-se os cenários B e D através de curvas de permanência de atendimento das demandas.

#### 4.3.1 Posições relativas dos açudes na rede de drenagem

O MDE utilizado neste estudo foi o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) corrigido pelo *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI), que promoveu o pós-processamento dos dados produzidos de forma a corrigir falhas de cobertura de dados através de técnicas de interpolação (JARVIS A.; REUTER; NELSON, 2008). Com base nesse MDE, a rede de drenagem foi definida através da ferramenta *Stream Definition* do IPH-Hydro Tools, que tem como base um valor limite de fluxo acumulado (SIQUEIRA, *et al.*, 2016).

Nesta primeira etapa, a rede de drenagem foi gerada com área de fluxo acumulado de 0,1 km<sup>2</sup>, de forma a ser bastante densa (Figura 12), com o objetivo de posicionar cada açude em cima da rede deslocando-o o mínimo possível para preservar suas posições relativas entre si.

**Figura 12** – Densa rede de drenagem gerada (superior esquerdo) e total de açudes analisados (superior direito) na bacia do Banabuiú; e exemplo de posicionamento dos açudes sobre a rede drenagem antes da aplicação da metodologia descrita (inferior).



Fonte: Autor

Por sua vez, os dados de entrada sobre os reservatórios consistiam em um *shapefile* das posições e comprimentos das paredes de açudes na área da bacia do Banabuiú, totalizando 13.097 açudes, obtidos em um estudo realizado pela FUNCEME (2020 – em desenvolvimento). Esse arquivo foi então convertido em um *shapefile* de pontos equivalentes à estrutura representada anteriormente a partir do seu centroide e esses pontos foram alocados sobre a rede de drenagem gerada para a bacia, de forma que cada açude foi posicionado sobre o pixel de rede de drenagem mais próximo (Figura 12), identificado através do cálculo da distância entre os centroides do pixel indicativo de açude e os da rede de drenagem. Apesar desse esforço, correções manuais ainda foram necessárias em alguns casos.

#### 4.3.2 Segmentação da rede de drenagem

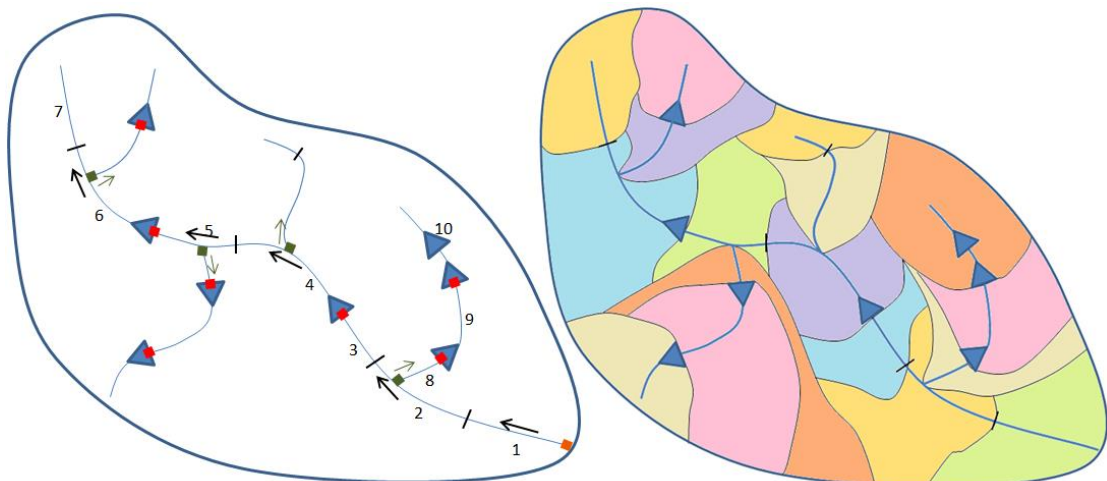
Para esta etapa, uma nova rede de drenagem, menos densa, foi definida com o objetivo de realizar a modelagem hidrológica da bacia. Foram geradas quatro redes, com diferentes densidades, a partir da área de fluxo acumulado de 25, 50, 75 e 100 km<sup>2</sup> na ferramenta *Stream Definition* do IPH-Hydro Tools. Essa densidade da rede é importante porque influencia diretamente na quantidade de barramentos que são representados de maneira explícita (*on-grid*) e, conseqüentemente, em quantos açudes são representados em *sub-grid* dentro do modelo.

A segmentação da rede de drenagem foi feita a partir do exutório da bacia (quadrado laranja na Figura 13) em sentido contrário ao fluxo do rio, de forma semelhante ao descrito por Siqueira (2018). Contudo, neste trabalho foi inserido um critério adicional para a quebra da rede drenagem: a presença de açudes. Assim, os critérios utilizados para a definição da divisão da rede de drenagem foram:

- i. Em um trecho de rio contínuo, seu comprimento máximo foi limitado a 15 km, para evitar a existência de trechos extremamente longos e, conseqüentemente, de minibacias de área muito extensa. O cálculo desta distância foi feita de forma acumulada, pixel a pixel, de forma semelhante à adotada por Siqueira (2018). Na Figura 13, pode-se notar a existência de quebras na rede de drenagem (riscos pretos) a intervalos regulares de comprimento, decorrentes deste critério;

- ii. Confluências dos rios e seus afluentes (quadrados verdes na Figura 13), no qual o fluxo acumulado de escoamento foi utilizado para identificar qual direção deve ser seguida em casos de junções de dois trechos de rios (SIQUEIRA, 2018). Nessa situação, um maior valor de fluxo acumulado indica maior trecho de drenagem a montante, sendo, portanto, a direção a ser seguida (setas pretas na Figura 13). Ao chegar ao pixel de cabeceira no trecho de rio analisado, volta-se ao início da rede de drenagem e faz-se o mesmo processo para os afluentes do rio principal (setas verdes na Figura 13);
- iii. Existência de açudes sobre a rede de drenagem, de forma que, ao encontrar um novo barramento, um novo trecho de rede é definido (quadrados vermelhos na Figura 13). Nesse caso, foi feita também uma avaliação da área de drenagem gerada a cada divisão com o objetivo de evitar a existência de trechos muito curtos e, conseqüentemente, de minibacias de área muito pequena. Assim, para ser definido como açude *on-grid*, a área de drenagem formada pela sua possível minibacia deveria ser de pelo menos 4 km<sup>2</sup>, valor empírico testado e adotado dentro do modelo. No trecho 10 indicado na Figura 13, pode-se notar um caso de açude sobre a rede de drenagem principal não contabilizado como gerador de trecho de rede.

**Figura 13** – Na esquerda, esquema de segmentação da rede de drenagem da bacia, partindo do exutório (quadrado laranja) em sentido contrário ao fluxo de escoamento do rio. Os trechos de rede são demarcados pelos critérios de distância máxima (riscos pretos), confluências (quadrados verdes) e presença de barramentos (quadrados vermelhos). Na direita, esquema de minibacias geradas a partir da segmentação da rede de drenagem produzida.



Fonte: Autor

### 4.3.3 Processamento dos dados no IPH-Hydro Tools

Após a segmentação da rede de drenagem, foi realizada a definição das minibacias (Figura 13) através da ferramenta *Unit-catchments Delineation* do IPH-Hydro Tools e a geração dos dados e arquivos necessários para os passos seguintes fazendo-se uso das ferramentas já presentes no modelo, conforme descrito por Alves *et al.* (2020).

Para geração das relações geomorfológicas da bacia, dados de entrada em uma das ferramentas desta etapa, foram utilizados dados de resumo de descarga de estações fluviométricas disponibilizados pela ANA, conforme descrito por Alves *et al.* (2020). Assim, dados de largura e profundidade foram relacionados com a área de drenagem dos postos, resultando nas relações apresentadas nas Equações (5) e (6), que possuem  $R^2 = 0,5935$  e  $R^2 = 0,8175$ , respectivamente.

$$W = 0,6456 * A^{0,547} \quad (5)$$

$$D = 0,0007 * A^{0,8434} \quad (6)$$

Onde,  $W$  é a largura do rio (m),  $D$  é a sua profundidade (m) e  $A$  é a área de drenagem (km<sup>2</sup>).

### 4.3.4 Construção de CAVs para os açudes

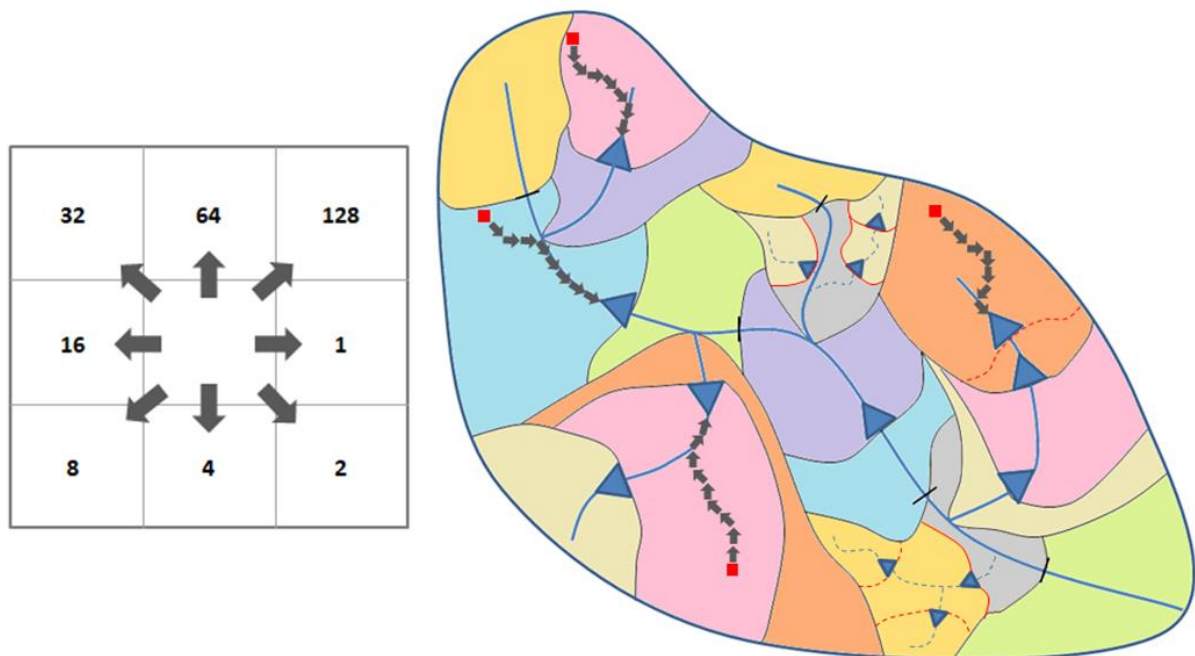
Para a construção das CAVs, primeiramente foi necessário se conhecer as áreas de contribuição de cada açude individualmente. Assim, utilizando-se os dados das direções de fluxo, das posições dos reservatórios sobre a rede de drenagem e das minibacias geradas, foram definidas as bacias de cada reservatório presente em cada minibacia. Esse procedimento foi feito de forma a determinar também qual a área que contribui efetivamente para a chegada de escoamento ao exutório em qualquer passo de tempo, sendo daqui em diante nomeada como Área Não Controlada por Açudes (ANCPA). Além disso, dados sobre a ocupação da minibacia pelos açudes também foram gerados, como a sua quantidade e densidade.

Essa ferramenta consiste na utilização das direções de fluxo para determinar o caminho que o escoamento gerado em cada célula deve seguir até atingir o próximo reservatório. Cada célula individualmente pode ter oito direções de fluxo

(Figura 14), que indicam para qual célula vizinha a vazão deve escoar. Assim, para cada célula, o caminho do escoamento será percorrido até que se atinja um açude, esteja ele presente ou não sobre a rede de drenagem principal.

Ao atingir esse ponto, a célula analisada é marcada com o código do açude, permitindo posteriormente o cálculo da área de geração de escoamento direta para cada reservatório. Em consequência da definição dessas áreas, obtém-se também a ANCPA, conforme esquema da Figura 14.

**Figura 14** – Na esquerda, representação esquemática das possíveis direções de fluxo e seus respectivos códigos a partir de uma célula. Na direita, esquema de minibacias em que estão representados reservatórios *on-grid* e em *sub-grid*, direções de fluxo a partir de pixels (quadrados vermelhos) dentro da área de contribuição de cada açude e ANCPA (em cinza) dentro de minibacias.



Fonte: Autor

Definidas as bacias de contribuição de cada açude, fez-se necessário conhecer as cotas de cada reservatório. Assim, os pixels marcados como açudes foram utilizados para identificar os seus respectivos valores de cota a partir do MDE utilizado.

Em seguida, a profundidade máxima das barragens foi adotada como um valor único para todas as estruturas da bacia, seguindo proposta semelhante ao adotado por Fleischmann *et al.* (2015). Foram testados quatro cenários de profundidade máxima, sendo eles de 3, 4, 5 e 6 m, adotados tendo em vista que se trata de açudes de pequena dimensão.



