

ALISSON LOPES RODRIGUES

MODELAGEM DA DINÂMICA DE ÁGUA EM PEQUENAS BARRAGENS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696m
2022
Rodrigues, Alisson Lopes, 1991-
Modelagem da dinâmica de água em pequenas barragens:
para ganhos em disponibilidade hídrica e atendimento a
demandas / Alisson Lopes Rodrigues. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (90 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.
Referências bibliográficas: f. 73-90.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.472>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Hidrologia. 2. Medidores de fluxo. 3. Barragens e açudes.
4. Desenvolvimento de recursos hídricos. 5. Hidrodinâmica.
I. Rodrigues, Lineu Neiva, 1968-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 551.48

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB-6/2523

ALISSON LOPES RODRIGUES

MODELAGEM DA DINÂMICA DE ÁGUA EM PEQUENAS BARRAGENS

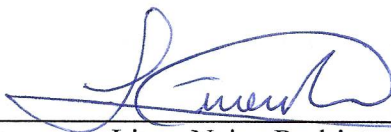
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de junho de 2022.

Assentimento:



Alisson Lopes Rodrigues
Autor



Lineu Neiva Rodrigues
Orientador

Aos meus pais

Antônio Carlos Rodrigues,
e Maria Terezinha Lopes Rodrigues.

Meus irmãos

Alice Cristina Rodrigues,
Ana liz Lopes Rodrigues e
Davi Luís Rodrigues.

Minha sobrinha

Esther Maria Lopes Rodrigues de Paula.

Meu tio

Flávio Lopes Rodrigues (*In memória*).

Meus avós maternos

Alice Orozimbo Caetano,
Lourdélino Lopes.

Meus avós paternos

Francisco de Assis Rodrigues,
Mercês de Souza Lopes.

Dedico essa dissertação de mestrado à todas as pessoas que conheci nesse período, cada uma me mostrou algo novo e importante.

DEDICO

Ao povo brasileiro.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Manifesto minha sincera gratidão ao orientador e amigo, Lineu Neiva Rodrigues, pelo apoio, incentivo, compreensão, paciência e conhecimentos transmitidos durante o período de mestrado. A Pedro Manuel Villa, Alice Cristina Rodrigues, Daniel Althoff e ao coorientador Guilherme Fernandes Marques, pela valiosa colaboração nas sugestões apresentadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares que sempre me ensinaram a resguardar e compreender os verdadeiros princípios e valores éticos e morais, propiciando-me um verdadeiro crescimento pessoal e profissional, minha eterna gratidão. Em especial, agradeço ao meu tio Flávio Lopes Rodrigues (*in memoriam*), sendo um modelo de vida a ser seguido e pelo incentivo para alcançar esse tão sonhado objetivo que pode concluir finalmente em minha vida.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados) pela concessão das informações essenciais para realização da pesquisa, e a prestigiosa instituição de ensino Universidade Federal de Viçosa (UFV) e aos professores, funcionários e colegas, pela oportunidade de conviver e adquirir novos e valiosos conhecimentos.

Ao departamento de engenharia agrícola (DEA), ao Centro de Referência em Recursos Hídricos (CRRH), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES), pelo apoio (Código de Financiamento 001).

E a todos que aqui citei e aos que injustamente não foram mencionados, mas que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho, o meu muito

Obrigado.

“Todas as verdades são fáceis de perceber depois de terem sido descobertas, o problema é descobri-las”.
(Galileu Galilei)

RESUMO

RODRIGUES, Alisson Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2022. **Modelagem da dinâmica de água em pequenas barragens**. Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

