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

PAULILO PALÁCIO BRASIL

MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NA AGRICULTURA IRRIGADA EM REGIÕES SECAS (NeStRes)

FORTALEZA
2021

PAULILO PALÁCIO BRASIL

MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NA AGRICULTURA IRRIGADA EM REGIÕES SECAS (NeStRes)

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B83m Brasil, Paulilo Palácio.
Modelo físico-matemático para alocação de água de pequenos reservatórios na agricultura irrigada em regiões secas (NeStRes) / Paulilo Palácio Brasil. – 2021.
80 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.

1. Agricultura de pequena escala. 2. Operação de reservatório. 3. Maximização da renda. 4. Irrigação. 5. Regiões secas. I. Título.

CDD 630

PAULILO PALÁCIO BRASIL

MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NA AGRICULTURA IRRIGADA EM REGIÕES SECAS (NeStRes)

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em 30/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

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

Dr. Silvio Carlos Ribeiro Vieira Lima
Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Trabalho do Governo do Estado do Ceará - SEDET

Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiondo
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claudivan Feitosa Lacerda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, **Pedro Palácio e Francisca Brasil** pelo amor incondicional, apoio nos bons e maus momentos e aconselhamentos durante todas as etapas da minha vida.

Aos meus irmãos, **Patrick Palácio e Pollyanna Palácio**, pela união, afeto e companheirismo que possuímos.

A minha esposa, **Amanda Moreira**, por todo amor, cuidado e carinho que tem me dado desde o início.

A vocês a *Minha eterna gratidão*.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus;

Aos meus amados pais, Pedro Palácio Beserra e Francisca Teixeira Brasil Palácio, pelo exemplo de seres humanos, pais dedicados e que são minha fonte de inspiração e motivação diária. Aos meus irmãos, Patrick Palácio Brasil e Pollyanna Palácio Brasil, por todo companheirismo, apoio e afeto. Aos meus cunhados, Francisco Genézio Teixeira Neto e a comadre Leidiane Rodrigues da Silva Palácio, por serem bons companheiros, atenciosos e amigos;

Aos meus amados sobrinhos, Alice Palácio da Silva e Miguel Palácio da Silva, que possuem nas faces s sorrisos mais belos e puros que faz ser grato e ver a beleza da vida;

A minha esposa, Amanda Gonçalves Moreira, por todo amor, paciência, companheirismo, planos, conquistas, carinho e iluminação que me deu desde o início do nosso relacionamento;

A pequenina Becky, pela felicidade que demonstra todas as vezes ao me ver, o que acaba me contagiando, e pela companhia em todas as horas;

Ao meu orientador e professor Pedro Henrique Augusto Medeiros pela genialidade, perspicácia, dedicação e experiência que ajudaram no meu crescimento e amadurecimento pessoal, profissional e acadêmico;

Ao professor José Carlos de Araújo, que, além da genialidade admirável, me mostrou a importância social que possuímos ao querermos avançar nas ciências;

Ao professor Francisco Dirceu Duarte Arraes, que me despertou a curiosidade científica e a necessidade de estar sempre avançando nas técnicas científicas;

Gostaria de agradecer também ao professor, George Leite Mamede, pela ajuda na organização de ideias, pelas dicas, pelas experiências e pela paciência a mim ofertadas;

Aos colegas que estão comigo desde a graduação em Iguatu, Emanoel Firmino, José Ribeiro, Juarez Jr., Kleber Macedo, José Brasil, Jacques Ribeiro, pelos anos de amizade, companheirismo e debate científicos;

Ao grupo de pesquisa e extensão HidroSed e todos seus integrantes, em especial a Christine Farias Coelho, José Wellington e Pedro Alencar;

Ao grande amigo, Antonio Viana, pelas conversas, sobre a vida, sobre matemática aplicada, pelo exemplo de alegria e de superação, para ele meu grande abraço;

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) do Centro de Ciências Agrárias, pela oportunidade de

realização do curso e pelo conhecimento lá adquirido;

Agradecer o coordenador da Pós-Graduação, Carlos Alexandre, pela excelente qualidade do ensino proporcionado e atenção dada ao discente;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

Agradecer a todos que, de algum modo, participaram, ajudaram na pesquisa e, dessa forma, contribuíram diretamente na finalização do meu doutorado;

Meu muito obrigado!

“Assim como casas são feitas de pedras, a ciência é feita de fatos. Mas uma pilha de pedras não é uma casa e uma coleção de fatos não é, necessariamente, ciência”.

Jules Henri Poincare

RESUMO

A disponibilidade de água em ambientes secos habitados geralmente tem sido promovida por grandes reservatórios estratégicos, mas os pequenos não estratégicos, construídos por agricultores e comunidades, são incapazes de lidar com secas de longo prazo e são inadequados para o abastecimento humano. No entanto, pequenos reservatórios promovem a distribuição espacial da água e desempenham um papel importante para a subsistência nas áreas rurais. Para preencher a lacuna de métodos de operação para reservatórios não estratégicos usados para irrigação, onde a água é um fator limitante, o modelo NeStRes foi desenvolvido. O modelo é composto por três módulos de operação: i) hidrológico: para definir a garantia das captações de água do reservatório; ii) agrícola: para simular a produção agrícola com base na disponibilidade de água; iii) econômico: para calcular a possível renda das lavouras irrigadas. Inicialmente, o NeStRes foi aplicado em 91 reservatórios situados na região semiárida na Bacia do Rio Banabuiú – BRB, Brasil como estudo de caso. As simulações indicaram que o rendimento máximo com o cultivo do milho é obtido quando os reservatórios são intensamente utilizados, secando completamente em um terço a dois terços do tempo. A adoção de um nível fixo de confiabilidade no abastecimento diário de água tem capacidade de retornar bons resultados de receita nos reservatórios simulados. Posteriormente, o modelo foi aplicado em 412 reservatórios localizados no estado do Ceará, o qual tem 93% do território inserido na região semiárida do Brasil. Dessa forma, as simulações permitiram propor padrões de uso de água regionais governados pelo regime hidrológico: a renda máxima da irrigação do milho é obtida quando a vazão específica para consumo (ou seja, a proporção da retirada diária de água pela capacidade de armazenamento do reservatório) está na faixa de 4 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório (em regiões mais secas) a 6 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade do reservatório (em áreas mais úmidas da costa e em altas altitudes). O procedimento metodológico apresentado neste estudo subsidia as decisões dos agricultores e pode ser útil para definir critérios de operação de reservatórios em outras regiões secas, permitindo a maximização da renda e evitando a adoção de taxas fixas de consumo de água para irrigação.

Palavras-chave: agricultura de pequena escala; operação de reservatório; maximização da renda; escassez hídrica; irrigação; mudança de paradigma; regiões secas.

ABSTRACT

The availability of water in dry inhabited environments has generally been promoted by large strategic reservoirs, but small non-strategic ones, built by farmers and communities, are unable to cope with long-term droughts and are inadequate for human supply. However, small reservoirs promote the spatial distribution of water and play an important role for livelihoods in rural areas. To fill the gap in operating methods for non-strategic reservoirs used for irrigation, where water is a limiting factor, the NeStRes model was developed. The model is composed of three operating modules: i) hydrological: to define the guarantee of water withdrawals from the reservoir; ii) agricultural: to simulate agricultural production based on water availability; iii) economic: to calculate the possible income from irrigated crops. Initially, NeStRes was applied in 91 reservoirs located in the semiarid region of the Banabuiú River Basin – BRB, Brazil as a case study. The simulations indicated that the maximum yield with maize cultivation is obtained when the reservoirs are intensively used, completely drying out in one to two thirds of the time. The adoption of a fixed level of reliability in the daily water supply is capable of returning good revenue results in the simulated reservoirs. Subsequently, the model was applied in 412 reservoirs located in the state of Ceará, which has 93% of the territory inserted in the semiarid region of Brazil. Thus, the simulations allowed to propose regional water use patterns governed by the hydrological regime: the maximum income from corn irrigation is obtained when the specific consumption of water (ie, the proportion of daily water withdrawal by the storage capacity of the reservoir) is in the range of 4 $L \cdot day^{-1}$ per m^3 of reservoir storage capacity (in drier regions) to 6 $L \cdot day^{-1}$ per m^3 of reservoir capacity (in wetter areas of the coast and at high altitudes) . The methodological procedure presented in this study supports farmers' decisions and can be useful to define criteria for the operation of reservoirs in other dry regions, allowing the maximization of income and avoiding the adoption of fixed rates of water consumption for irrigation.

Keywords: small scale agriculture; reservoir operation; income maximization; water scarcity; irrigation; paradigm change; drylands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo médio anual (a) e déficit hídrico anual (b) da agricultura de sequeiro do milho por município no Brasil (2013-2017). 14
Figura 2 – Esquema teórico para estimativa do volume de segurança para agricultura irrigada com base na relação trade-off entre evaporação e irrigação. 27
Figura 3 – Esquema teórico para estimativa do volume de segurança para relação trade-off com a agricultura irrigada. 31
Figura 4 – Bacia do Rio Banabuiú e os 91 reservatórios analisados. 35
Figura 5 – Estado do Ceará com a distribuição dos 412 reservatórios estudados. 36
Figura 6 – Diagrama Triangular de Regularização (DTR) para volumes afluentes anuais com coeficiente de variação de 1,40. 41
Figura 7 – Relação entre o rendimento e o máximo rendimento possível na produção de milho irrigado de acordo com o nível de garantia do fornecimento diário de água. 43
Figura 8 – Prática atual e proposta de uso de água de reservatórios não estratégicos para irrigação. 44
Figura 9 – Nível de garantia ótimo no suprimento diário de água para irrigação do milho em relação ao tempo de residência da água nos reservatórios. 46
Figura 10 – Sensibilidade dos fatores climáticos, agrícolas e econômicos do NeStRes na receita e na garantia do fornecimento diário de água. 48
Figura 11 – Restrição de aplicação do modelo NeStRes. 49
Figura 12 – Razão entre o rendimento para uma simulação do uso específico da água e o rendimento máximo possível para os respectivos reservatórios para o milho irrigado. 50
Figura 13 – Dendrograma da análise de agrupamento dos reservatórios com características semelhantes. 56
Figura 14 – Box-plot de variáveis hidrológicas nos dois grupos formados na Análise de Agruamento Hierárquico. 57
Figura 15 – Distribuição espacial dos grupos de reservatórios de acordo com a Análise de Agrupamento Hierárquico e características climáticas no estado do Ceará. 58
Figura 16 – Vazão específica da água nos grupos de reservatórios formados na Análise de Agrupamento Hierárquico. 59
Figura 17 – Renda relativa *versus* vazão específica para consumo do Grupo I (a –

composto pelos reservatórios das áreas mais secas) e Grupo II (b – composto pelos reservatórios das áreas mais úmidas). 60

Figura 18 – Relação da vazão específica para consumo *versus* tempo de residência de água para o Grupo I (a – composto pelos reservatórios das áreas mais secas) e Grupo II (b – composto pelos reservatórios das áreas mais úmidas)..... 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição de pequenos reservatórios em países selecionados 22
Tabela 2 – Correlação estatística em relação à vazão específica para consumo (SWC) e componentes principais (PCA) no cultivo do milho 55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....13
2 HIPÓTESES.....18
3 OBJETIVOS.....19
4 REVISÃO DE LITERATURA.....20
4.1 Convivência ser humano/seca.....20
4.2 Papel dos reservatórios em regiões secas.....21
4.3 Uso de pequenos reservatórios na agricultura.....23
4.4 Operação de reservatórios na agricultura irrigada.....24
5 MATERIAL E MÉTODOS.....27
5.1 Desenvolvimento do modelo NeStRes.....27
5.2 Aplicação do NestRes.....34
5.3 Critérios para aplicação do NeStRes em pequenos reservatórios.....39
5.4 Análise do impacto do regime hidrológico sobre a operação de pequenos reservatórios.....41
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....43
6.1 Estudo de caso: Bacia do Rio Banabuiú.....43
6.2 Critérios de aplicação do NeStRes em pequenos reservatórios.....49
6.3 O papel das variáveis hidrológicas na operação de pequenos reservatórios: aplicação do modelo NeStRes no estado do Ceará.....50
6.3.1 Análise estatística.....54
6.3.2 Critérios operacionais do reservatório de acordo com o clima.....58
7 CONCLUSÕES.....63
REFERÊNCIAS.....65
ANEXO A – INFORMAÇÕES DOS RESERVATÓRIOS NÃO ESTRATÉGICOS UTILIZADOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÃO DE RENDA E VAZÃO ESPECÍFICA.....72

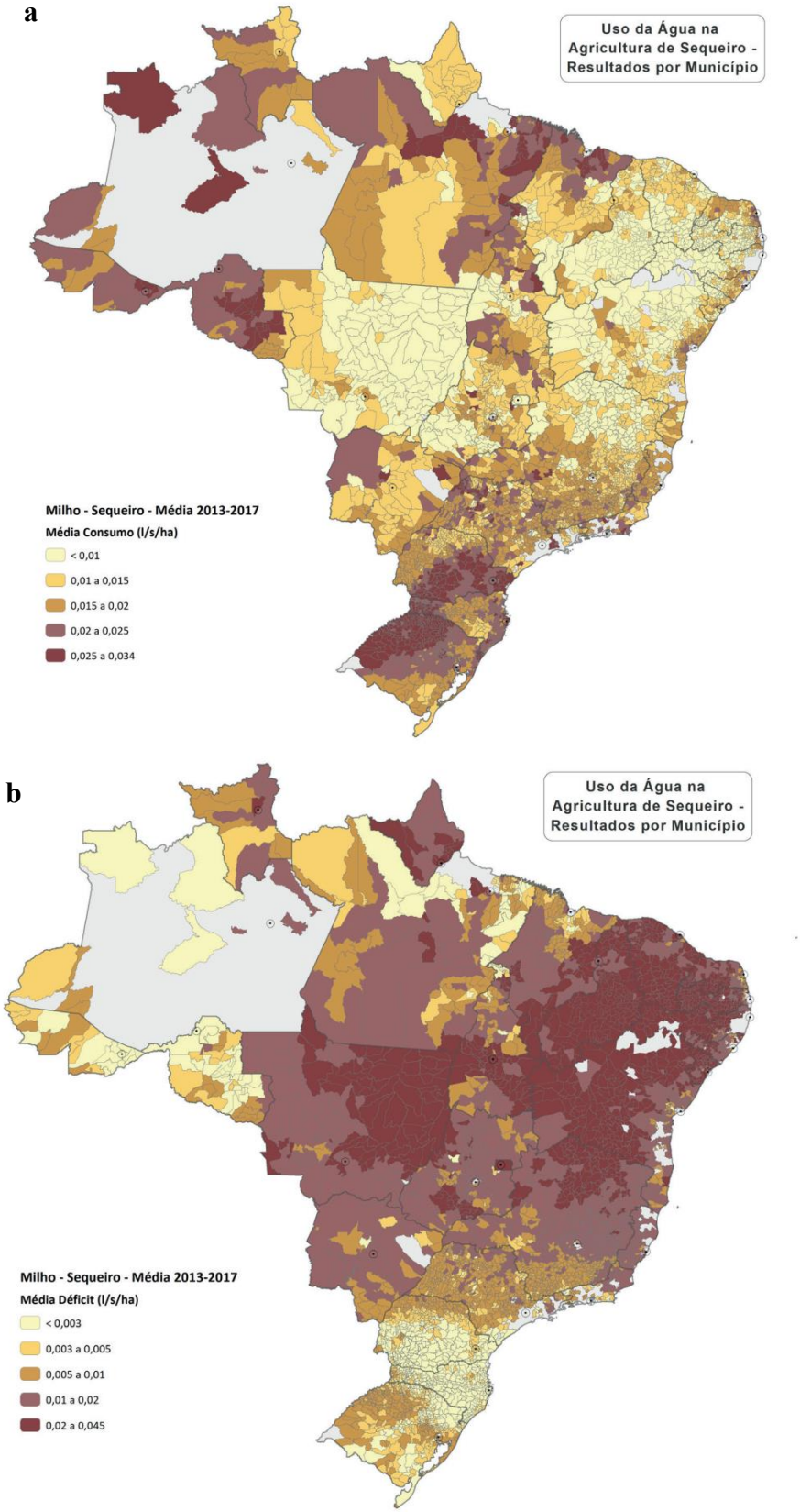
1 INTRODUÇÃO

Poucos eventos extremos são economicamente e ecologicamente tão perturbadores quanto a seca, que afeta milhões de pessoas no mundo a cada ano (WILHITE, 2000). A primeira parcela da população afetada e com os maiores impactos pela seca são os que vivem em áreas rurais, absorvendo até 80% de todos os impactos diretos, com múltiplos efeitos na produção agrícola, segurança alimentar e meios de subsistência rural (FAO, 2020). Setenta e oito por cento dos pobres do mundo (quase 800 milhões de pessoas) vivem em áreas rurais (BANCO MUNDIAL, 2017).

Os indivíduos que vivem em ambientes secos geralmente têm meios de subsistência inseguros, principalmente em função da magnitude relativamente baixa e da alta variabilidade das chuvas ao longo do tempo. Historicamente, as sociedades foram severamente afetadas por secas (MACHIWAL et al., 2017). Diante disso, a perfuração de poços e construção de pequenos barramentos em rios, são infraestruturas fundamentais na gestão de água em sistemas de produção agrícola, seja em agro ecossistemas temperados ou tropicais. Em particular nas regiões subtropicais e tropicais semiáridas, o armazenamento de água é essencial para garantir a resiliência na produção agrícola, na criação de gado e, portanto, da renda (WISSER et al., 2010; AYANTUNDE et al., 2018).

O acesso igualitário da água ainda é um desafio para órgãos gestores. Assim, grande parte dos pequenos agricultores enfrentam o desafio de manter e possivelmente aumentar a produção agrícola de grãos em sistema de sequeiro sob os efeitos da escassez de água durante o ciclo produtivo, caso do cultivo do milho de sequeiro no Brasil (ANA, 2020, ver Figura 1). No entanto, o risco de falhar nesse desafio é alto, não apenas devido as condições climáticas atuais e futuras, mas também como resultado da resposta humana, que pode ser ineficiente ou consistir em soluções de curto prazo (SCHILL et al., 2019, TAMBURINO et al., 2020).

Figura 1 – Consumo médio anual (a) e déficit hídrico anual (b) da agricultura de sequeiro do milho por município no Brasil (2013-2017).



Fonte: ANA (2020).

A captação direta de água da chuva e armazenamento dos escoamentos através de barramentos têm sido a chave para garantir os meios de subsistência e o aumento da produtividade das culturas em muitas civilizações e o armazenamento de água tornou-se uma estratégia fundamental contra a escassez hídrica (WISSER et al., 2010). Diante disso, a construção de grandes reservatórios estratégicos ofereceu a essas civilizações segurança alimentar e crescimento econômico durante os períodos de escassez hídrica (NUNES; MEDEIROS, 2020). Os reservatórios têm permitido o crescimento econômico e a redução da pobreza em muitas regiões do mundo (BRISCOE, 2009). Notavelmente, os benefícios acumulados dependem não apenas da construção de reservatórios, mas também do desenvolvimento de capacidades institucionais e humanas para administrar essa infraestrutura hídrica (GRAY; SADOFF, 2006) e usar efetivamente a água disponível para fins agrícolas, industriais ou civis (CAMPOS, 2015). Porém, de um modo geral, a alocação da água dos grandes reservatórios é voltada a grandes centros urbanos e tem como característica uma distribuição desigual da água, em especial, para os pequenos agricultores (MOREIRA, 2018).

Os efeitos positivos dos grandes reservatórios construídos pelo setor público levaram agricultores e comunidades remotas a construir seus próprios pequenos reservatórios, que podem gerar redes de alta densidade (MAMEDE et al., 2012), contribuindo para a descentralização do abastecimento de água (van der ZAAG; GUPTA, 2008), mas também impactando o fluxo hídrico (HABETS et al., 2018) e o aporte aos maiores reservatórios estratégicos localizados em posições a jusante (KROL et al., 2011; MAMEDE et al., 2018). Portanto, a operação dos reservatórios desempenha um papel importante na sustentabilidade dos sistemas acoplados "*humano-hidrologia*" em terras secas. Para reduzir a probabilidade de falhas no abastecimento de água, os reservatórios para abastecimento humano são geralmente operados com alto nível de garantia de acordo com a prática de "*economia de água*" (CAMPOS, 2010).

Nesse contexto, a construção espontânea de pequenos reservatórios tem exercido papel fundamental na descentralização e acesso a água para parte da população mais vulnerável às secas (WISSER et al., 2010; de FRAITURE et al., 2014; FOWE et al., 2015; MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020). Os pequenos açudes embora não sejam capazes de atender expressivas demandas, especialmente por serem mais susceptíveis aos efeitos de secas (de ARAÚJO; BRONSTERT, 2016), cumprem um papel essencial para a sobrevivência das pequenas e esparsas comunidades rurais (de FRAITURE et al., 2014; FOWE et al., 2015; YOHANNES et al., 2017).

Embora essa notável importância na resiliência das civilizações situadas em

regiões de clima árido e semiárido, o uso da água armazenada pelos pequenos reservatórios possui conflitos estruturais e sociais (BRASIL, 2016). Com o convívio com a seca, pequenas comunidades e vilarejos possuem receio em usar os pequenos reservatórios de forma abrupta e sofrer o impacto da falta de água no decorrer do ano. Isso é observado como fator nobre, pois o abastecimento humano e animal é considerado prioritário tanto na política hídrica nacional (BRASIL, 1997) como também no subconsciente do pequeno agricultor. No entanto, essa demanda hídrica poderia ser atendida através de meios mais seguros, como, por exemplo, poços tubulares ou cisternas. O uso dos pequenos reservatórios tem sido apontado como prática essencial para reverter as perdas de produção causadas por veranicos durante o cultivo agrícola (WISSER et al., 2010; de FRAITURE et al., 2014; YOHANNES et al., 2017). Os mesmos autores sugerem que esses reservatórios sejam utilizados exclusivamente na produção agrícola irrigada, considerando que esta é a principal atividade dessas regiões no mundo.

Em muitas outras regiões no mundo, principalmente regiões de clima árido e semiárido, os pequenos reservatórios vêm sendo utilizados e indicados como fonte de suplementação hídrica para o aumento da produção agrícola em pequena escala (FAULKNER et al., 2008, DOUXCHAMPS et al., 2014, ACHEAMPONG et al., 2014, XIE et al., 2014, DOUXCHAMPS et al., 2015, POUSSIN et al., 2015, DUCROT, 2017, XIE et al., 2017, ACHEAMPONG et al., 2018, AYANTUNDE et al., 2018, TAMBURINO et al., 2020 , VICO et al., 2020). Entretanto, a utilização dos pequenos reservatórios tem sido pouco explorada em pesquisas científicas hidrológicas (FOWE et al., 2015) e, com isso, essas estruturas acabam subutilizados pelos órgãos gestores e pelas comunidades ribeirinhas, devido aos conflitos inseridos sobre a posse da água (OGILVIE et al., 2019).

A alocação da água na produção agrícola está sujeita, a priori, a três restrições: i) terra; ii) água e; iii) capital. Dentre essas, a restrição da água é recomendada em projetos de irrigação voltados para regiões semiáridas, notando que mesmo com poucos recursos de terra e capital, a água é o bem mais escasso por questões climáticas. Porém, os pequenos reservatórios não são incluídos de maneira efetiva nesses projetos por apresentarem baixa segurança hídrica durante todo o ciclo de produção de um dado cultivo.

Em regiões onde os pequenos reservatórios são utilizados na agricultura irrigada, a regra de operação é inexistente e, com isso, acarreta perdas na produção agrícola e no uso da água. Portanto, devido à insegurança na oferta hídrica para longos períodos, os pequenos reservatórios devem possuir uma destinação específica, que é a geração de renda para o pequeno agricultor. Porém, se faz necessário um estudo minucioso sobre os corpos hídricos da

região e a demanda para abastecimento humano e animal, de forma a garantir a dessedentação dos indivíduos para o sistema homem-água não colapsar (SIVAPALAN et al., 2015).

A regra de operação de reservatórios varia conforme as características climáticas, morfologia do reservatório e os usos propostos da água. Em função disso, a construção de um modelo de gestão para pequenos reservatórios torna-se ainda mais complexa, pois estes possuem menores vazões, atendem pequenas áreas irrigadas e têm alto risco de colapso hídrico. Desse modo, esse modelo deve inferir um uso prioritário da água em que possa ser inserido objetivos finais definidos pelos usuários. No caso do uso na agricultura irrigada, deve-se observar que a melhor forma de otimizar o uso da água é maximizando a renda e não a área cultivada. E desse modo, os agricultores serão capazes de gerir os pequenos reservatórios observando as necessidades locais. Essa observação é ainda mais crítica em regiões de clima seco, pois as características climáticas, que por sua vez, são altamente complexas, possuem interações com a existência de uma densa e crescente rede de pequenos reservatórios, por exemplo, existem cerca de 20.000 dessas estruturas apenas no estado do Ceará (PEREIRA et al., 2019).

2 HIPÓTESES

Diante da necessidade de coevolução do sistema acoplado humano-água e a inexistência de critérios técnicos ao uso do pequeno reservatório, foram formuladas algumas hipóteses no âmbito desta pesquisa de doutorado, que são:

- Os pequenos reservatórios podem gerar renda de forma consistente a longo prazo e podem ajudar na resiliência dos pequenos agricultores com a prática da agricultura irrigada;
- O paradigma de economizar a água de pequenos reservatórios em regiões semiáridas é inadequado, tendo em vista a baixa eficiência na distribuição hídrica e a reduzida vazão fornecida para uso na agricultura irrigada;
- Dada a variabilidade hidrológica, o uso ótimo da água de pequenos reservatórios para irrigação não deve seguir uma regra de operação única e, portanto, essas estruturas devem ser operadas de forma individual.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo de operação de reservatórios não estratégicos de forma a auxiliar a gestão da agricultura irrigada e melhorar o rendimento dos pequenos agricultores.

São objetivos específicos:

i. Desenvolver e aplicar um modelo estruturado para uso da água de pequenos reservatórios com a ótica de maximização da renda com a prática da irrigação em regiões de clima seco;
ii. Avaliar as respostas das variáveis de entrada do modelo em relação à renda máxima possível e à regra de operação e;
iii. Analisar os impactos das variáveis morfológicas e hidrológicas em torno da operação dos pequenos reservatórios inseridos no estado do Ceará.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Convivência ser humano/seca

A seca é um fenômeno natural presente em todos os climas na Terra, com características variadas entre as regiões e o que mais causa impactos a uma grande parcela da sociedade todos os anos. É um evento perigoso de início lento, de longa duração, associado à escassez de água e previsibilidade limitada (de ARAÚJO; BRONSTERT, 2016). Ela se materializa em uma redução da precipitação em relação à média histórica, que se estende por uma determinada escala espacial por um determinado período de tempo resultando, assim, em impactos. Nas últimas décadas, os episódios de seca tornaram-se mais generalizados e prolongados em muitas partes do mundo, com maiores impactos socioeconômicos e ambientais (FAO, 2017).