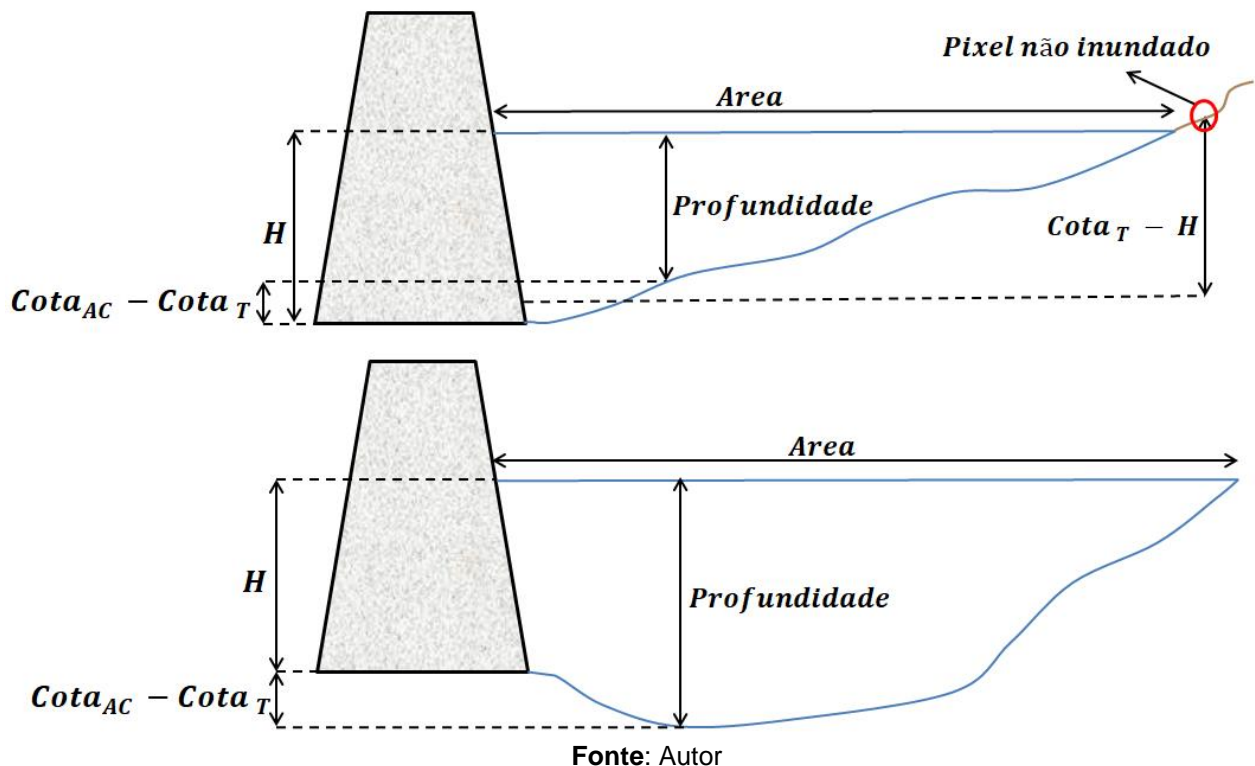
Para cada cenário destes, foram determinados os pixels alagados para profundidades incrementais de metro em metro até atingir o valor máximo avaliado em cada cenário, ou seja, para  $H = 3$  m, foram definidos os pixels inundados para as alturas de 1, 2 e 3 m de coluna d'água; e assim sucessivamente para todos os outros cenários.

Essa estimativa foi feita comparando-se as cotas do açude com aquelas dos pixels nas suas respectivas bacias de contribuição: caso a diferença entre a cota do terreno avaliada e a altura da coluna d'água fosse menor do que a cota do açude, o pixel era dito inundado; caso contrário, era dito não inundado, conforme indicado na Figura 15. Uma vez definido como parte da área do espelho d'água daquele reservatório, a profundidade em cada pixel foi calculada conforme a Equação (7).

$$Prof_{Pixel_i} = H + (Cota_{AC} - Cota_i) \quad (7)$$

Onde  $H$  é a profundidade máxima (m),  $Cota_{AC}$  é a cota da base do açude (m),  $Cota_i$  é a cota do terreno avaliada (m) e  $Prof_{Pixel_i}$  é a profundidade no pixel  $i$  (m).

**Figura 15** – Representação esquemática da determinação da área inundada por açude e da profundidade por pixel dada uma altura de coluna d'água  $H$  no reservatório.



Assim, a profundidade média do reservatório foi calculada conforme a Equação (8), seguindo proposta semelhante ao adotado por Habets *et al.* (2014) ao se definir um valor único de profundidade média por açude.

$$Prof_{media} = \frac{\sum_{i=1}^n Prof_{Pixel_i}}{n} \quad (8)$$

Onde  $Prof_{media}$  é a profundidade média do açude (m),  $Prof_{Pixel_i}$  é a profundidade no pixel  $i$  (m) e  $n$  é a quantidade de pixels inundados.

Por sua vez, a área do espelho d'água do açude a cada profundidade  $H$  corresponde ao somatório das áreas dos pixels inundados, identificados através da metodologia descrita anteriormente e conforme indicado na Figura 15. Por fim, o volume de cada açude a cada profundidade  $H$  foi calculado como o produto da área do espelho d'água pela profundidade média do açude. Assim, a curva Cota-Área-Volume foi construída para alturas incrementais de 1 m até se atingir a profundidade máxima avaliada em cada um dos cenários.

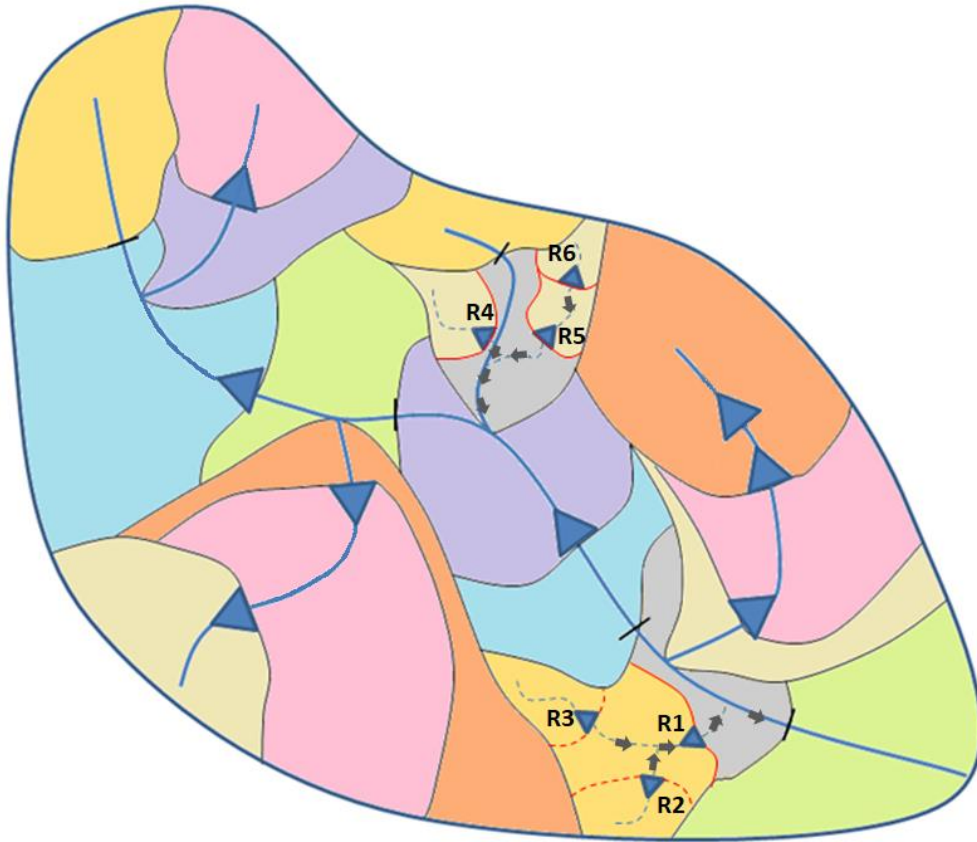
#### 4.3.5 Construção da tabela incremental de chuva efetiva que chega ao exutório

Para elaborar a tabela incremental do volume efetivamente liberado para jusante em cada minibacia, primeiro foi necessário estabelecer as relações montante-jusante entre os diversos açudes em *sub-grid* distribuídos em cada uma delas. Partindo-se de um reservatório específico, e conhecendo-se as direções de fluxo da minibacia (conforme indicado na Figura 14), percorreu-se toda extensão da minibacia até o atingir o seu exutório, identificando nesse caminho todos os açudes que estão à jusante do açude avaliado, marcando-o como de montante para todos os açudes identificados.

Na Figura 16, por exemplo, partindo-se do açude R3, segue-se o fluxo de escoamento até o exutório da minibacia, passando-se por R1. O mesmo acontece com R2. Logo, é identificado que R1 possui 2 açudes a montante, R2 e R3, enquanto estes últimos são de cabeceira, pois não possuem nenhum reservatório a montante deles. Da mesma forma, podem-se analisar as relações de montante-jusante entre os açudes R4, R5 e R6. Nesse caso, tem-se que R4 e R6 são de cabeceira e R5 possui o barramento R6 a montante.



**Figura 16** – Representação esquemática de minibacias em que estão indicados reservatórios em *sub-grid* (R1 a R6) e suas respectivas direções de fluxo até o exutório.



Fonte: Autor

Esse tipo de análise garante a representação fiel da rede de drenagem e todos os tipos de configurações de açudes possíveis, uma vez que um único açude pode receber contribuição de vários (como R1, por exemplo), como também pode haver caso em que um reservatório não interaja com nenhum outro na minibacia (como R4, por exemplo).

Em seguida, foram avaliados valores de chuva efetiva variando de 0 a 2000 mm, com intervalos de 10 mm, em cada minibacia para verificar o seu comportamento a estes eventos em razão da quantidade e disposição dos açudes em *sub-grid*. Ou seja, nesta etapa buscou-se estimar qual a vazão que chega ao exutório de cada minibacia a cada evento de chuva efetiva incremental de 10 mm até um total de 2000 mm, sabendo-se a distribuição espacial dos reservatórios em *sub-grid* e as CAVs de cada açude.

No esquema apresentado na Figura 16, por exemplo, nota-se que as áreas em cinza nas minibacias com açudes em *sub-grid* geram escoamento diretamente para o seu exutório, tendo em vista que não há nenhum barramento em seu

caminho para reter a vazão. Por sua vez, a área da bacia incremental de R2, R3, R4 e R6 vão contribuir para o aumento do volume em seus respectivos barramentos; e apenas quando eles atingirem a sua capacidade máxima, é que essas áreas passam a contribuir para jusante. Já R1 e R5 recebem inicialmente apenas a contribuição de suas áreas de bacia incrementais e, à medida que os reservatórios a montante enchem, passam a receber a contribuição de áreas adicionais. De forma semelhante, à medida que atingem seu volume máximo, suas áreas passam a contribuir com a vazão que chega efetivamente ao exutório da minibacia.

Assim, tem-se uma estimativa do comportamento hidrológico das minibacias e seus respectivos açudes para um dado evento de chuva efetiva, podendo-se estimar tanto o total que fica retido de forma conjunta nas estruturas existentes na minibacia, como o total que chega ao exutório a cada evento incremental.

#### **4.3.6 Módulo de balanço hídrico no reservatório**

Os reservatórios no modelo MGB foram representados e tratados de três formas distintas, dependendo da sua dimensão e posição na rede de drenagem dentro da bacia:

- i. Grandes reservatórios, de alta importância estratégica (indicados em vermelho na Figura 9), foram representados de forma explícita no modelo, tendo suas CAVs e dados de operação obtidos através de bancos de dados, constituindo o grupo de reservatórios monitorados e *on-grid*;
- ii. Pequenos e médios açudes localizados na rede principal de drenagem foram representados também de forma explícita no modelo, tendo suas CAVs determinadas pela metodologia descrita na Seção 4.3.4 e dados de operação estimados. Esse grupo de reservatórios constitui aqueles não monitorados e *on-grid*;
- iii. Pequenos e médios açudes localizados fora da rede principal de drenagem foram representados de forma semelhante a um reservatório equivalente, cuja contribuição para a vazão que atinge o exutório da minibacia é determinada pelas tabelas incrementais descritas na Seção 4.3.5. Esse grupo de reservatórios constitui aqueles não monitorados e em *sub-grid*.

O balanço hídrico nos reservatórios monitorados e *on-grid* foi realizado com base na Equação (4). Nesta abordagem, os fluxos que contribuem para o aumento do volume do reservatório são a vazão de entrada, o influxo de água subterrânea e a precipitação direta sobre o reservatório. Em contrapartida, os fluxos que causam diminuição do volume são as vazões liberadas a jusante e para atender as demandas e as perdas por evaporação direta a partir do espelho d'água e por percolação para o leito do reservatório (ver Seção 3.3.2).

#### 4.3.6.1 Reservatórios não monitorados e *on-grid*

O módulo de açudes não monitorados e *on-grid* foi inserido entre o terceiro e quarto módulos do modelo MGB-IPH (Figura 11), recebendo, portanto, como dado de entrada a vazão escoada por toda a minibacia no passo de tempo, ou seja, aquela que atinge o exutório. Essa vazão é utilizada então para determinar o volume total afluente ao reservatório no passo de tempo do modelo, que é de um dia (Equação (9)).

$$V_{ESC} = Q_{afluente} * DT \quad (9)$$

Onde  $V_{ESC}$  é o volume escoado na minibacia em um passo de tempo ( $m^3$ ),  $Q_{afluente}$  é a vazão afluente ao exutório da minibacia ( $m^3/s$ ) e  $DT$  é uma constante que se refere ao passo de tempo (86400 s).