Pequenos reservatórios desempenham um papel fundamental no desenvolvimento agrícola na região do Cerrado brasileiro, contribuindo para melhorar a distribuição temporal da água, e aumentando a disponibilidade hídrica nos meses secos, reduzindo a vulnerabilidade das comunidades rurais à seca. O principal objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo de simulação dinâmica, baseado no método da dinâmica do sistema (SD), para avaliar, ao longo do tempo a dinâmica de água em uma pequena barragem e o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista. Os dados diários de vazão afluente ao reservatório foram obtidos da base de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados) para o período de outubro de 2009 a setembro de 2011 e estendido, por meio de modelagem, a junho de 2015. O modelo desenvolvido foi calibrado e validado com dados históricos. As principais variáveis que influenciam na variação no volume de água do reservatório foram avaliadas por meio de análise de sensibilidade. Os resultados indicaram que a vazão afluente é variável que mais influenciou na variação do volume de água no reservatório, seguida da área do espelho d'água e das perdas por evaporação e infiltração, que, juntas, representaram uma retirada de água da barragem equivalente a 14,4% da vazão afluente. De acordo com os resultados da análise de risco de não atendimento da demanda hídrica prevista, em 85,9% do tempo o nível da água no reservatório esteve acima do nível crítico, e 81,6% da água estava disponível para atender a demanda hídrica. A pequena barragem oferece um risco de não atender a demanda hídrica da comunidade em pelo menos 18% do tempo.

Palavras-chave: Sistema Dinâmico. Pequenas barragens. Recursos hídricos. Análise sensitiva. Pequenos irrigantes. Hidrologia. Simulação.

ABSTRACT

RODRIGUES, Alisson Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2022. **Water dynamics modeling in small dams**. Adviser: Lineu Neiva Rodrigues.

Small reservoirs play a key role in agricultural development in the Brazilian Cerrado region, contributing to improve the temporal distribution of water, and increasing water availability in the dry months, reducing the vulnerability of rural communities to drought. The main objective of this study was to develop a dynamic simulation model, based on the system dynamics (SD) method, to evaluate, over time, the water dynamics in a small dam and the risk of not meeting the predicted water demand. Daily data on inflow into the reservoir were obtained from the database of the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa Cerrados) for the period from October 2009 to September 2011 and extended, through modeling, to June 2015. The model developed has been calibrated and validated with historical data. The main variables that influence the variation in the volume of water in the reservoir were evaluated through sensitivity analysis. The results indicated that the inflow is the variable that most influenced the variation of the volume of water in the reservoir, followed by the area of the water mirror and the losses by evaporation and infiltration, which together represented a withdrawal of water from the dam equivalent to 14.4% of the influent flow. According to the results of the risk analysis of not meeting the predicted water demand, in 85.9% of the time the water level in the reservoir was above the critical level, and 81.6% of the water was available to meet the water demand. The small dam poses a risk of not meeting the community's water demand at least 18% of the time.

Keywords: Dynamic System. Small dams. Water resources. Sensitive analysis. Small irrigants. Hydrology. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Pequenas barragens de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil..... 23
- Figura 2.** Representação esquemática dos diferentes fluxos que compõe o balanço hídrico de uma pequena barragem de terra..... 25
- Figura 3.** Influxo de água subterrânea e infiltração em uma pequena barragem de terra..... 28
- Figura 4.** Tomada de fundo em uma pequena barragem de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil. 29
- Figura 5.** Vertedor retangular dimensionado em um pequeno reservatório de terra, localizado em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil..... 30
- Figura 6.** Perdas de fluxos por evaporação direta na superfície do espelho d'água em um pequeno reservatório..... 31
- Figura 7.** Esquema representativo de redes de pequenos reservatórios em cascata em uma bacia hidrográfica, é o funcionamento de um único reservatório..... 33
- Figura 8.** Diagrama causal dinâmico de recursos hídricos..... 35
- Figura 9.** Bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho (D), com destaque para os pequenos reservatórios dispostos em cascata R1, R2, R3, R4 e R5..... 38
- Figura 10.** Fluxograma representativo do modelo de simulação da dinâmica de água na pequena barragem e do risco de não atendimento da demanda hídrica (SiPREDH)..... 40
- Figura 11.** Representação esquemática das principais variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água de uma pequena barragem..... 41
- Figura 12.** Corte transversal na parede de uma pequena barragem de terra, com destaque para o vertedor trapezoidal e as alturas de água na barragem..... 44
- Figura 13.** Diagrama de laço causal do modelo sistema dinâmico para avaliar a dinâmica de água de pequenas barragens..... 50
- Figura 14.** Dinâmica temporal da vazão afluente ao reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil..... 51
- Figura 15.** Nível d'água observado e simulado para o período de aquecimento, calibração e validação no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil..... 52
- Figura 16.** Variação no volume da barragem em função da variação de $\pm 10\%$ no valor de Q_A , A_{ES} , Q_{EV} , Q_I , H_i , Q_{SF} , Q_{SV} e Q_S no período de setembro 2009 a outubro 2011..... 54