Segundo Srinivasan et al. (2012), as consequências de uma seca são regidas não apenas pelo grau e frequência de exposição, mas também pela vulnerabilidade da sociedade. Neste contexto, em regiões rurais, o setor agrícola suporta mais de 80% dos danos e perdas causados pelas secas, afetando a pecuária e a produção agrícola e tendo graves consequências para o abastecimento de alimentos e aos meios de subsistência, especialmente para pequenos proprietários e os membros mais pobres das sociedades rurais (FAO, 2017). Em casos graves, pode durar anos e ter efeitos devastadores na agricultura, na pecuária e no abastecimento de água (WILHITE et al., 2007). No Brasil, de acordo com a CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) a avaliação dos impactos da seca em áreas de atividades agrícolas e/ou pastagens (agroprodutivas), o estado do Rio Grande do Norte, situado na região semiárida brasileira, obteve o maior número de municípios com impacto da seca superior a 80% da área agroprodutiva.

Diante do processo de convivência do homem com a seca, buscando resiliência à escassez hídrica e subsistência de forma a garantir alimento, as sociedades desenvolveram formas de adaptação (DI BALDASSARRE et al., 2019), com isso a construção de barramentos estratégicos tornou-se a forma mais simples e barata de garantir aporte hídrico em meio a prolongadas secas. Devido a isso, comunidades construíram, de forma espontânea e sem controle governamental, milhares de pequenos reservatórios (PETER et al., 2014) de forma a garantir suprimento hídrico durante a estação seca para diversos usos, como: dessedentação de animais, uso doméstico, irrigação de pequenas lavouras, entre outros. Na região Nordeste do Brasil, onde tem a predominância do clima semiárido, o abastecimento

hídrico é fortemente dependente de reservatórios superficiais (GAISER et al., 2003; MAMEDE et al., 2012; PETER et al., 2014; MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020; NUNES; MEDEIROS, 2020).

4.2 Papel dos reservatórios em regiões secas

Em ambientes secos, o principal objetivo dos reservatórios de superfície é melhorar a disponibilidade de água. A prática de armazenamento de água das chuvas em reservatórios superficiais como medida de conter impactos da seca acarretou em melhorias nas condições socioeconômicas e de subsistência local. Na região seca do Nordeste brasileiro, por exemplo, os reservatórios superficiais fornecem mais de 90% do abastecimento de água (GAISER et al., 2003).

No Nordeste do Brasil é comum que as secas afetem drasticamente as lavouras (MAMEDE et al., 2012) e também o abastecimento hídrico para os fins nobres (dessedentação humana e animal). Diante disso, as construções de grandes reservatórios asseguraram o abastecimento de água durante longos períodos de escassez de chuvas e assim fortalecendo a economia da região. Durante os períodos recorrentes de escassez de água, quando surgem conflitos sociais, regras de operação eficientes para usos múltiplos - um requisito para alocação eficiente de água em reservatórios – tornam-se um grande desafio (de ARAÚJO et al., 2018). A legislação brasileira sobre os recursos hídricos, por exemplo, dispõe que os usos múltiplos em torno da água devem ser ofertados, mas que em situação de escassez hídrica os usos da água devem ser priorizados para a dessedentação humana e animal.

Apesar da reconhecida importância dos reservatórios em reduzir a frequência de secas hidrológicas, a dependência da sociedade em tais estruturas aumenta a vulnerabilidade, o que pode potencializar os efeitos negativos das secas (DI BALDASSARRE et al., 2018) devido a problemas sistêmicos e governamentais na distribuição da água (MOREIRA, 2018) e, assim, levando ao colapso do sistema caso os reservatórios venham a secar (KUIL et al., 2016) e têm fortes impactos sobre a hidrologia em escalas regionais e globais (HABETS et al., 2018). A má gestão hídrica dessas estruturas tem afetado negativamente a fração mais vulnerável da população. Nesse caso é imprescindível uma avaliação a longo prazo em escalas regionais dos riscos que o consumo da água irrestrita possa promover (de FRAITURE; GIORDANO, 2014).

A partir do aumento do capital hidráulico local, ocorreu uma grande pressão para a construção de pequenos reservatórios (van der ZAAG; GUPTA, 2008) pelo seu custo

reduzido e disponibilidade de rios favoráveis ao barramento, em comparação com os grandes reservatórios, e ao acesso fácil ao produtor (FOWE et al., 2015, HABETS et al., 2018). Os pequenos reservatórios desempenham um papel significativo na subsistência rural e para apoiar o uso da água durante a estação seca, particularmente para irrigação e gado em áreas rurais (WISSER et al., 2010).

Na região Nordeste do Brasil, a construção desses pequenos açudes, no entanto, levou a uma densa rede de reservatórios que, devido às altas taxas de evaporação em regiões de clima seco, associadas a pequenos volumes armazenados e a má gestão hídrica, fez com que esses reservatórios fossem deixados de lado pelos órgãos governamentais de gestão e planejamento dos recursos hídricos, por serem meios de abastecimento inseguro, desse modo, motivando a utilização desses reservatórios apenas como bebedouros temporários para dessedentação animal.

Muitas regiões do mundo também possuem densa rede de pequenos reservatórios, por exemplo, na Índia existem cerca de 208.000 pequenos reservatórios (chamados de 'tanques') (PALANISAMI et al., 2010), em Burkina Faso e norte de Gana na bacia do Volta existem mais de 1.700 pequenos reservatórios espalhados (VENOT; CECCHI, 2011) e muitos desses são abandonados por problemas hidráulicos. Venot e Krishnan (2011) realizaram um levantamento da quantidade de pequenas barragens em várias regiões pelo mundo (Tabela 1).

Tabela 1 - Distribuição de pequenos reservatórios em países selecionados

País	Quantidade	País	Quantidade
África Subsaariana		*Norte da África e Oriente Médio*	
Burkina Faso	> 1700	Argélia	> 1000
Etiópia	> 110	Marrocos	> 120
Gana	> 1000	Tunísia	> 610
Costa do Marfim	> 600	Síria	> 50
Mali	~ 800	*Restante do Mundo*	
Mauritânia	~ 350	Brasil (Nordeste)	> 70.000
Moçambique	> 600	Índia	> 208.000
Nigéria	~ 100	México	~ 12.000
Uganda	~ 425	Tailândia	~ vários milhares
Zâmbia	2000-3000	Sri Lanka	> 15.000
Zimbábue	~ 10.000	Ceará (Brasil)*	~ 20.000

Fonte: Venot e Krishnan (2011) editado.
* Pereira et al. (2019)

A construção espontânea de pequenos reservatórios, em muitos casos em área de difícil acesso, impediu o monitoramento de suas características hidráulicas dificultando assim

uma gestão apropriada. A partir desse contexto, os pequenos reservatórios receberam menos atenção da comunidade científica e pelos órgãos de planejamento, ocasionando perda de informações que são necessárias para um uso eficiente da água (de FRAITURE et al., 2014, FOWE et al., 2015). Contudo, com a adição de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, a capacidade de monitoramento foi aperfeiçoada através das pesquisas científicas, desse modo extraindo algumas características necessárias para efetuar uma gestão hidrológica apropriada nessas estruturas (ver em PEKEL et al., 2016; PEREIRA et al., 2019).

Segundo de Araújo et al. (2009) relatam que uma política de desenvolvimento descentralizada pode compensar os possíveis efeitos graves das tendências climáticas da seca na região semiárida do Brasil sobre a disponibilidade futura de água.

4.3 Uso de pequenos reservatórios na agricultura

Em face a mudanças climáticas globais, que é caracterizada por crescente demanda hídrica e suprimentos de água cada vez mais variáveis, a distribuição equitativa da água e a proteção contra a seca dos meios de subsistência rurais exigirão uma capacidade física cada vez maior de armazenar água. Isso é especialmente verdadeiro para as regiões semiáridas e subúmidas secas da África Subsaariana, da Ásia (van der ZAAG; GUPTA, 2008) e na região semiárida do Brasil (MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020). A importância dos pequenos reservatórios nesse contexto é inegável, pois eles desempenham um papel fundamental na resiliência de pequenos produtores rurais. Os pequenos produtores são vitais para a segurança alimentar, especialmente em países em desenvolvimento (PANDE; SAVENIJE, 2016), visto que eles produzem até quatro quintos dos alimentos no mundo em desenvolvimento (FAO, 2011).

Um dos principais usos diretos da água dos pequenos reservatórios da África Ocidental é a irrigação (POUSSIN et al., 2015). Diante disso, os governos e colaboradores financeiro têm incentivado a construção de pequenos reservatórios para aumentar a produção de cereais irrigados a jusante (VENOT; KRISHNAN, 2011). Contudo, a quantidade de pequenos agricultores que se dedicam à irrigação por meios próprios é crescente (de FRAITURE; GIORDANO, 2014) o que limita a expansão da agricultura de pequeno porte. As autoras defendem que a pequena irrigação privada seja expandida, sendo observado que essa prática difere dos esquemas públicos, pois é iniciada e financiada pelos próprios agricultores locais, é operado e gerenciado individualmente ou em pequenos grupos de agricultores, as áreas irrigadas são pequenas, normalmente menos de dois hectares (2 ha) com tecnologias de

baixo custo. Nessas regiões, os agricultores cultivam safras de alto valor de mercado, proporcionando uma renda em dinheiro muito necessária durante a estação seca e por ser um fenômeno espontâneo sem necessidade de regulação governamental.

Na África Subsaariana, há evidências de que as famílias com acesso à irrigação em pequena escala são significativamente menos pobres do que as famílias que não têm acesso à irrigação, porém os acessos a equipamentos de irrigação tendem a ter distribuição desigual por existir benefícios ocultos apropriados pelas elites locais (DUCROT, 2017). No estado Ceará, por exemplo, durante a grave seca plurianual que se iniciou no ano de 2012 foi observado a priorização da demanda hídrica para as indústrias, acarretando em perdas na agricultura em diversas escalas, sendo que os critérios utilizados na oferta hídrica não foram justificados pelos órgãos governamentais (de ARAÚJO et al., 2018).

Poussin et al. (2015) observaram na bacia do Alto Volta dois esquemas de irrigação, onde um fica em Burkina Faso e outro em Gana, que foram capazes de melhorar as condições de meios de subsistência através da agricultura com produção de insumos para pecuária mesmo com falhas sistêmicas na gestão agrícola/organizacional, e através da piscicultura. Os autores fomentaram que as autoridades locais geralmente consideram a preservação da água nos pequenos reservatórios como prioritária como forma de reduzir os impactos na qualidade e quantidade de água disponível durante o ano. Essa prática adotada reduz a produção agrícola e não garante segurança hídrica para os fins de consumo humano e animal devido a alta vulnerabilidade à seca e ao assoreamento que pequenos reservatórios possuem (LIMA NETO et al., 2011; de ARAÚJO; BRONSTERT, 2016).

O incremento no uso dos pequenos reservatórios na agricultura tem capacidade de aumentar substancialmente a produção agrícola local (WISSER et al., 2010) agregando valor a água armazenada nessas estruturas (de FRAITURE et al., 2014), porém com necessidade de participação coletiva para obter resultados satisfatórios na produção agrícola e na redução dos impactos ocasionados pelo manejo inadequado nos reservatórios (POUSSIN et al., 2015).

A agricultura familiar tem grande importância para o Brasil, pois está presente em mais de 2 milhões de estabelecimentos agropecuários, ocupa uma área de aproximadamente 28 milhões de hectares e envolve 8,6 milhões de pessoas, das quais 38% residem no Semiárido (EMBRAPA, 2019).

4.4 Operação de reservatórios na agricultura irrigada

O uso de pequenos reservatórios na irrigação privada e/ou de pequeno porte em pequenas comunidades é visto de forma positiva por diversos autores em muitas regiões do mundo, destacando pesquisas realizadas em países com clima seco, pobres e/ou em desenvolvimento. No entanto, alguns fatores locais dificultam um uso racional da água para garantir a maximização da renda aos agricultores, por exemplo: 1) o uso desordenado da água dos reservatórios sem uma distribuição igualitária aos irrigantes; 2) falta de regulação e apoio dos órgãos de governo no gerenciamento da água e no financiamento aos pequenos agricultores, respectivamente; 3) baixa capacidade de investimento dos agricultores em tecnologias de irrigação que ajudem a otimizar o uso da água na irrigação; 4) poucas pesquisas científicas voltadas a operação de pequenos reservatórios e; 5) a insegurança no abastecimento hídrico para os consumos básicos (humano e animal).

Ogilvie et al. (2019) comentam que algumas regiões semiáridas do mundo possuem milhões de pequenos reservatórios, em função disso, a dispersão e a escala geográfica dificultam uma melhor compreensão dos sistemas irrigados acoplado humano-água e a identificação de estratégias adequadas para apoiar os agricultores ribeirinhos. Além disso, o acesso desigual a irrigação e equipamentos de irrigação causam um descontentamento ao nível de comunidade o que acaba prejudicando a capacidade de coesão em ações coordenadas coletivas (DUCROT, 2017). Assim a necessidade de uma visão holística da dinâmica do pequeno produtor é, portanto, necessária para entender quais restrições específicas do local são críticas para a subsistência do pequeno produtor (PANDE; SAVENIJE, 2016).

Alguns bons exemplos estão notificados na academia, por exemplo, Yohannes et al. (2017) observaram no Norte da Etiópia melhorias nas condições de subsistência a partir do uso racional da água de um pequeno reservatório e a partir da criação de uma associação de produtores agrícolas. A irrigação privada e pequeno porte já dominam a paisagem no Sul da Ásia. Estudos demonstram o impacto positivo substancial na redução da pobreza, proporcionando a milhões de pequenos proprietários de irrigação receitas líquidas de até US$ 7,5 bilhões por ano ao todo, mesmo considerando a hidrologia, agronomia, acesso ao mercado e fatores de mercado (de FRAITURE; GIORDANO, 2014). As autoras comentam que essa atividade desempenha um papel crucial na geração de receita durante a estação seca e está em uma crescente proliferação no Sul da Ásia e se espalhando na África Subsaariana.

O crescimento da irrigação privada desorientada pode causar problemas sociais e ambientais. Por exemplo, Sivapalan e Blöschl (2015) argumentam que o processo de aumento na demanda no consumo da água pode trazer à tona fenômenos emergentes nos sistemas hídricos em constantes mudanças, como o "*peak water paradox*", adaptação às mudanças,

bloqueio ou restrições do sistema e colapso do sistema devido ao seu esgotamento. Kandasamy et al. (2014) relataram a necessidade de uma gestão sustentada por modelos de sistema acoplado de sócio-hidrologia a longo prazo que incluem explicitamente o acoplamento bidirecional entre os sistemas humano e hidrológico, incluindo a evolução lenta dos valores humanos e normas relativos à água e ao meio ambiente.

Nesse contexto, Tamburino et al. (2020) avaliam que o uso de tanques em fazendas (pequenos reservatórios) na irrigação tem resultados promissores, caso seja bem planejado e com direito de acesso igualitário, e ainda evitam demanda excessivas nos reservatórios subterrâneos profundos, os quais possuem renovação hídrica menor que os reservatórios superficiais. Vico et al. (2020) desenvolveram um modelo para determinar o tamanho do tanque mais adequado na fazenda, de acordo com dois critérios: maximização do rendimento médio (ou seja, maximização da produção) e obtenção de um rendimento mínimo aceitável (ou seja, minimização do risco, levando em consideração a aversão ao risco do agricultor). Os autores observaram que a longo prazo a maximização do rendimento e a minimização do risco são objetivos difíceis de conciliar.

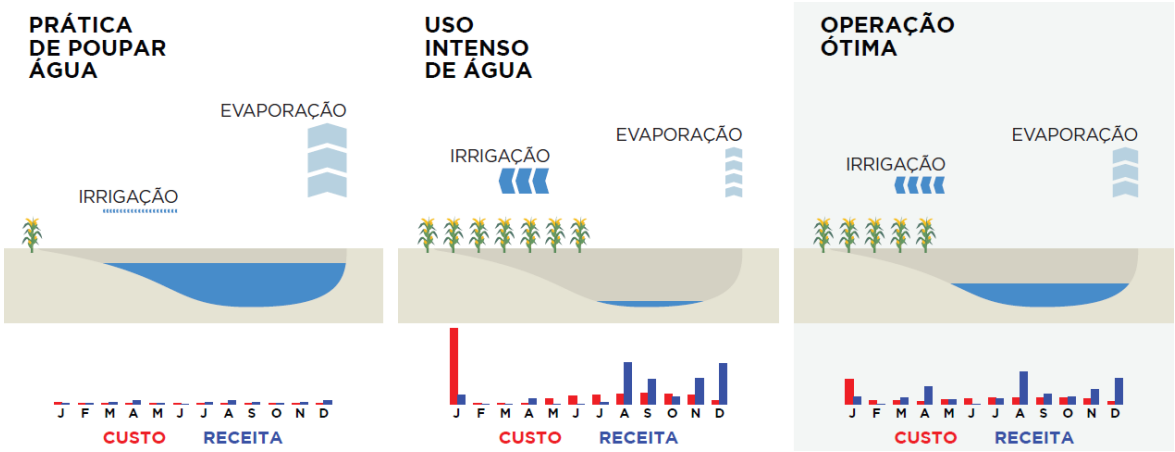
O semiárido do Brasil, em especial no estado do Ceará, é subdividido em regiões hidrográficas, as quais possuem pelo menos um grande reservatório para o desenvolvimento dos grandes centros (polos irrigados e indústrias) e também para estratégia na mitigação de períodos de secas recorrentes. Além disso, o estado possui uma densa rede de pequenos reservatórios (cerca de 20.000, ver em PEREIRA et al., 2019) os quais, a grande maioria, são utilizados apenas como bebedouros para atividade pecuária, ocasionando baixo valor agregado a água nesses reservatórios. Portanto, é necessário que exista uma coevolução entre o sistema acoplado humano-água sobre o uso racional da água de pequenos reservatórios em regiões secas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Desenvolvimento do modelo NeStRes

O NeStRes é um modelo de operação de pequenos reservatórios não estratégicos para irrigação em terras áridas, que visa maximizar a receita na agricultura de pequena escala. O conceito envolvido é: avaliar o *trade-off* entre evaporação e retirada da água para irrigação, de modo a evitar o risco de perda da safra. A prática de economizar água para irrigação contínua reduz o risco de escassez nos períodos secos, porém elevadas perdas por evaporação direta e pequena conversão do volume armazenado no reservatório para retirada, acarretando quantidades menores provindas da agricultura irrigada. Por outro ponto de vista, o uso intenso da água permite maiores áreas cultivadas, com isso elevando o risco de esvaziamento total do reservatório antes do fim do ciclo produtivo de uma dada cultura, o que pode resultar em perdas de safra por déficit hídrico (Figura 2).

Figura 2 – Esquema teórico para estimativa do volume de segurança para agricultura irrigada com base na relação *trade-off* entre evaporação e irrigação.



O modelo simula o arranjo agrícola baseado na dinâmica dos reservatórios na escala de tempo diária, admitindo a água como sendo o fator limitante principal, e é composto por três módulos: a) modelo hidrológico para cálculo da disponibilidade hídrica; b) módulo agrícola que simula o sistema de produção agrícola; c) módulo econômico, para quantificação da renda do agricultor com a atividade agrícola.

No módulo hidrológico, a disponibilidade de água é avaliada pelo cálculo da dinâmica temporal no reservatório observando o princípio da conservação de massa (Equações 1 a 3, de ARAÚJO et al., 2006):

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \tag{1}$$

$$Q_{in} = Q_R + Q_P + Q_G \tag{2}$$

$$Q_{out} = Q_E + Q_I + Q_S + Q_{Abs} \tag{3}$$

Em que: dV (m³) é a variação do volume armazenado no reservatório durante o intervalo de tempo dt; Q_{in} é a soma de todas as entradas (fluxo devido ao escoamento - Q_R, precipitação direta no lago - Q_P; recarga subterrânea - Q_G) e Q_{out} é a soma de todas as saídas (evaporação - Q_E, infiltração - Q_I, derramamento - Q_S, retirada para abastecimento de água - Q_{Abs}), sendo todas as vazões calculadas em $m^3 \cdot dia^{-1}$. Para aplicação do modelo no estado do Ceará, infiltração e recarga subterrânea são consideradas insignificantes de acordo com trabalhos anteriores (CAMPOS, 2010).

A vazão afluente (Q_R) foi calculada utilizando o modelo *Curve Number* (*CN*) que se baseia em estimar o escoamento superficial direto (*Pe*) em função de precipitações individuais em pequenas e médias bacias hidrográficas. Neste estudo foi calibrado um valor de *CN* para cada dado de escoamento superficial médio fornecido pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH-CE). Dessa forma, foram obtidas séries de escoamentos superficiais diretos em cada posto pluviométrico mais próximo ao reservatório a ser estudado.

$$S = \left(\frac{25400}{CN}\right) - 254 \tag{4}$$

$$Pe = \frac{(P - 0{,}2 \cdot S)^2}{P + 0{,}8 \cdot S} \tag{5}$$

Em que: S é capacidade total de água no solo e função do *CN* (mm); *Pe* é o escoamento superficial (mm); P é a precipitação (mm).

A disponibilidade hídrica do reservatório é estimada através da simulação de diferentes captações para abastecimento de água (Q_{Abs}), que fornecem pares de vazão de água do reservatório e o respectivo nível de garantia. O nível de garantia do abastecimento diário de água (G) é calculado de acordo com a Equação 6.

$$G = 1 - \left(n_u / n \right) \tag{6}$$

Em que: n_u é número de dias com falhas no abastecimento e n o número total de dias simulados.

A geometria do reservatório é representada por uma função potencial, calibrada a partir das curvas de cota/área/volume (ver Pereira et al. 2019):

$$V(h) = K \cdot h^{\alpha} \tag{7}$$

$$A(h) = \alpha \cdot K \cdot h^{\alpha - 1} \tag{8}$$

Em que: *V(h)* é o volume do reservatório em função do nível da água (*h*) (m³); *A(h)* é a área alagada em função do nível da água (m²); *h* é o nível da água (m); *K* e *α* são os coeficientes de abertura e forma, respectivamente. É mostrado a partir das Equações 1 a 8 que a retirada e a evaporação da água são conflitantes: maior retirada reduz o volume do reservatório e a área alagada, consequentemente promovendo menor perda de água devido à evaporação, e vice-versa (ver, por exemplo, Campos et al. 2016).

No módulo agrícola, o balanço hídrico da cultura é calculado, também em uma escala diária, considerando o manejo da irrigação via clima, ou seja, a demanda hídrica da cultura é igual à demanda atmosférica, para definir quando e quanto irrigar. O módulo considera a irrigação e a precipitação efetiva (método recomendado pela FAO (2010), ver a Equação 10) como componentes de entrada, enquanto as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e consumo de água pelas plantas (evapotranspiração) como os componentes de saída. Com o manejo adequado, a irrigação é promovida apenas para atingir a capacidade de campo, podendo-se assim eliminar o escoamento superficial, a percolação profunda e a evaporação direta, restando irrigação, precipitação e evapotranspiração (BRASIL e MEDEIROS, 2020).

$$\mathrm{Peff}_i = \begin{cases} P_i \times \left(\dfrac{4{,}17 - 0{,}02 \times P_i}{4{,}17} \right) & P_i < 83\mathrm{mm} \\ 41{,}7 + 0{,}1 \times P_i & P_i \geq 83\mathrm{mm} \end{cases} \tag{9}$$

Em que: *Peff* é a precipitação efetiva ou parte da chuva que fica efetivamente disponível para as plantas (mm).

A evapotranspiração de referência é estimada utilizando-se a equação

parcimoniosa proposta por Hargreaves e Samani (1985, Equação 10). A escolha desse método de evapotranspiração de referência se dá pela limitação de dados climatológicos a longo prazo e pela oportunidade de ajustes numéricos que visam aprimorar a precisão da evapotranspiração (LIMA JÚNIOR et al., 2016).

$$\mathrm{ETo} = 0,408 \cdot \left(\mathrm{T_{max}} - \mathrm{T_{min}}\right)^{0,5} \cdot 0,0023 \cdot \left(\mathrm{T_{av}} + 17,8\right) \cdot \mathrm{Ra} \tag{10}$$

$$\mathrm{ETc} = \mathrm{ETo} \cdot \mathrm{kc} \tag{11}$$

Em que: *ETo* é a evapotranspiração de referência (mm); T_{max}, T_{min} e T_{av} são as temperaturas máxima, mínima e média (°C), respectivamente; *Ra* é a radiação solar no topo da atmosfera (MJ.m^{-2}); *ETc* é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm) e; *kc* é o coeficiente de evapotranspiração da cultura para a cultura no dia i (adimensional).

A irrigação varia no tempo, e é definida para elevar o teor de água do solo à capacidade do campo antes que a cultura esteja sujeita ao estresse hídrico. A condição de irrigação é que a umidade do solo seja igual ou menor do que a água facilmente disponível (W_{Ra}, Equação 12), ou seja, pode ser extraído do solo sem que a cultura sofra com os efeitos do estresse hídrico. W_{Ra} é calculado como uma porcentagem da água máxima disponível no solo (W_{Max}, Equação 13).

$$\mathrm{W_{Ra}} = \mathrm{W_{max}} \cdot \mathrm{f} \tag{12}$$

$$\mathrm{W_{max}} = \left(\theta_{\mathrm{FC}} - \theta_{\mathrm{WP}}\right) \cdot \left(\rho_{\mathrm{s}} / \rho_{\mathrm{W}}\right) \cdot \mathrm{Z_{RD}} \tag{13}$$

Em que: W_{Ra} é a água prontamente disponível para as plantas (mm); *f* é a fração de água solo em que a cultura começa a sentir os efeitos do estresse hídrico (adimensional); W_{Max} é a disponibilidade máxima de água no solo (mm); θ_{FC} e θ_{WP} são as umidades do solo na capacidade do campo e no ponto murcho (%), respectivamente; ρ_s e ρ_W são os pesos específicos do solo e água (g.cm^{-3}); Z_{RD} é a profundidade da zona raízes (cm).

A disponibilidade total de água no solo no dia i (d_{ws_i}) é calculada a partir da água disponível no início do dia i ($d_{ws_0} = W_{Max}$), evapotranspiração da cultura no dia anterior (ETc_{i-1}), precipitação efetiva do dia i ($Peff_i$) e lâmina líquida de irrigação do dia anterior (d_{nir_i-1}), todas as variáveis em mm (Equação 14).

$$\mathrm{d_{ws_i}} = \mathrm{d_{ws_0}} - \mathrm{ETc_{i-1}} + \mathrm{Peff_i} + \mathrm{d_{nir_i-1}} \tag{14}$$

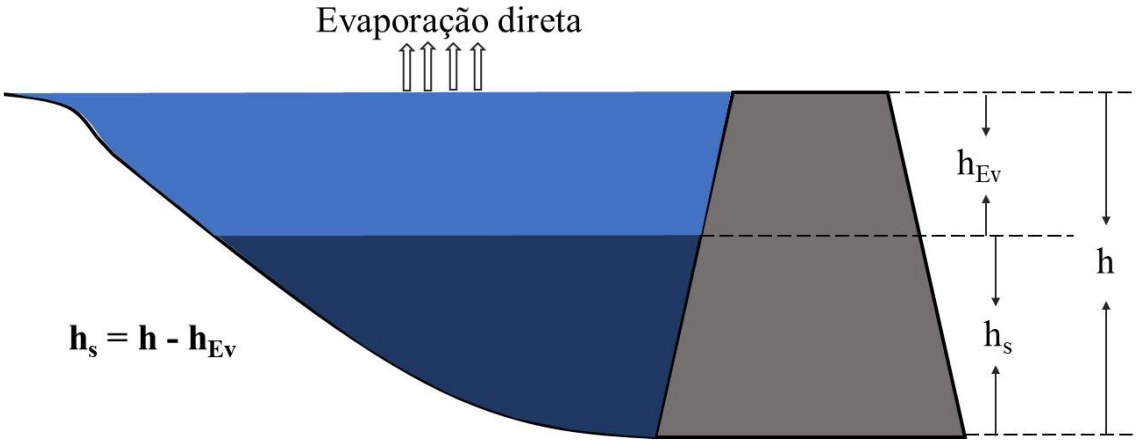
A lâmina líquida de irrigação (d_{nir_i-1}) é definida com a exigência para que o solo

atinja a disponibilidade máxima de água (W_{Max}), e a adoção da irrigação depende da disponibilidade de água no solo (d_{ws_i}), segundo a Equação 15.

$$d_{nir_i} = \begin{cases} W_{max} - \left(d_{ws_i} - ETc_i\right) & d_{ws_i} \leq W_{RA} \\ 0 & d_{ws_i} > W_{RA} \end{cases} \quad (15)$$

A admissão da água como o principal fator limitante em regiões secas, a área real para cultivo (A_{max}) foi definida com base no volume observado no reservatório no início de cada ciclo produtivo, de modo a melhor relacionar o *trade-off* entre a evaporação direta e a demanda da irrigação e evitando, assim, o esvaziamento do reservatório antes do fim ciclo produtivo. O volume de água de segurança (V_s) é definido a partir de um nível de água de segurança (h_s), que é a diferença entre nível de água presente no reservatório no início de um ciclo produtivo de uma dada cultura (h) com a evaporação potencial direta máxima durante um ciclo produtivo (h_{Ev}) (Figura 3).