No que se refere à contribuição pela precipitação direta sobre o reservatório, este volume foi calculado a partir da precipitação diária sobre a minibacia (dado de entrada do MGB-IPH) e da área do espelho d'água do açude, conforme a Equação (10). Quanto ao volume perdido por evaporação direta, é adotada uma metodologia semelhante ao descrito anteriormente, considerando-se desta vez a taxa de evaporação potencial em espelho d'água por minibacia (Equação (11)), calculada na rotina de evapotranspiração dentro do modelo MGB-IPH. O volume inicial de cada reservatório foi adotado como sendo metade da sua capacidade máxima, sendo feita uma interpolação a partir de suas respectivas CAVs para determinar a área de espelho d'água inicial. Nos passos de tempo seguintes, a área de espelho d'água inicial foi definida como sendo igual à área final do passo de tempo anterior.

$$V_{PREC} = P_{IC,IT} * AI_{IAC,IT} * 1000 \quad (10)$$

$$V_{EVAP} = EP_{IC,IT} * AI_{IAC,IT} * 1000 \quad (11)$$

Onde  $V_{PREC}$  é o volume decorrente da precipitação direta sobre a área do espelho d'água ( $m^3$ ),  $V_{EVAP}$  é o volume perdido por evaporação direta a partir do espelho d'água ( $m^3$ ),  $P_{IC,IT}$  é a precipitação que ocorre na minibacia IC no passo de tempo IT (mm),  $EP_{IC,IT}$  é a evaporação potencial em espelho d'água na minibacia IC no passo de tempo IT (mm),  $AI_{IAC,IT}$  é a área do espelho d'água no início do passo de tempo para o açude IAC no passo de tempo IT ( $km^2$ ) e o valor 1000 é um fator de correção de unidades.

No que se refere às perdas por infiltração, Molle (1989) estima que, em média, esse processo seja responsável por 23% do rebaixamento do nível d'água em pequenos açudes, correspondendo a 34% dos valores de perda por evaporação. Assim, esta relação foi utilizada para o cálculo do volume percolado (Equação (12)).

$$V_{PERC} = V_{EVAP} * 0,34 \quad (12)$$

Onde  $V_{PERC}$  é o volume perdido por percolação ( $m^3$ ) e  $V_{EVAP}$  é o volume perdido por evaporação direta a partir do espelho d'água ( $m^3$ ).

Por sua vez, as estimativas de demandas nesses reservatórios foram calculadas com base nas demandas e volumes dos reservatórios monitorados, para os quais se têm dados (ver Seção 4.3.6.2). Assim, estimaram-se quantos dias cada açude seria capaz de atender suas demandas estando com sua capacidade máxima, adotando-se a menor quantidade de dias como o coeficiente de tempo de atendimento a demandas por reservatórios nesta bacia. Dessa forma, o volume de demandas foi calculado conforme a Equação (13).

$$V_{DEM} = \frac{V_{max_{IAC}}}{c_{f_{atend}}} \quad (13)$$

Onde  $V_{DEM}$  é o volume para atendimento de demandas em um dia ( $m^3$ ) e  $V_{maxIAC}$  é o volume máximo do açude IAC ( $m^3$ ) e  $cf_{atend}$  é o coeficiente de atendimento a demandas estimado (222,23 dias).

Segundo dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2016), os açudes podem ser classificados quanto ao seu nível de criticidade no armazenamento de água em cinco faixas, tendo como base os seus percentuais volumétricos. Em faixa de situação muito confortável, estão aqueles reservatórios com volume entre 80% e 100% do seu total; em situação confortável, aqueles com volume entre 50% e 80%; em situação de alerta, aqueles com volume entre 30% e 50%; em situação crítica, aqueles com volume entre 10% e 30%; e em situação muito crítica, os açudes com volume entre 0% e 10%.

Tendo isso em vista, adotaram-se as três faixas mais críticas como critério para controle dos volumes de demanda nesses açudes. Dessa forma, para açudes em situação muito crítica foi adotado um volume de demanda nulo no dia em questão; em situação crítica, um volume de demanda igual a um quinto da demanda total; e em situação de alerta, um volume de demanda igual à metade da demanda total. No restante das situações, mantem-se a demanda usual.

Diante desses valores, o volume do reservatório no final de cada passo de tempo foi calculado conforme a Equação (14).

$$V_{fIAC,IT} = V_{iIAC,IT} + V_{ESC} + V_{PREC} - V_{EVAP} - V_{PERC} - V_{DEM} \quad (14)$$

Onde  $V_{fIAC,IT}$  e  $V_{iIAC,IT}$  são os volume final e inicial do reservatório para o açude IAC no passo de tempo IT ( $m^3$ ),  $V_{ESC}$  é o volume escoado na minibacia ( $m^3$ ),  $V_{PREC}$  é o volume decorrente da precipitação direta sobre o reservatório ( $m^3$ ),  $V_{EVAP}$  é o volume perdido por evaporação direta a partir do espelho d'água ( $m^3$ ),  $V_{PERC}$  é o volume perdido por percolação ( $m^3$ ) e  $V_{DEM}$  é o volume para atendimento de demandas em um dia ( $m^3$ ).

Caso o volume a ser armazenado no reservatório seja maior que sua capacidade máxima, o seu volume final é definido como o volume máximo do reservatório e o volume excedente é liberado para jusante, sendo essa a única regra para liberação de volume dessa classe de reservatório. Essa consideração é feita no

sentido de reproduzir o comportamento que se observa para pequenos e médios açudes na região, que, em sua grande maioria, não apresentam estrutura de liberação de vazão além do vertedor (MOLLE; CADIER, 1992).

Por fim, o volume final do reservatório é utilizado para calcular a área do espelho d'água ao final do passo de tempo, por meio de interpolação linear com as CAVs elaboradas anteriormente.

#### 4.3.6.2 Reservatórios monitorados e *on-grid*

O módulo de reservatórios monitorados e *on-grid* conta com 16 açudes, que foram inseridos explicitamente dentro do modelo MGB-IPH no exutório das minibacias em que estão localizados. Dessa forma, o seu balanço hídrico é feito de maneira muito semelhante ao balanço hídrico dos reservatórios não monitorados e *on-grid*, descrito na seção anterior.

Assim, os termos referentes ao volume afluente, ao volume decorrente da precipitação direta sobre o reservatório e ao volume evaporado a partir do espelho d'água são calculados da mesma forma, conforme as Equações (9), (10) e (11), respectivamente. As suposições sobre o volume e a área do espelho d'água inicial adotadas para o grupo de açudes anterior também são adotadas para este conjunto de reservatórios.

A primeira diferença entre as abordagens adotadas refere às perdas por infiltração. Para os açudes não monitorados e *on-grid*, foi adotada uma relação entre o volume percolado e os valores de perda por evaporação, proposta por Molle (1989). Contudo, tendo em vista que à medida que o tamanho do reservatório aumenta, a importância relativa desse tipo de perda diminui (GÜNTNER, 2002) e a inexistência de dados para grandes reservatórios, não foram consideradas perdas por infiltração para os açudes monitorados. Tal abordagem é semelhante àquela adotada por Güntner (2002) na construção do modelo WASA.

Outra diferença entre as abordagens adotadas para estes dois grupos de reservatórios refere-se ao volume utilizado para abastecer demandas. Para os açudes monitorados, as vazões de demanda são conhecidas (Tabela 1), logo o volume necessário para o passo de tempo de um dia pode ser calculado diretamente. No mais, as regras de operação com base nos níveis de criticidade do

armazenamento de água são as mesmas aplicadas para os açudes não monitorados.

Para este conjunto de reservatórios é acrescentado ainda um volume de regularização no balanço hídrico, decorrente da necessidade de liberação das águas armazenadas para jusante para manutenção do escoamento em trechos de rios em determinados períodos. Os valores destas vazões estão apresentados na Tabela 1 e os seus respectivos volumes foram calculados para o passo de tempo diário. Também neste caso foram adotadas as mesmas regras de operação com base nos níveis de criticidade do armazenamento.

**Tabela 1** – Reservatórios monitorados da sub-bacia do Banabuiú e seus respectivos volumes máximos, vazões regularizadas e vazões de demanda.

Açude	Volume máximo (hm <sup>3</sup> )	Q <sub>REG</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>DEM</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Banabuiú	1601,00	12,93	8,566
Cedro	125,69	0,5	0,074
Cipoada	86,09	0,8	0,064
Fogareiro	118,82	1,2	0,883
Monsenhor Tabosa	12,10	0,1	0,058
Patu	71,83	0,84	0,069
Pedras Brancas	434,05	3,2	0,727
Pirabibu	74,00	3,8	0,054
Poço do Barro	54,70	0,6	0,047
Quixeramobim	54,00	1,7	0,125
São José I	7,67	0,05	0,029
São José II	29,14	0,2	0,044
Serafim Dias	43,00	0,5	0,192
Trapiá II	18,19	0,4	0,107
Umari	35,04	0,39	0,108
Vieirão	20,96	0,27	0,093

**Fonte:** Autor. Baseado em dados da ANA (2017a, 2017b) e SRH/CE (2017).

Com isso, o volume em cada reservatório monitorado no final de cada passo de tempo foi calculado conforme a Equação (15).

$$V_{fIAC,IT} = V_{iIAC,IT} + V_{ESC} + V_{PREC} - V_{EVAP} - V_{REG} \quad (15)$$

Onde  $V_{fIAC,IT}$  e  $V_{iIAC,IT}$  são os volumes final e inicial do reservatório para o açude IAC no passo de tempo IT (m<sup>3</sup>),  $V_{ESC}$  é o volume escoado na minibacia (m<sup>3</sup>),

$V_{PREC}$  é o volume decorrente da precipitação direta sobre o reservatório ( $m^3$ ),  $V_{EVAP}$  é o volume perdido por evaporação direta a partir do espelho d'água ( $m^3$ ) e  $V_{REG}$  é o volume de regularização liberado para jusante a cada passo de tempo ( $m^3$ ).

Caso o volume final seja maior que capacidade máxima do reservatório, este volume é definido como o máximo e o volume excedente é liberado para jusante, somando-se ao volume regularizado. O volume para atendimento de demandas foi então subtraído dessa soma, tendo em vista que as vazões de demandas estão inseridas dentro das vazões regularizadas (CEARÁ, 2009).

Por fim, o volume final do reservatório foi utilizado para calcular a área do espelho d'água final, por meio de interpolação linear com as CAVs dos açudes, obtidas através do Portal Hidrológico do Ceará (COGERH; FUNCEME, 2022).

#### 4.3.6.3 Reservatórios não monitorados e em *sub-grid*

O módulo de açudes não monitorados e em *sub-grid* foi adicionado dentro do módulo de escoamento na minibacia (Figura 11), tendo em vista que parte do escoamento gerado fica retido nos reservatórios distribuídos ao longo da rede secundária. Assim, este é o primeiro módulo referente a reservatórios antrópicos que é processado dentro do MGB-IPH.

Conhecendo-se o volume  $V_i$  armazenado na minibacia no início do passo de tempo, é feita uma interpolação linear com os dados das tabelas incrementais (ver Seção 4.3.5), com o objetivo de se obter as condições iniciais de área do espelho d'água ( $AED_i$ ), a chuva efetiva equivalente ao volume já armazenado ( $R_i$ ) e a chuva efetiva que seria liberada caso ocorresse essa chuva efetiva ( $RLIB_i$ ). O valor de  $V_i$  é determinado de forma semelhante ao utilizado nos outros grupos de açudes.

Em seguida, soma-se a chuva efetiva  $R$  ocorrida no passo de tempo (calculada dentro do modelo MGB-IPH) com o  $R_i$ , obtendo-se um valor de chuva efetiva teórica equivalente ( $R_{equiv}$ ). Esse valor é então utilizado em uma nova interpolação linear para se obter o volume armazenado na minibacia no passo de tempo intermediário ( $V_{interm}$ ), a área do espelho d'água no final do passo de tempo ( $AED_f$ ) e a porção da chuva efetiva que teoricamente atingiria o exutório caso todo o



valor da soma tivesse ocorrido ( $RLIB_{equiv}$ ). Assim, para determinar o total que efetivamente atinge o exutório ( $RLIB_f$ ), subtrai-se  $RLIB_i$  do  $RLIB_{equiv}$ .

Na Figura 17, tem-se um exemplo de um trecho de tabela incremental para uma determinada minibacia. Assim, caso haja inicialmente um volume  $V_i$  de 423.538,50 m<sup>3</sup> armazenado na minibacia, isso corresponderia a  $R_i$  de 10 mm,  $RLIB_i$  de 6,23 mm e  $AED_i$  de 0,24508 km<sup>2</sup>. Supondo uma chuva efetiva de 10 mm nesta minibacia, temos um  $R_{equiv}$  igual a 20 mm. Realizando-se novamente a interpolação com este valor como dado de entrada, tem-se que o volume final  $V_{interm}$  será 847.077 m<sup>3</sup>, a área  $AED_f$  será 0,44015 km<sup>2</sup> e  $RLIB_{equiv}$  corresponde a 12,46 mm. Por fim, subtraindo-se  $RLIB_i$  do  $RLIB_{equiv}$ , temos que  $RLIB_f$  é 6,23 mm.

**Figura 17** – Trecho de arquivo das tabelas incrementais para açudes em *sub-grid* com as relações entre a chuva efetiva ocorrida (R), a que chega ao exutório ( $R_{saida}$ ), o volume armazenado ( $Varm$ ) e área do espelho d'água ( $Aed$ ) correspondente.