Figura 17. Variação do volume de água armazenada na barragem com e sem evaporação e infiltração na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.....	55
Figura 18. Simulação do comportamento das principais variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água.....	56
Figura 19. Volume e a porcentagem das variáveis de fluxos de acordo com a dinâmica de água no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.....	58
Figura 20. Diagrama de laço causal do modelo SiPREDH para avaliar risco de não atendimento da demanda hídrica prevista.....	62
Figura 21. Simulação do comportamento das variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água no reservatório, com base nos dados históricos de setembro 2009 a outubro 2011 e estendido a junho de 2015.....	63
Figura 22. Variação do nível de água em relação altura do canal que conduz água do reservatório para a comunidade.....	65
Figura 23. Curvas de permanência de demanda (D_H) e de oferta hídrica (Q_{ABS}) no reservatório isolado na bacia do rio Buriti vermelho, DF, Brasil.....	66
Figura 24. Volume das variáveis de fluxos e demanda hídrica da comunidade no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Categoria dos pequenos, médios e grandes reservatórios em relação ao volume e área.	22
Tabela 2. Classificações dos principais vertedores utilizados em pequenas barragens de terra.	30
Tabela 3. Características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.	39
Tabela 4. Valores de limiares estatísticos para interpretação do desempenho do modelo sistema dinâmico.	47
Tabela 5. Critérios de desempenho do modelo sistema dinâmico para os períodos de calibração e validação no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.....	52
Tabela 6. Resultado da análise de sensibilidade do modelo sistema dinâmico no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.	53
Tabela 7. Valores máximo, médio e mínimo das variáveis de fluxos e estado no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.	57
Tabela 8. Valores máximo, médio e mínimo das variáveis de fluxos e estado e o nível da água que conecta o reservatório ao canal de irrigação.....	65
Tabela 9. Resultado do risco de não atendimento da demanda hídrica prevista na bacia do rio Buriti vermelho, DF, Brasil.	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A Área da seção transversal ao escoamento.
A Área da seção transversal do tubo.
 A_{ES} Área do espelho d'água.
 A_w Tropical.
BHBV Bacia Hidrográfica do rio Buriti Vermelho.
cm Centímetros.
 C_v Coeficiente de correção da velocidade.
DF Distrito Federal.
 D_H Demanda hídrica.
EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
Fr Frequência de ser igualada ou superada.
G Influxo de água subterrânea.
GR5J Modelos Hidrológicos GR para chuva-vazão família 5.
ha dia⁻¹ Hectares dia.
ha Hectares.
 H_i Altura da água no reservatório no tempo i .
 H_v Altura d'água no vertedor.
I declividade média.
Imed Infiltração média.
KGE Índice de eficiência de Kling-Gupta.
km km⁻² Quilômetros por quilômetros ao quadrado.
km² Quilômetros quadrados.
km³ Quilômetros cúbicos.
L Largura do vertedor.
m km⁻¹ Metros por quilômetros
m m⁻¹ Metros por metros.
m Metros.
m² Metros quadrados.
m³ s⁻¹ Metros cúbicos por segundos.
m³ Volume.
MAE Erro médio absoluto.

MARE Erro absoluto relativo médio.

min Minutos.

mm dia⁻¹ Milímetros dia.

mm Milímetros.

MSEI Modelo de Simulação de Estratégias de Irrigação.

N_{CR} Variação do nível de água na barragem em relação altura do canal de irrigação.

NSE Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe.

P Precipitação.

PVC Policloreto de vinil.