Figura 3 – Esquema teórico para estimativa do volume de segurança para relação *trade-off* com a agricultura irrigada.



A Figura 3 demonstra a dependência de uma gestão agrícola para culturas que possuem ciclo produtivo curto (culturas anuais), desse modo reduzindo o *trade-off* a favor da suplementação da irrigação. O volume de água armazenado no reservatório disponível para a irrigação foi determinado através das equações as seguir:

$$h_{Ev} = tc \cdot \frac{Ev_{max}}{30} \quad (16)$$

$$V_s = V_i - V_{Ev} \quad (17)$$

$$V_s = K \cdot \left(h - h_{Ev}\right)^{\alpha} \tag{18}$$

$$V_s = K \cdot h_s^{\alpha} \tag{19}$$

Em que: *tc* é a duração de um ciclo produtivo de uma cultura (dias); Ev_{max} é a evaporação potencial máxima no decorrer de 30 dias (m); V_i é o volume de água armazenada no reservatório (m³) e; V_{Ev} é o volume de água evaporada direta no decorrer de 30 dias (m³).

A partir disso, a demanda de água pela evapotranspiração de uma cultura, por área cultivada, é determinada a partir da Equação 20.

$$q_d = \frac{DHC \cdot kc_{max}}{tc} \cdot 10 \tag{20}$$

Em que: q_d é a demanda de água por unidade de área de uma cultura ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$); *DHC* é a demanda hídrica média de uma cultura (mm); kc_{max} é o coeficiente de cultivo durante o período de maior demanda hídrica da cultura (adimensional).

A área potencial cultivável é determinada pela relação entre a água retirada para a irrigação (*Qabs*) e a demanda da cultura por unidade de área (ver Equação 21). Essa relação determina o limite da área cultivada a partir da demanda de uma cultura durante um ciclo.

$$A_P = \frac{Q_{abs}}{q_d} \tag{21}$$

Em que: Ap é a área potencial para cultivo de uma cultura para uma vazão de retirada fixa *Qabs(G)* (ha).

O volume de água a ser retirado do reservatório para irrigação no dia i (Q_{Abs_i}) é calculado pelo produto da lâmina bruta de irrigação necessária no dia i (d_{gir_i}) para evitar estresse hídrico na cultura, pela área máxima disponível para cultivo (A_{max}, Equação 22). A lâmina bruta de irrigação exigida no dia i (d_{gir_i}) é dada pela razão da lâmina líquida de irrigação exigida no dia i (d_{nir_i}) pela eficiência do sistema de irrigação em relação ao uso da água.

$$A_{max} = \begin{cases} Min\left(\dfrac{V_s}{tc \cdot q_d}, A_P\right) & h_i > h_{Ev} \\ 0 & h_i \leq h_{Ev} \end{cases} \tag{22}$$

$$V_{abs} = 10 \cdot LB \cdot A_{max} \tag{23}$$

Em que: A_{max} é área cultivada real em um ciclo produtivo (ha); V_{abs} é o volume de água real para uso na irrigação (m³); *LB* é a lâmina bruta de irrigação (mm).

Como o manejo de irrigação adotado foi o de turno de rega variável, desse modo, o volume de água no reservatório será subtraído de V_{abs} ao final de cada dia quando a irrigação for necessária na simulação. No processo de definição da área cultivada real no modelo, $\mathrm{Min}\left(\frac{V_s}{tc \cdot q_d}, A_P\right)$, o cultivo de sequeiro durante a estação chuvosa só é possível quando a condição apresentada na equação 22 for atendida. E, assim, garante-se que a cultivo não sofrerá perdas por estresse hídrico.

Por fim, o módulo econômico calcula um balanço considerando os custos e as receitas do sistema de produção agrícola. Os custos referem-se à produção (preparo do solo, sementes, agrotóxicos, mão de obra, entre outros); eletricidade; e custo de aquisição inicial do sistema de irrigação. A receita corresponde ao valor obtido com a venda da produção ao final do ciclo da cultura, admitindo-se um preço fixo ($R\$ \cdot kg^{-1}$) do produto.

Esses dados são calculados diariamente e estão sujeitos a cobrança de juros (no caso de dívidas) e rendimento de poupança (no caso de balanço positivo). E ao fim da simulação é maximizada uma renda mensal que se pode adquirir através do uso dos pequenos reservatórios na produção do milho.

$$RL = RB - Ct \tag{24}$$

$$RL = RB - \left(Cp + Ce + Ic \pm Rs\right) \tag{25}$$

$$RL_n = 0 \rightarrow \mathrm{Max}\left(Ic\right) \tag{26}$$

Em que: *RL* é a receita líquida na produção agrícola (R$); *RB* é a receita bruta na produção agrícola (R$); *Ct* são os custos totais na produção agrícola (R$); *Cp* são os custos de operação da agricultura ($); *Ce* são os custos da energia elétrica (R$); *Ic* é a renda mensal do agricultor adquirida na produção agrícola (R$); *Rs* é o rendimento do saldo sendo positivo ou negativo (R$); o índice n é a contagem do último dia de simulação no modelo NeStRes.

Com a metodologia descrita acima, é necessário que se observe algumas limitações existente no modelo NeStRes, que são: 1) a água armazenada no reservatório acima da cota de sangria é totalmente retirada ao fim do dia de simulação sem que haja a equação do vertedouro; 2) não existem restrições nas condições de solo, drenagem e

nutrientes, dessa forma garantindo rentabilidade máxima para uma dada cultura; 3) não há variação no crescimento e atividade das raízes; 4) não há restrição de comercialização de uma dada cultura e o preço de venda é fixo.

Diante dessas limitações, citadas acima, se faz necessário uma análise local das condições de solo e clima, valor agregado atual da cultura no momento da simulação, análise de quantidade máxima comercializável de uma determinada cultura para uma região, observar a função exercida pelo reservatório e analisar a legislação vigente sobre o uso consultivo da água dos reservatórios.

5.2 Aplicação do NestRes

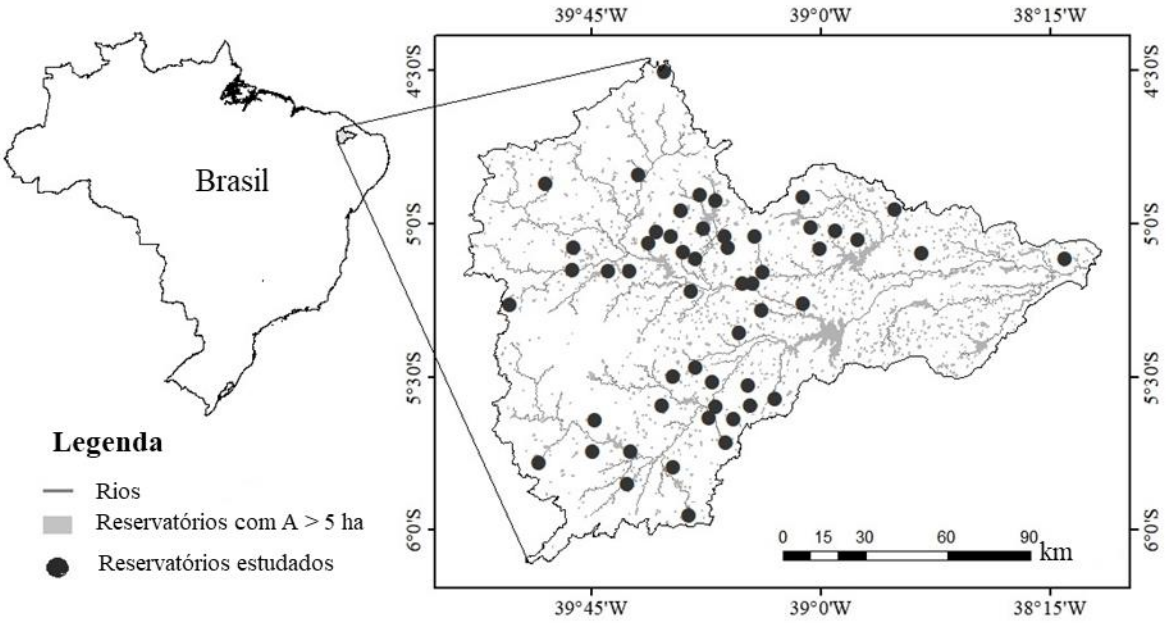
Na primeira etapa da pesquisa, o modelo foi aplicado em 91 reservatórios (capacidade de armazenamentos máximos entre $3{,}5 \cdot 10^5$ a $1{,}7 \cdot 10^7$) localizados na Bacia do Rio Banabuiú (BRB), com aproximadamente 19.800 km² no Nordeste do Brasil (Figura 4). De acordo com a classificação climática de Köppen, a bacia é de clima semiárido quente (BSh), com temperaturas médias mensais variando entre 25 ºC a 29 ºC, a precipitação média ficando em torno dos 700 mm e evaporação potencial de até 2000 mm por ano (INMET, 2018). A precipitação mensal é consideravelmente variável no tempo (MEDEIROS; de ARAÚJO, 2014): a estação chuvosa está concentrada entre os meses de fevereiro até maio, responsável por 75% da precipitação anual e uma média de 36 dias por ano com precipitação superior a 5 mm.

Geologicamente, BRB é caracterizada por ocorrência de embasamento cristalino, com disponibilidade hídrica subterrânea muito limitada e espacialmente heterogênea, a exceção o aquífero aluvial nas proximidades na foz da bacia. Os solos são geralmente pouco profundos, com profundidade na ordem de 1 m, que associadas às características climáticas, resultam em rios intermitentes. A variabilidade temporal das vazões nos rios é muito dissertada (FIGUEIREDO et al., 2016) e o coeficiente de variação é da ordem 1,4.

A escassez e a alta variabilidade temporal da disponibilidade hídrica levou à construção de milhares de barragens, gerando uma rede de reservatórios muito densa com mais de 1000 reservatórios com áreas superficiais maiores que 5 hectares na BRB (PEREIRA et al., 2019). Prevalece a prática conservadora de economizar água nos reservatórios, valor cultural resultante de: 1) intensos impactos socioeconômicos das secas do passado; 2) operação de reservatórios com alta garantia, introduzida por técnicos para estruturas estratégicas de abastecimento humano e surgindo como diretriz independente dos usos da

água. No entanto, a maioria dos pequenos reservatórios não estratégicos são incapazes de lidar com períodos extensos de seca e, desse modo, esvaziam, devido às altas taxas de evaporação potencial, mesmo sem retirada de água para uso humano.

Figura 4 – Bacia do Rio Banabuiú e os 91 reservatórios analisados.



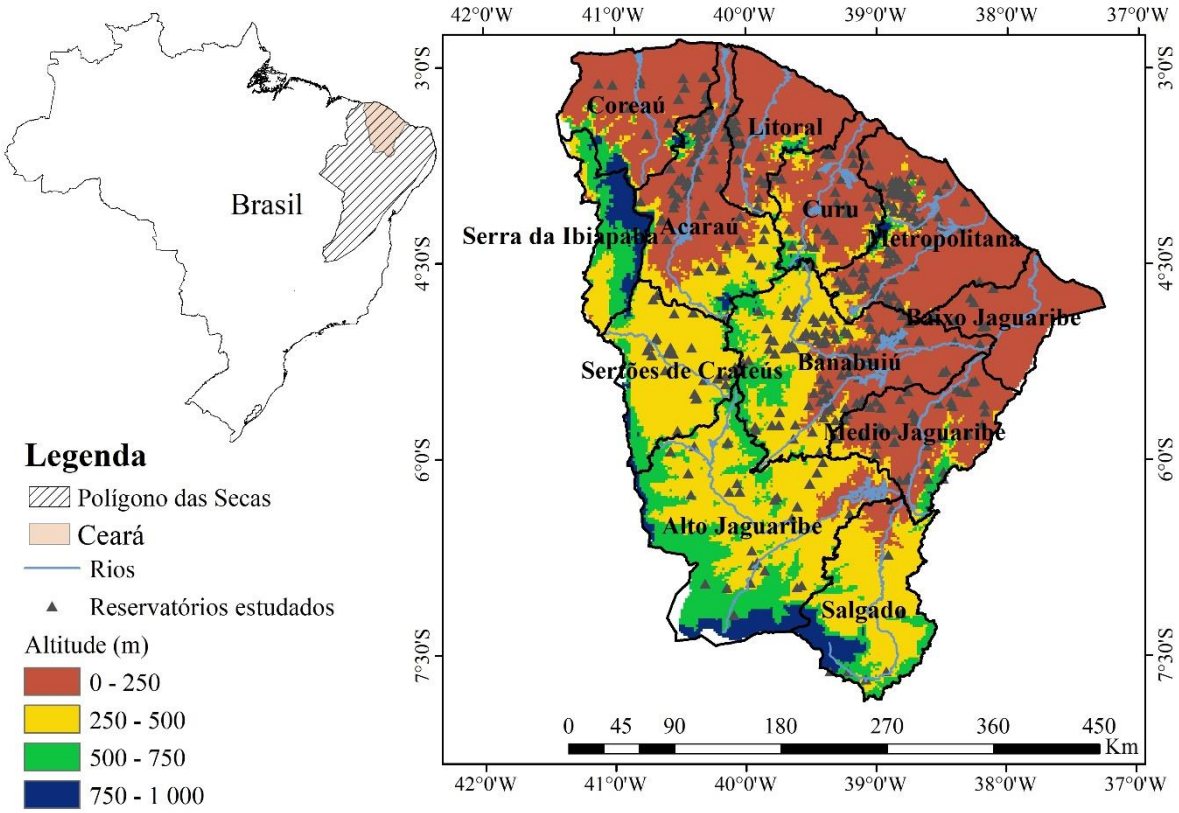
Os pequenos reservatórios na BRB foram simulados ao longo de um período de 108 anos (1910-2017), para os quais tinham disponíveis dados de precipitação diários de quatro estações pluviométricas distribuídas na referida bacia (ANA, 2018). Outros dados climáticos, como, evaporação potencial, temperatura máxima e mínima, foram coletados em duas estações climatológicas (INMET, 2018). Os dados climáticos foram definidos para cada reservatório simulado em relação à estação climatológica mais próxima. A vazão afluente diária para os reservatórios (Q_R, na Equação 2) foi calculada aplicando-se o método empírico *Curve Number* (*CN*) (USDA, 1986), usando a série de tempo de chuva mencionada acima. O parâmetro único do modelo foi calibrado com base em séries temporais de escoamentos superficiais médios medidos pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH-CE) nas regiões localizadas dentro da BRB, desse modo, foi ajustado um valor de *CN* em função do coeficiente de escoamento superficial medido nas respectivas regiões próximas aos reservatórios estudados.

Na segunda etapa do trabalho, foram simulados 412 reservatórios não estratégicos, (capacidade de armazenamento de $9{,}4 \cdot 10^4$ a $4{,}1 \cdot 10^7$ m³), incluindo os da BRB, distribuídos em todo o território do estado do Ceará (Figura 5). O estado tem,

aproximadamente, 93% do seu território inserido na região semiárido do Brasil, porém com a existência de algumas áreas próximas a zonas litorâneas e de elevadas altitudes.

O estado do Ceará tem grande parte da sua área com clima semiárido quente (BSh, segundo a classificação de Köppen), mas também apresenta regiões com climas tropicais e litorâneos costeiros, com temperaturas mensais médias variando entre 25 ºC e 32 ºC, precipitação média entre 500 mm e 1300 mm por ano e evaporação potencial média podendo alcançar até 3000 mm por ano em algumas regiões (INMET, 2018).

Figura 5 – Estado do Ceará com a distribuição dos 412 reservatórios estudados.



A população do estado é de aproximadamente $9 \cdot 10^6$ milhões de habitantes, o que leva a ter uma densidade demográfica de 62 habitantes por km². O setor público monitora 155 reservatórios que responsáveis no abastecimento dos grandes centros urbanos e agrícolas. Ao incluir os reservatórios que não são monitorados pelo setor público, a quantidade dessas estruturas chega a mais de 20.000 (PEREIRA et al., 2019), sendo que reservatórios com capacidades de até um milhão de metros cúbicos de armazenamento correspondem a 97% do total de reservatórios existentes no estado do Ceará, porém acumulam abaixo de 10% da capacidade de armazenagem de água total.

Em virtude da densa rede de reservatórios existente, não é viável o monitoramento contínuo de todas as estruturas, propiciando, dessa forma, o esquecimento de milhares reservatórios no planejamento hídrico do estado. Dessa forma, esses reservatórios não são indicados para o abastecimento humano pela falta de gestão e monitoramento hídrico adequado, com isso motivando o abandono dessas estruturas por falta de regras de operação que se adequem as condições específicas de cada reservatório.

Existem uma relevante quantidade de dados disponíveis sobre as estruturas estratégicas monitoradas pelo setor público no estado do Ceará, mas pouco se sabe sobre as não estratégicas, que são desse estudo. Perante isso, a caracterização geométrica dos reservatórios foi baseada nas curvas cota-área-volume existentes no banco de dados publicado no Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS (PINHEIRO, 2004), que contém informações de várias centenas de reservatórios construídos no estado do Ceará, dos quais nenhum é monitorado pelo órgão gestor do estado.

Os reservatórios estudados foram simulados ao longo de uma série de 108 anos (1910-2017), para os quais estavam disponíveis dados pluviométricos diários para 86 postos distribuídos no Ceará (ANA, 2018). Os outros dados climáticos, como evaporação potencial, temperatura máxima e mínima, foram tomados como as médias mensais registradas em 12 estações climáticas localizadas no estado do Ceará (INMET, 2018).

A variabilidade climatológica mencionada acima impõe uma forte variação dos volumes de água armazenada na rede de reservatórios (HEINE et al., 2014; ZHANG et al., 2021), impondo o prevalecimento da prática de economizar água, o que fez disso um valor cultural na região. Isso posto, milhares de pequenos reservatórios não estratégicos secam frequentemente devido às altas taxas de evaporação potencial, mesmo na ausência de vazões de retiradas para consumo e, desse modo, são inadequados para o abastecimento familiar por possuírem baixa confiabilidade em oferta hídrica. Nesse contexto, para que seja possível estabelecer usos específicos para reservatórios não estratégicos de acordo com a capacidade de converter o volume armazenado em vazões que destinem a um abastecimento específico, observando que para o abastecimento humano e animal não se permitem a existência de falhas (BRASIL, 1997). A partir disso, milhares de reservatórios ficariam “livres” para serem utilizados em atividades econômicas e no desenvolvimento da agricultura irrigada, por exemplo.

A cultura adotada nas simulações foi o milho (*Zea mays*), pois é um cereal expressivamente cultivado em todo território brasileiro, incluindo a região semiárida, com mais de 80 milhões de toneladas de grãos produzidos em uma área de aproximadamente 16,6

milhões de hectares na safra 2017/2018 (CONAB, 2018). Além disso, existem diferentes cultivares de milho adaptadas a diversas condições de temperatura e umidade, algumas das quais adequadas ao clima semiárido. No estado do Ceará, segundo Frizzone et al. (2021), o milho irrigado corresponde apenas a 3,7% da área irrigada e no volume de água bruta para irrigação na bacia do rio Jaguaribe.

O tipo solo utilizado nas simulações possui característica textural média, com as seguintes propriedades: umidade na capacidade de campo (θ_{FC}) de 22%, umidade no ponto de murcha permanente (θ_{WP}) de 10% e densidade (ρ_s) de 1,4 g.cm^{-3}.

O ciclo da cultura foi considerado de 110 dias, com mais 10 dias para preparo do solo e replantio, totalizando um ciclo de 120 dias. Portanto, foi admitido nas simulações que é possível que tenha até três ciclos produtivos do milho em um ano caso haja armazenamento suficiente no reservatório para suprir a irrigação em qualquer período. A área máxima irrigável foi admitida a demanda hídrica da cultura com consumo de 650 mm por ciclo, independente da época de semeadura. Durante a estação chuvosa no estado, o aporte hídrico para o cultivo é fornecido preferencialmente pelas chuvas e apenas suplementada pela irrigação, observando que a área cultivada estará atrelada as condições presentes no reservatório no início do ciclo produtivo. Esse critério conservador visa evitar a perda de safra por falha no atendimento hídrico pela irrigação.

A produtividade do milho irrigado no Brasil está na faixa de 6 a 10 Mg·ha^{-1} de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, sendo considerada nas simulações uma produtividade de 8,5 Mg·ha^{-1} . Os custos de produção foram definidos como valores médios representativos dos campos de milho irrigado de médio nível tecnológico no Brasil, cerca de R$ 10.000 por hectare com custos de implantação da cultura do milho e de sistema de irrigação por aspersão convencional. A irrigação foi definida foi a aspersão convencional com 75% de eficiência de aplicação da água, esta que se tem obtido pequenas projetos de irrigação em propriedades rurais.

No módulo econômico, foi considerada uma taxa de retorno mensal de 0,65%, de acordo com a rentabilidade da poupança no Brasil para o ano de 2018, e foi aplicada uma taxa de juros de 10% ao ano sobre os saldos negativos também relacionados ao mesmo período, de acordo com as condições de financiamento aplicadas ao setor agrícola. O melhor critério de operação do reservatório adotado neste trabalho foi aquele que proporciona a maior renda obtida com o arranjo proposto de agricultura irrigada.

Para avaliar o papel das variáveis e parâmetros nos resultados do modelo, foi realizada uma análise de sensibilidade. Os fatores climáticos (evaporação e precipitação),

agrícolas (duração do ciclo e demanda de água da cultura) e econômicos (preço de venda, juros e taxas de retorno) variaram na faixa de −50% a + 50%, observando as mudanças na receita e na garantia do fornecimento hídrico.

Um reservatório específico, representativo das condições médias de nossa amostra e bem conhecido por nós em estudos anteriores (por exemplo, Zhang et al. 2016), foi escolhido para a análise de sensibilidade. A capacidade de armazenamento do açude São Joaquim é de $5{,}1 \cdot 10^6$ e está dentro da faixa de aplicabilidade do modelo NeStRes (ver texto a seguir). Os valores usados como referência (0% de variação) nas simulações são:

- Fatores climáticos: precipitação anual e evaporação potencial de 750 mm e 1 990 mm, respectivamente;
- Fatores agrícolas: ciclo de 110 dias e 650 mm de demanda hídrica da cultura do milho;
- Fatores econômicos: preço de venda do milho de R$ 800 por tonelada (de acordo com o mercado local), taxa de retorno de 0,65% ao mês e taxa de juros de 10% ao ano.

5.3 Critérios para aplicação do NeStRes em pequenos reservatórios

O modelo NeStRes foi idealizado como uma ferramenta para apoiar a decisão de como operar reservatórios não estratégicos para irrigação em ambientes com escassez de água. Portanto, é inadequado definir critérios de operação para reservatórios estratégicos com múltiplos usos de água, especialmente se incluir abastecimento humano, para o qual é necessário alto nível de garantia.

No semiárido brasileiro, onde o modelo foi aplicado neste trabalho, reservatórios estratégicos são operados pelos órgãos gestores de recursos hídricos com nível de garantia de 90% para que demandas prioritárias, como abastecimento humano, não sejam comprometidas durante as secas frequentes (de ARAÚJO et al., 2018). No entanto, pequenos reservatórios são incapazes de fornecer esse alto nível de garantia porque a maioria deles seca completamente pelo menos uma vez a cada dois anos, como consequência das altas taxas de evaporação.

Para definir quais reservatórios podem ser operados com base no NeStRes, foi utilizado neste estudo o "Diagrama Triangular de Regularização" – DTR proposto por Campos (2010) (Figura 6). DTR é um método gráfico baseado em dois fatores de eficiência de reservatório (Equações 27 e 28) para estimar as porcentagens de evaporação, vertimento e possível retirada de água de reservatórios para um nível de garantia de 90%.

$$f_V = \tau = \frac{V_{max}}{\mu} \tag{27}$$

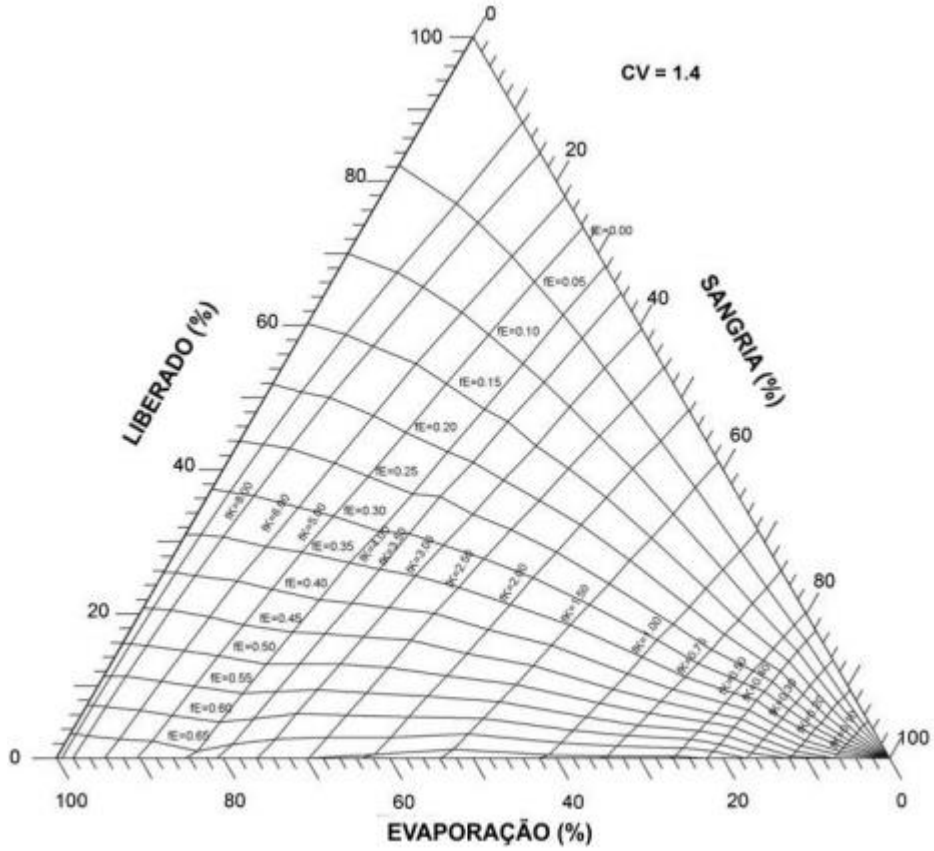
$$f_E = \frac{\left(3 \cdot K^{1/3} \cdot E\right)}{\mu^{1/3}} \tag{28}$$

Em que: f_V e f_E são o fator de capacidade ou tempo de residência da água (τ, anos) e o fator adimensional de evaporação, respectivamente; V_{max} é a capacidade de armazenamento do reservatório (m^3); μ é a vazão média anual ($m^3 \cdot ano^{-1}$); E é a evaporação média (m^3) durante a estação seca; K é o fator de abertura do reservatório, que pode ser estimado por $K = V_{max} / h_{max}^3$ e; h_{max} é a profundidade máxima da água no reservatório (m).