R (mm)	$R_{saida}$ (mm)	Aed (km <sup>2</sup> )	Varm (m <sup>3</sup> )
0.0	0.00	0.00000	0.00
10.0	6.23	0.24508	423538.50
20.0	12.46	0.44015	847077.00
30.0	18.69	0.62057	1270615.50
40.0	24.93	0.82638	1694154.00
50.0	31.16	1.02884	2117692.50
60.0	37.39	1.19537	2541231.00
70.0	43.62	1.35733	2964769.50
80.0	49.85	1.51821	3388308.00
90.0	56.08	1.66337	3811846.50
100.0	62.31	1.79733	4235385.00
110.0	68.54	1.92333	4658923.50
120.0	74.78	2.03307	5082462.00
130.0	81.01	2.14282	5506000.50
140.0	87.24	2.24813	5929539.00
150.0	93.47	2.34608	6353077.50
160.0	99.99	2.43137	6744032.00
170.0	106.53	2.51459	7132854.00
180.0	113.07	2.59461	7521676.00
190.0	119.61	2.67436	7910498.00
200.0	126.64	2.74822	8244472.00

Fonte: Autor

A evaporação a partir da área do espelho d'água inicial foi contabilizada de forma semelhante aos outros grupos de açudes, sendo utilizada a Equação (11) para o cálculo do volume evaporado. Também de forma semelhante, o volume de demandas foi calculado assumindo-se as mesmas suposições adotadas para os açudes não monitorados e *on-grid*, sendo utilizada a Equação (13) para este fim.

Além disso, foram aplicadas as mesmas regras de operação com base no nível de criticidade no armazenamento de água do reservatório.

Assim, o volume  $V_f$  armazenado na minibacia ao final do passo de tempo será dado pela subtração do volume evaporado e aquele utilizado para atender demandas do volume intermediário  $V_{interm}$ , resultante da segunda interpolação da tabela incremental (Equação (16)).

$$V_{f_{IC,IT}} = V_{interm_{IC,IT}} - V_{EVAP} - V_{DEM} \quad (16)$$

Onde  $V_{f_{IC,IT}}$  é o volume armazenado final para a minibacia IC devido à presença de açudes em *sub-grid* no passo de tempo IT ( $m^3$ ),  $V_{interm_{IC,IT}}$  é o volume armazenado no passo de tempo intermediário na minibacia IC no passo de tempo IT ( $m^3$ ),  $V_{EVAP}$  é o volume perdido por evaporação direta a partir do espelho d'água ( $m^3$ ) e  $V_{DEM}$  é o volume para atendimento de demandas a cada passo de tempo ( $m^3$ ).

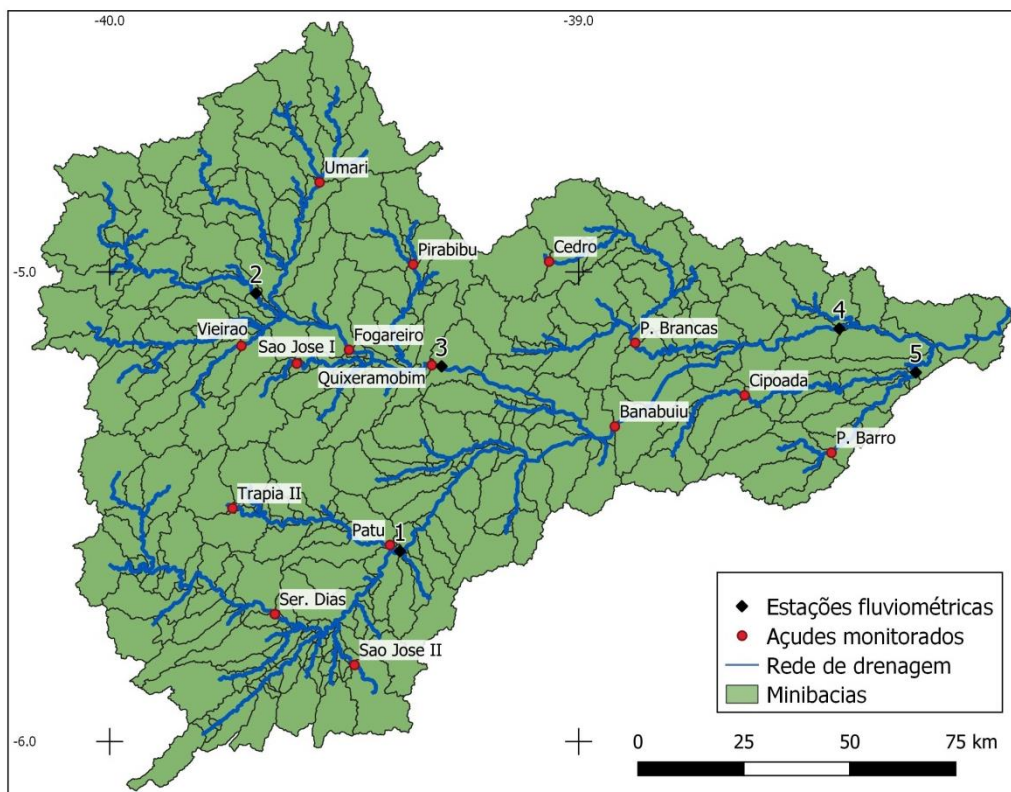
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta. Inicialmente são apresentados os resultados da modelagem da sub-bacia do Banabuiú sem a presença dos reservatórios, servindo como um controle para comparação com os demais cenários. Em seguida, os resultados dos demais cenários avaliados são apresentados, bem como a sua pertinente discussão.

### 5.1 MODELAGEM DA SUB-BACIA DO BANABUIÚ SEM PRESENÇA DE AÇUDES

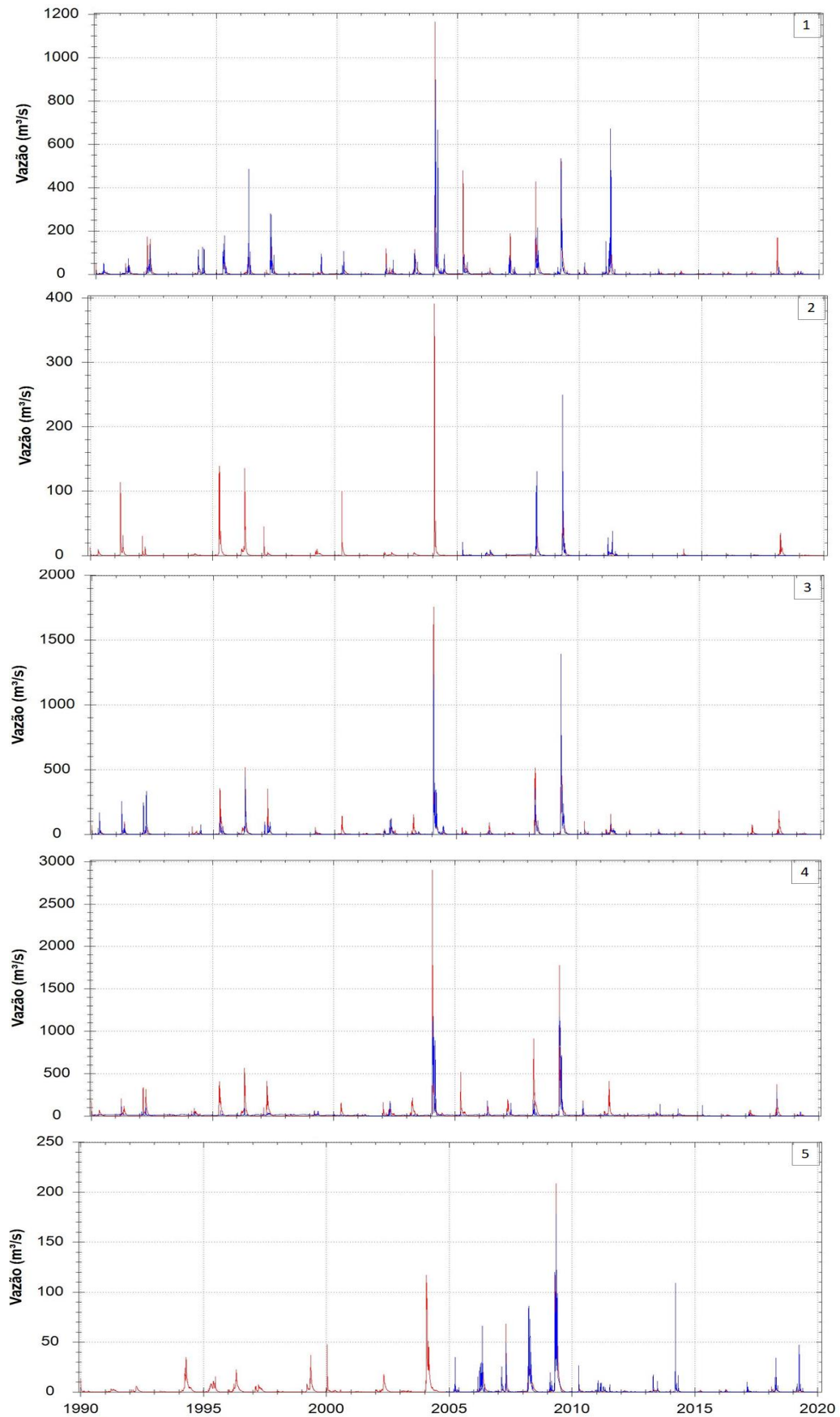
Para o cenário A, a sub-bacia do Banabuiú foi subdividida em 243 minibacias a partir da rede de drenagem e o modelo MGB-IPH foi calibrado com base em dados de vazão observada provenientes das estações fluviométricas indicadas na Figura 18. Os hidrogramas resultantes dessa análise estão apresentados na Figura 19 e as métricas de desempenho estão descritas na Tabela 2.

**Figura 18** – Divisão da sub-bacia do Banabuiú em minibacias, localização das estações fluviométricas utilizadas para calibração do modelo e dos açudes monitorados.



Fonte: Autor

**Figura 19** – Vazões observadas (azul) e simuladas no cenário A (vermelho) para estações fluviométricas presentes na sub-bacia do Banabuiú. A referência a cada estação é feita na Tabela 2.



Fonte: Autor

**Tabela 2** – Métricas de desempenho das vazões simuladas com o modelo MGB. A localização das estações fluviométricas dentro da bacia está indicada na Figura 18. NS: Coeficiente de Nash-Sutcliffe; NS-Log: Coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; EV: Erro de volume.

ID	Estação fluviométrica	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	NS	NS-Log	EV (%)
1	Senador Pompeu	4.530	0,379	-0,112	31,368
2	Juazeiro	1.170	0,818	-0,954	18,602
3	Quixeramobim	7.050	0,587	-1,201	51,792
4	Morada Nova II	17.300	-0,372	-3.662	30.475
5	Melões	1.360	0,664	0,161	-21,484

Fonte: Autor

A partir destes resultados, observa-se que o modelo apresentou um desempenho misto, tendo em vista a variedade de respostas obtidas entre as estações. Enquanto algumas apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, outras tiveram desempenho mediano ou não aceitável.

Para as estações de Juazeiro e Melões, o modelo apresentou os melhores resultados de NS, indicando uma boa representação das vazões que passam por esses pontos. No entanto, estas estações são as que possuem menor área de contribuição (Tabela 2) e maior quantidade de falhas nos dados de vazão observada (Figura 19), limitando a sua validade como representativos da qualidade da modelagem na região. Por sua vez, as estações de Quixeramobim e Senador Pompeu possuem valores de NS entre 0,3 e 0,6, indicando um desempenho mediano do modelo para estes pontos.

Por fim, a estação de Morada Nova II apresentou um NS negativo, indicando que a vazão média que passa por este ponto seria uma melhor estimativa do que os valores gerados pelo modelo. A bacia de drenagem dessa estação corresponde a aproximadamente 87% da área total em estudo, indicando uma tendência de piora nos resultados de NS com o aumento da área de drenagem e, conseqüentemente, com o aumento da influência dos reservatórios.

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva e Medeiros (2018) em um estudo realizado na bacia do Piranhas-Açu, localizado na região semiárida do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Estes autores discutem seus resultados comparando-os a outros trabalhos realizados em sub-bacias da sua área de estudo e sugerem que a presença de reservatórios de grande e médio porte influencia negativamente na capacidade do modelo de representar a vazão nesses pontos.

No que se refere aos valores de NS-Log, observa-se que foram, em sua maior parte, negativos, indicando uma dificuldade desta função objetivo de avaliar de forma adequada as baixas vazões que ocorrem na bacia. Resultado semelhante foi encontrado por Felix e da Paz (2016), em um estudo da bacia do rio Piancó, na Paraíba, indicando que este comportamento do NS-Log é sistemático para regiões semiáridas.