Q_A Vazão afluente.

Q_{ABS} Vazão no canal de irrigação.

Q_{EV} Evaporação.

Q_I Infiltração.

Q_S Vazão efluente.

Q_{SF} Vazão na tomada de fundo.

Q_{SV} Vazão no vertedor.

R1 Reservatório 1.

R1 Reservatório 1.

R2 Reservatório 2.

R3 Reservatório 3.

R4 Reservatório 4.

R5 Reservatório 5.

RAC Demanda hídrica da comunidade.

Rh Raio hidráulico.

RMSE Raiz do erro quadrático médio.

RNA Redes neurais artificiais.

s⁻¹ m ^{$-\frac{1}{3}$} Segundo vezes metros elevado a menos um terço.

SD Sistema dinâmico.

SiPREDH Avaliar o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista.

t Volume de água no reservatório no tempo inicial.

t_o Volume de água no reservatório no tempo final.

T_x Temperatura máxima.

V_O Volume.

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem.

ΔV_0 Variação do volume.

ΔN Diferença de nível da comunidade ao reservatório.

$^{\circ}\text{C}$ Graus Celsius.

C_{vo} Coeficientes de variação dos dados observados.

C_{vs} Coeficientes de variação dos dados simulados.

g Aceleração da gravidade.

k Coeficiente de forma.

k_1 Coeficiente de forma.

n Coeficiente de rugosidade.

n Número de observações.

\bar{O} Médias aritméticas dos dados observados.

O_i Valores dos dados observados.

\bar{S} Médias aritméticas dos dados simulados.

S_i Valores dos dados simulados.

α Coeficiente de forma.

α_1 Coeficiente de forma.

μ_o Médias aritméticas dos dados observados.

μ_s Médias aritméticas dos dados simulados.

σ_o Desvios padrão dos dados observados.

σ_s Desvios padrão dos dados simulados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos específicos	19
3. REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1. Mudanças climáticas e reservas de água.....	20
3.2. Reservatórios.....	22
3.3.1. Pequenos Reservatórios/Barragens.....	23
3.4. Balanço hídrico de um pequeno reservatório.....	25
3.5. Fluxos de entradas em pequenos reservatórios	26
3.5.1. Vazão afluente	26
3.5.3. Ascensão capilar e infiltração.....	27
3.6. Fluxos de saídas em pequenos reservatórios.....	29
3.6.1. Tomada de fundo	29
3.6.4. Evaporação	31
3.7. Impacto de pequenos reservatórios na hidrologia	32
3.8. Modelagem e Sistema dinâmico (SD).....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1. Área de estudo	38
4.2. Fluxograma representativo do desenvolvimento do modelo sistema dinâmico (SD)..	40
4.3. Desenvolvimento do modelo SD para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados	41
4.3.1. Vazão afluente ao reservatório	42
4.3.2. Área do espelho d'água.....	42
4.3.3. Evaporação	42
4.3.4. Infiltração	43
4.3.5. Altura da água no reservatório.....	43
4.3.6. Vazão do vertedor.....	44
4.3.7. Vazão de saída na tomada de fundo.....	45
4.3.8. Vazão de saída do reservatório	45
4.4. Avaliação e calibração do modelo SD desenvolvido para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados.....	45

4.5. Avaliação do comportamento das principais variáveis que influenciam na dinâmica de água de pequenas barragens.....	47
4.6. Simulação e avaliação da dinâmica de água em um pequeno reservatório isolado	48
4.7. Avaliar o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista-SiPREDH.....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1. Modelo de simulação dinâmica SD.....	50
5.2. Calibração e validação do modelo SD.....	51
5.3. Análise de sensibilidade do modelo SD	53
5.3.1. Teste de condição extrema	55
5.4. Simulação e avaliação da dinâmica de água no reservatório.....	56
5.5. Avaliação da dinâmica de água em uma pequena barragem ao longo tempo e do risco de não atendimento da demanda hídrica prevista	62
5.5.1. Risco de não atendimento da demanda hídrica prevista.....	66
6. CONCLUSÕES.....	71
7. RECOMENDAÇÕES	72
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos solos ácidos, pobres em matéria orgânica e nutrientes, a região do Cerrado foi fundamental para a ascensão da agricultura brasileira ao cenário internacional (UNESCO, 2012; KLINK, 2014; RADA, 2013; THE ECONOMIST, 2010). Com uma extensão de aproximadamente 204 milhões de hectares, abrangendo 24% do território nacional, o Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, a savana tropical mais rica do mundo em biodiversidade e a última fronteira agrícola do planeta (RATTER et al., 2003).