Definindo f_V e f_E, é possível estimar a partir do DTR a porcentagem do armazenamento anual que pode ser convertida em *Vabs*. Na área de estudo, a *Vabs* dos reservatórios é muito sensível à evaporação (Campos et al. 2016) e, portanto, ao fator de evaporação f_E (Figura 6).

O critério para definir a aplicabilidade do modelo NeStRes foi baseado na eficiência do reservatório, estabelecendo uma restrição para estruturas que possam converter pelo menos 5% da vazão afluente anual em *Vabs*. Observando o gráfico referente a um coeficiente de variação dos escoamentos anuais igual a 1,4 (Figura 6), constata-se que esse limite estabelece que todos os reservatórios com $f_E < 0{,}65$ são capazes de fornecer água com alta garantia (90%, segundo Campos 2010), sendo adequados para abastecimento humano e, portanto, inadequados para serem operados com base no modelo NeStRes. Este critério visa evitar a competição entre o abastecimento humano e a irrigação em reservatórios não estratégicos.

Figura 6 – Diagrama Triangular de Regularização (DTR) para volumes afluentes anuais com coeficiente de variação de 1,40.



Fonte: Campos (2010).

5.4 Análise do impacto do regime hidrológico sobre a operação de pequenos reservatórios

Para classificar os 412 reservatórios, distribuídos no estado do Ceará, em grupos com características semelhantes, o que pode facilitar a definição de critérios para o uso eficiente da água para irrigação, foi utilizada a análise de agrupamento. Os dados foram normalizados (*Z-scores*) e tratados pelo método de Ward (método da variância mínima), tendo o quadrado da distância euclidiana como medida de similaridade.

A técnica estatística multivariada de análise fatorial/análise de componentes principais (*EFA*/*PCA*) foi aplicada para identificar as variáveis que melhor explicam a variação no processo de definição da regra de operação em pequenos reservatórios não estratégicos onde a água é utilizada para irrigação do milho. Foram utilizadas variáveis relacionadas à morfometria dos reservatórios (tempo de residência da água, fator de evaporação, coeficientes geométricos do reservatório), dinâmica hidrológica (precipitação média, evaporação potencial média, índice de aridez, escoamento superficial médio,

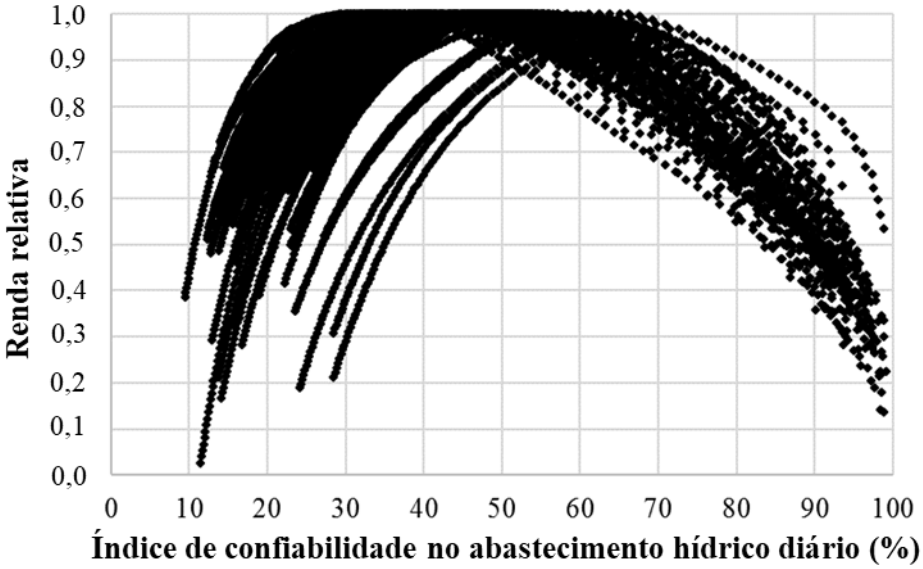
coeficiente de variação do escoamento superficial anual), bem como a vazão específica para consumo (expresso pelo produto da retirada máxima diária de água pela capacidade de armazenamento do reservatório) para a simulação que produza a maior receita. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 16.0.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Estudo de caso: Bacia do Rio Banabuiú

A simulação dos 91 reservatórios não estratégicos da Bacia do Rio Banabuiú indicou que a renda máxima obtida com o cultivo do milho é atingida quando os reservatórios são operados com nível de garantia de abastecimento diário de água na faixa de 32% a 66% (Figura 7), ou seja, permitindo o completo esvaziamento do açude em cerca de um a dois terços do tempo.

Figura 7 – Relação entre o rendimento e o máximo rendimento possível na produção de milho irrigado de acordo com o nível de garantia do fornecimento diário de água.

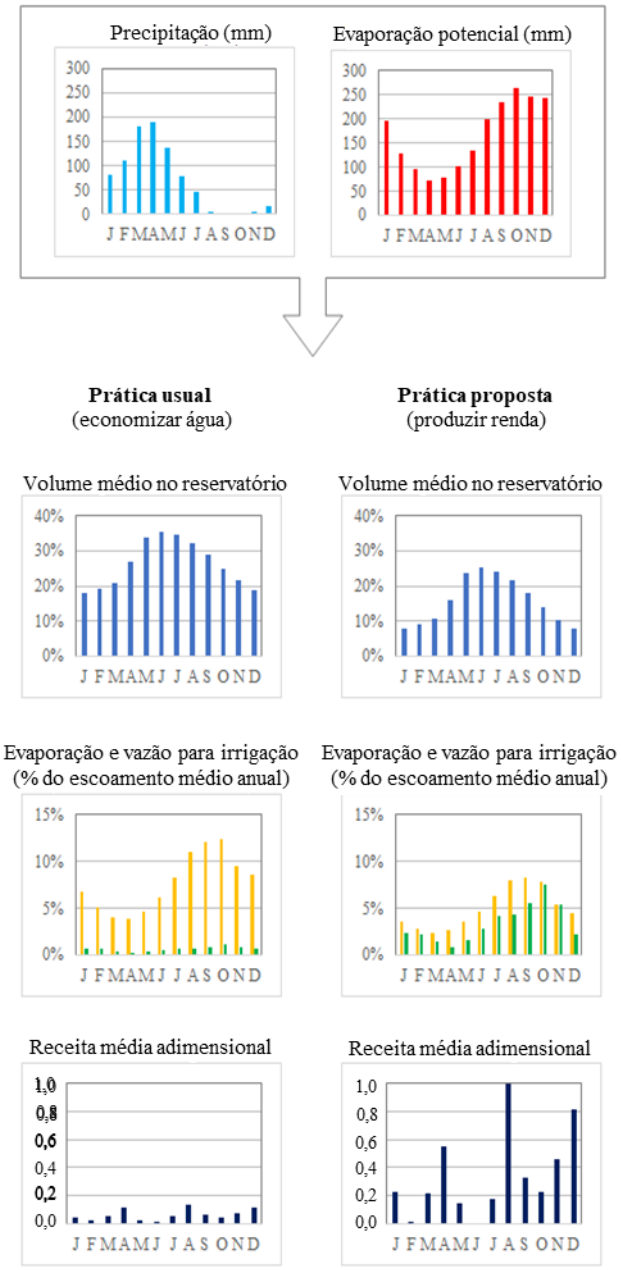


Essa constatação destaca o grande papel do clima na definição do critério de operação de pequenos reservatórios em ambientes secos. Por exemplo, Ouyang et al. (2018) simularam a irrigação de milho, algodão e soja de uma lagoa ($1 \cdot 10^5$ m³ de capacidade) em East Mississipi, EUA, onde a precipitação anual e a evapotranspiração são 1300 e 600 mm, respectivamente. Os autores descobriram que o nível do tanque seria puxado para perto de zero no máximo duas vezes em 10 anos. Por outro lado, Sanfo et al. (2017) afirmaram que um reservatório de capacidade de $3 \cdot 10^5$ m³ em Burkina Faso é capaz de irrigar uma área variável na faixa de 17 a 25 ha e que a produção na estação seca nem sempre é possível porque o reservatório não é totalmente preenchido a cada ano, sugerindo que os reservatórios da fazenda sejam usados para irrigação suplementar. Nessa região, a precipitação anual é de

aproximadamente 850 mm e a temperatura varia em torno de 20 °C a 38 °C, semelhante ao BRB.

Os resultados na bacia de estudo sugerem uma mudança de paradigma no que diz respeito ao uso de água de pequenos reservatórios para irrigação: mudar a prática comum de economizar água, usando-a mais intensamente para a produção agrícola e economizando receita da agricultura, que não é suscetível à perda por evaporação como na prática anterior (Figura 8).

Figura 8 – Prática atual e proposta de uso de água de reservatórios não estratégicos para irrigação.



Setenta e seis por cento dos reservatórios simulados apresentaram operação ótima, ou seja, conferindo renda máxima, com nível de garantia do abastecimento diário de água na faixa de 40% a 55%. A partir das curvas de rendimentos adimensionais versus nível de garantia para todos os 91 reservatórios estudados, ilustrados na Figura 7, pode-se retratar que operar qualquer um dos reservatórios com nível de garantia de 54% leva a, pelo menos, 85% da receita máxima possível com o milho irrigado.

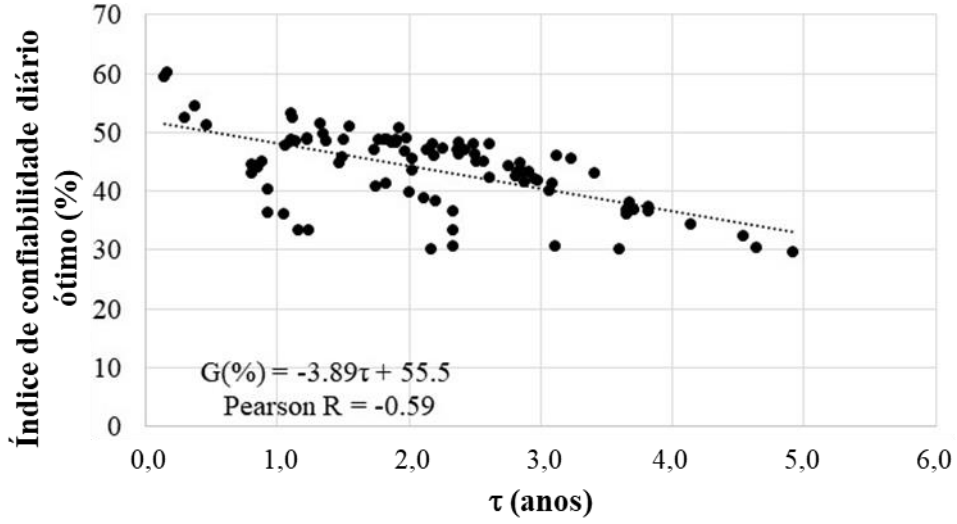
O critério ótimo que ocorre em uma faixa estreita de níveis de confiabilidade para toda a BRB indica que o modelo NeStRes pode ser usado para definir regras gerais de operação de reservatórios não estratégicos na escala da bacia. Isso é particularmente importante em regiões com escassez de dados, como o semiárido brasileiro (ZHANG et al., 2016; PEREIRA et al., 2019), onde a simulação de reservatórios individuais é dificultada pela escassez de dados.

A operação dos pequenos reservatórios com nível de garantia de 90% – os mesmos critérios adotados para os reservatórios estratégicos no abastecimento humano – levam a alta ineficiência no uso da água: adotando a prática atual de economia de água, o cultivo irrigado da cultura do milho gera renda no faixa de 0,35 a 0,80 da renda máxima possível.

De Araújo e Bronstert (2016) estudaram a propagação da seca na Bacia do Jaguaribe, na qual a BRB está inserida, avaliando a dinâmica temporal de estruturas de diversos tamanhos: grandes, médios e pequenos reservatórios, poços e cisternas. Os autores descobriram que pequenos reservatórios são as estruturas menos eficazes, sendo incapazes de lidar com secas de longo prazo. Em seu estudo sobre questões de escala na governança da água, van der Zaag e Gupta (2008) já haviam discutido sobre o papel dos pequenos reservatórios no sistema hidrológico, destacando a importância de tais estruturas para a subsistência, embora grandes reservatórios sejam hidrologicamente mais eficientes.

O nível ótimo de garantia do suprimento hídrico diário para fins de irrigação apresenta correlação (Pearson R = -0,59) com o fator de capacidade (f_V) (Figura 9). Representando o tempo de residência da água no reservatório (τ), o fator de capacidade possui informações não apenas sobre o volume potencial de água que pode ser utilizado para irrigação, mas também sobre o regime hidrológico. Outras características do reservatório, como o nível trófico, são correlacionadas ao fator de capacidade (WIEGAND et al., 2016), que pode ser estimado com poucos dados e, portanto, representa um bom parâmetro para o gerenciamento de pequenos reservatórios não estratégicos na ausência de dados mais detalhados.

Figura 9 – Nível de garantia ótimo no suprimento diário de água para irrigação do milho em relação ao tempo de residência da água nos reservatórios.



As simulações realizadas com o modelo NeStRes na Bacia do Rio Banabuiú trazem reflexões sobre o papel dessas estruturas no sistema hidrológico. Pereira et al. (2019) relatam que a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH, onde o BRB está localizado, monitora 155 reservatórios estratégicos, enquanto o mapeamento hídrico global realizado por Pekel et al. (2016) indica a existência de mais de 20.000 reservatórios na mesma área de 149.000 km². Embora representem cerca de 90% da capacidade total de armazenamento (GUTIÉRREZ et al., 2014), os reservatórios estratégicos promovem uma disponibilidade hídrica muito centralizada, com a distribuição espacial da água sendo atendida pelos menores. O uso racional dos reservatórios não estratégicos ajuda a cumprir seu papel de subsistência e geração de renda nas áreas rurais.

Além disso, o uso de reservatórios não estratégicos para irrigação ameniza a demanda dos reservatórios estratégicos, que atendem a múltiplos usos, inclusive abastecimento humano (de ARAÚJO et al., 2004, de ARAÚJO; BRONSTERT, 2016). Em redes de reservatórios de alta densidade, é provável que a definição de reservatórios distintos para diferentes setores de demanda de água possa reduzir conflitos, como os observados na região semiárida brasileira após uma seca de 6 anos (2012–2017) (de ARAÚJO et al. 2018).

Por fim, Di Baldassarre et al. (2018) argumentam que o aumento da disponibilidade de água por meio da construção de reservatórios tende a aumentar a demanda de água também, um feedback denominado “efeito de reservatório”. Portanto, a dependência do abastecimento de água de poucas fontes pode levar a maior vulnerabilidade e danos mais intensos durante as secas. Kuil et al. (2016) simularam a dinâmica temporal da

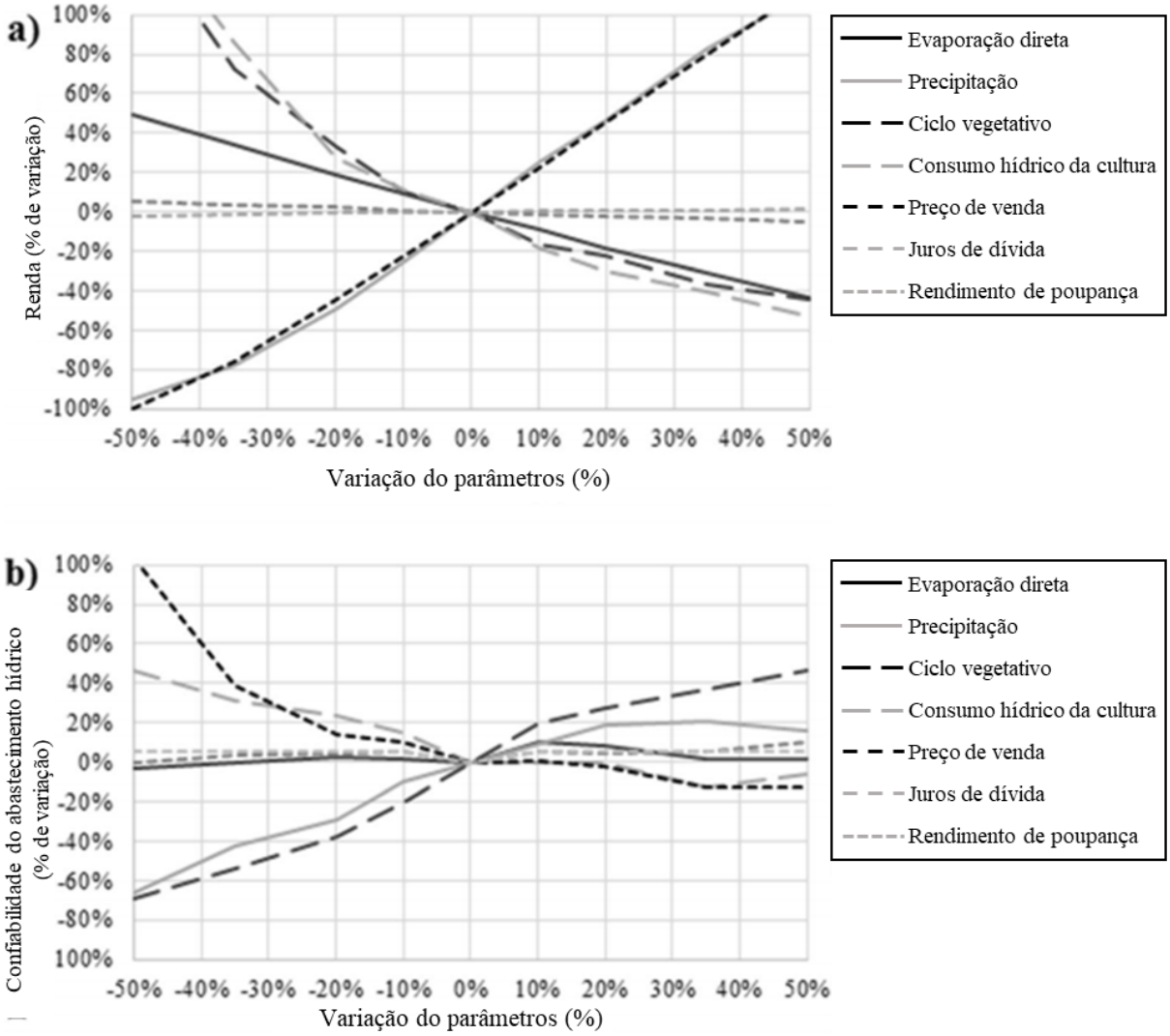
disponibilidade hídrica e como os Maias reagiram a ela, indicando o efeito de reservatório como uma possível causa do colapso da civilização. No Estado do Ceará, de Araújo e Bronstert (2016) avaliaram as secas hidrológicas e seus efeitos na sociedade, concluindo que o abastecimento descentralizado de água com estruturas de múltiplos tamanhos tende a reduzir a vulnerabilidade dos sistemas hidrológicos às secas. Nesse sentido, o uso de reservatórios não estratégicos para irrigação também contribui para aumentar a resiliência do sistema ao descentralizar o abastecimento de água para usos múltiplos.

A análise de sensibilidade indicou que a receita resultante da irrigação das lavouras de milho na área de estudo (Figura 10a) é altamente impactada por variações nos fatores climáticos: o aumento da precipitação ou diminuição da evaporação em 50% pode aumentar a receita em mais de 100% e cerca de 50%, respectivamente. A receita também é muito sensível ao preço de venda do milho, que desempenha um papel importante no resultado do modelo, e ao ciclo da cultura e à demanda de água, principalmente pelas variações negativas desses fatores que aumentam significativamente a receita. No entanto, os resultados são insensíveis às taxas de juros e de retorno do módulo econômico no intervalo das simulações. O intenso uso da água dos reservatórios garante produções anuais, evitando que os saldos econômicos negativos durem muito e, assim, reduzindo o impacto da taxa de juros. Por outro lado, os períodos de seca impedem colheitas muito frequentes e os saldos econômicos positivos também são limitados no tempo.

A garantia do abastecimento diário de água é mais estável e menos afetada por variações nos fatores climáticos, agrícolas e econômicos (Figura 10b). Ainda assim, reduções de precipitação e ciclo da safra em 50% podem diminuir o nível de garantia ótima em aproximadamente 70%, enquanto uma redução no preço de venda da safra em 50% pode aumentar o nível ótimo de garantia do fornecimento de água em 100%.

Apesar do potencial do modelo NeStRes demonstrado neste trabalho, ainda não somos capazes de capturar como o feedback dos agricultores para o novo sistema de produção agrícola exigiria mudanças na operação dos reservatórios propostos, considerando o sistema acoplado homem-água (SIVAPALAN et al., 2012). Por exemplo, Pande e Savenije (2016) desenvolveram um modelo sociohidrológico para pequenos agricultores em Maharashtra, Índia, e avaliaram as estratégias de adaptação dos agricultores em circunstâncias hidrológicas e/ou econômicas desfavoráveis. Roobavannan et al. (2017) usaram o estudo de caso da Bacia do Rio Murrumbidgee, na Austrália, para demonstrar como a diversificação da economia mudou os valores da sociedade e promoveu uma transição da alocação de água para uma agricultura mais sustentável.

Figura 10 – Sensibilidade dos fatores climáticos, agrícolas e econômicos do NeStRes na receita e na garantia do fornecimento diário de água.



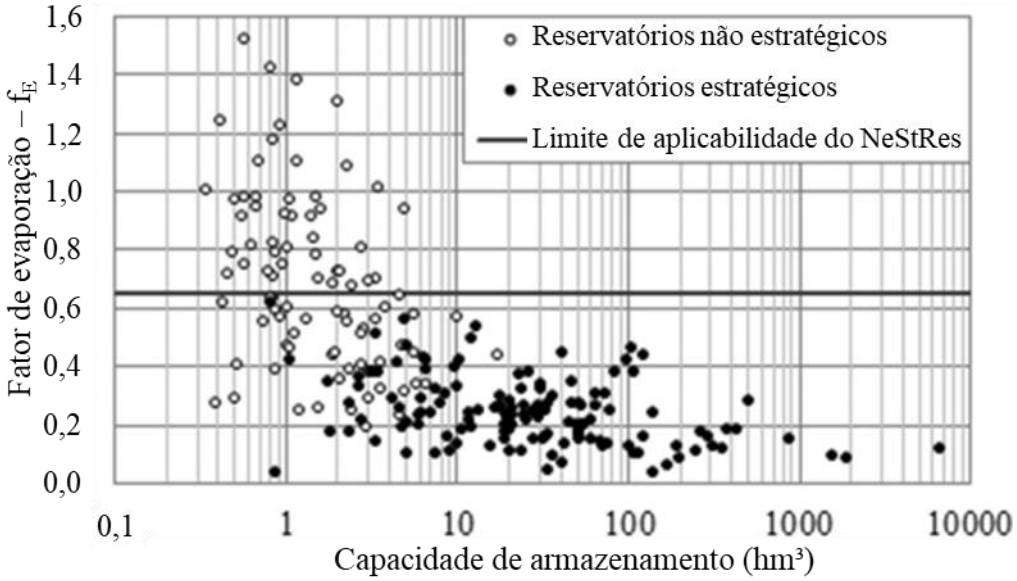
Algumas características importantes devem ser consideradas em trabalhos futuros sobre a coevolução da sociedade com os fluxos de água:

- Qual o impacto na afluência nos reservatórios estratégicos promovido pelo uso mais intenso da água de pequenos reservatórios a montante? Como a sociedade reage a um possível menor armazenamento nas estruturas estratégicas de abastecimento humano?
- Se a prática de irrigação intensa, com base nos critérios propostos neste trabalho, resultar em uma alta disponibilidade de um produto, isso poderia reduzir o preço do mercado e afetar as decisões dos pequenos agricultores?
- Quão resilientes são os agricultores em manter altas dívidas durante secas de longo prazo, quando a produção das safras irrigadas é muito restrita em pequenos reservatórios?

6.2 Critérios de aplicação do NeStRes em pequenos reservatórios

O critério definido como restrição para aplicação do modelo NeStRes ($f_E < 0,65$) foi testado em 134 reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) no estado do Ceará, onde está inserida a BRB. Esperava-se que esses reservatórios ficassem fora do limite de aplicabilidade do modelo, pois atendem a importantes centros de demandas de água, incluindo o abastecimento humano, e, portanto, não podem ser operados com foco apenas na irrigação. De fato, todos os reservatórios estratégicos monitorados pela COGERH apresentaram $f_E < 0,65$ (Figura 11) e foram classificados como inadequados para serem operados com o modelo NeStRes, validando o critério adotado.

Figura 11 – Restrição de aplicação do modelo NeStRes.



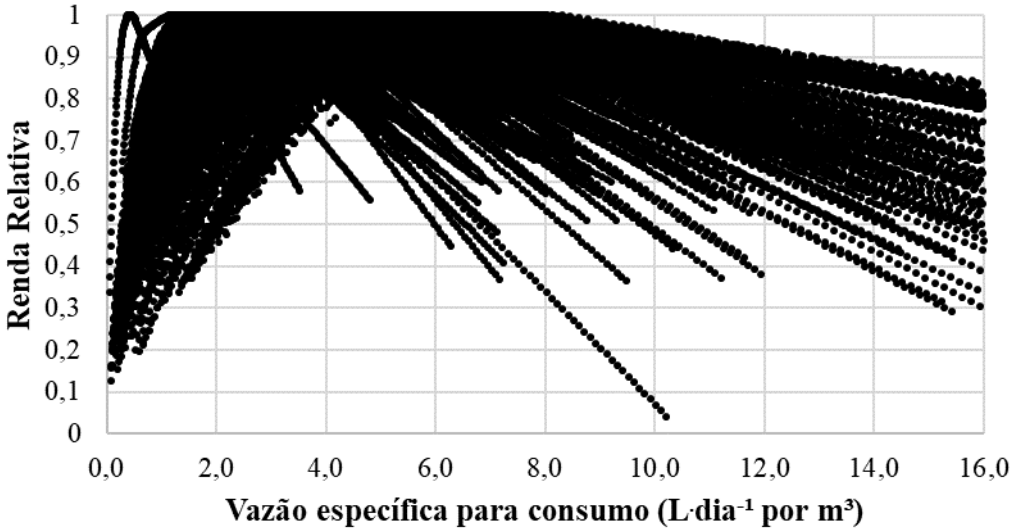
Os 91 reservatórios não estratégicos estudados apresentaram uma ampla faixa de f_E de 0,2 a 1,5, com 48% classificados como adequados para o modelo NeStRes (Figura 11). Os 52% restantes dos reservatórios, que podem fornecer uma vazão hídrica com elevada garantia e apresentam restrição para serem operados com o modelo, são pequenos reservatórios ($< 1 \cdot 10^7$ m³) não administrados pelo setor público. Nesses casos, a operação do reservatório deve ser baseada nas principais demandas a serem atendidas e o modelo NeStRes é recomendado apenas se não houver competição entre a irrigação e os usos prioritários

humano e dessedentação animal, conforme definido pela legislação brasileira (BRASIL, 1997).