## 5.2 MODELAGEM DA SUB-BACIA DO BANABUIÚ CONSIDERANDO A PRESENÇA DE AÇUDES

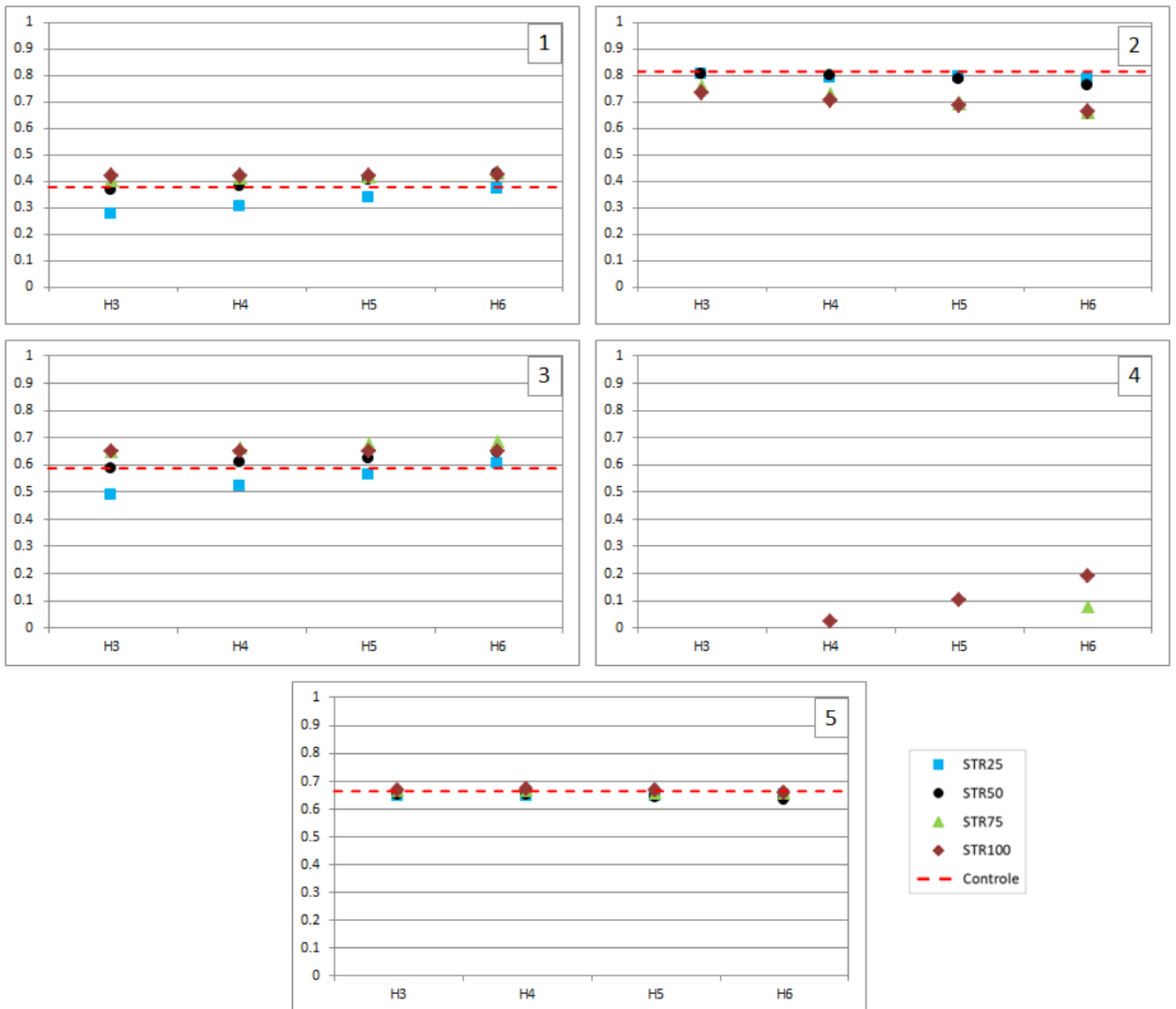
A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da modificação do modelo MGB-IPH para incorporação dos módulos de reservatórios, considerando-se todos os cenários investigados para verificação da metodologia proposta.

### 5.2.1 Avaliação da influência da densidade de drenagem e altura do açude

A densidade de drenagem foi um fator que influenciou diretamente na quantidade de reservatórios que foram simulados de forma explícita, *on-grid*, e na que foram representados através dos reservatórios equivalentes (avaliados pelas tabelas incrementais), em *sub-grid*. Dentre os 12.871 açudes considerados na modelagem, 423 foram identificados como *on-grid* no cenário STR25, enquanto que nos cenários STR50, STR75 e STR100, foram 266, 209 e 177 reservatórios, respectivamente. Por consequência, a diferença dessas quantidades para o total de açudes avaliados, representa a quantidade de reservatórios em *sub-grid*.

Por sua vez, a profundidade máxima foi uma variável que influenciou no volume total armazenado pelos pequenos e médios açudes presentes na bacia. À medida que se aumentou esta altura da coluna d'água, um maior volume era armazenado, gerando também um maior espelho d'água na região e uma maior profundidade média do reservatório. Nesse contexto, a Figura 20 apresenta os resultados obtidos para os 16 diferentes conjuntos de variáveis avaliados dentro do cenário B, indicando como as vazões simuladas se comportaram para cada estação fluviométrica após a inserção dos módulos de reservatórios.

**Figura 20** – Comparação dos coeficientes de Nash-Sutcliffe entre as combinações dos diferentes cenários de densidade de drenagem e profundidade máxima. Cada gráfico representa um posto fluviométrico encontrado na bacia (Tabela 2), em que o eixo vertical apresenta os valores de NS e o horizontal, os cenários de altura da parede do açude: H3, H4, H5 e H6. As densidades de drenagem estão indicadas na legenda: STR25, STR50, STR75 e STR100; assim como o cenário de controle, indicado pela linha tracejada vermelha.



Fonte: Autor

Para as estações de Juazeiro e Melões, o modelo já apresentava uma boa capacidade de simular as vazões naqueles trechos de rio. Com a inserção dos módulos de reservatórios, o MGB-IPH passou a apresentar um desempenho ligeiramente inferior ao observado anteriormente para a estação de Juazeiro, uma vez que os valores de NS ficaram abaixo do valor do modelo não modificado. Contudo, o resultado ainda é considerado satisfatório para todos os cenários.

Na estação de Melões, todos os cenários apresentaram coeficientes em torno de 0,65, valor muito próximo do NS original; enquanto que na estação de Juazeiro, ocorreu uma variação mais acentuada deste valor, chegando ao mínimo de 0,652 no cenário B100\_6. Em geral, para esta última estação, os cenários de maior densidade de drenagem (STR25 e STR50) apresentaram os melhores valores de NS, sendo que a altura da parede do reservatório não teve tanto influencia sobre os resultados obtidos.

Por sua vez, nas estações de Senador Pompeu e Quixeramobim observa-se um comportamento misto entre os diferentes cenários avaliados. Naqueles de menor densidade de drenagem (STR75 e STR100), os valores de NS foram ligeiramente superiores do que o modelo não modificado, enquanto que nos cenários de maior densidade, houve o comportamento oposto. Nestas estações também não houve uma diferença muito significativa entre os cenários de diferentes profundidades, embora as maiores alturas de coluna d'água apresentem resultados levemente melhores.

Por fim, na estação de Morada Nova II, há uma melhora considerável na métrica de desempenho do modelo devido à inserção do módulo de reservatórios. Na sua versão original (cenário A), o modelo apresentou valores de NS negativos para esta estação, indicando uma baixa capacidade de representar as vazões que passam por este ponto. Contudo, com as modificações propostas, o modelo passou a apresentar valor positivo de NS para os cenários de drenagem menos densa e com maior profundidade, sendo o B100\_6 o melhor cenário obtido, com NS de 0,192, representando uma diferença de mais de 0,5 em relação ao valor do modelo não modificado. Apesar disso, esse valor ainda não é considerado totalmente satisfatório para esta métrica, tendo ainda espaço de melhora na representação do sistema hidrológico que ocorre de fato na bacia.

Dessa forma, nota-se que há uma tendência a melhores resultados ao se utilizar uma rede menos densa, com mais açudes em *sub-grid*. Uma hipótese que pode explicar este comportamento é o fato de que a tabela incremental que regula o funcionamento dos reservatórios em *sub-grid* permite uma representação do acúmulo de volume no sistema de reservatórios da minibacia sem precisamente indicar quanto está armazenado em cada açude individualmente, reduzindo incertezas associadas à abordagem adotada.



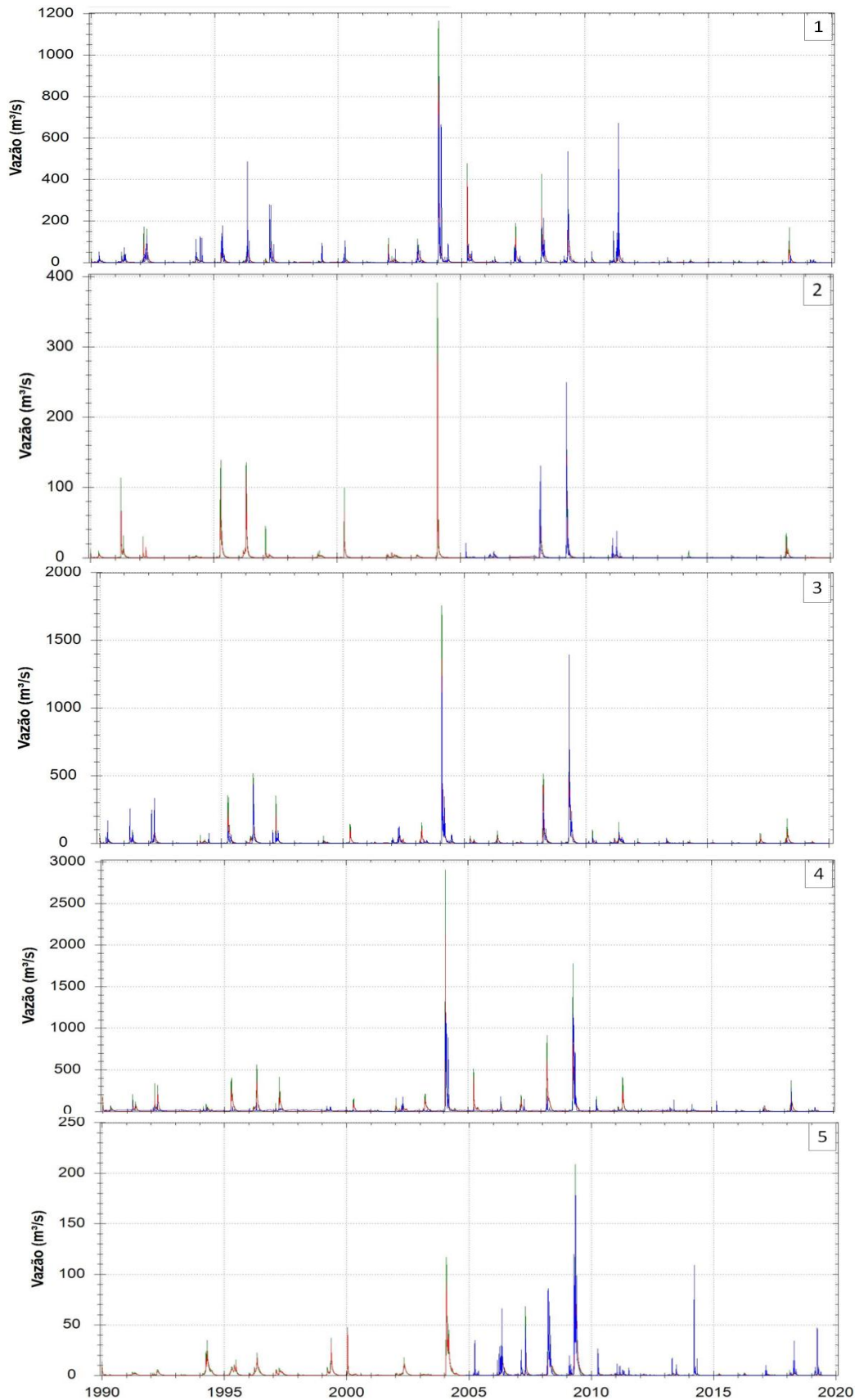
Em relação à profundidade máxima do reservatório, a observação de uma tendência específica é menos expressiva, apesar dos resultados levemente melhores com maiores colunas d'água. Apenas para a estação de Morada Nova II que este parâmetro teve uma influência realmente significativa no resultado, sendo claro que maiores profundidades resultam numa melhor representação do conjunto de açudes observados naquele ponto.

Assim, como nas outras estações não houve mudança significativa (positiva ou negativa), pode-se inferir que os cenários com alturas mais elevadas foram melhores para representar todo o conjunto de minibacias da sub-bacia do Banabuiú. Esse comportamento é condizente com o observado por Molle (1994b), que, ao estudar 420 açudes da região nordeste brasileira, identificou uma profundidade média de 5,21 m. Nesse contexto, o cenário B100\_6 foi escolhido para a realização das análises seguintes.

Na Figura 21, pode-se observar que as vazões simuladas com o modelo modificado apresentam valores máximos, nos picos dos hidrogramas, mais próximos das vazões máximas observadas, o que representa um ganho na simulação dessas regiões. Esse comportamento é especialmente relevante na estação Morada Nova II, indicando o porquê do coeficiente de NS ter apresentado uma melhora considerável neste posto.

Resultado semelhante foi obtido por Van Langen *et al.* (2021a), ao investigarem o efeito da inclusão de reservatórios na performance de modelos hidrológicos em bacias brasileiras. Os autores indicam uma melhora média do coeficiente de Kling Gupta (KGE) variando de 0,21 a 0,40, sendo que a maior melhora ocorreu nas bacias com maiores capacidades de reservatórios, similar ao observado neste estudo.

**Figura 21** – Vazões observadas (em azul), simuladas com a versão original do modelo (em verde) e simuladas com o modelo modificado para inserção dos módulos de reservatórios no cenário B100\_6 (em vermelho). A referência a cada estação é feita na Tabela 2.