O bioma Cerrado é importante para o equilíbrio hidrológico no Brasil. Observa-se, entretanto, nesta região, um aumento da escassez hídrica e dos conflitos pelo uso da água, o que pode ser atribuídos aos longos períodos de estiagens, ao rápido desenvolvimento econômico da região e à falta de uma adequada estratégia de monitoramento e de gestão de recursos hídricos (FALEIRO e FARIA., 2009).

Os conflitos pelo uso de recursos hídricos contribuem, entre outras coisas, para a piora da qualidade de vida da população (TREW, 2019). Um dos maiores desafios para a gestão de recursos hídricos em áreas agrícolas, em especial em regiões que já se encontram em situação de escassez hídrica, é conseguir conciliar a expansão da agricultura irrigada com a disponibilidade de recursos hídricos (RODRIGUES et al., 2017; SILVA et al., 2015). Esse desafio é evidente na região no Cerrado que concentra cerca de 64% da área irrigada do Brasil (BRASIL, 2014) e aproximadamente 80% de todos os pivôs centrais do país (ALTHOFF e RODRIGUES, 2019a).

Considerando os efeitos das mudanças climáticas, cujas projeções apontam diversos riscos para o desenvolvimento socioeconômico da região, com previsão de aumento da temperatura e de redução da precipitação (CHOU et al., 2014), prolongamento da estação seca (PIRES et al., 2016) e consequentemente redução da vazão disponível em cursos d'água (OLIVEIRA et al., 2017). Esses efeitos, aliado ao crescimento que está previsto para a agricultura irrigada, espera-se um aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos na região.

De maneira geral, o problema de baixa disponibilidade hídrica na região do Cerrado é sazonal (ALTHOFF et al., 2021). Isto é, existe uma abundância de água no período chuvoso e escassez no período seco. Em ambientes com essa característica climática, os pequenos reservatórios de água desempenham um papel fundamental no desenvolvimento agrícola, pois contribuem para melhorar a distribuição temporal da água, aumentando a sua disponibilidade nos meses secos (MACHIWAL et al., 2016).

Nesse sentido, esses reservatórios contribuem para reduzir a vulnerabilidade das comunidades rurais à seca e para melhorar a qualidade de vida da população rural (RODRIGUES et al., 2013). Os pequenos reservatórios, além de armazenar temporariamente o excesso de água da chuva, têm um papel importante sobre a regularização dos fluxos a jusante, podendo fornecer uma proteção contra enchentes (POOLMAN, 2005). Outra importante contribuição dessas infraestruturas é contribuir para a recarga dos aquíferos subterrâneos, aumentando assim o fluxo de base na parte a jusante da área de captação (ADWUBI, et al., 2009; HABETS et al., 2018; SHINDE et al., 2010).

Estudos relacionados a pequenos reservatórios, de maneira geral, são escassos na literatura hidrológica mundial. Para a região do Cerrado, esses estudos praticamente inexistem. Grande parte das pesquisas realizadas no mundo se concentrou em avaliar os impactos potenciais do clima e sua relação com grandes barragens (HANAK e LUND, 2012; ZHOU et al., 2015; KROL et al., 2011; MATTEAU et al., 2009). Nota-se, assim, a necessidade de mais estudos voltados ao entendimento da dinâmica da água em pequenas barragens, que são estruturas indispensáveis para a sustentabilidade de regiões agrícola e à adaptação às mudanças climáticas globais (VAN DE GIESEN et al., 2010; BOELEEE et al., 2013; ZHOU et al., 2015; ADWUBI et al., 2009; LIEBE et al., 2009; ALTROFF et al., 2020).