6.3 O papel das variáveis hidrológicas na operação de pequenos reservatórios: aplicação do modelo NeStRes no estado do Ceará

A aplicação do modelo NeStRes a 412 reservatórios não estratégicos do estado do Ceará (ver Figura 5 para a distribuição espacial dos reservatórios simulados) indicou que a renda máxima obtida com o cultivo do milho irrigado é atingida quando os reservatórios são operados com retirada máxima na faixa de 1 a 8 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório (Figura 12). Segundo esse critério de operação, 87% dos reservatórios analisados secariam entre um terço e dois terços do tempo, aumentando a conversão das perdas por evaporação em retirada de água para irrigação. Resultado semelhante ao observado apenas para a bacia do rio Banabuiú. O que demonstra a necessidade mudança nos critérios de uso da água em pequenos reservatórios para regiões secas: usar intensamente a água na agricultura irrigada, desse modo, aumentando a receita, ao invés de economizar água e perder o capital hídrico por evaporação.

Figura 12 – Razão entre o rendimento para uma simulação do uso específico da água e o rendimento máximo possível para os respectivos reservatórios para o milho irrigado.



É importante observar as inclinações das curvas da Figura 12: a redução da retirada de água abaixo do ótimo é altamente ineficiente (em termos de retorno financeiro), enquanto a água utilizada com mais intensidade do que o ótimo tende, na maioria dos casos, a

reduzir mais ligeiramente a receita. Portanto, na ausência de dados que definam com precisão os critérios de operação do reservatório, é mais eficiente intensificar a retirada de água para irrigação do que adotar a prática de economizar água. O estabelecimento de tais tendências é de grande importância em uma perspectiva local, uma vez que pequenos reservatórios localizados em regiões secas geralmente carecem de critérios de operação e modelos de gestão da água para o uso racional da água, embora a importância de tais estruturas para o desenvolvimento da pequena agricultura e a resiliência das comunidades a períodos de seca seja relatada na comunidade científica (GIORDANO; de FRAITURE, 2014, FOWE et al., 2015, NAKAWUKA et al., 2017, YOHANNES et al., 2017; MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020).

Por exemplo, analisando a eficiência de projetos de irrigação de um reservatório ($4{,}2 \cdot 10^6$ m³ de capacidade) entre Burkina Faso e Gana, Poussin et al. (2015) observaram melhorias na segurança alimentar e nos meios de subsistência locais, mesmo apresentando uma má gestão agrícola e deficiência operacional no uso da água do reservatório. Yohannes et al. (2017) analisando a adaptação de pequenos agricultores que utilizavam um reservatório com capacidade de $1{,}9 \cdot 10^6$ m³ em uma região seca no Norte da Etiópia, constataram que o bom manejo agrícola, com o envolvimento participativo dos agricultores nas tomadas de decisão, permitiu dobrar a área irrigada e colaborar na resiliência à escassez de água. Em concordância, Wisser et al. (2010) analisaram um possível aumento de 100% e 30% na produção de cereais na África e na Ásia, respectivamente, se pequenos reservatórios fossem utilizados na produção agrícola.

Perante o exposto, a prática de “guardar água” em pequenos reservatórios torna-se inviável social e economicamente em regiões de clima seco, impactando negativamente na segurança alimentar, pois ao operar com menores vazões específicas destinadas a agricultura acarretam perdas de quase 90% da capacidade máxima de receita para cultivo do milho (ver na Figura 12). No entanto, o receio de usar essas estruturas na na produção agrícola é intensificado pela aversão ao risco para o abastecimento de água humano e animal. Esse sentimento foi adquirido através da convivência frequente de seca extremas e isso induz a necessidade de armazenar e poupar para facilitar o acesso a água nos períodos de escassez.

Em razão disso, a ótica da segurança hídrica não deve ser aplicada na maioria dessas estruturas, pois não reduzem a níveis aceitáveis os riscos relacionados nos abastecimentos “nobres”. Segundo de Araújo e Bronstert (2016), os pequenos reservatórios são altamente vulneráveis a seca, com probabilidade de secar em um ano de 70% a 80%, enquanto grandes reservatórios raramente ultrapassam 20, são mais suscetíveis aos impactos

das mudanças climáticas (KROL et al., 2011); e a perda de capacidade de armazenamento pelo assoreamento (LIMA NETO et al., 2011). Todavia, descentralização do uso da água (de ARAÚJO et al., 2004) e a utilização de reservatórios não estratégicos tem capacidade de aumentar de forma eficiente a produção agrícola a longo prazo e ainda podendo reduzir a demanda de água das fontes estratégicas, dessa forma contribuindo na redução dos conflitos sobre o uso da água.

O milho irrigado possui baixa rentabilidade e resultados considerados insatisfatórios em processos de tomada de decisões para escolha de cultivos irrigados e, relação aos resultados obtidos com culturas perenes (FRIZZONE et al., 2021). Os mesmos autores concluíram que ao se analisar indicadores econômicos, sociais e ambientais, a cultivo do milho irrigada fica atrás de vários cultivos inseridos nos perímetros irrigados no estado do Ceará. Porém, no caso dos pequenos reservatórios como fonte de abastecimento da irrigação, as culturas perenes limitam a área cultivada devido a ciclos produtivos longos e acarretando perda da grande parte do capital hídrico por evaporação (ver demonstração na Figura 3). Por outro lado, culturas anuais como cereais (milho, arroz e trigo), leguminosas (feijão e fava) e tubérculos (mandioca) são caracterizados por terem ciclos curtos, desse modo dando a possibilidade de se produzir pelo menos mais de um ciclo por ano. Outra característica das culturas anuais é que são amplamente consumidas em todo o mundo, são produzidas, em sua maioria, sob regime de sequeiro, tem manejo agrícola simples e não necessitam de segurança no abastecimento elevada para garantir a produção, podendo, assim, ser sustentadas por pequenos reservatórios.

Segundo Yohannes et al. (2017), o uso de culturas mais resistentes à seca na região semiárida da Etiópia ajudou a reduzir os impactos econômicos causados pela escassez de água. Porém, algumas culturas forrageiras, a biomassa máxima pode ser uma meta de produção apropriada. Para cereais e outras culturas cujo rendimento é uma fração da biomassa, atingir o rendimento máximo comercializável pode ser a meta de produção correta. Ainda assim, o agricultor geralmente busca o máximo de dinheiro possível e, às vezes, alcançar o rendimento potencial máximo não é a opção mais lucrativa. (FRIZZONE et al., 2021).

Devido ao modelo ser do tipo concentrado, ou seja, avalia apenas a dinâmica dos fluxos de água no tempo, o critério de operação de um reservatório não estratégico não deve impactar os fluxos de água em grandes bacias hidrográficas, mas o efeito combinado de uma rede densa de reservatórios pode não ser desprezível. Wisser et al. (2010), avaliando o efeito combinado da demanda hídrica em escala global, estimam uma redução de até 18% na vazão

anual dos riachos devido à construção de pequenos reservatórios. Porém, Lima (2020), analisando o efeito combinado na bacia do rio Jaguaribe no Ceará (cerca de 74.000 km²), utilizando o modelo hidrológico *WASA* com esquema de reservatórios em cascata (GÜNTNER et al., 2004), adotando cenários de uso da água de acordo com a prática atual na região (economia de água) e a recomendada com a aplicação do modelo NeStRes, concluiu que o uso intenso da água dos reservatórios não estratégicos não causam impactos significativos na dinâmica de armazenamento dos grandes reservatórios, não comprometendo assim, a produção hídrica.

Na bacia do Alto Jaguaribe (24.000 km²), localizada no estado do Ceará, de Araújo e Medeiros (2013) avaliaram o impacto da rede de reservatórios sobre os recursos hídricos, apresentando impactos positivos, mas também negativos. Negativamente, o grande número de pequenos reservatórios aumenta as perdas por evaporação, reduzindo potencialmente os fluxos dos rios e adicionando complexidade ao gerenciamento do sistema. Porém, além da distribuição espacial e acessibilidade da população rural à água, a rede tem alguns outros efeitos positivos: retenção de sedimentos, redução do assoreamento dos reservatórios estratégicos (LIMA NETO et al., 2011) e aumento da eficiência energética no abastecimento de água no sistema (NASCIMENTO et al., 2019). Liu et al. (2017) também sugerem que o nexo água-energia-alimento pode ser uma maneira de melhor adaptar pequenos reservatórios para usos múltiplos em regiões com climas secos.

Além dos efeitos hidrológicos, a construção de barragens tem impactos sociais importantes, permitindo que as populações que vivem em ambientes secos em todo o mundo se estabeleçam em condições de escassez natural de água. No Ceará, a construção de reservatórios estratégicos e não estratégicos elevou a resiliência da população a intensa variabilidade hidrológica que estão submetidas, apoiou o crescimento econômico e melhorou a capacidade de superar as secas recorrentes (NUNES; MEDEIROS, 2020, MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020). Na África do Sul, de Fraiture et al. (2014) investigaram os impactos de pequenas áreas de irrigação privada e averiguaram que essa prática reduziu substancialmente a pobreza e proporcionou rendas melhores para milhões de pequenos proprietários rurais. Comentaram também, sobre a necessidade de regulação na destinação de água ao setor agrícola para o meio ambiente, uma vez que são possíveis impactos ambientais devido um uso intensivo de terra e água. Segundo Tamburino et al. (2020), o mau uso de longo prazo dos recursos superficiais e subterrâneos podem causar impactos irreparáveis na disponibilidade de água e, consequentemente, reduzindo a produtividade agrícola para pequenos produtores.

Para um uso eficiente da água em reservatórios não estratégicos, conforme

inicialmente proposto na concepção do modelo NeStRes, recomenda-se avaliar os riscos que o consumo de água irrestrita pode promover a longo prazo na escala regional (de FRAITURE; GIORDANO, 2014). Sivapalan e Blöschl (2015) argumentam que muitas regiões agrícolas do mundo estão experimentando uma realocação de água da agricultura irrigada para o ecossistema, devido aos danos ambientais causados pela superexploração da água nas atividades humanas. Por exemplo, Kandasamy et al. (2014) relataram a oscilação do pêndulo observada na Bacia de Murrumbidgee, Austrália, entre o desenvolvimento agrícola e a saúde ambiental: o uso intenso de água no setor agrícola resultou em uma série de danos ambientais e socioeconômicos, levando a mudanças na estrutura governamental e na dinâmica da água abstração na bacia.

6.3.1 Análise estatística

A aplicação do teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) resultou em um valor de 0,8, indicando que as variáveis selecionadas são adequadas para o uso da Análise de Componentes Principais (PCA) (valor mínimo de KMO indicado para a adequação das variáveis de entrada é 0,5). Na matriz de correlação, observou-se que o tempo médio de residência da água no reservatório (τ) apresenta correlação moderada com a vazão específica para consumo (SWC), com valor de -0,637 (Tabela 2).

Apesar da correlação relativamente baixa das variáveis de entrada do NeStRes entre si, observada na Tabela 2, elas obtiveram um índice de significância estatística na análise. Isso indica a complexidade em determinar com precisão o índice de operação que retorna a renda máxima no cultivo do milho. Essas incertezas, combinadas com a falta de critérios agrícolas e de gestão da água na escala local, reduzem o desempenho de pequenos sistemas de irrigação e motivam o abandono da prática de irrigação (de FRAITURE e GIORDANO, 2014; de FRAITURE et al., 2014; YOHANNES et al., 2017).

A análise de PCA resultou em três componentes que explicam quase três quartos da variância total dos dados (Tabela 2), permitindo identificar quais variáveis compõem cada grupo e contribuem para explicar a variância dos dados. Observou-se que os componentes foram divididos em três características: componente climático (CP1); componente morfométrico (CP2) e a componente operacional (CP3). O CP1, que explica a maior parte da variância dos dados (37%), é composto por variáveis relacionadas ao clima, indicando a importância do módulo hidrológico do NeStRes no cálculo do balanço hídrico em reservatórios não estratégicos.

As componentes CP2 e CP3, que juntos são responsáveis por quase dois quintos da variância total dos dados, correspondem a uma associação do potencial de acúmulo de água (controlado pelos coeficientes geométricos do reservatório, K e α), pela dinâmica da água armazenada nos reservatórios (expresso pela variável adimensional f_E), citada por Campos (2010), e pelos critérios de operação do reservatório (vazão específica para consumo).

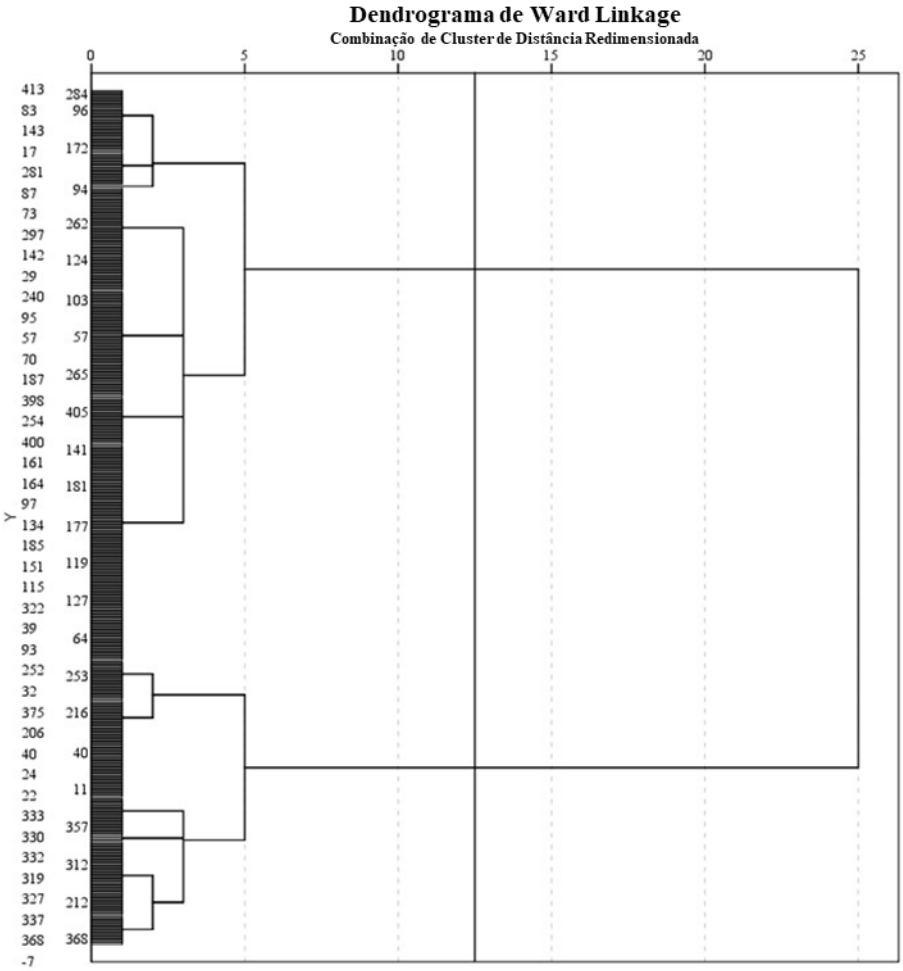
Tabela 2 – Correlação estatística em relação à vazão específica para consumo (SWC) e componentes principais (PCA) no cultivo do milho

Variáveis	**Correlação**	**Componentes**		
	SWC ($L \cdot dia^{-1}$ por m^3)	CP1	CP2	CP3
SWC ($L \cdot dia^{-1}$ por m^3)	1	**0,798**	-	-
τ (anos)	-0,637*	-	-	**0,731**
f_E	-0,551*	-	**0,704**	-
α	0,053	-	**-0,833**	-
K	0,022	-	**0,773**	-
Evaporação potencial média (mm)	-0,539*	**-0,808**	-	-
Chuva média (mm)	0,605*	**0,897**	-	-
Índice de aridez	0,577*	**0,879**	-	-
Escoamento superficial médio (mm)	0,616*	**0,869**	-	-
Coeficiente de variação do escoamento	-0,194*	-	-	-
Autovalor		3,72	1,94	1,82
Variância explicada (%)		37,22	19,44	18,21
Variância acumulada (%)		37,22	56,66	74,87

* $p < 0,001$.

Na Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) foram formados dois grupos de reservatórios com características semelhantes, conforme ilustrado no dendrograma (Figura 13).

Figura 13 – Dendrograma da análise de agrupamento dos reservatórios com características semelhantes.



A Figura 14 apresenta as variáveis hidrológicas nos dois grupos formados, destacam-se as principais diferenças entre eles: O Grupo I compreende 275 reservatórios localizados em regiões mais secas (ver o índice de aridez, Figura 14a), com precipitação média anual geralmente abaixo de 750 $mm \cdot ano^{-1}$, Figura 14b) e taxas de evaporação potencial superiores a 2000 $mm \cdot ano^{-1}$ (Figura 14e), enquanto o Grupo II reuniu 137 reservatórios localizados em regiões mais úmidas com precipitação anual relativamente maior (> 800 $mm \cdot ano^{-1}$) e menores taxas de evaporação potencial (< 1700 $mm \cdot ano^{-1}$). A Figura 15 apresenta a distribuição espacial dos grupos de reservatórios na região estudada, bem como as variáveis climáticas.

Figura 14 – Box-plot de variáveis hidrológicas nos dois grupos formados na Análise de Agruamento Hierárquico.

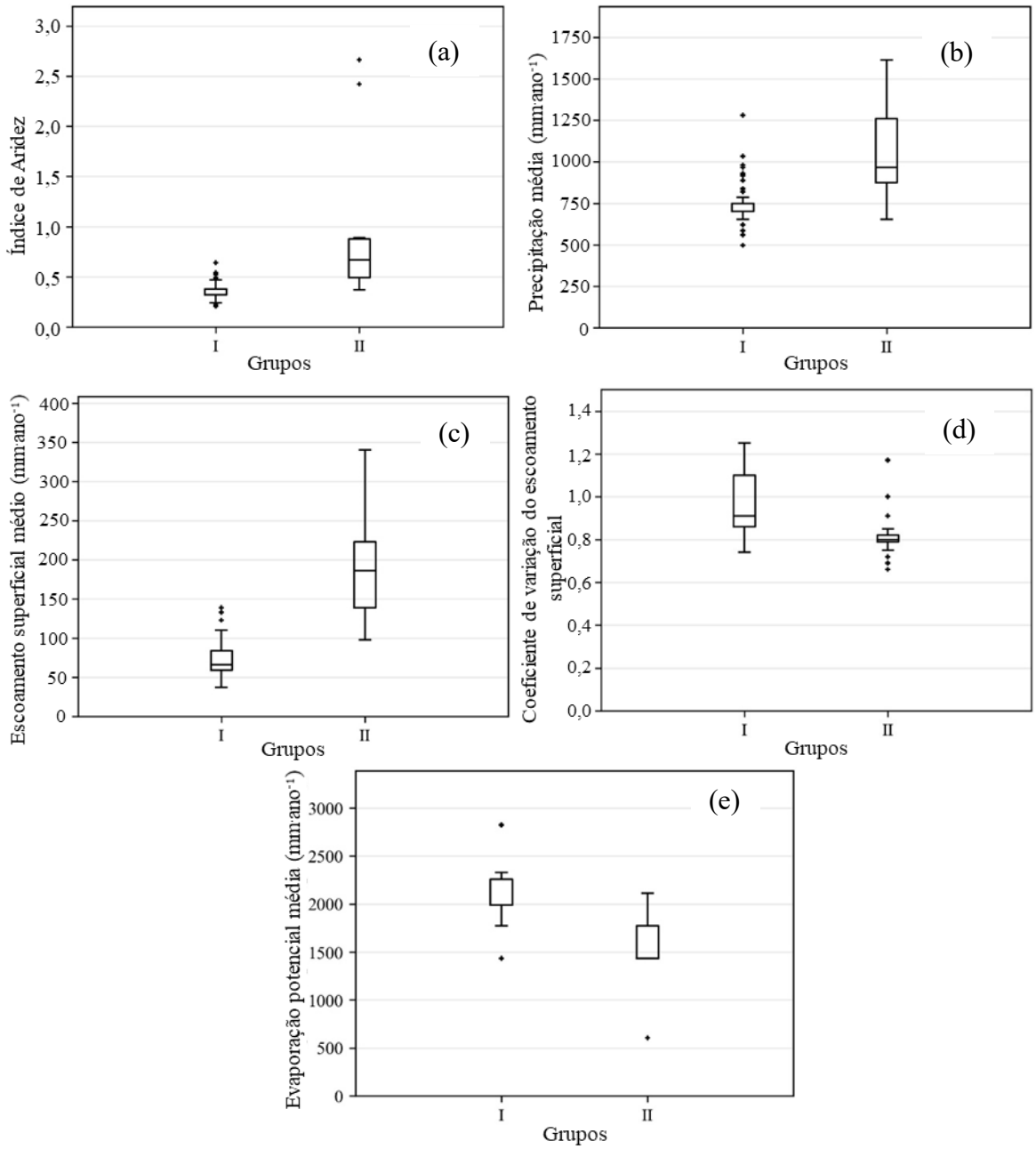
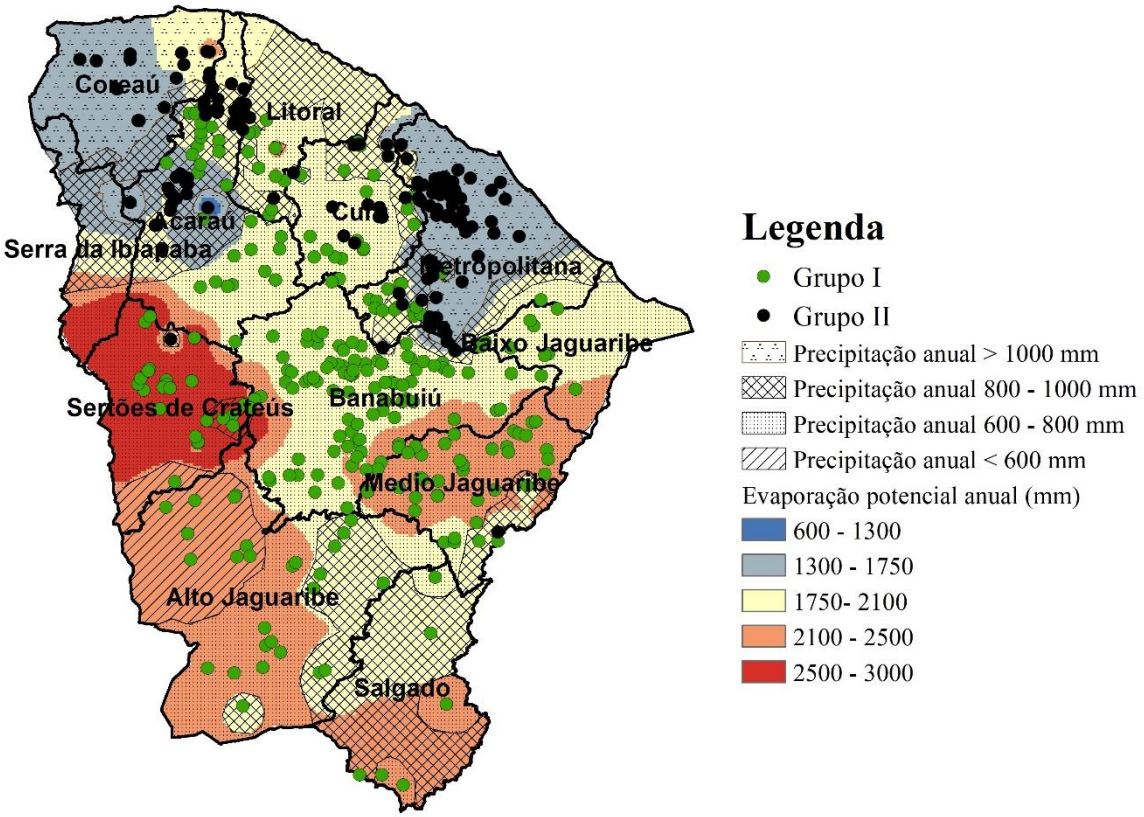


Figura 15 – Distribuição espacial dos grupos de reservatórios de acordo com a Análise de Agrupamento Hierárquico e características climáticas no estado do Ceará.



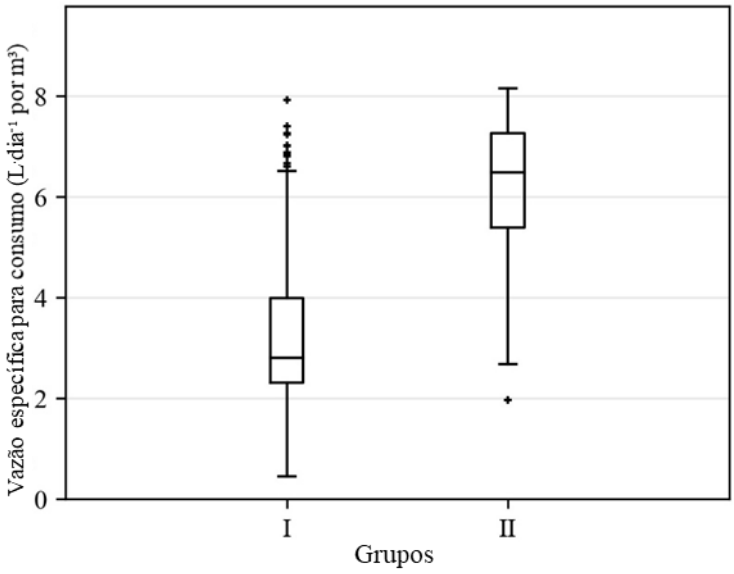
6.3.2 Critérios operacionais do reservatório de acordo com o clima

A separação dos reservatórios em grupos resultou em critérios de uso específicos da água para cada grupo, aqui expresso como a vazão específica para consumo (ou seja, a razão da retirada máxima diária de água pela capacidade de armazenamento do reservatório) que levou à maior renda possível. A Figura 16 ilustra que, enquanto os reservatórios do Grupo I, em condições mais secas, devem ser operados com retirada máxima diária de água entre 2 e 4 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório, os reservatórios do Grupo II podem ser utilizados de forma mais intensa, com vazão específica para consumo na faixa de 5 a 7 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório.

Além das condições mais secas, a variabilidade temporal do escoamento superficial para os reservatórios do Grupo I (ver Figura 14d) contribui para reduzir o volume de água que pode ser fornecido por esses reservatórios, devido às incertezas de quando e

quanta água entrará. Van Oel et al. (2008) afirmam que um alto coeficiente de variação das afluências a montante no reservatório Orós pode resultar em uma menor produção de água, o mesmo comportamento sendo observado por Campos (2010) no reservatório de Trussu, ambos reservatórios estão situados na área deste estudo.

Figura 16 – Vazão específica da água nos grupos de reservatórios formados na Análise de Agrupamento Hierárquico.