Fonte: Autor

### 5.2.2 Avaliação do açude equivalente em *sub-grid*

Para avaliação da representação dos açudes em *sub-grid* dentro do modelo foi feita uma comparação entre duas versões da metodologia: a proposta metodológica original (cenário B); e uma versão alternativa, em que todos os açudes em *sub-grid* seriam representados como um reservatório equivalente no exutório de cada respectiva minibacia (cenário C). Essa versão alternativa tem a vantagem de ser mais simples. Neste sentido, a comparação permitiria avaliar se o aumento da complexidade do modelo foi compensado pela melhora no desempenho.

A Tabela 3 e a Figura 22 apresentam, respectivamente, uma comparação entre os resultados dos coeficientes e dos hidrogramas nas estações fluviométricas entre essas duas versões do modelo. Nota-se que, em termos do coeficiente de NS apenas, a versão do modelo que trabalha com o cenário C apresenta melhores resultados, sendo possível supor que uma versão simplificada do modelo poderia gerar um resultado melhor, sem tanto custo computacional.

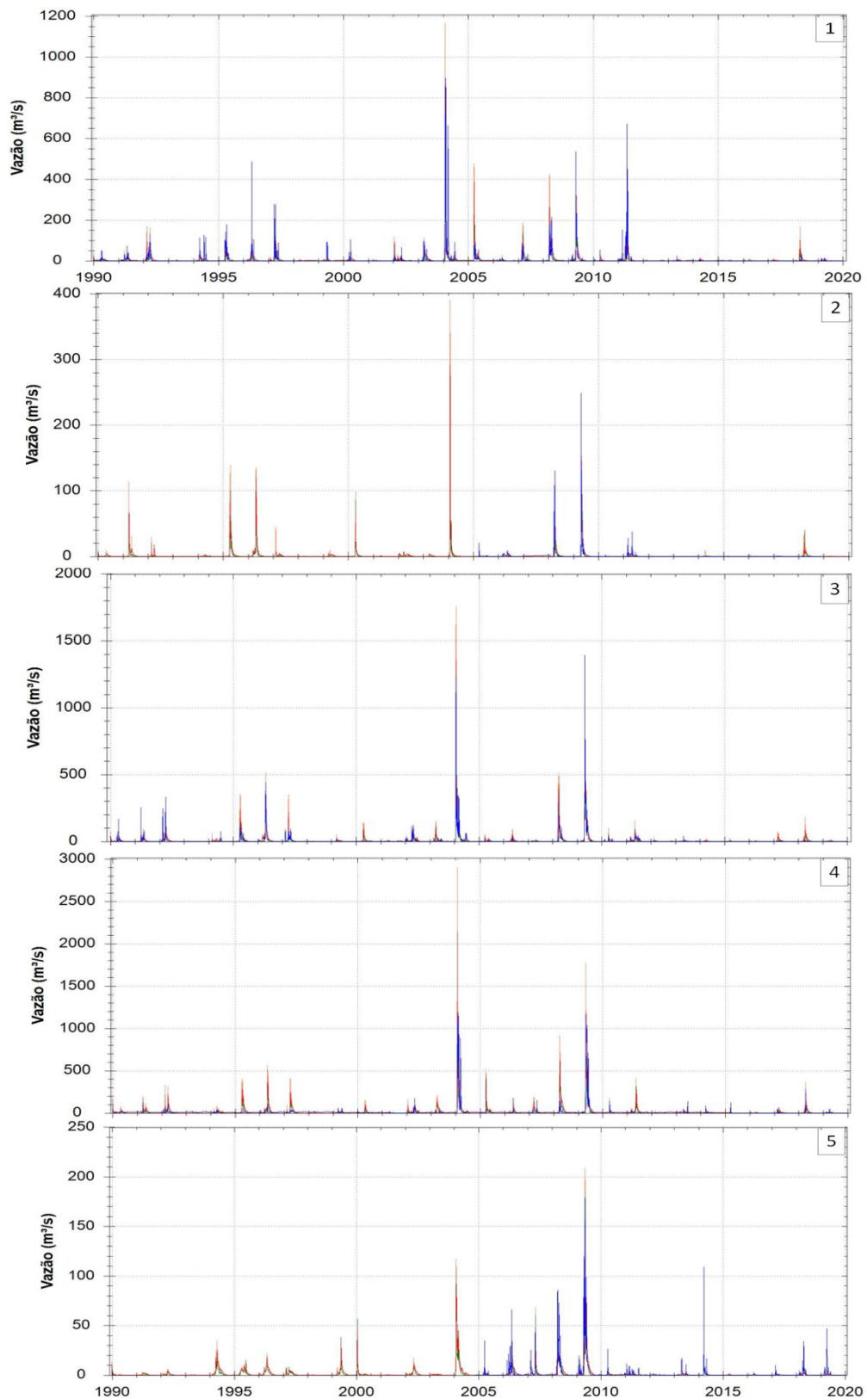
Contudo, ao se observar as outras métricas do modelo, torna-se claro que esta conclusão não é possível. Ao colocar todos os açudes como um único reservatório equivalente no exutório da minibacia cria-se um excesso de retenção de água nesses pontos, explicitado pelos altos valores do NS-log e do erro volumétrico, gerando erros na representação física dos processos que ocorrem de fato na bacia. Esse resultado indica ainda que outros processos de retenção de água podem ser extremamente relevantes para a modelagem dessa bacia, como a perda de água em trânsito, por exemplo.

**Tabela 3** – Comparação entre os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NS-log) e erro volumétrico (EV) para as vazões simuladas com o modelo MGB-IPH nas versões do cenário B100\_6 e C.

ID	Estação fluviométrica	Cenário B100_6			Cenário C		
		NS	NS-log	EV (%)	NS	NS-log	EV (%)
1	Senador Pompeu	0.425	0.124	10.41	0.481	-3.143	-47.59
2	Juazeiro	0.661	-0.055	3.58	0.660	-0.050	-45.68
3	Quixeramobim	0.650	-1.429	36.32	0.760	-2.705	-27.70
4	Morada Nova II	0.192	-3.393	13.06	0.218	-6.207	-33.94
5	Melões	0.659	0.102	-27.03	0.602	-0.418	-54.31

Fonte: Autor

**Figura 22** – Vazões observadas (em azul), simuladas com a versão original do modelo (em laranja), simuladas com açudes em *sub-grid* representados pelas tabelas incrementais no cenário B100\_6 (em vermelho) e simuladas com o reservatório equivalente de *sub-grid* posicionado no exutório da minibacia (em verde). A referência a cada estação é feita na Tabela 2.



Fonte: Autor

Comparando-se os hidrogramas destas duas versões do modelo, nota-se que a versão alternativa produz picos de vazões mais atenuados, se aproximando dos valores de fato observados. Contudo, essa versão do modelo também gera uma atenuação das vazões de base do hidrograma, o que explica os elevados valores de NS-log e erro volumétrico no cenário C, que diverge totalmente do comportamento real da bacia. Em contrapartida, a versão proposta no cenário B, que utiliza as tabelas incrementais, apresenta picos de vazões mais elevados, mas consegue reproduzir de forma mais consistente todos os fluxos que ocorrem na bacia.

Assim, pode-se notar que, de maneira geral, considerando todo o conjunto de minibacias que compõem a sub-bacia do Banabuiú, a forma de representação dos açudes em *sub-grid* por meio das tabelas incrementais representa um ganho na modelagem hidrológica da região, permitindo uma representação mais adequada do comportamento observado. Uma hipótese que pode explicar este comportamento é o fato das tabelas incrementais permitirem a consideração das áreas não controladas por açudes dentro de cada minibacia de forma independente, representando de forma mais precisa a distribuição espacial dos reservatórios na região.

Dentro desse contexto, diversos trabalhos adotaram abordagens variadas para tratar desta questão. O modelo AÇUMOD, por exemplo, desenvolvido para considerar estruturas hidráulicas como os açudes na modelagem hidrológica da região nordeste brasileira, traz uma abordagem distribuída para a representação dos reservatórios na bacia. Nele, apesar de existirem classes de açudes, cada reservatório é representado explicitamente, sendo feito o balanço hídrico de forma individual. Para isso, são necessárias informações das CAVs, assim como das cotas do vertedouro e da cota do porão (SILANS *et al.*, 2000). Nesse sentido, apesar de apresentar bons resultados, este modelo exige uma quantidade de dados que muitas vezes não é conhecida para a maior parte dos açudes, sendo uma opção inviável para modelagem de grandes bacias com densas redes de reservatórios e pouca quantidade de informações.

Por sua vez, o modelo WASA apresenta uma representação estatística dos açudes presentes na região, tendo em vista a adoção de reservatórios equivalentes para as 5 classes de dimensão de açudes adotados no modelo, dispostos em cascata. Contudo, nessa abordagem, a área de cada sub-bacia é adotada como

igualmente distribuída como área de contribuição entre as classes de reservatórios (GÜNTNER, 2002), perdendo-se assim as relações entre os diversos açudes e entre as áreas de contribuição.

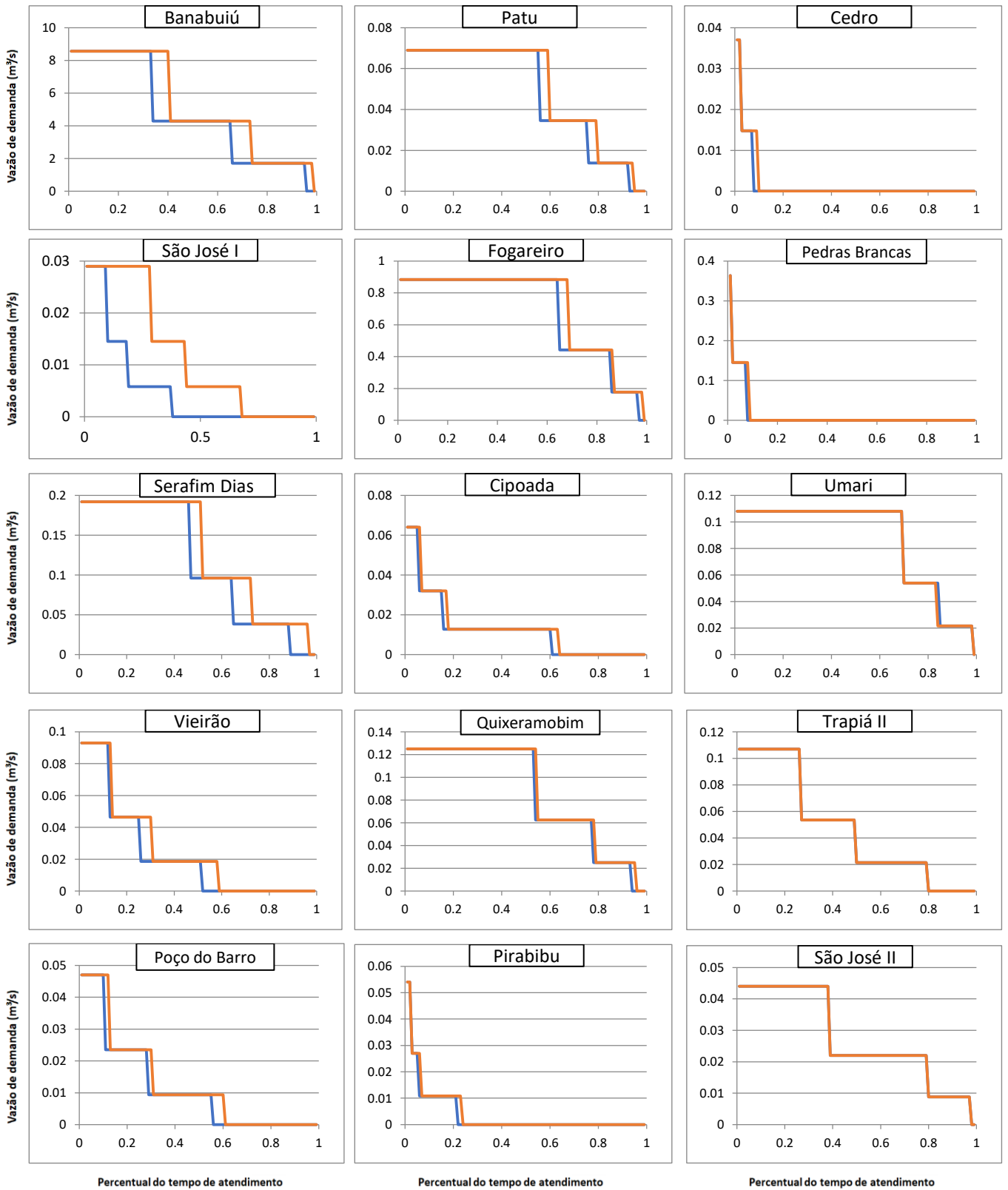
Em uma abordagem agregada, mais próxima da metodologia proposta aqui, Hughes e Mantel (2010) utilizaram o modelo Pitman para avaliar as incertezas na simulação de pequenos reservatórios na África do Sul. Neste estudo, os autores utilizaram camadas raster com informações das sub-bacias da área modelada, dos polígonos de pequenos açudes e da rede de drenagem para definir quais açudes estavam diretamente sobre o canal, influenciando nas diversas relações entre os açudes e na área total que contribui para o exutório em um dado passo de tempo. Contudo, este modelo foi aplicado em escala mensal.

### **5.2.3 Avaliação da capacidade de atendimento a demandas**

A capacidade de atendimento a demandas foi um fator avaliado com objetivo de identificar o efeito que os pequenos reservatórios distribuídos sobre a área da bacia têm sobre os açudes monitorados, de importância estratégica para o abastecimento da região. Assim, foram avaliados dois cenários: um com todos os grupos de açudes (cenário B) e outro apenas com os monitorados (cenário D); através de curvas de permanência de atendimento. A Figura 23 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação deste parâmetro, indicando o comportamento dos açudes monitorados frente aos cenários testados, podendo-se observar a formação de 2 grupos de respostas distintos.