Na região do Cerrado, em virtude do crescimento da irrigação e da construção de novos barramentos, é cada vez mais necessário entender como essas infraestruturas impactam no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, em especial quando elas estão dispostas em cascata. Embora grupos de pequenas barragens armazenem uma quantidade de água significativa, influenciando na disponibilidade hídrica da bacia e na dinâmica de água à jusante, nos estudos, em geral, eles são tratados de forma isolada, sem considerar as suas sinergias e o fato de estarem hidrológicamente conectados pelo rio que foi represado (DUBREUIL e GIRARD, 2013). Para simular o comportamento hidrológico de uma pequena barragem é fundamental conhecer o comportamento da infiltração e da evaporação, principais componentes do balanço de água (FOWE et al., 2015).

O impacto no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica advindo da implantação de uma única pequena barragem pode não ser significativo (HABETS et al., 2018; DEITCH et al., 2013). O mais comum na região do Cerrado, entretanto, é encontrar vários reservatórios dispostos em cascata ao longo de um mesmo curso de água, sendo importante entender como esses reservatórios atuando em conjunto impactam a dinâmica de água na bacia hidrográfica (HABETS et al., 2018; FOWLER et al., 2016; JAYATILAKA et al., 2003; GÜNTNER et al., 2009; SHINOBI et al., 1998; MALVEIRA et al., 2012).

O impacto dessas estruturas nos sistemas hídricos precisa ser melhor quantificado e considerado no planejamento de recursos hídricos (RODRIGUES et al., 2012; ROSENBERRY et al., 2007; LU et al., 2018). Apesar de sua importância estratégica para o desenvolvimento de uma região, o impacto ambiental, causado principalmente por reservatórios mal dimensionados tem dificultado a construção de novas barragens em várias regiões do Brasil, principalmente no Cerrado. Na maioria dos casos, os problemas de dimensionamento surgem por falta de informação (HABETS et al., 2014; FABRE et al., 2015). Por isso, torna-se cada vez mais importante gerar informações para subsidiar a alocação e construção de novos reservatórios na região.

Existem vários modelos hidrológicos na literatura que possibilitam avaliar a influência de barragens na vazão de um rio (PONTES et al., 2015; COLLISCHON, et al 2007; COLLISCHON, et al 2011; AHN et al., 2018; SINGH, 1995; MANETA et al., 2009a), esses modelos, entretanto, foram concebidos para representar a dinâmica de grandes barragens, sendo difícil a sua adaptação para o caso de pequenas barragens, onde os eventos hidrológicos ocorrem em escalas de tempo diária ou menores.

Modelos matemáticos desenvolvidos com o propósito de simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas com presença de pequenas barragens isoladas ou em cascata, são de fundamental importância para o planejamento e manejo de recursos hídricos. Os resultados advindos desses modelos são importantes para as agências de águas, pois podem subsidiar o planejamento de recursos hídricos, principalmente quando se realizam previsões a longo prazo (SCHREIDER et al., 2002; NATHAN e LOWE, 2012), podendo, desta forma, auxiliar no desenvolvimento de estratégias para melhorar a eficiência de uso e as tomadas de decisões, buscando garantir o uso sustentável de recursos hídricos. Os resultados são também importantes para auxiliar no desenvolvimento de políticas hídricas com programas e projetos de fomento à infraestrutura de armazenamento. Os planejadores precisam entender melhor estes efeitos para poder definir onde as intervenções devem ser realizadas, quando e qual a sua magnitude.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento e a contribuição de pequenos reservatórios para ganhos em disponibilidade hídrica e atendimento a demandas.