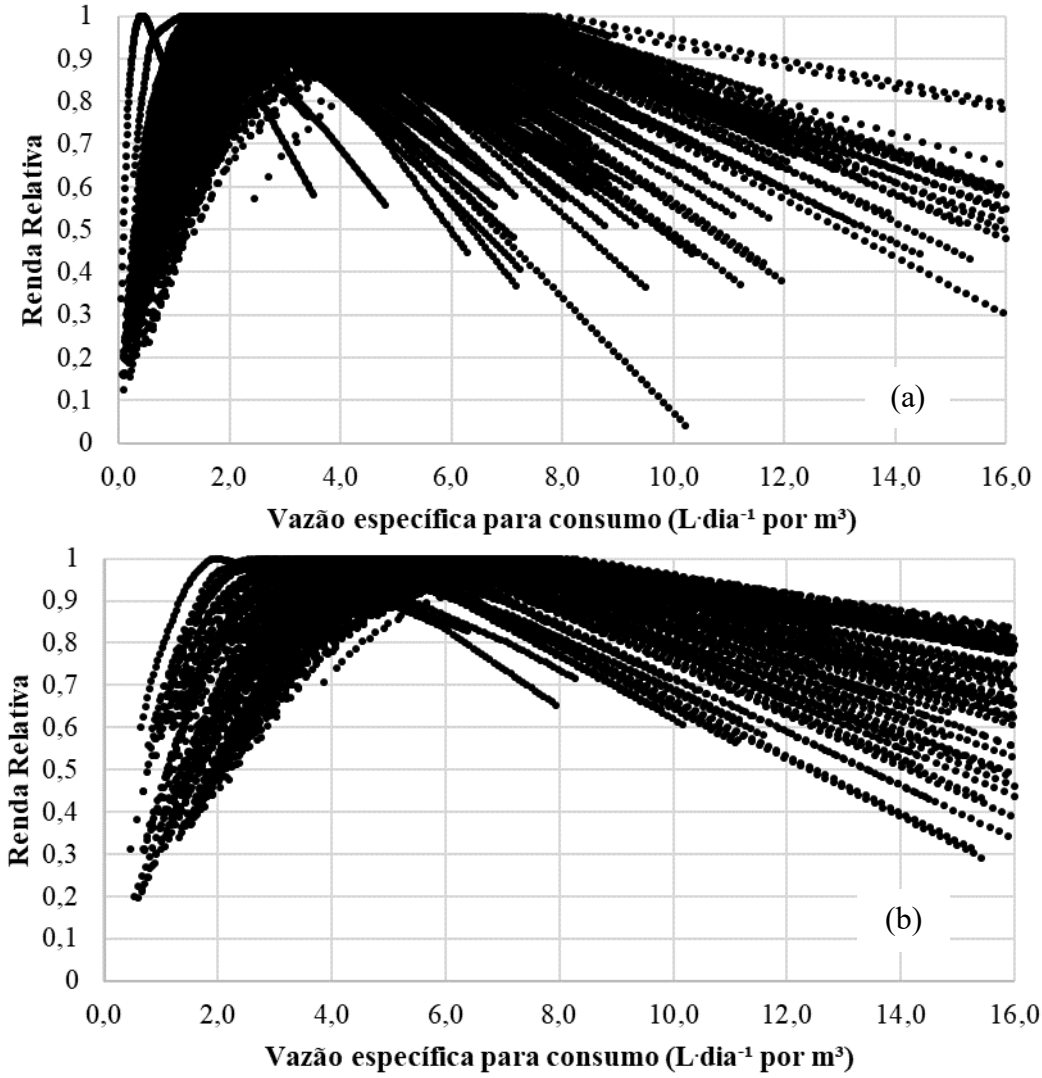


A Figura 17 apresenta a renda relativa *versus* a vazão específica para consumo nos os grupos de reservatórios. As figuras indicam uma alta variação no valor da vazão específica para consumo que maximiza a receita entre os reservatórios, mas admitir um valor fixo para cada grupo de reservatórios permite obter receitas elevadas, ajudando a estabelecer critérios de operação de pequenos reservatórios não estratégicos mesmo sob escassez de dados. Para o Grupo I, uma vazão específica fixa de 4 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório produz receitas de pelo menos 80% da maior possível na maioria dos reservatórios, e no Grupo II, o valor fixo que produz receitas elevadas para a maioria dos reservatórios é de 6 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório.

O tempo de residência (τ) é um parâmetro chave para dimensionar reservatórios em regiões semiáridas, sendo $\tau \sim 2$ anos a referência para definir a capacidade de armazenamento do reservatório na região de estudo (CAMPOS, 2010), mas Brasil e Medeiros (2020) argumentam que é útil também para definir os critérios de operação de pequenos reservatórios não estratégicos. Neste estudo, avaliamos se o tempo de residência da água pode ser utilizado para subsidiar a definição dos critérios de operação do reservatório. A Figura 18

apresenta a vazão específica para consumo *versus* tempo de residência para os grupos de reservatórios.

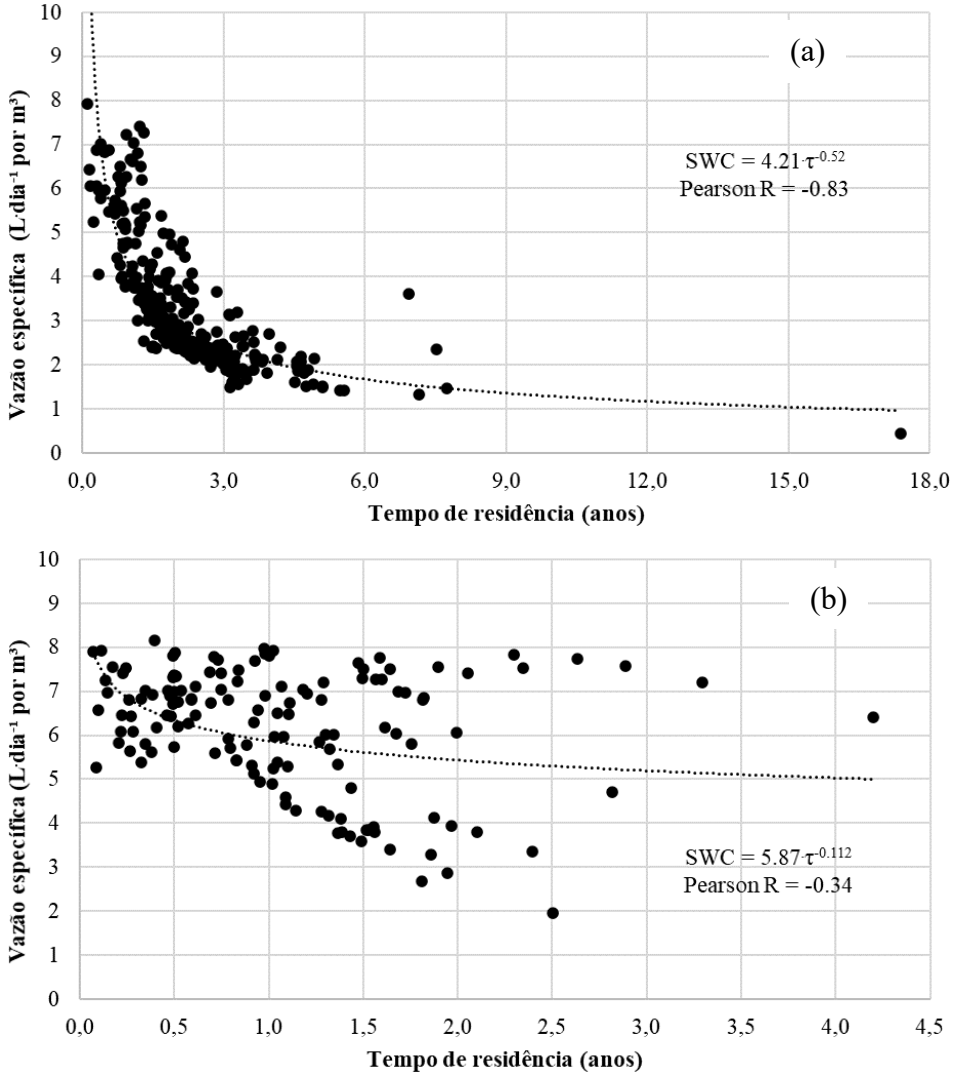
Figura 17 – Renda relativa *versus* vazão específica para consumo do Grupo I (a – composto pelos reservatórios das áreas mais secas) e Grupo II (b – composto pelos reservatórios das áreas mais úmidas).



Para o Grupo I (Figura 18a), foi observada uma alta correlação negativa (Pearson R = -0,83) entre vazão específica e o tempo de residência na água. Tal achado apoia uma melhor definição dos critérios de uso da água, uma vez que a capacidade e a vazão do reservatório, usadas para calcular o tempo de residência, são facilmente obtidas ou podem ser estimadas com dados limitados. Por exemplo, Pereira et al. (2019) desenvolveram um método no qual a capacidade do reservatório é calculada a partir da área inundada e do perímetro do reservatório, que pode ser obtido, por exemplo, a partir de conjuntos de dados disponíveis,

como o *Global Surface Water Explorer* (PEKEL et al., 2016).

Figura 18 – Relação da vazão específica para consumo *versus* tempo de residência de água para o Grupo I (a – composto pelos reservatórios das áreas mais secas) e Grupo II (b – composto pelos reservatórios das áreas mais úmidas).



Por outro lado, as mesmas variáveis (vazão específica para consumo e tempo de residência de água) estão mal correlacionadas (Pearson R = -0,33) nos reservatórios do Grupo II (Figura 18b). Para este grupo específico de reservatórios, localizados em áreas mais úmidas e apresentando menor variabilidade hidrológica, recomenda-se a definição de um valor fixo da vazão específica (6 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de reservatório, ver Figura 16b).

Neste trabalho avaliamos as características hidrológicas que controlam a operação de pequenos reservatórios não estratégicos usados para irrigar suplementarmente as

plantações de milho, com foco no *trade-off* entre consumo da água pela irrigação e a evaporação. A influência de outros fatores dos módulos agrícolas e econômicos do modelo NeStRes (como características da cultura, possibilidade de cultivo sob estresse hídrico, retorno e taxas de juros, variação do preço da produção) ainda são pouco conhecidos e devem ser melhor analisados para melhor promover compreensão da operação de reservatórios não estratégicos.

7 CONCLUSÕES

O abastecimento humano de água em terras áridas geralmente é realizado pelo armazenamento de água em reservatórios superficiais estratégicos operados com alto nível de garantia para evitar falhas no abastecimento. No entanto, essa prática é ineficiente para pequenos reservatórios incapazes de ofertar água por longos períodos, sob altas taxas de evaporação, sem o esvaziamento completo do volume armazenado. Portanto, o modelo NeStRes tem a proposta de propor operação dos pequenos reservatórios não estratégicos para fins do desenvolvimento da agricultura irrigada em terras áridas, com a mudança de paradigma de usar a água para a produção agrícola e economizar os rendimentos adquiridos através da prática, ao invés de economizar água, que é susceptível a perda por evaporação.

A simulação de 91 reservatórios inseridos na Bacia do Rio Banabuiú na região semiárida do Brasil, indicou que os rendimentos máximos obtidos com a irrigação são alcançados quando os reservatórios são operados com níveis de garantia no abastecimento diário de água na faixa de 32% a 66%, ou seja, permitindo seu completo esvaziamento em aproximadamente um terço a dois terços do tempo com regime de irrigação suplementar. A operação dos reservatórios na BRB com um nível de garantia fixo de abastecimento diário de água em 54% produz, pelo menos, 85% dos rendimentos máximos possíveis para todos os reservatórios simulados.

O nível ótimo de garantia no abastecimento diário para fins da irrigação se correlaciona com o tempo de residência da água nos reservatórios (Pearson R = -0,59). Portanto, o tempo de residência da água pode ser usado como um parâmetro para definir o índice de confiabilidade em pequenos reservatórios para a irrigação na BRB com a possibilidade de escassez de dados hidrológicos.

Importantes informações podem ser obtidas da aplicação do modelo NeStRes sobre o papel desempenhado por diferentes reservatórios no sistema de água: considerando que a prática comum de “economizar água” é desejada para reservatórios estratégicos, reduzindo o risco de falha no abastecimento de água humana, reservatórios não estratégicos podem ser explorados mais intensamente para gerar renda com a agricultura irrigada em terras áridas.

Simulação de 412 reservatórios não estratégicos na região semiárida do Brasil com NeStRes (Modelo de operação de reservatórios não estratégicos para irrigação em regiões secas) mostra que o uso mais intenso da água gera maior renda. A regra de operação que maximiza a receita é fortemente dependente do clima, e irrigar acima do ótimo é mais

eficiente do que irrigar com vazões menores.

Os critérios gerais propostos neste trabalho de uso de água para a irrigação de milho na região estudada são: para reservatórios em condições mais secas, um vazão específica para consumo de 4 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade de armazenamento do reservatório produz rendimentos de pelo menos 80% dos mais altos possíveis na maioria dos reservatórios, enquanto nas áreas mais úmidas da costa e em grandes altitudes, o valor fixo que produz altas receitas para a maioria dos reservatórios é de 6 $L \cdot dia^{-1}$ por m^3 de capacidade do reservatório. Além disso, o critério de operação ideal está bem correlacionado com o tempo de residência da água nos reservatórios, o que pode ser utilizado para definir com mais precisão a vazão específica para consumo para cada estrutura.

Os resultados apresentados neste estudo fornecem informações sobre como o *trade-off* entre o consumo de água e a evaporação afeta a receita gerada pela irrigação em terras áridas. O procedimento adotado neste trabalho abre caminho para estabelecer critérios específicos de operação para reservatórios ou em outras regiões com escassez de água pelo mundo, evitando a adoção de regras fixas que impeçam a maximização da receita.

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**, v. 9, n. 24, p. 1867-1877, 2014.

ACHEAMPONG, D.; BALANA, B. B.; NIMOH, F. ; ABAIDOO, R. C. Assessing the effectiveness and impact of agricultural water management interventions: the case of small reservoirs in northern Ghana. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 163-170, 2018.

ANA. **HidroWeb: Sistema de informações hidrológicas**. Agência Nacional das Águas – ANA. 2018. Disponível em http://www.snirh.gov.br/hidroweb

ANA. **Uso da água na agricultura de sequeiro no Brasil (2013-2017)**. Agência Nacional de Águas, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. - Brasília: ANA, 2020.

ARAÚJO, J. C. de; GÜNTER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R.; HAUSCHILD, M.; MENDIONDO, E. M. Water Scarcity Under Scenarios for Global Climate Change and Regional Development in Semiarid Northeastern Brazil, **Water International**, v. 2, p. 209-220, 2004.

ARAÚJO, J. C. de; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrol Sci J**, v. 51, n. 1, p. 157–170, 2006.

ARAÚJO, J. C. de; MEDEIROS, P. H. A. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments. **Australasian Journal of Water Resources**, v. 17, n. 1, p. 87-100, 2013.

ARAÚJO, J. C. de; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. **Water Internationa**l, 2016.

ARAÚJO, J. C. de; MAMEDE, G. L.; de LIMA, B. P. Hydrological guidelines for reservoir operation: Application to the Brazilian semiarid region. **Water**, v. 10, p. 16-28, 2018.

AYANTUNDE, A. A.; COFIE, O.; BARRON, J. Multiple uses of small reservoirs in crop-livestock agro-ecosystems of Volta basin: Implications for livestock management. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 81-90, 2018.

Banco Mundial. **Relatório Anual de 2017 do Banco Mundial**, Washington, DC: Banco Mundial, 2017. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27986. License: CC BY-NC-ND 3.0 IGO.

BRASIL Lei Nº 9433, de 8 janeiro de 1997. Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em 15 de março de 2021

BRASIL, P. P. **Proposta de uso racional da água de reservatórios não-estratégicos para agricultura irrigada**. Dissertação. 51 f. (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BRASIL, P. P.; MEDEIROS, P. H. A. NeStRes – model for operation of Non-Strategic

Reservoirs for irrigation in drylands: model description and application to a semiarid basin. **Water Resources Management**. 34:1, 195–210, 2020.

BRASIL. Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1997.

BRISCOE, J. Water security: why it matters and what to do about it. **Innov. Technol. Gov. Global**, v. 4, p. 3–28, 2009.

CAMPOS, J. N. B. Modeling the yield-evaporation-spill in the reservoir storage process: the regulation triangle diagram. **Water Resour Manag**, v. 24, p. 3487–3511, 2010.

CAMPOS, J. N. B. Paradigms, and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective**. Environ Manag**, v. 55, p. 1052–1063, 2015.

CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 88, n. 2, p. 1113–1125, 2016.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Volume 6, safra 2018/19, n.2 – Segundo levantamento. Companhia Nacional de Abastecimento. 2018.

de FRAITURE, C.; GIORDANO, M. Small private irrigation: A thriving but overlooked sector. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 167-174, 2014.

de FRAITURE, C.; KOUALI, G. N.; SALLY, H.; KABRE, P. Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 212-220, 2014.

DI BALDASSARRE, G.; WANDERS, N.; AGHAKOUCHAK, A.; KUIL, L.; RANGECROFT, S.; VELDKAMP, T. I. E.; GARCIA, M.; van OEL, P. R.; BREINL, K.; van LOON, A. F. Water shortages worsened by reservoir effects. **Nature Sustainability**, v. 1, p. 617– 622, 2018.

DOUXCHAMPS, S.; AYANTUNDE, A.; BARRON, J. Taking stock of forty years of agricultural water management interventions in smallholder systems of Burkina Faso. **Water resources and rural development**, v. 3, p. 1-13, 2015.

DUCROT, R. Is small-scale irrigation an efficient pro-poor strategy in the upper Limpopo Basin in Mozambique? **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 100, p. 383-392, 2017.

EMBRAPA – **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. Roseli Freire de Melo, Tadeu Vinhas Voltolini, editores técnicos, Brasília-DF, 2019.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Land and Water Development Division**. CROPWAT Model. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 2010.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Save and Grow: A Policymakers Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production**. Rome, Italy, 2011.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Drought**. 2017. http://www.fao.org/land-water/water/drought/en/. Acesso em 27/11/2020.

FAULKNER, J. W.; STEENHUIS, T.; DE GIESEN, N. V.; ANDREINI, M.; LIEBE, J. R. Water use and productivity of two small reservoir irrigation schemes in Ghana's upper east region. **Irrig. and Drain**, v. 57, p. 151–163, 2008.

FIGUEIREDO, J. V.; ARAÚJO, J. C. de; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, C. A. G. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, northeastern Brazil. **Hydrol Process**, v. 30, p. 2390–2400, 2016.

FOWE, T.; KARAMBIRI, H.; PATUREL, J. E; POUSSIN, J. C.; CECCHI, P. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 99-109, 2015.

FRIZZONE, J. A.; LIMA, S. C. R. V.; LACERDA, C. F.; MATEOS, L. Socio-Economic Indexes for Water Use in Irrigation in a Representative Basin of the Tropical Semiarid Region. **Water**, v. 13, n. 2643, 2021.

GIORDANO, M.; de FRAITURE, C. Small private irrigation: Enhancing benefits and managing trade-offs. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 175-182, 2014.

GRAY, D.; SADOFF, C. W. **Water for Growth and Development**. World Bank, Washington DC, 2006.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; de NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95–106, 2014.

HABETS, F.; MOLÉNAT, J.; CARLUER, N.; DOUEY, O.; LEENHARDT, D. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: a review. **Sci Total Environ**, v. 643, p. 850–867, 2018.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Appl Eng Agric**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985.

HEINE, I.; FRANCKE, T.; ROGAß, C.; MEDEIROS, P. H. A.; BRONSTERT, A.; FÖRSTER, S. Monitoring seasonal changes in the water surface areas of reservoirs using TerraSAR-X time series data in semiarid northeastern Brazil. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, p. 3190-3199, 2014.

INMET. **Normais climatológicas brasileiras 1981–2010**. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018.

KANDASAMY, J.; SOUNTHARARAJAH, D.; SIVABALAN, P.; CHANAN, A.; VIGNESWARAN, S.; SIVAPALAN, M. Socio-hydrologic drivers of the pendulum swing between agricultural development and environmental health: a case study from Murrumbidgee River basin, Australia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1027-1041, 2014.

KROL, M. S.; de VRIES, M. J.; van OEL, P. R.; ARAÚJO, J. C. de. Sustainability of Small Reservoirs and Large-Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. **Water Resour Manage**, v. 25, p. 3017–3026, 2011.

KUIL, L.; CARR, G.; VIGLIONE, A.; PRSKAWETZ, A.; BLÖSCHL, G. Conceptualizing socio-hydrological drought processes: the case of the Maya collapse. **Water Resour Res**, v. 52, p. 6222–6242, 2016.

LIMA, T. B. R.; **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos**. Dissertação. 94 f. (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

LIMA JÚNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MÂCEDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; de ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, p. 319-333, 2011.

LIU, J.; YANG, H.; CUDENNEC, C.; GAIN, A. K.; HOFF, H.; LAWFORD, R.; QI, J.; de STRASSER, L.; YILLIA, P. T.; ZHENG, C. Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus, **Hydrological Sciences Journal**, v. 62, n. 11, p. 1714-1720, 2017.

MACHIWAL, D.; DAYAL, D.; KUMAR, S. Estimating Water Balance of Small Reservoirs in Arid Regions: A Case Study from Kachchh, India. **Agricultural Research**, v. 6, p. 57-65, 2017.

MAMEDE, G. L.; ARAÚJO, N.; SCHNEIDER, C. M.; de ARAÚJO, J. C.; HERRMANN, H.J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **PNAS**. 109:19, 7191–7195, 2012.

MAMEDE, G. L.; GÜNTNER, A.; MEDEIROS, P. H. A.; de ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT A. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **J Hydrol Eng**, v. 23, n. 12, 05018020, 2018.

MEDEIROS, P. H. A.; de ARAÚJO, J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **J Soils Sediments**, v. 14, p. 1216–1223, 2014.

MEDEIROS, P. H. A.; SIVAPALAN, M. From hard-path to soft-path solutions: slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1803-1814, 2020.

MOREIRA, A.G. **Apropriação desigual da água na Chapada do Apodi: espoliação, privatização e exportação**. Dissertação. 111 f. (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graudação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

NAKAWUKA, P.; LANGAN, S.; SCHMITTER, P.; BARRON, J. A review of trends, constraints, and opportunities of smallholder irrigation in East Africa. **Global Food Security**, v. 17, p. 196-212, 2017.

NASCIMENTO, A. T. P.; CAVALCANTI, N. H. M.; CASTRO, B. P. L.; MEDEIROS, P. H. A. Decentralized water supply by reservoir network reduces power demand for water

distribution in a semi-arid basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p. 80-91, 2019.

NUNES, L. F. C. V.; MEDEIROS, P. H. A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **REGA – Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 18, 2020.

OGILVIE, A.; RIAUX, J.; MASSUEL, S.; MULLIGAN, M.; BELAUD, G.; GOULVEN, P.; CALVEZ, R. Socio-hydological drivers of agricultural water use in small reservoirs. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 17-29, 2019.

OUYANG, Y.; FENG, G.; LEININGER, T. D.; READ, J.; JENKINS, J. N. Pond, and irrigation model (PIM): a tool for simultaneously evaluating pond water availability and crop irrigation demand. **Water Resour Manag**, v. 32, p. 2969–2983, 2018.

PALANISAMI, K.; MEINZEN-DICK, R.; GIORDANO, M. Climate change and water supplies: options for sustaining tank irrigation potential in India. **Economic and Political Weekly**, v. 45, n.26-27, p. 183–190, 2010.

PANDE, S.; SAVENIJE, H. H. G. A sociohydrological model for smallholder farmers in Maharashtra, India. **Water Resour Res**, v. 52, p. 1923–1947, 2016.

PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**. 540, 418–422, 2016.

PEREIRA, B. S.; MEDEIROS, P. H. A.; FRANCKE, T.; RAMALHO, G. B.; FOERSTER, S.; de ARAÚJO, J. C. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrol Sci J**, v. 64, n. 1, p. 66-79, 2019.

PETER, S. J.; de ARAÚJO, J. C.; ARAÚJO, N. A. M.; HERRMAN, H. J. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 408-420, 2014.

PINHEIRO, F.D. **Açudagem particular em cooperação no Ceará**. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS, p. 732, 2004.

POUSSIN, J. C.; RENAUDIN, L.; ADOGOBA, D.; SANON, A.; TAZEN, F.; DOGBE, W.; FUSILIER, J. L.; BARBIER, B.; CECCHI, P. Performance of small reservoir irrigated schemes in the Upper Volta basin: Case studies in Burkina Faso and Ghana. **Water resources and rural development**, v. 6, p. 50-65, 2015.

ROOBAVANNAN, M.; KANDASAMY, J.; PANDE, S.; VIGNESWARAN, S.; SIVAPALAN, M. Role of sectoral transformation in the evolution of water management norms in agricultural catchments: a sociohydrologic modeling analysis. **Water Resour Res**, v. 53, n. 10, p. 8344–8365, 2017.

SANFO, S.; BARBIER, B.; DABIRÉ, I. W. P.; VLEK, P. L. G.; FONTA, W. M.; IBRAHIM, B.; BARRY, B. Rainfall variability adaptation strategies: an ex-ante assessment of supplemental irrigation from farm ponds in southern Burkina Faso. **Agric Syst**, v. 152, p. 80–89, 2017.

SCHILL, C.; ANDERIES, J. M.; LINDAHL, T.; FOLKE, C.; POLASKY, S.; CÁRDENAS, J. C.; CRÉPIN, A. S.; JANSSEN, M. A.; NORBERG, J.; SCHLÜTER, M. A more dynamic

understanding of human behaviour for the Anthropocene. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 12, p. 1075–1082, 2019.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: a new science of people and water. **Hydrol Process**, v. 26, p. 1270–1276, 2012.

SIVAPALAN, M.; BLÖSCHL, G. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. **Water Resour. Res**, v. 51, p. 6988–7022, 2015.

SRINIVASAN, V.; LAMBIN, E. F.; GORELICK, S. M.; THOMPSON, B. H.; ROZELLE, S. The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. **Water Resources Research**, v. 48, W10516, 2012.

TAMBURINO, L.; DI BALDASSARRE, G.; VICO, G. Water management for irrigation, crop yield and social attitudes: a socio-agricultural agent-based model to explore a collective action problem. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1815–1829, 2020.

USDA. **Urban hydrology for small watersheds**. United States Department of Agriculture, Washington. 1986.

van der ZAAG, P.; GUPTA, J. Scale issues in the governance of water storage projects. **Water Resour Res**, v. 44, W10417, 2008.

van OEL, P. R.; KROL, M. S.; HOESKTRA, A. Y.; de ARAÚJO, J. C. The impact of upstream water abstraction on reservoir yield: the case of the Orós Reservoir in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 4, p. 857-867, 2008.

VENOT, J. P.; CECCHI, P. Valeurs d'usage ou performances techniques: comment apprécier le rôle des petits barrages en Afrique subsaharienne. **Cah**. **Agric**, v. 20, n. 1–2, p. 112–117, 2011.

VENOT, J. P.; KRISHNAN, J. Discursive framing: debates over small reservoirs in the Rural South. **Water Altern**, v. 4, n. 3, p. 316–324, 2011.

VICO, G.; TAMBURINO, L.; RIGBY, J. R. Designing on-farm irrigation ponds for high and stable yield for different climates and risk-coping attitudes. **Journal of Hydrology**, v. 584, 2020.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301: p. 236-244, 1963.

WIEGAND, M. C.; PIEDRA, J. I. G.; de ARAÚJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 415–424, 2016.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In D.A. Wilhite (Ed.), **Droughts: global assessment**. London: Routledge, 2000.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J. Understanding the complex impacts of drought: A key to improving drought mitigation and preparedness. **Water Resources Management**. v. 21, n. 5, p. 763-774, 2007.