O primeiro grupo, compreendendo os reservatórios Banabuiú, São José I, Serafim Dias, Patu, Vieirão, Fogareiro e Poço do Barro, apresenta uma curva de permanência de atendimento superior no cenário em que existem apenas os reservatórios monitorados, indicando que a existência da densa rede de açudes de forma distribuída na região diminui a disponibilidade hídrica para esses grandes reservatórios. Esse resultado é condizente com estudos realizados na região por Van Langen *et al.* (2021b) e Ribeiro Neto *et al.* (2022).

**Figura 23** – Curvas de permanência de atendimento das demandas para os reservatórios monitorados nos cenários B (em azul) e D (em vermelho).



Fonte: Autor

Estes autores avaliaram o efeito de uma densa rede de reservatórios sobre a propagação e evolução da seca na região semiárida brasileira, indicando que uma grande quantidade de pequenos reservatórios tem uma grande influência sobre o armazenamento de água no sistema hidrológico. Ribeiro Neto *et al.* (2022) argumentam que a seca pode ser inclusive modificada devido à presença dos pequenos açudes, tanto na forma de um adiantamento do seu início como também atrasando a sua recuperação após o fim da seca meteorológica. Essa característica se deve ao fato de haver inicialmente maior retenção de água nas porções a montante da bacia (VAN LANGEN *et al.*, 2021b), justificada pelo fato de que, em muitos casos, esses pequenos açudes só vertem quando superam a sua capacidade máxima.

Vale destacar ainda que, apesar de interferir na disponibilidade de água nos grandes reservatórios, essa densa rede de pequenos açudes também é responsável por aumentar a quantidade de água retida na bacia (RIBEIRO NETO *et al.*, 2022), melhorando também a distribuição espacial da capacidade de atendimento das demandas difusas e a eficiência energética dos sistemas de atendimento destas demandas (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

No que refere ao segundo grupo de reservatórios, incluídos aqui os demais açudes, observam-se curvas de permanência de atendimento da demanda similares nos dois cenários investigados, ou seja, não há um cenário em que haja maior vantagem na disponibilidade de água para os grandes reservatórios. Isso implica no fato de que, mesmo havendo densas redes de pequenos reservatórios, nem todas as bacias de drenagem irão se comportar de forma semelhante. Uma hipótese que pode explicar este comportamento reside na grande diversidade de interações e configurações possíveis entre as redes de reservatórios dentro de uma bacia, resultando em uma maior ou menor área não controlada por açudes, o que implica diretamente no impacto que pequenos açudes têm sobre reservatórios estratégicos.

#### **5.2.4 Fontes de incertezas e limitações da abordagem metodológica adotada**

Para construção dos módulos propostos dentro do modelo MGB-IPH e a geração dos dados sobre a densa rede de pequenos reservatórios, algumas hipóteses foram assumidas e algumas simplificações realizadas. Nesse contexto,



cabe comentar sobre as principais fontes de incertezas e limitações existentes na metodologia proposta.

No que se refere à utilização do SRTM como modelo digital de elevação para a geração das CAVs, assume-se que os açudes estavam completamente secos no período de coleta dos dados (fevereiro de 2000, segundo EROS (2018)), o que é razoável tendo em vista que se trata do final de um período seco na região. Contudo, a resolução vertical deste MDE é baixa, sendo uma considerável fonte de incertezas dentro da metodologia proposta. Apesar disso, ressalva-se que a metodologia independe do SRTM como fonte de entrada, podendo ser aplicada a outro MDE diminuindo essas incertezas associadas.

Quanto às tabelas incrementais de chuva efetiva que chega ao exutório adotadas para representar os pequenos açudes em *sub-grid*, a hipótese adotada é que todos os reservatórios agrupados seguem a mesma regra de enchimento e esvaziamento ao longo do tempo. Em relação ao enchimento, esta suposição tem caráter mais adequado, tendo em vista que, estando todos os reservatórios vazios no início do tempo (fato plausível na região semiárida brasileira), os seus enchementos ocorrerão de forma similar.

Por sua vez, o esvaziamento é um processo mais complexo e que depende fortemente da área de espelho d'água de cada açude especificamente, uma vez que reservatórios rasos com grande espelho d'água tendem a perder mais por evaporação e secam mais rapidamente, enquanto reservatórios mais profundos apresentam comportamento oposto. Hughes e Mantel (2010) também relataram existir incertezas associadas com a estrutura do modelo adotada em seu estudo, especificamente com a agregação dos reservatórios dentro da minibacia, sendo esta uma fonte indiscutível de incertezas, frente às hipóteses adotadas em cada estudo.

Outra questão que merece destaque neste contexto foi a adoção de regras e vazões para atendimento de demandas e liberação de água nos diversos grupos de reservatórios dentro do modelo. No Ceará, as vazões liberadas para jusante a partir dos reservatórios monitorados são definidas através da alocação negociada dos açudes na região, sendo definidas regras para operação semestral dos sistemas, podendo ser vazões contínuas em um determinado período (CEARÁ, 2016; COGERH, 2020) ou na forma de pulsos (SOHIDRA, 2021). Assim, não existe uma regra única de operação para todo o período de análise.

Aliado a isso, não existem dados específicos sobre as vazões utilizadas para atender demandas a partir dos pequenos açudes. Assim, a falta destes dados representa uma grande fonte de incertezas para a modelagem realizada e a adoção de uma vazão diária constante neste trabalho implica numa hipótese que inevitavelmente associa erros a esta abordagem. Esse fato também foi relatado por Hughes e Mantel (2010), ao estudarem as incertezas da simulação do impacto de pequenos açudes no regime de vazões da África do Sul. Estes autores indicam que a falta de informações para definir os padrões de retirada de água representam a principal lacuna de informações em estudos deste tipo.

Por fim, a calibração do modelo original para a representação da bacia considerando a situação sem reservatórios (cenário A) pode implicar na associação de erros na definição de parâmetros do modelo, tendo em vista que a presença dos açudes é indiretamente compensada através desses parâmetros. Em outro estudo com o modelo MGB-IPH no semiárido brasileiro, Silva e Medeiros (2018) apontam que o MGB, por não representar reservatórios no seu escopo, acaba sendo calibrado de forma a considerar que parte do armazenamento fica retida nos reservatórios e quando há vertimento, o modelo não consegue representá-los de forma adequada. Nesse sentido, a recalibração do modelo seria necessária para adequar os parâmetros ao novo cenário. Habets *et al.* (2014), dentro desse contexto, realizaram uma avaliação sem calibração inicial do seu modelo proposto no sentido de contabilizar esta questão.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um módulo de reservatórios para incorporação ao modelo MGB-IPH visando à modelagem de bacias hidrográficas de grande escala considerando densas redes de pequenos reservatórios sobre as quais existe pouco ou nenhum dado. Para tal, foram desenvolvidas metodologias de análise e geração de dados sobre pequenos reservatórios distribuídos sobre a sub-bacia do Banabuiú, bacia adotada para estudo de caso.

Inicialmente, foram investigadas as relações e a influência de diferentes formas de representação dos açudes dentro do modelo, variando a quantidade de açudes representados explicitamente (*on-grid*) e a quantidade que era utilizada para gerar os açudes equivalentes (aqueles em *sub-grid*). A partir desta análise, pode-se inferir que a utilização de maiores densidades de drenagem foi a abordagem mais adequada, apresentando os melhores resultados globais do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia.

Por sua vez, as densas redes de pequenos reservatórios foram representadas na forma de reservatório equivalente por meio de uma tabela incremental que relacionava as respectivas áreas de contribuição de cada açude, bem como as interações entre eles. Ao comparar essa abordagem com uma alternativa que considerava os reservatórios equivalentes no exutório de cada minibacia, ficou evidente que a metodologia proposta foi a mais adequada, sendo capaz de melhorar globalmente os coeficientes do modelo MGB-IPH.

A representação das relações de posição entre os açudes e suas respectivas áreas de contribuição, bem como a representação das áreas que contribuem direto para o exutório aparentam ter forte papel na modelagem dessas regiões e foi um parâmetro bem ajustado na abordagem proposta.

Analisando diferentes cenários de interação entre pequenos e grandes reservatórios, pode-se perceber que a presença dos pequenos açudes gera uma redução da quantidade de água que chega aos reservatórios estratégicos, embora represente um aumento da disponibilidade hídrica distribuída no sistema. Essa característica implica na necessidade de se conhecer adequadamente todo o sistema para que se possa realizar a correta gestão dos recursos presentes nele.

Dessa forma, embora existam limitações quanto aos resultados apresentados, observa-se que houve um considerável avanço na modelagem de densas redes de pequenos açudes em grandes bacias com baixa ou nenhuma disponibilidade de dados, sendo possível atingir uma modelagem consideravelmente melhor do que a versão original do MGB-IPH. Além disso, há ainda espaço para melhorias no modelo proposto, tanto na representação de processos, como a inserção das perdas em trânsito; como na obtenção de estimativas e regras de operação (tanto para o atendimento de demandas, como para a liberação de vazão para jusante) mais precisas para os reservatórios, sendo estas sugestões para pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

- ACHEAMPONG, E. N.; OZOR, N.; SEKYI-ANNAN, E. Development of small dams and their impact on livelihoods: Cases from northern Ghana. **African Journal of Agricultural Research**, [S. l.], v. 9, n. 24, p. 1867–1877, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8610>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação: Relatório síntese**. Brasília: [s. n.], 2017 a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação: Anexo C**. Brasília: [s. n.], 2017 b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **A distribuição desproporcional de água no Brasil**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.facebook.com/anagovbr/photos/o-brasil-possui-12-de-toda-a-água-doce-do-mundo-pode-parecer-muito-mas-a-distrib/1075462189221358/>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>
- ALVES, M. E. *et al.* **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools**. [S. l.: s. n.].
- ANA. **Séries Históricas de Estações**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 12 out. 2019.
- ANDRADE, E. M. DE *et al.* HYDROLOGICAL RESPONSES OF A WATERSHED TO VEGETATION CHANGES IN A TROPICAL SEMIARID REGION. **Revista Caatinga**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 161–170, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n119rc>
- ANNOR, F. O. *et al.* Delineation of small reservoirs using radar imagery in a semi-arid environment: A case study in the upper east region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, [S. l.], v. 34, n. 4–5, p. 309–315, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.08.005>
- AYALEW, T. B. *et al.* Effect of Spatially Distributed Small Dams on Flood Frequency: Insights from the Soap Creek Watershed. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S. l.], v. 22, n. 7, p. 04017011, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001513)
- BATISANI, N.; YARNAL, B. Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. **Applied Geography**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 483–489, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.10.007>
- BERHANE, G. *et al.* Overview of micro-dam reservoirs (MDR) in Tigray (northern Ethiopia): Challenges and benefits. **Journal of African Earth Sciences**, [S. l.], v. 123, p. 210–222, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.07.022>

BEVEN, K. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer**. [S. l.]: Wiley-Blackwell, 2012.

BEZERRA, J. M. *et al.* Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 73–84, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100010>

BRÊDA, J. P. L. F. *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, [S. l.], v. 159, n. 4, p. 503–522, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

CADIER, E. **Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Transposição hidrológica**. Recife: [s. n.], 1994. v. 31 *E-book*.

CEARÁ. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Fortaleza: INESP, 2009.

CEARÁ. **Cogerh define diretrizes para a operação dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú no período chuvoso**. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2016/02/04/cogerh-define-diretrizes-para-a-operacao-dos-vales-do-jaguaribe-e-banabuiu-no-periodo-chuvoso/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

CHERLET, M. *et al.* (org.). **World Atlas of Desertification**. 3. ed. Luxembourg: [s. n.], 2018. *E-book*. Disponível em: <https://wad.jrc.ec.europa.eu/>

CIRILO, J. A. *et al.* Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **RBRH**, [S. l.], v. 25, n. 15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>

COGERH. **Manual de Operação da Sala de Situação do Ceará**. [S. l.: s. n.]

COGERH. **Comitê de Bacia do Rio Banabuiú aprova vazões dos açudes da região para 2020**. 2. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/comite-de-bacia-do-rio-banabuiu-aprova-vazoes-dos-acudes-da-regiao-para-2020-2/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

COGERH; FUNCEME. **Portal Hidrológico do Ceará**. [s. l.], 2022. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

COLLISCHONN, B. *et al.* Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 119–133, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p119-133>

COLLISCHONN, W. *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n1.p95-118>

DE ARAÚJO, J. C. Gestão das águas de pequenos açudes na região semiárida. In: MEDEIROS, S. de S. *et al.* (org.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 307–324. *E-book*.