2.2. Objetivos específicos

- i. Desenvolver modelo matemático para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados;
- ii. Avaliar e calibrar o modelo matemático desenvolvido para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados;
- iii. Avaliar o comportamento das principais variáveis que influenciam na dinâmica de água de pequenas barragens;
- iv. Simular e avaliar a dinâmica de água no pequeno reservatório isolado.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Mudanças climáticas e reservas de água

Mudanças observadas nos padrões de precipitação, aumentos nas temperaturas da superfície, aumentos na frequência e intensidade de inundações e secas, derretimento generalizado do gelo do Ártico e reduções na cobertura de neve no topo das montanhas e mudanças na umidade do solo são algumas das principais mudanças hidrológicas registradas associadas às mudanças climáticas (HUBER e KNUTTI, 2011; IPCC, 2014; EHSANI et al., 2017).

Atualmente, as emissões de gases do aquecimento global continuam aumentando e as mudanças climáticas decorrentes desse efeito terão impactos irreversíveis, afetando a segurança alimentar e dificultando o acesso à água principalmente em regiões de vulnerabilidade como a América do Sul (IPCC, 2022). Como resultado, as mudanças nos padrões de chuva devido às mudanças climáticas alteram a disponibilidade para diferentes tipos de uso da água aumentando o risco e o potencial de atendimento das demandas, com perdas em segurança hídrica e alimentar, e um adicional de 350 milhões de pessoas enfrentarão escassez generalizada de água até 2030 (SMERDON, 2017; IPCC, 2022).

Nas últimas décadas, o consumo de água cresceu duas vezes mais rápido que a população, e segundo as estatísticas estima-se que a demanda aumentará em 55% até 2050, por essa razão os desafios são muitos (WWAP, 2015). Por outro lado, as Nações Unidas estimam que 20% dos aquíferos, grandes reservatórios subterrâneos de água doce que são potenciais fontes de alimentação de nascentes e rios, estão sendo explorados em excesso. Esses aquíferos são responsáveis por fornecer água potável para metade da população mundial e também são a fonte de 43% da água utilizada para irrigação, e a maior parte dessa água pode deixar a bacia hidrográfica por evaporação direta e transpiração das culturas agrícolas (WWAP, 2015).

De acordo com as projeções, as reservas mundiais de água doce podem diminuir em 40% até 2030 (WWAP, 2015). Além disso, tanto a precipitação quanto os níveis de água subterrânea diminuíram significativamente nas últimas duas décadas (AHMADI e ZARGHAMI, 2019; DAWADI e AHMAD, 2012). Portanto, ainda que haja água suficiente para suprimir as necessidades de crescimento do consumo e garantir a sustentabilidade ecológica, e necessário uma mudança drástica no uso e gerenciamento deste recurso, para não acarretar graves consequências de escassez hídrica (IPCC, 2022).

Embora haja água suficiente para abastecer todas as pessoas do planeta, existe uma forte distribuição espaço temporal da água doce na superfície do globo terrestre. Isto, combinado a

um aumento da demanda hídrica, particularmente em países em rápido desenvolvimento, implicará em uma maior proporção da população mundial vivendo em escassez de água (SAVENIJE, 2000; OKI e KANAE, 2006). Nesse sentido, em muitas regiões do mundo a população experimentará, cada vez mais, escassez hídrica, projetada para aumentar com as mudanças climáticas e com a intensidade dos eventos climáticos extremos. Haverá, assim, uma pressão crescente para construção de pequenos reservatórios, que funcionaram como infraestrutura de adaptação às mudanças climáticas eminentes (VAN DER ZAAG e GUPTA, 2008; PACHAURI et al., 2014).

No Brasil, a região nordeste é uma das mais vulneráveis às mudanças na precipitação, pois enfrenta problemas de estiagem prolongada durante a própria estação chuvosa e, portanto, os efeitos negativos gerados tendem a ser mais severos (SOUZA et al., 2015). No entanto, outras regiões do Brasil começaram a mostrar uma realidade preocupante devido à sua alta vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas e às consequências do histórico de uso da terra, afetando os processos hidrológicos na escala regional, com uma tendência na diminuição das chuvas durante estação chuvosa (SILVA et al., 2016).