WISSER, D.; FROLKING, S.; DOUGLAS, E. M.; FEKETE, B. M.; SCHUMANN, A. H.; VÖRÖSMARTY, C. J. The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production – A global-scale analysis. **Jornal of Hydrology**, v. 384, p. 264-275, 2010.

XIE, H.; YOU, L.; WIELGOSZ, B.; RINGLER, C. Estimating the potential for expanding smallholder irrigation in Sub-Saharan Africa. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 183–193, 2014.

XIE, H.; YOU, L.; TAKESHIMA, H. Invest in small-scale irrigated agriculture: A national assessment on potential to expand small-scale irrigation in Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 251–264, 2017.

YOHANNES, D. F.; RITSEMA, C. J.; SOLOMON, H.; FROEBRICH, J.; van DAM, J. C. Irrigation water management: Farmers' practices, perceptions, and adaptations at Gumselassa irrigation scheme, North Ethiopia. **Agricultural Water Management**, v. 191, p. 16–28, 2017.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P.; de ARAÚJO, J. C.; MOTAGH, M.; WASKE, B. Bathymetric survey of water reservoirs in North-Eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. **Sci Total Environ**, v. 571, p. 575 – 593, 2016.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P. H. A.; de ARAÚJO, J. C.; DUAN, Z.; BRONSTERT, A.; WASKE, B. Mapping regional reservoir surface water volume variation in northeastern Brazil during 2009-2017 using high-resolution satellite images. **Science of the Total Environment**, v. 789, n. 147711, 2021.

ANEXO A – INFORMAÇÕES DOS RESERVATÓRIOS NÃO ESTRATÉGICOS UTILIZADOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÃO DE RENDA E VAZÃO ESPECÍFICA

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Aguiar	Acaraú	-3,47	-40,35	0,92	5,0	837	1.775	84	51	2,3	R$ 12.260
Alcante	Acaraú	-3,51	-40,14	0,81	6,3	875	1.775	186	46	6,7	R$ 20.112
Altinhos	Acaraú	-3,43	-40,24	1,38	4,0	875	1.775	186	46	3,3	R$ 20.176
Anapu II	Acaraú	-3,50	-40,10	2,20	8,3	875	1.775	186	49	3,7	R$ 36.358
Apurinã	Acaraú	-3,43	-40,36	4,38	17,0	837	1.775	84	44	2,0	R$ 40.739
Argentina	Acaraú	-3,37	-40,24	2,19	21,9	875	1.775	186	50	7,0	R$ 61.788
Bananeiras	Acaraú	-4,16	-40,63	0,95	3,7	919	1.775	188	38	5,3	R$ 22.326
Barra de Juá	Acaraú	-4,31	-39,86	2,95	118,0	753	1.775	84	47	6,9	R$ 77.162
Bom Futuro	Acaraú	-3,84	-40,37	1,84	11,0	837	1.775	84	50	2,5	R$ 23.751
Buri	Acaraú	-3,77	-40,57	1,02	5,3	837	1.775	84	45	2,5	R$ 11.890
Canadá	Acaraú	-4,03	-40,54	2,88	9,9	875	1.775	186	46	3,8	R$ 53.591
Capim-Açu	Acaraú	-3,49	-40,05	2,00	9,4	875	1.775	186	50	4,3	R$ 37.409
Caraúbas	Acaraú	-3,63	-40,24	2,49	9,5	837	1.775	84	44	2,0	R$ 23.705
Caruaru	Acaraú	-4,12	-40,34	0,92	3,1	753	1.775	84	44	1,8	R$ 7.537
Chagas Barreto	Acaraú	-3,70	-40,24	0,98	7,0	837	1.775	84	47	3,0	R$ 11.709
C. do Arroz	Acaraú	-3,07	-40,30	4,09	94,0	1.067	2.115	194	61	6,5	R$ 152.039
Éden	Acaraú	-3,66	-40,37	0,22	0,6	837	1.775	84	39	1,6	R$ 1.275
Elísio	Acaraú	-3,99	-40,51	0,91	4,5	875	1.775	186	49	4,6	R$ 19.280
Eurípedes	Acaraú	-3,93	-40,56	1,01	2,8	875	1.775	186	49	2,9	R$ 13.073
Expedito	Acaraú	-3,53	-40,15	0,73	5,0	875	1.775	186	48	5,9	R$ 16.552
Formiga	Acaraú	-4,31	-40,60	0,48	1,1	919	1.775	188	37	3,4	R$ 7.572
Francisco Ponte	Acaraú	-3,56	-40,09	0,70	2,5	875	1.775	186	49	3,6	R$ 11.316
Groaíras	Acaraú	-4,51	-39,88	1,89	24,6	753	1.775	84	44	5,2	R$ 34.677
Guimarães	Acaraú	-3,90	-40,44	1,17	4,6	875	1.775	186	46	4,1	R$ 22.306
Guriú	Acaraú	-3,42	-40,12	1,38	7,3	875	1.775	186	48	4,9	R$ 29.753
Helianto	Acaraú	-3,30	-40,28	0,53	3,0	1.067	2.115	194	42	6,3	R$ 17.104
Hermeto	Acaraú	-3,46	-40,11	1,27	5,0	875	1.775	186	49	3,8	R$ 20.785
Iratinga	Acaraú	-4,07	-40,55	1,66	6,7	919	1.775	188	36	5,7	R$ 38.359
Japiaçu	Acaraú	-4,54	-40,15	1,45	10,5	753	1.775	84	44	3,5	R$ 17.746
Julira	Acaraú	-3,97	-40,44	1,35	8,2	875	1.775	186	46	5,8	R$ 34.111
Lagoa Seca	Acaraú	-3,87	-40,44	0,73	4,7	875	1.775	186	49	5,4	R$ 15.515
Lituânia	Acaraú	-3,41	-40,11	0,67	7,0	875	1.775	186	54	6,2	R$ 16.728
Magalhães Pinto	Acaraú	-4,32	-40,04	1,17	6,5	753	1.775	84	46	2,7	R$ 14.228
Mantença	Acaraú	-4,55	-40,19	1,77	11,0	753	1.775	84	49	2,8	R$ 24.035
Manuel Dias	Acaraú	-4,17	-40,64	1,28	5,4	919	1.775	188	37	5,8	R$ 31.788
Maria de Jesus	Acaraú	-3,55	-40,29	0,60	5,2	837	1.775	84	44	3,7	R$ 7.913
Martins Filho	Acaraú	-4,36	-40,14	4,15	20,2	753	1.775	84	46	2,4	R$ 49.832
Milério	Acaraú	-3,47	-40,32	0,67	2,6	875	1.775	186	49	3,8	R$ 11.316
Monte	Acaraú	-3,91	-40,19	2,47	13,8	837	1.775	84	45	2,7	R$ 30.219
Monte Silva	Acaraú	-3,96	-40,55	0,80	4,7	875	1.775	186	49	5,1	R$ 16.782
Monte Só	Acaraú	-3,61	-40,35	0,90	11,1	837	1.775	84	44	4,8	R$ 15.842
Morgado	Acaraú	-3,44	-40,14	1,26	11,1	875	1.775	186	50	6,5	R$ 31.561
Morro Vermelho	Acaraú	-3,42	-40,33	0,62	3,5	875	1.775	186	49	4,9	R$ 13.300
Otílio	Acaraú	-3,43	-40,26	2,06	7,3	875	1.775	186	46	3,8	R$ 36.828
Pacheco	Acaraú	-3,38	-40,33	1,49	5,3	875	1.775	186	46	3,8	R$ 26.209
Pacova II	Acaraú	-3,32	-40,29	1,79	8,8	875	1.775	186	50	4,4	R$ 35.587

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Pajé	Acaraú	-4,00	-39,90	2,22	15,0	875	1.775	186	48	5,7	R$ 48.942
Pajeú	Acaraú	-3,80	-39,99	2,10	11,9	837	1.775	84	48	2,5	R$ 28.044
Papucu	Acaraú	-3,84	-40,48	0,52	5,8	875	1.775	186	54	6,4	R$ 13.364
Pedra Amarela	Acaraú	-4,14	-40,04	2,49	76,8	753	1.775	84	44	7,0	R$ 62.371
Pereiros II	Acaraú	-4,56	-40,36	0,63	10,7	753	1.775	84	46	5,4	R$ 11.647
Picos	Acaraú	-3,58	-40,35	1,20	4,4	837	1.775	84	42	2,1	R$ 11.776
Pintada	Acaraú	-4,88	-40,54	0,59	2,5	875	1.775	186	47	4,3	R$ 11.175
Pirituba	Acaraú	-4,02	-40,80	0,86	4,6	1.205	1.435	174	40	6,0	R$ 28.380
Portela	Acaraú	-3,78	-40,36	1,50	7,1	837	1.775	84	43	2,5	R$ 17.049
Quariguasi	Acaraú	-3,72	-40,41	1,30	3,3	837	1.775	84	40	1,5	R$ 8.849
Rangel	Acaraú	-4,90	-40,14	2,21	22,4	674	1.775	104	43	4,8	R$ 53.682
Reinaldo	Acaraú	-3,30	-40,08	0,95	17,5	1.067	2.115	194	61	6,1	R$ 33.214
Reparo	Acaraú	-4,46	-39,95	4,39	20,7	753	1.775	84	42	2,7	R$ 59.800
R. Cachoeirinha	Acaraú	-3,46	-40,43	1,46	5,9	837	1.775	84	43	2,2	R$ 15.099
R. dos Porcos	Acaraú	-3,52	-40,35	1,28	4,7	837	1.775	84	40	2,2	R$ 13.254
Riacho Papucu	Acaraú	-3,86	-40,51	7,74	26,8	875	1.775	186	45	3,9	R$ 150.671
Riacho Salgado	Acaraú	-4,52	-40,26	3,26	55,5	753	1.775	84	45	5,7	R$ 68.332
Rio Carcará	Acaraú	-3,70	-40,06	2,92	10,3	837	1.775	84	43	1,9	R$ 25.601
Sales	Acaraú	-4,10	-39,92	1,44	11,3	837	1.775	84	48	3,1	R$ 20.344
Santa Rita	Acaraú	-3,44	-40,08	1,45	20,5	875	1.775	186	61	5,6	R$ 34.756
Soares	Acaraú	-3,45	-40,25	1,17	7,6	875	1.775	186	49	5,4	R$ 23.869
Tamboatá	Acaraú	-3,40	-40,07	1,54	9,1	875	1.775	186	48	5,3	R$ 31.369
Timbaúba	Acaraú	-4,87	-40,40	3,95	28,9	674	1.775	104	43	3,6	R$ 66.879
Valparaíso	Acaraú	-4,24	-39,85	4,37	57,0	753	1.775	84	45	5,1	R$ 82.675
Verde	Acaraú	-4,87	-40,40	5,35	59,5	674	1.775	104	43	4,7	R$ 111.919
Vilebaldo	Acaraú	-3,46	-40,39	2,40	9,2	837	1.775	84	44	2,0	R$ 23.357
Acoci	Alto J.	-6,99	-40,14	1,95	18,0	621	2.331	51	27	4,8	R$ 41.501
Areré	Alto J.	-6,36	-39,60	1,12	12,5	888	1.901	77	39	5,5	R$ 22.218
Barreiro	Alto J.	-6,86	-39,85	1,09	6,3	621	2.331	77	22	3,8	R$ 14.924
Boa Vista	Alto J.	-6,11	-40,44	1,75	21,7	560	2.257	44	31	4,1	R$ 25.635
Cana-Brava	Alto J.	-6,98	-39,61	2,55	9,3	929	1.901	85	46	1,9	R$ 27.088
Cococá	Alto J.	-6,27	-40,42	2,34	31,8	560	2.257	44	33	3,9	R$ 26.643
Domingos G.	Alto J.	-5,94	-40,57	1,65	21,0	560	2.257	44	32	4,1	R$ 24.398
Elpídio M.	Alto J.	-5,90	-40,39	3,77	25,1	560	2.257	44	32	2,4	R$ 34.248
Feitosa	Alto J.	-5,87	-40,13	13,97	216,5	560	2.257	44	35	4,3	R$ 235.954
Forte	Alto J.	-5,88	-40,14	2,48	24,9	560	2.257	44	33	3,3	R$ 27.891
Herbster	Alto J.	-6,31	-39,78	1,14	7,0	653	2.331	52	29	3,1	R$ 17.572
Ipuçaba	Alto J.	-7,19	-40,09	4,85	28,9	929	1.901	51	43	3,2	R$ 74.874
Itaguá	Alto J.	-6,95	-40,31	1,89	17,9	621	2.331	51	28	4,6	R$ 43.080
Lagoa de Dentro	Alto J.	-6,81	-39,94	0,91	6,3	621	2.331	51	27	3,7	R$ 15.649
Lagoa do Arroz	Alto J.	-6,29	-39,76	3,05	44,4	653	2.331	52	32	5,7	R$ 81.753
Logradouro	Alto J.	-6,70	-39,95	1,78	27,0	621	2.331	51	30	6,2	R$ 45.180
Mucuim	Alto J.	-6,25	-40,13	7,01	133,1	560	2.257	44	33	5,0	R$ 125.965
Petrola	Alto J.	-6,19	-40,07	3,68	52,5	560	2.257	44	32	4,5	R$ 63.675
Pinho	Alto J.	-6,97	-39,57	1,23	19,0	929	1.901	51	42	6,3	R$ 29.780
Queirós Filho	Alto J.	-6,79	-39,91	2,73	29,1	621	2.331	51	29	5,0	R$ 58.399
Quinquê	Alto J.	-6,10	-39,45	0,32	1,3	888	1.901	77	42	2,2	R$ 3.141
Riacho do Saco	Alto J.	-6,25	-40,04	6,30	175,6	560	2.257	44	34	6,1	R$ 127.663
Riacho Tomás	Alto J.	-6,19	-39,51	4,24	99,5	888	1.901	77	45	6,9	R$ 105.673
Sanharó	Alto J.	-6,95	-39,96	0,88	4,4	621	2.331	51	27	2,7	R$ 12.771

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Santa Delfina	Alto J.	-6,45	-39,64	2,27	21,7	888	1.901	77	55	3,3	R$ 41.544
Sipaúba	Alto J.	-6,42	-39,20	0,38	2,5	888	1.901	77	48	2,5	R$ 2.984
Sítio S. Cruz	Alto J.	-6,03	-39,41	1,53	7,9	888	1.901	77	44	2,4	R$ 15.181
Escodeiro	Baixo J.	-4,51	-39,88	0,95	8,7	736	2.007	79	39	3,7	R$ 13.143
Gondim	Baixo J.	-4,80	-38,25	4,80	178,2	736	2.007	79	44	6,0	R$ 106.064
Imburana	Baixo J.	-4,64	-38,21	1,50	11,3	736	2.007	79	38	3,2	R$ 17.813
Ingarana	Baixo J.	-5,11	-38,21	1,55	20,0	725	2.007	97	38	6,5	R$ 31.904
Maia	Baixo J.	-4,98	-38,16	0,51	13,7	736	2.007	79	37	6,8	R$ 11.742
Meireles	Baixo J.	-4,77	-38,28	2,10	27,8	736	2.007	79	38	4,7	R$ 37.698
Moça-Branca	Baixo J.	-4,90	-38,56	0,76	6,5	725	2.007	97	36	5,2	R$ 15.325
Palhano	Baixo J.	-4,69	-38,10	3,95	21,1	736	2.007	79	40	2,3	R$ 38.433
Rio Palhano	Baixo J.	-4,93	-38,59	4,37	33,9	725	2.007	97	34	5,4	R$ 81.186
Santa Fé	Baixo J.	-4,99	-38,19	1,10	7,1	736	2.007	79	44	2,4	R$ 12.708
Adauto	Banabuiú	-5,77	-39,92	0,86	12,4	702	1.989	66	36	6,6	R$ 20.798
Águas Belas	Banabuiú	-4,87	-39,90	1,05	20,9	673	1.989	59	44	5,2	R$ 25.951
Alagoas	Banabuiú	-4,50	-39,48	0,58	3,1	749	1.989	66	43	2,4	R$ 7.503
Albertópolis	Banabuiú	-5,26	-39,06	1,49	9,5	749	1.989	66	46	2,5	R$ 22.056
Aracê	Banabuiú	-5,07	-39,00	2,84	21,7	749	1.989	66	49	2,6	R$ 40.751
Arcelino	Banabuiú	-5,05	-39,46	1,32	7,3	749	1.989	66	44	2,3	R$ 16.845
Assis Machado	Banabuiú	-4,94	-38,40	6,60	113,0	749	1.989	66	45	5,2	R$ 133.028
Barrigas	Banabuiú	-4,91	-39,62	3,21	17,0	749	1.989	66	43	2,3	R$ 38.866
Benevides	Banabuiú	-5,75	-39,93	2,45	30,0	702	1.989	66	33	6,5	R$ 61.985
Betúlia	Banabuiú	-5,04	-39,49	3,82	37,4	749	1.989	66	51	3,0	R$ 60.155
Cacodé	Banabuiú	-5,85	-39,63	1,03	7,1	702	1.989	66	38	3,4	R$ 18.859
Cairara	Banabuiú	-5,15	-39,82	0,50	3,6	673	1.989	59	47	2,1	R$ 4.969
Cais	Banabuiú	-5,15	-39,69	0,71	3,5	673	1.989	59	43	1,8	R$ 6.928
Campestre	Banabuiú	-5,00	-39,03	1,17	4,7	749	1.989	66	37	2,1	R$ 10.830
Campos Barros	Banabuiú	-4,90	-39,68	3,39	22,8	673	1.989	59	45	2,2	R$ 40.812
Capitão-Mor	Banabuiú	-5,08	-39,39	0,51	9,1	749	1.989	66	44	5,5	R$ 11.144
Castro	Banabuiú	-5,47	-39,41	0,80	8,1	749	1.989	66	37	3,4	R$ 9.897
Castro Filho	Banabuiú	-5,39	-39,42	5,61	22,9	749	1.989	66	46	2,2	R$ 56.846
Catita	Banabuiú	-4,96	-38,75	2,06	22,6	749	1.989	66	49	3,4	R$ 29.879
Chagas	Banabuiú	-4,99	-39,05	2,50	12,3	749	1.989	66	40	2,4	R$ 30.358
Cinco Riachos	Banabuiú	-5,02	-38,95	1,65	14,1	749	1.989	66	49	2,8	R$ 22.209
Cipó	Banabuiú	-4,92	-39,48	0,75	10,7	749	1.989	66	48	4,2	R$ 13.291
Climério	Banabuiú	-5,59	-39,34	0,46	3,5	702	1.989	66	40	3,5	R$ 8.634
Codiá	Banabuiú	-5,70	-39,31	5,88	95,8	702	1.989	66	40	6,3	R$ 144.502
Coque	Banabuiú	-5,37	-39,13	2,27	7,0	749	1.989	66	30	2,1	R$ 19.082
Coronel	Banabuiú	-5,19	-39,26	1,93	19,4	749	1.989	66	49	3,3	R$ 36.231
Costa Melo	Banabuiú	-5,04	-39,21	0,85	4,5	749	1.989	66	45	2,2	R$ 9.422
Costa Ribeiro	Banabuiú	-5,02	-39,24	2,87	11,8	749	1.989	66	38	2,1	R$ 28.690
Cozoline	Banabuiú	-5,04	-39,32	1,10	6,4	749	1.989	66	48	2,1	R$ 12.361
Crisântemo	Banabuiú	-5,28	-39,19	0,42	2,2	749	1.989	66	43	2,2	R$ 3.527
Diamantina	Banabuiú	-5,28	-39,08	2,12	17,5	749	1.989	66	49	2,9	R$ 37.213
Duarte	Banabuiú	-5,79	-39,49	1,08	7,0	702	1.989	66	33	3,7	R$ 16.225
Elpídio Luís	Banabuiú	-5,24	-39,98	0,93	8,0	673	1.989	59	47	2,6	R$ 12.537
Enéias	Banabuiú	-5,53	-39,38	0,50	2,1	702	1.989	66	30	2,8	R$ 5.551
Ferreira Sousa	Banabuiú	-5,10	-39,39	0,58	3,4	749	1.989	66	45	2,4	R$ 7.447
Ferros	Banabuiú	-4,93	-39,34	3,46	12,7	749	1.989	66	34	2,1	R$ 31.364
Fonte	Banabuiú	-5,28	-39,01	3,29	28,7	749	1.989	66	47	3,1	R$ 51.702

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Freitas	Banabuiú	-5,04	-39,21	1,00	5,8	749	1.989	66	42	2,6	R$ 15.172
Garcia	Banabuiú	-5,15	-39,15	2,07	14,4	749	1.989	66	48	2,5	R$ 30.640
Gaspar	Banabuiú	-5,05	-38,88	0,65	7,9	749	1.989	66	49	3,7	R$ 11.164
General Clarindo	Banabuiú	-5,16	-39,13	0,44	6,0	749	1.989	66	49	4,0	R$ 7.091
Guarujá	Banabuiú	-5,33	-39,21	1,97	13,8	749	1.989	66	47	2,7	R$ 31.639
Iêmen	Banabuiú	-5,74	-39,62	1,06	5,2	702	1.989	66	31	3,2	R$ 15.743
Ingirana	Banabuiú	-5,54	-40,38	1,51	20,0	749	1.989	66	48	4,0	R$ 26.477
Ipueiras	Banabuiú	-5,03	-38,83	1,20	9,7	749	1.989	66	48	2,7	R$ 15.022
Iraúna	Banabuiú	-4,86	-39,68	3,02	34,9	673	1.989	59	45	3,6	R$ 53.561
Itaguaí	Banabuiú	-5,09	-39,45	4,87	31,0	749	1.989	66	48	2,3	R$ 64.032
Jantar	Banabuiú	-5,08	-39,81	0,65	3,7	673	1.989	59	46	1,8	R$ 5.830
José Rangel	Banabuiú	-5,09	-39,78	0,85	4,9	673	1.989	59	42	2,2	R$ 9.951
Lagoa de Sá	Banabuiú	-5,27	-39,20	2,41	79,0	749	1.989	66	51	6,0	R$ 62.006
Maiadas	Banabuiú	-5,00	-39,84	0,82	6,5	673	1.989	59	47	2,4	R$ 10.588
M. Gonçalves	Banabuiú	-5,64	-39,74	2,05	14,8	702	1.989	66	39	3,5	R$ 39.625
Marengo	Banabuiú	-5,03	-39,54	17,33	120,0	749	1.989	66	46	2,8	R$ 303.246
Melo Neto	Banabuiú	-5,74	-39,74	0,69	2,9	702	1.989	66	36	2,2	R$ 8.597
Miraúna	Banabuiú	-4,86	-39,62	0,88	5,5	749	1.989	66	47	2,4	R$ 11.746
Monte Sião	Banabuiú	-5,08	-38,79	0,39	40,0	749	1.989	66	59	6,4	R$ 12.278
Montese	Banabuiú	-5,26	-40,02	0,89	50,2	673	1.989	59	52	6,0	R$ 25.168
Montevidéu	Banabuiú	-5,13	-39,67	3,60	30,0	673	1.989	59	43	2,9	R$ 56.975
Napoleão	Banabuiú	-5,42	-39,37	1,15	9,6	749	1.989	66	49	2,7	R$ 14.617
Novo	Banabuiú	-5,10	-38,40	0,53	49,8	749	1.989	66	60	6,1	R$ 15.102
Oliveira Castro	Banabuiú	-5,59	-39,51	3,08	26,7	702	1.989	66	41	3,9	R$ 67.121
Onofre	Banabuiú	-5,51	-39,35	0,85	5,5	702	1.989	66	31	4,1	R$ 10.878
Palmares	Banabuiú	-4,91	-39,06	2,03	8,4	749	1.989	66	37	2,2	R$ 20.008
Paradé	Banabuiú	-5,49	-39,48	2,28	15,9	702	1.989	66	30	4,5	R$ 31.935
Pirabibu	Banabuiú	-5,11	-39,41	0,97	11,1	749	1.989	66	51	3,4	R$ 17.881
Pompeu	Banabuiú	-5,02	-39,38	1,91	23,5	749	1.989	66	49	3,7	R$ 33.788
Raiz	Banabuiú	-5,06	-38,83	1,50	5,0	749	1.989	66	32	2,1	R$ 12.592
Retiro	Banabuiú	-5,32	-38,46	3,61	11,8	749	1.989	66	30	2,2	R$ 32.711
R. Canhotinho	Banabuiú	-5,36	-39,27	2,31	17,2	749	1.989	66	46	2,8	R$ 30.803
R. do Tigre	Banabuiú	-4,95	-39,46	4,75	24,1	749	1.989	66	42	2,3	R$ 57.918
R. dos Tanques	Banabuiú	-5,15	-39,03	5,65	22,4	749	1.989	66	36	2,1	R$ 54.646
Riachuelo	Banabuiú	-5,09	-38,67	1,55	12,3	749	1.989	66	49	2,8	R$ 25.759
São Jerônimo	Banabuiú	-5,74	-39,80	3,08	25,5	702	1.989	66	41	3,7	R$ 62.489
São Joaquim	Banabuiú	-5,06	-39,56	5,09	30,8	749	1.989	66	46	2,4	R$ 65.688
São Nicolau	Banabuiú	-5,21	-39,52	0,89	36,1	749	1.989	66	55	5,8	R$ 22.036
Sibiró	Banabuiú	-5,08	-39,31	2,97	24,3	749	1.989	66	48	2,9	R$ 54.332
Sigefredo	Banabuiú	-5,17	-39,08	1,59	29,7	749	1.989	66	45	5,6	R$ 34.750
Silveira	Banabuiú	-5,13	-39,64	4,98	67,9	749	1.989	66	53	3,8	R$ 111.118
S. dos Macacos	Banabuiú	-5,95	-39,43	0,35	2,3	702	1.989	66	37	3,4	R$ 6.056
Suçuarana	Banabuiú	-5,15	-39,62	0,93	4,9	673	1.989	59	45	1,7	R$ 8.275
Tapajós	Banabuiú	-5,16	-39,19	0,57	3,8	749	1.989	66	47	2,4	R$ 6.838
Teotônio	Banabuiú	-4,84	-39,59	10,29	140,0	749	1.989	66	52	3,9	R$ 241.510
Tertuliano	Banabuiú	-5,62	-39,37	4,62	75,0	702	1.989	66	36	7,2	R$ 131.784
Tingui	Banabuiú	-5,21	-39,42	2,84	31,7	749	1.989	66	50	3,4	R$ 49.691
Úrsula	Banabuiú	-4,90	-39,40	2,85	15,0	749	1.989	66	42	2,4	R$ 38.508
V. de São Pedro	Banabuiú	-5,19	-39,77	3,36	18,5	673	1.989	59	41	2,1	R$ 40.249
Valentim	Banabuiú	-5,10	-39,41	1,02	19,2	749	1.989	66	43	5,9	R$ 22.937