DE ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 23, n. 8, p. 1169–1178, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.7232>

DE FIGUEIREDO, J. V. *et al.* Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 30, n. 13, p. 2390–2400, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10801>

DE TOLEDO, C. E.; DE ARAÚJO, J. C.; DE ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 3683–3699, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.915593>

DEITCH, M. J.; MERENLENDER, A. M.; FEIRER, S. Cumulative Effects of Small Reservoirs on Streamflow in Northern Coastal California Catchments. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 27, n. 15, p. 5101–5118, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0455-4>

DOHERTY, F. R.; ARAÚJO FILHO, P. F.; CADIER, E. **Modelização hidrológica das pequenas bacias do Nordeste brasileiro**. Recife: SUDENE, 1994. v. Hidrologia *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

EDUARDO, E. N. *et al.* Hydrological simulation as subside for management of surface water resources at the Mortes River Basin. **Ciência e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 40, n. 4, p. 390–404, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404009516>

EROS. **USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled**. [s. l.], 2018. Disponível em: [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects%0Ahttps://doi.org/10.5066/F7F76B1X](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects%0Ahttps://doi.org/10.5066/F7F76B1X). Acesso em: 25 ago. 2021.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S. Lake Topography and Active Storage From Satellite Observations of Flood Frequency. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 56, n. 7, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019WR026362>

FELIX, V. de S.; DA PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 556–569, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>

FLEISCHMANN, A. *et al.* Modeling the role of reservoirs versus floodplains on large-

scale river hydrodynamics. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 99, n. 2, p. 1075–1104, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03797-9>

FLEISCHMANN, A. *et al.* Um Modelo Hidrológico-Hidrodinâmico Da Bacia Do Paraná e Seus Reservatórios. *In*: 2019b, Foz do Iguaçu. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: ABRHidro, 2019.

FLEISCHMANN, A. S. *et al.* Desenvolvimento do módulo de reservatórios do modelo hidrológico MGB-IPH. *In*: 2015, Brasília. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília: ABRH, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Ancient Egyptian Agriculture**. [s. l.], 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/country-showcase/item-detail/en/c/1287824/>. Acesso em: 20 jul. 2020.

FREITAS, S. *et al.* PLUVIÓGRAFOS EM DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS. *In*: 2021, Belo Horizonte. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: [s. n.], 2021. p. 1–10.

FUCK JÚNIOR, S. C. F. Subsídio À Gestão Ambiental: Descrição Fisiográfica E Análise Funcional Das Bacias Hidrográficas Do Ceará. **Geoambiente on-Line**, [S. l.], v. 10, p. 41–71, 2008.

GHEYI, H. R. *et al.* (org.). **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido/Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. *E-book*.

GOODRICH, D. C. *et al.* Linearity of basin response as a function of scale in a semiarid watershed. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 33, n. 12, p. 2951–2965, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/97WR01422>

GRIN, S. **Geometry and water height-area-volume curves of the reservoirs in the semiarid Madalena basin in Northeast Brasil**. Enschede: [s. n.], 2014. Disponível em: [http://essay.utwente.nl/66590/1/Grin\\_Sido.pdf](http://essay.utwente.nl/66590/1/Grin_Sido.pdf).

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil**. 2002. - University of Postdam, Postdam, 2002.

GÜNTNER, A. *et al.* Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region / Modélisation simple du bilan hydrologique de systèmes de réservoirs de surface dans une grande région semi-aride pauvre en données. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 49, n. 5, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.901.55139>

HABETS, F. *et al.* Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 18, n. 10, p. 4207–4222, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>

HABETS, F. *et al.* The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 643, p. 850–867, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.188>



HUGHES, D. A.; MANTEL, S. K. Estimating the uncertainty in simulating the impacts of small farm dams on streamflow regimes in South Africa. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 578–592, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.484903>

HUGHES, D. A.; SAMI, K. Transmission losses to alluvium and associated moisture dynamics in a semiarid ephemeral channel system in Southern Africa. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 45–53, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060105>

JARIHANI, B. *et al.* Characterisation of Hydrological Response to Rainfall at Multi Spatio-Temporal Scales in Savannas of Semi-Arid Australia. **Water**, [S. l.], v. 9, n. 7, p. 540, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w9070540>

JARVIS A., H. I.; REUTER, A.; NELSON, E. G. **Hole-filled seamless SRTM data V4**. [s. l.], 2008. Disponível em: <https://srtm.csi.cgiar.org>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LANE, L. J.; KIDWELL, M. R. **Hydrologic Modeling in Arid Areas: Concepts , Theory and Data**. Tucson: United States Department of Agriculture, 2001. *E-book*.

LAWRENCE, P.; LO CASCIO, A. **Sedimentation in small dams: Hydrology and drawdown computations**HR Wallingford. [S. l.: s. n.].

LIEBE, J. **Estimation of Water Storage Capacity and Evaporation Losses of Small Reservoirs in the Upper East region of Ghana**. 2002. - Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, [s. l.], 2002. Disponível em: [http://www.zef.de/fileadmin/template/Glowa/Downloads/thesis\\_liebe.pdf](http://www.zef.de/fileadmin/template/Glowa/Downloads/thesis_liebe.pdf)

LIEBE, J. R. *et al.* Suitability and Limitations of ENVISAT ASAR for Monitoring Small Reservoirs in a Semiarid Area. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. l.], v. 47, n. 5, p. 1536–1547, 2009 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2004805>

LIEBE, J. R. *et al.* Determining watershed response in data poor environments with remotely sensed small reservoirs as runoff gauges. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 45, n. 7, p. 1–12, 2009 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008WR007369>

LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: A case study in the Upper East Region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, [S. l.], v. 30, n. 6- 7 SPEC. ISS., p. 448–454, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>

MARENGO, J. A. *et al.* Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *In: Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 383–422. *E-book*. Disponível em: [http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/06.11.02.16/doc/Marengo\\_Variabilidade.pdf?languagebutton=en](http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/06.11.02.16/doc/Marengo_Variabilidade.pdf?languagebutton=en)

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, [S. l.], v. 129, n. 1–2, p. 103–115, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>

MEDEIROS, P.; SIVAPALAN, M. **From hard-path to soft-path solutions: slow-fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment.** [S. l.]: Taylor & Francis, 2020. v. 65*E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770258>

MENEGHETTI, G. T.; FERREIRA, N. J. Variabilidade sazonal e interanual da precipitação no Nordeste Brasileiro. *In*: 2009, Natal. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: [s. n.], 2009. p. 1685–1689.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Plano Estratégico De Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido - PDSA**. Brasília: [s. n.], 2005.

MIRALLES, D. G. *et al.* On the Use of the Term “Evapotranspiration”. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 56, n. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020WR028055>

MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Recife: SUDENE, 1989. v. 25*E-book*.

MOLLE, F. **Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento**. Recife: SUDENE, 1994 a. v. 30*E-book*.

MOLLE, F. **Geometria dos pequenos açudes**. Recife: SUDENE, 1994 b. v. 29*E-book*.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. Recife: SUDENE/ORSTOM, 1992. *E-book*.

MOURA, E. M. De *et al.* MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PIRANHAS-AÇU UTILIZANDO O MODHISA JUNTAMENTE COM O BALANÇO HÍDRICO. *In*: 2007, São Paulo. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo: [s. n.], 2007. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/7ac0936c5b197ca812af391ad456853e\\_d0ae0c784b0a82e6013278d63d8ec3a3.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/7ac0936c5b197ca812af391ad456853e_d0ae0c784b0a82e6013278d63d8ec3a3.pdf)

NASCIMENTO, A. T. P. do *et al.* Decentralized water supply by reservoir network reduces power demand for water distribution in a semi-arid basin. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 64, n. 1, p. 80–91, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1566728>

NATHAN, R.; LOWE, L. The Hydrologic Impacts of Farm Dams. **Australasian Journal of Water Resources**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 75–83, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.7158/13241583.2012.11465405>

NATIONAL WEATHER SERVICE - NOAA. **Inter-Tropical Convergence Zone**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.weather.gov/jetstream/itcz>. Acesso em: 9 ago. 2020.

NEAL, B. *et al.* Identifying the Separate Impact of Farm Dams and Land Use Changes on Catchment Yield. **Australasian Journal of Water Resources**, [S. l.], v.

5, n. 2, p. 165–176, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13241583.2002.11465202>

OJHA, C. S. P.; KHOBRADE, S. D.; ADELOYE, A. J. Estimating Air Vapor Pressure in a Semiarid Region Using FAO-56 Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S. l.], v. 137, n. 8, p. 491–500, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000322](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000322)

PAIVA, R. C. D. *et al.* SAMEWATER: Uma agenda de pesquisa integrada da hidrologia da América do Sul. *In*: 2017, Florianópolis. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis: ABRH, 2017.

PASSAIA, O. A. *et al.* Impact of large reservoirs on simulated discharges of Brazilian rivers. **RBRH**, [S. l.], v. 25, n. March, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190084>

PAYAN, J.-L. *et al.* How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model? **Water Resources Research**, [S. l.], v. 44, n. 3, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007WR005971>

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**, [S. l.], v. 64, n. 1, p. 66–79, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1566727>

PEUGEOT, C. *et al.* Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 279, n. 1–4, p. 224–243, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00181-1)

PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 379–400, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626668809491261>

PONTES, P. R. M. *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 94, p. 1–20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>

RAZIEI, T.; ARASTEH, P. D.; SAGHFAN, B. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *In*: 2005, Frankfurt and Slubice. **ICID 21st European Regional Conference**. Frankfurt and Slubice: [s. n.], 2005.

RENARD, K. G. The hydrology of semiarid rangeland watersheds. **Report (USDA ARS)**, [S. l.], p. 27, 1970. Disponível em: [citeulike-article-id:8188933%5Chttp://ddr.nal.usda.gov/dspace/handle/10113/6181](http://ddr.nal.usda.gov/dspace/handle/10113/6181)

RIBEIRO NETO, G. G. *et al.* Drought Cycle Analysis to Evaluate the Influence of a Dense Network of Small Reservoirs on Drought Evolution. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 58, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2021WR030799>

RODRIGUES, L. N. *et al.* Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah region. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 873–882, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9941-8>

RODRIGUES, L. N.; LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Region of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1–10, 2013.

ROMERO, R. *et al.* A 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the spanish mediterranean regions: First exploratory study. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 18, n. 5, p. 541–560, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0088\(199804\)18:5<541::aid-joc270>3.0.co;2-n](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0088(199804)18:5<541::aid-joc270>3.0.co;2-n)

SAWUNYAMA, T.; SENZANJE, A.; MHIZHA, A. Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment. **Physics and Chemistry of the Earth**, [S. l.], v. 31, n. 15–16, p. 935–943, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.08.008>

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Levantamento da Geodiversidade - Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil - Isoetas Anuais Médias Período 1977 a 2006**. [s. l.], 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>.

SILANS, A. M. B. P. De *et al.* Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído AÇUMOD à Bacia Hidrográfica Do Rio Do Peixe - Estado Da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 5–19, 2000. Disponível em: [http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CDQQFjAA&url=http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/6f185875495f46381a51346a928e2ca8\\_ab199d38d643584467e1a06e0ec56583.pdf&ei=CuJRUE2TGpSe9QSDrYDoAQ&usg=AFQjCNHdX4lwu\\_LYjNKp](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CDQQFjAA&url=http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/6f185875495f46381a51346a928e2ca8_ab199d38d643584467e1a06e0ec56583.pdf&ei=CuJRUE2TGpSe9QSDrYDoAQ&usg=AFQjCNHdX4lwu_LYjNKp)

SILVA, A. C. S. *et al.* Considerações Sobre Aspectos Sociais E Físicos Da Açudagem Na Bacia Do Açude Sumé - Pb. *In:* 2009, Campo Grande. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande: [s. n.], 2009.

SILVA, D. S. da; MEDEIROS, J. D. F. De. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Seridó. *In:* 2018, Maceió. **Anais do XIV SRHNE**. Maceió: [s. n.], 2018. p. 1–10. Disponível em: <https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/4068>

SILVA, J. L. B. *et al.* Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a7128>

SIQUEIRA, V. *et al.* IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>

SIQUEIRA, V. A. Supplement of Toward continental hydrologic – hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], p. 4815–4842, 2018.

SOHIDRA. **Vazões dos açudes Castanhão , Orós e Banabuiú são definidas para o segundo semestre de 2021.** [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.sohidra.ce.gov.br/2021/07/05/vazoes-dos-acudes-castanhao-oros-e-banabuiu-sao-definidas-para-o-segundo-semester-de-2021/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

SRH/CE. **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará.** [s. l.], 2017. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

TINÔCO, I. C. M. *et al.* Characterization of Rainfall Patterns in the Semiarid Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 397–409, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.11137/2018\\_2\\_397\\_409](https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409)

TOLEDO, C. E. *et al.* Water loss in transit in an intermittent river in brazilian semi-arid. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 177, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i3.5090>

TUNJI, L. A. Q.; SEMPEWO, J. I.; MBATYA, W. Development of a water surface area-storage capacity relationship for Namodope Reservoir, Uganda. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 183–193, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1787243>

UNITED NATION STATISTICS DIVISION. **Environmental Indicators: Inland Water Resources.** [s. l.], 2011. Disponível em: <https://unstats.un.org/unsd/environment/waterresources.htm>. Acesso em: 20 jul. 2020.

VAN LANGEN, S. *et al.* **Accuracy vs Realism: Does including reservoirs improve hydrological models?** [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.31223/X55S5S>.

VAN LANGEN, S. C. H. *et al.* Effect of a reservoir network on drought propagation in a semi-arid catchment in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 66, n. 10, p. 1567–1583, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1955891>

ZAFARI, A. **The Water System of Ancient Rome.** [s. l.], 2019. Disponível em: <http://engineeringrome.org/the-water-system-of-ancient-rome/>. Acesso em: 20 jul. 2020.

ZHANG, C. *et al.* Integrated hydrological modelling of small- and medium-sized water storages with application to the upper Fengman Reservoir Basin of China. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 16, n. 11, p. 4033–4047, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-16-4033-2012>

ZHANG, Q. *et al.* Spatio-temporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: The Yellow River basin as a case study. **Global and Planetary Change**, [S. l.], v. 114, p. 38–49, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.005>

ZHANG, S. *et al.* Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 571, p. 575–593, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.024>