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Várzea Grande	Banabuiú	-5,82	-39,10	1,22	15,9	702	1.989	66	33	6,8	R$ 31.216
Várzea Redonda	Banabuiú	-5,08	-39,39	1,44	7,5	749	1.989	66	43	2,2	R$ 16.684
Vicente	Banabuiú	-5,33	-38,49	0,82	5,0	749	1.989	66	48	2,2	R$ 9.470
Antonino	Coreaú	-3,42	-40,58	0,95	9,4	1.066	1.435	206	47	7,3	R$ 34.681
Córrego Verde	Coreaú	-3,51	-40,75	1,17	5,4	1.066	1.435	206	42	5,4	R$ 30.056
Escorredor	Coreaú	-3,51	-40,74	1,35	6,0	1.066	1.435	206	42	5,3	R$ 41.586
Guajará	Coreaú	-3,24	-40,51	2,52	6,8	1.066	1.435	206	37	2,7	R$ 62.754
Inhanduba	Coreaú	-3,08	-40,47	6,27	92,9	1.067	2.115	194	60	5,8	R$ 210.844
Itaúna	Coreaú	-3,12	-41,12	4,48	15,2	1.066	1.435	206	38	4,8	R$ 130.448
Jaceguai	Coreaú	-3,15	-40,46	0,93	6,7	1.067	2.115	194	52	5,6	R$ 27.321
João de Sá	Coreaú	-3,20	-40,30	2,08	9,7	1.067	2.115	194	38	6,5	R$ 67.782
Lagoa Grande	Coreaú	-3,31	-40,88	1,10	2,8	1.066	1.435	206	35	4,1	R$ 26.830
Lusitânia	Coreaú	-3,13	-41,01	2,01	9,5	1.066	1.435	206	44	5,2	R$ 57.024
Maria Velha	Coreaú	-3,07	-40,32	1,67	32,7	1.067	2.115	194	64	5,6	R$ 54.439
Quatral	Coreaú	-3,24	-40,30	1,26	31,4	1.067	2.115	194	65	5,8	R$ 43.253
R. das Cobras	Coreaú	-3,12	-40,80	0,81	2,0	1.066	1.435	206	36	3,9	R$ 19.092
Rio da Prata	Coreaú	-3,09	-40,80	1,61	3,7	1.066	1.435	206	35	3,8	R$ 39.391
Abernaud	Curu	-3,64	-39,36	1,96	12,1	820	2.007	133	30	7,4	R$ 48.983
Anajé	Curu	-3,85	-39,26	0,99	4,0	820	2.007	133	32	4,7	R$ 16.453
Andrade Lima	Curu	-3,99	-39,06	2,35	13,6	820	2.007	133	35	6,0	R$ 47.020
Baltazar	Curu	-4,16	-39,01	1,62	33,4	749	1.989	66	51	4,4	R$ 39.130
Batoque	Curu	-4,38	-39,47	0,63	10,7	749	1.989	66	52	3,8	R$ 13.444
Benjamim	Curu	-4,26	-39,37	8,81	10,0	652	1.775	123	32	1,3	R$ 40.354
Carrapato	Curu	-4,05	-39,23	2,29	33,6	749	2.007	139	50	6,7	R$ 68.979
Chinauquê	Curu	-4,24	-39,66	1,87	14,2	749	1.989	66	47	2,4	R$ 24.931
Cordeiro	Curu	-3,99	-39,01	2,09	15,5	820	2.007	133	38	6,7	R$ 47.886
Damasceno	Curu	-4,56	-39,17	0,88	5,8	749	1.989	66	45	2,2	R$ 10.354
Dimas	Curu	-4,53	-39,09	0,77	6,5	749	1.989	66	48	2,5	R$ 10.983
Gonzaga	Curu	-3,82	-39,45	0,83	5,7	820	2.007	133	34	7,0	R$ 19.445
Ingá	Curu	-4,06	-39,05	1,20	3,7	820	2.007	133	39	3,0	R$ 19.273
Itaji	Curu	-4,11	-39,21	0,58	2,9	652	1.775	123	47	3,4	R$ 7.608
Itarumã	Curu	-4,63	-39,29	1,10	8,1	749	1.989	66	45	2,5	R$ 14.985
Jatobá	Curu	-4,36	-39,64	0,55	4,2	749	1.989	66	45	2,6	R$ 8.731
J. Magalhães	Curu	-4,32	-39,33	2,01	15,0	749	1.989	66	47	2,4	R$ 26.643
José Bonifácio	Curu	-3,75	-39,05	1,64	143,0	820	2.007	133	72	5,3	R$ 46.563
Maurício	Curu	-4,36	-39,51	2,18	12,6	749	1.989	66	41	2,3	R$ 24.086
Monte Orebe	Curu	-4,31	-39,33	1,23	6,8	749	1.989	66	40	2,2	R$ 13.150
Nicolau	Curu	-3,73	-39,17	5,45	89,6	820	2.007	133	55	6,5	R$ 153.170
Nogueira Ramos	Curu	-3,83	-39,77	3,76	48,0	820	2.007	133	49	6,8	R$ 104.411
Oitis	Curu	-4,52	-39,53	2,01	21,3	749	1.989	66	46	3,1	R$ 32.089
Oliveira	Curu	-4,64	-39,25	1,49	16,1	749	1.989	66	47	3,1	R$ 23.748
Pereira Filho	Curu	-4,54	-39,10	1,42	4,7	749	1.989	66	30	1,9	R$ 9.762
R. das Pedras	Curu	-4,05	-39,52	5,49	64,5	749	2.007	139	45	7,1	R$ 168.526
Riacho Massapê	Curu	-3,95	-39,31	2,05	11,9	749	2.007	139	40	5,2	R$ 46.047
R. Olho d'Água	Curu	-3,85	-39,72	3,07	13,9	820	2.007	133	32	5,4	R$ 64.216
R. Pau d' Óleo	Curu	-3,66	-39,09	0,55	2,5	1.253	1.435	201	37	6,7	R$ 19.421
R. Pau Ferrado	Curu	-3,66	-39,18	1,03	4,9	1.253	1.435	201	40	6,5	R$ 35.593
Riacho Piabas	Curu	-3,89	-38,98	1,73	9,7	820	2.007	133	34	6,0	R$ 36.981
R. Santa Rita	Curu	-3,66	-39,39	1,01	7,4	820	2.007	133	41	6,0	R$ 18.857
Salvação	Curu	-4,23	-39,45	1,34	8,3	652	1.775	123	46	4,2	R$ 19.217

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
São Paulo	Curu	-4,28	-39,38	1,35	4,4	652	1.775	123	54	2,0	R$ 14.049
Sela	Curu	-3,66	-39,35	2,00	8,7	820	2.007	133	33	5,0	R$ 37.875
Serra Branca	Curu	-4,32	-39,56	0,23	4,0	749	1.989	66	44	4,7	R$ 4.027
Serrinha Verde	Curu	-3,87	-38,27	0,98	14,7	820	2.007	133	57	5,7	R$ 23.851
Tibúrcio	Curu	-4,03	-39,30	2,63	40,5	749	2.007	139	49	7,0	R$ 83.057
Umirim	Curu	-3,65	-39,35	1,41	26,2	820	2.007	133	58	6,2	R$ 38.431
Ziguezague	Curu	-4,11	-39,23	0,60	18,1	652	1.775	123	56	6,4	R$ 14.315
Aracati	Litoral	-3,88	-39,83	0,68	4,4	497	2.257	74	43	2,3	R$ 6.484
Cairu	Litoral	-3,86	-39,88	6,98	26,0	497	2.257	74	35	1,9	R$ 57.079
Combuco	Litoral	-3,50	-39,94	2,96	7,1	786	1.775	88	31	1,8	R$ 22.019
Isaac	Litoral	-3,68	-39,88	1,07	8,0	497	2.257	74	44	2,6	R$ 11.795
Mendes Carneiro	Litoral	-3,58	-40,02	0,88	4,5	786	1.775	88	43	2,4	R$ 9.507
Mesquita	Litoral	-4,07	-39,91	1,97	20,4	497	2.257	74	44	3,4	R$ 26.993
Vilar	Litoral	-3,58	-40,05	0,78	11,0	786	1.775	88	45	4,3	R$ 12.062
Zeca Sales	Litoral	-3,27	-40,16	14,39	143,0	1.067	2.115	194	51	6,7	R$ 532.587
Altamiro	Médio J.	-6,04	-38,62	3,92	75,6	726	2.257	44	48	3,5	R$ 57.830
Andrade Furtado	Médio J.	-5,48	-38,76	2,19	15,8	726	2.257	44	49	1,6	R$ 12.527
Berilópolis	Médio J.	-5,54	-39,10	5,41	39,6	726	2.257	44	45	1,9	R$ 38.849
Cafundó	Médio J.	-5,57	-39,11	0,84	84,0	726	2.257	44	62	5,2	R$ 16.123
Campo Novo	Médio J.	-5,39	-38,76	1,18	8,6	726	2.257	44	48	1,5	R$ 5.948
Carapuça	Médio J.	-6,15	-38,60	2,91	12,8	1.034	1.900	102	44	2,9	R$ 50.270
Castanhão	Médio J.	-5,46	-38,38	3,10	10,7	698	2.331	37	23	1,5	R$ 15.352
Cintra	Médio J.	-5,57	-38,52	1,00	14,8	726	2.257	44	47	2,7	R$ 9.687
Diógenes	Médio J.	-5,56	-38,43	1,13	4,4	698	2.331	37	31	3,6	R$ 12.758
Dois irmãos	Médio J.	-5,61	-38,96	2,87	12,0	726	2.257	44	34	1,4	R$ 12.758
Encanto II	Médio J.	-5,56	-39,00	4,54	37,4	726	2.257	44	44	2,1	R$ 36.717
Esperança	Médio J.	-5,75	-38,97	0,56	2,5	726	2.257	44	36	1,5	R$ 2.641
Ferreira de Sousa	Médio J.	-5,66	-39,22	0,63	3,4	726	2.257	44	36	2,4	R$ 4.089
Figueiredo	Médio J.	-6,10	-38,48	2,48	75,0	1.034	1.900	102	68	5,4	R$ 62.107
Futuro	Médio J.	-5,77	-38,95	0,62	4,1	726	2.257	44	44	1,7	R$ 3.690
Gabriel	Médio J.	-6,15	-38,48	0,93	8,1	1.034	1.900	102	47	4,7	R$ 20.898
Holandina	Médio J.	-5,81	-38,30	1,40	4,7	1.034	1.900	102	42	2,2	R$ 18.101
Javari	Médio J.	-5,64	-38,16	2,36	28,6	726	2.257	44	48	2,5	R$ 18.854
José de Queirós	Médio J.	-5,73	-38,19	4,31	56,0	698	2.331	37	40	2,7	R$ 49.889
Lagoinha	Médio J.	-5,68	-39,40	1,14	5,1	726	2.257	44	34	1,5	R$ 5.821
Leandro	Médio J.	-5,78	-38,86	0,71	4,2	726	2.257	44	39	1,8	R$ 4.490
M. Pinheiro	Médio J.	-5,90	-38,61	3,19	27,0	726	2.257	44	46	2,0	R$ 24.118
Marreco	Médio J.	-5,71	-38,70	0,70	4,8	726	2.257	44	49	1,5	R$ 3.779
Maximiano	Médio J.	-5,83	-38,50	2,36	17,8	726	2.257	44	46	1,9	R$ 16.881
Monte Ararat	Médio J.	-5,84	-39,30	0,90	4,2	726	2.257	44	34	1,6	R$ 4.907
Monte Nobre	Médio J.	-5,96	-39,00	1,65	22,9	726	2.257	44	46	2,8	R$ 15.753
Nova Holanda	Médio J.	-5,40	-38,24	1,15	54,1	698	2.331	37	45	5,5	R$ 20.078
Paes	Médio J.	-5,67	-38,70	1,90	37,5	726	2.257	44	52	3,0	R$ 17.191
Pinheiro	Médio J.	-5,60	-39,05	1,17	42,0	726	2.257	44	47	5,5	R$ 17.541
Poção	Médio J.	-5,48	-38,35	2,60	20,5	698	2.331	37	31	2,4	R$ 25.577
Prado	Médio J.	-5,59	-38,42	2,13	12,5	698	2.331	37	30	2,0	R$ 14.600
Queirós Pessoa	Médio J.	-5,54	-38,82	4,48	34,9	726	2.257	44	42	2,1	R$ 36.074
Rabelo	Médio J.	-5,88	-39,00	1,04	8,0	726	2.257	44	44	2,0	R$ 8.159
R.B. Vermelho	Médio J.	-5,87	-38,86	0,40	1,7	726	2.257	44	35	1,4	R$ 1.702
R. do Angico	Médio J.	-5,81	-38,30	2,27	8,1	698	1.900	37	41	2,4	R$ 31.928

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Riacho Fechado	Médio J.	-5,65	-38,72	1,86	19,2	726	2.257	44	50	2,3	R$ 12.738
Saldanha	Médio J.	-5,58	-38,17	11,42	65,9	698	2.331	37	31	2,1	R$ 84.262
Sambito	Médio J.	-5,49	-38,30	1,19	21,8	698	2.331	37	41	3,5	R$ 13.740
Solonópole	Médio J.	-5,70	-39,24	0,62	4,6	726	2.257	44	51	2,3	R$ 5.901
Cachoeira	Médio J.	-5,56	-39,43	1,82	10,1	698	2.331	37	31	1,9	R$ 11.378
Vermelho	Médio J.	-5,87	-38,86	2,12	19,9	726	2.257	44	43	2,4	R$ 18.217
Volga	Médio J.	-5,41	-38,27	1,12	9,6	698	2.331	37	40	1,9	R$ 7.684
Açudinho	Metrop.	-4,42	-38,90	0,76	4,1	967	1.435	98	35	7,6	R$ 35.380
Ameixeiras	Metrop.	-4,81	-38,90	0,45	31,0	967	1.435	98	68	7,0	R$ 23.074
Araripe de Sousa	Metrop.	-4,23	-38,35	0,60	9,9	1.196	1.435	159	45	6,9	R$ 23.465
Barbados	Metrop.	-4,66	-39,08	2,21	23,0	967	1.435	98	47	7,9	R$ 112.787
Barbante	Metrop.	-3,94	-38,75	0,27	9,3	1.282	1.435	256	65	7,9	R$ 15.659
Boa Fortuna	Metrop.	-4,68	-39,11	0,95	6,2	749	1.989	77	47	2,4	R$ 13.328
Bom Jardim	Metrop.	-4,01	-38,97	1,59	8,3	1.282	1.435	256	46	7,0	R$ 73.113
Botelho	Metrop.	-4,06	-38,86	0,62	3,2	1.282	1.435	256	43	7,4	R$ 29.477
Botija	Metrop.	-4,10	-38,79	3,39	8,8	1.282	1.435	256	25	7,3	R$ 149.485
Brisa-mar	Metrop.	-3,98	-38,78	1,00	4,1	1.282	1.435	256	43	6,6	R$ 42.856
Bu	Metrop.	-4,11	-38,77	2,37	13,0	1.282	1.435	256	42	7,8	R$ 118.054
Cabra-Velho	Metrop.	-4,81	-38,82	2,17	11,6	1.196	1.435	159	29	7,0	R$ 71.910
C. de Dentro	Metrop.	-4,69	-39,26	2,45	23,3	749	1.989	77	48	3,3	R$ 45.772
Caucaia	Metrop.	-3,87	-38,88	2,70	25,6	1.260	1.435	223	51	6,9	R$ 103.510
Cavalaria	Metrop.	-4,21	-38,51	1,04	25,4	1.196	1.435	159	49	6,8	R$ 41.067
Cavalcante	Metrop.	-4,04	-38,77	0,75	4,2	1.282	1.435	256	45	7,4	R$ 36.131
Cesário	Metrop.	-3,87	-38,66	0,51	6,2	1.282	1.435	256	62	6,8	R$ 24.335
Chichio	Metrop.	-4,81	-38,82	1,42	24,5	967	1.435	98	60	6,8	R$ 67.436
Colares	Metrop.	-4,70	-39,13	11,25	50,0	749	1.989	77	37	2,4	R$ 140.209
Criancó	Metrop.	-4,36	-38,60	8,24	32,0	967	1.435	98	25	7,7	R$ 382.866
Cristiano	Metrop.	-3,88	-38,80	1,16	24,0	1.260	1.435	223	63	6,1	R$ 42.717
Cruzeiro	Metrop.	-4,64	-38,96	1,34	8,3	967	1.435	98	39	7,5	R$ 63.039
Dario	Metrop.	-3,96	-38,89	0,59	1,3	1.282	1.435	256	24	7,0	R$ 24.348
Domingos	Metrop.	-3,86	-38,82	1,86	10,6	1.260	1.435	223	43	6,8	R$ 65.790
Éleri	Metrop.	-3,94	-38,52	1,30	6,8	1.196	1.435	159	29	7,0	R$ 43.043
Elias Barros	Metrop.	-4,42	-38,87	2,38	8,4	967	1.435	98	24	7,6	R$ 107.179
Eng. O. Pombo	Metrop.	-4,62	-38,87	2,41	15,5	967	1.435	98	38	7,8	R$ 115.463
Fausto	Metrop.	-3,93	-38,88	1,33	3,7	1.260	1.435	223	29	6,2	R$ 42.380
Flávio Ribeiro	Metrop.	-4,18	-38,69	8,12	11,3	1.282	1.435	256	20	4,7	R$ 297.686
Fontenele	Metrop.	-4,93	-39,21	0,81	2,5	967	1.435	98	23	7,2	R$ 35.031
Garanhuns	Metrop.	-4,69	-39,02	3,88	19,2	749	1.989	77	40	2,4	R$ 48.177
Guanabara	Metrop.	-4,74	-39,01	2,23	35,0	749	1.989	77	54	4,0	R$ 51.014
Ibiraipu	Metrop.	-4,59	-39,10	1,05	4,6	967	1.435	98	30	7,5	R$ 48.120
Ipiranga	Metrop.	-4,01	-38,97	0,74	8,4	1.282	1.435	256	59	7,0	R$ 35.867
Isabel II	Metrop.	-4,72	-38,97	1,68	8,9	749	1.989	77	42	2,4	R$ 22.100
Itapemirim	Metrop.	-3,87	-38,85	0,79	20,6	1.260	1.435	223	58	7,5	R$ 37.538
Itauninha	Metrop.	-4,78	-38,91	0,60	3,0	967	1.435	98	34	7,4	R$ 27.584
Jacinto	Metrop.	-3,89	-38,77	0,50	10,0	1.260	1.435	223	57	7,4	R$ 22.889
Jaramataia	Metrop.	-3,97	-38,84	1,80	8,7	1.260	1.435	223	35	7,7	R$ 71.630
Juvenal	Metrop.	-4,21	-38,68	4,07	9,9	967	1.435	98	20	6,4	R$ 165.948
Lajedo	Metrop.	-4,04	-38,91	1,22	2,6	1.282	1.435	256	22	6,8	R$ 52.579
Leiria	Metrop.	-4,07	-38,70	6,90	14,8	1.282	1.435	256	22	6,9	R$ 300.158
Leocádio	Metrop.	-4,90	-38,80	0,68	5,3	1.260	1.435	223	51	6,3	R$ 22.503

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Mairi	Metrop.	-4,69	-39,25	1,39	5,9	749	1.989	77	40	2,0	R$ 12.353
Malheiros	Metrop.	-4,14	-38,74	0,78	2,9	1.282	1.435	256	36	7,1	R$ 34.745
Máximo	Metrop.	-4,11	-38,80	2,04	10,9	1.282	1.435	256	42	7,7	R$ 100.286
Minguaú	Metrop.	-3,82	-38,73	1,46	3,7	1.260	1.435	223	29	5,8	R$ 41.403
Moisés	Metrop.	-4,14	-38,72	1,61	6,1	1.282	1.435	256	32	7,9	R$ 77.819
Nunes	Metrop.	-4,50	-38,93	0,92	6,4	967	1.435	98	40	7,6	R$ 44.251
Odmar	Metrop.	-4,96	-38,75	2,14	14,0	967	1.435	98	41	7,3	R$ 99.511
Ouro Preto II	Metrop.	-3,90	-38,88	3,10	10,9	1.260	1.435	223	32	6,8	R$ 102.178
Pacajus	Metrop.	-4,14	-38,52	6,53	83,0	1.196	1.435	159	40	7,4	R$ 268.876
Pão de Açúcar	Metrop.	-3,89	-38,83	2,17	10,0	1.260	1.435	223	38	6,9	R$ 74.916
Pedro Lopes	Metrop.	-4,38	-38,91	1,76	18,4	967	1.435	98	46	8,0	R$ 91.169
Penedo	Metrop.	-3,97	-38,75	3,06	8,0	1.282	1.435	256	24	7,5	R$ 138.260
Perigoso	Metrop.	-3,89	-38,46	0,64	3,0	1.282	1.435	256	26	7,2	R$ 22.140
Piraju	Metrop.	-4,10	-38,87	2,61	6,4	1.260	1.435	256	23	7,3	R$ 115.101
Plácido	Metrop.	-3,91	-38,95	3,75	16,8	1.282	1.435	223	33	7,8	R$ 149.656
Poço Escuro	Metrop.	-4,18	-38,65	1,01	7,8	967	1.435	256	52	7,3	R$ 50.085
Queluz	Metrop.	-4,46	-38,84	1,11	8,8	749	1.435	98	45	7,3	R$ 51.646
Raimundo Viana	Metrop.	-4,70	-39,21	2,71	43,1	967	1.989	77	55	4,0	R$ 62.841
Riacho da Ema	Metrop.	-4,75	-38,87	0,09	10,1	1.282	1.435	98	72	6,6	R$ 4.699
São Borja	Metrop.	-3,98	-38,76	1,50	11,8	967	1.435	256	55	7,0	R$ 71.071
Serra Azul	Metrop.	-4,84	-38,81	0,33	13,9	967	1.435	98	62	7,5	R$ 17.707
Tamanca	Metrop.	-4,52	-38,71	1,52	18,4	1.260	1.435	98	52	7,5	R$ 75.218
T. de Baixo	Metrop.	-3,93	-38,82	4,10	11,0	749	1.435	223	28	6,0	R$ 129.166
Tatu	Metrop.	-4,68	-39,00	1,01	7,6	1.282	1.989	77	49	2,6	R$ 14.299
Teles	Metrop.	-3,99	-38,76	2,30	4,5	1.282	1.435	256	22	6,0	R$ 96.727
Timbó	Metrop.	-3,96	-38,80	2,39	5,5	1.260	1.435	256	23	7,0	R$ 106.084
Tito	Metrop.	-3,95	-38,80	1,34	11,9	967	1.435	223	46	7,9	R$ 59.579
Tronco	Metrop.	-4,48	-38,89	0,94	19,4	1.282	1.435	98	56	7,8	R$ 49.039
Umarizeiras	Metrop.	-4,00	-38,72	2,59	7,9	967	1.435	256	30	7,2	R$ 113.628
Várzea Nova	Metrop.	-4,74	-38,91	6,21	27,7	1.282	1.435	98	29	7,8	R$ 292.372
Vazante Grande	Metrop.	-3,99	-38,98	2,25	64,5	967	1.435	256	67	7,3	R$ 31.216
Acióli	Salgado	-6,16	-38,75	3,94	17,9	734	1.901	68	32	2,6	R$ 39.548
Barnabé	Salgado	-6,16	-38,82	1,16	4,7	734	1.901	68	30	2,5	R$ 10.557
B. de Menezes	Salgado	-7,63	38,92	3,16	10,4	914	2.192	89	30	2,6	R$ 39.218
Graça	Salgado	-6,38	-38,88	0,83	6,4	734	1.901	68	42	3,1	R$ 10.088
Jati	Salgado	-7,69	-39,08	3,97	28,9	745	2.192	93	41	2,4	R$ 40.325
Justino	Salgado	-7,18	-38,81	1,30	12,4	740	2.192	76	47	3,8	R$ 25.615
Riacho Jardim	Salgado	-7,63	-39,21	1,48	198,0	745	2.192	74	60	7,9	R$ 69.504
São Cipriano	Salgado	-6,73	-38,91	0,78	4,3	919	1.901	84	38	3,4	R$ 11.517
Sítio Araruna	Salgado	-7,63	-39,35	0,57	3,1	980	2.192	91	36	3,7	R$ 12.023
Viração	Salgado	-6,14	-38,75	1,52	7,5	734	1.901	68	36	2,5	R$ 14.372
Floresta	S. Ibi.	-4,05	-40,31	0,14	5,8	1.612	606	340	66	7,9	R$ 7.899
Vargem	S. Ibi.	-3,89	-40,45	1,92	15,1	1.465	606	323	53	8,1	R$ 101.250
Apuí	S. Crateús	-5,14	-40,57	41,89	21,9	710	2.822	110	37	0,4	R$ 67.765
Arcélia	S. Crateús	-5,20	-40,71	2,43	13,4	710	2.822	110	50	2,7	R$ 23.466
Bezerra de Melo	S. Crateús	-5,07	-40,68	9,57	59,0	710	2.822	110	49	3,2	R$ 117.607
Caititu	S. Crateús	-5,16	-40,75	0,64	3,9	710	2.822	110	54	2,4	R$ 4.723
Carapinima	S. Crateús	-4,78	-40,70	1,63	5,5	676	2.822	104	34	2,8	R$ 21.374
Coutinho	S. Crateús	-5,53	-40,37	3,32	35,8	586	2.822	75	44	3,5	R$ 37.263
Descanso	S. Crateús	-5,50	-40,39	0,91	35,0	586	2.822	75	54	4,1	R$ 12.574

Reservatório	Região hidrográfica	Lat	Lon	Cap.	BH	P	Ev	Pe	G	SWC	Ic_{max}
				hm^3	km^2	$mm \cdot ano^{-1}$			%		$R\$ \cdot mês^{-1}$
Falcão	S. Crateús	-5,39	-40,32	1,23	6,1	586	2.822	75	38	2,4	R$ 8.369
Grota Verde	S. Crateús	-5,32	-40,61	1,43	9,4	710	2.822	110	50	3,0	R$ 13.109
Irapuá	S. Crateús	-5,15	-40,41	3,99	32,9	710	2.822	110	50	3,7	R$ 54.387
Irapuru	S. Crateús	-5,30	-40,08	1,13	9,4	586	2.822	75	37	3,9	R$ 13.512
Itauru	S. Crateús	-4,74	-40,67	3,73	21,4	676	2.822	104	41	3,4	R$ 62.486
Mano	S. Crateús	-5,30	-40,08	6,17	58,6	586	2.822	75	40	4,0	R$ 94.471
Manuel Barbosa	S. Crateús	-5,32	-40,04	1,52	15,8	586	2.822	75	39	4,4	R$ 22.903
Marinheiro	S. Crateús	-5,17	-40,57	2,40	21,1	710	2.822	110	48	4,1	R$ 28.525
Moura Fé	S. Crateús	-5,13	-40,73	0,93	5,4	710	2.822	110	54	2,4	R$ 6.903
Ponciano	S. Crateús	-5,08	-40,69	1,57	8,9	710	2.822	110	49	3,0	R$ 16.515
Portais	S. Crateús	-5,19	-40,59	1,32	12,0	710	2.822	110	50	3,8	R$ 15.439
Renan	S. Crateús	-5,36	-40,15	1,77	12,6	586	2.822	75	38	3,3	R$ 18.115
Sabóia II	S. Crateús	-5,38	-40,21	10,29	63,6	586	2.822	75	36	3,2	R$ 113.196
Santiago	S. Crateús	-5,19	-40,55	1,34	9,3	710	2.822	110	54	2,5	R$ 9.228
S.J. dos Campos	S. Crateús	-5,43	-40,15	3,09	28,8	586	2.822	75	39	4,2	R$ 51.155
Trici	S. Crateús	-5,78	-40,52	3,05	38,8	560	2.331	44	28	4,0	R$ 41.462

* Cap. = Capacidade máxima; BH = Bacia hidrográfica; P = Precipitação média anual; Ev = Evaporação média anual; Pe = Escoamento superficial médio anual; G = Índice de confiabilidade no abastecimento; SWC = Vazão específica de consumo ($L \cdot dia^{-1}$ por m^3); $Ic_{máx}$ = Renda mensal.