Como resultado, espera-se que as mudanças climáticas afetem o equilíbrio entre oferta e demanda de água em muitas regiões do Brasil, e um provável aumento na frequência de inundação e secas, desafiando as atuais estratégias de gestão da água (ANA, 2021). Nesse sentido, os efeitos hidrológicos das mudanças climáticas podem exigir mudanças significativas na gestão da água, potencialmente aumentando o impacto de pequenas barragens na hidrologia (LIN et al., 2017). Deve haver um repensar e otimizar os pequenos, médios e grandes reservatórios para retenção de água, controle de enchentes, tolerância à seca, para garantir as vazões ambientais, demanda de água e geração de energia (FABRE et al, 2015; EHSANI et al., 2017).

Enfim, mudanças rápidas estão ocorrendo no mundo atual, seja na indústria, agricultura, mineração, comércio, serviços, etc. Somado ao crescente desenvolvimento da tecnologia, padrões de vida, níveis de consumo e expectativa de vida, criam uma demanda crescente por água e uma expansão significativa das áreas urbanas. Por outro lado, a agricultura está se expandindo rapidamente para fornecer alimentos, mudando rapidamente a cobertura e o uso terra. Dadas as mudanças climáticas e a velocidade com que essas mudanças ocorrem, temos um quadro dos impactos de longo prazo, de velocidade e magnitude incertas, que podem tornar a gestão dos recursos hídricos uma tarefa desafiadora (WWAP, 2015).

3.2. Reservatórios

A capacidade tecnológica do homem para projetar e construir reservatórios é antiga, e registros mostram que essas técnicas vêm sendo implementados há pelo menos 5 mil anos, desde que as primeiras civilizações se desenvolvem às margens dos rios, com o objetivo principal de servir aos povos da Babilônia, Egito, Índia, Persas, Chineses e Orientais (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). A história dos reservatórios e barragens é acompanhada pelos picos e declínios de civilizações antigas, principalmente em sociedades e culturas altamente dependentes da irrigação (WURBS, 2005).

Mais da metade das bacias hidrográficas do mundo têm fluxos de água regulados por reservatórios artificiais, a quantidade total de água armazenada em grandes reservatórios equivale a cerca de (2%) da água doce da superfície do globo (VOROSMARTY et al., 1997). Os reservatórios podem ser classificados de acordo com suas características físicas e estruturais, como a altura da barragem, o tempo médio de permanência de uma parcela da água em seu interior e sua capacidade de retenção (Tabela 1).

Tabela 1. Categoria dos pequenos, médios e grandes reservatórios em relação ao volume e área.

Categoria do reservatório	Volume (m³)	Área (km²)
Pequeno	10 ⁶ a 10 ⁸	1 a 10 ²
Médio	10 ⁸ a 10 ¹⁰	10 ² a 10 ⁴
Grande	10 ¹⁰ a 10 ¹¹	10 ⁴ a 10 ⁶

Adaptado de (MEES, 2020).

No Brasil, o estabelecimento de reservatórios começou na região Nordeste pela colonização portuguesa, com o objetivo principal de levar água aos engenhos dos primeiros colonizadores. Durante o período de colonização no interior do país, os reservatórios foram uma estratégia utilizada por agricultores e pequenos proprietários para tentar amenizar os efeitos da seca severa e prolongada. Essa técnica de manipulação e alteração ambiental, diante das adversidades climáticas, foi a única forma de superar a inexistência de córregos perenes e mananciais contínuos em todo o semiárido nordestino (REBOUÇAS, 1997).

Os reservatórios podem ser considerados como intermediários entre o ambiente lântico e lótico, são normalmente projetados e construídos em pontos fluviais com grande desnível em bacias hidrográficas, principalmente rios localizados na bacia hidrográfica em regiões de planalto, com diferentes objetivos como pesca, irrigação, recreação e aquicultura, abastecimento público, navegação, geração de energia, piscicultura, dessedentação de animais e, além disso, são amplamente utilizados para regular vazões e reduzir ondas de inundação,

apresentando-se como uma estrutura hidráulica muito versátil para sociedade humana (CRISTOFOLLETI, 1980; TUNDISI, 1990).

Grandes reservatórios têm um forte impacto hidrológico regional e global, que se estima causar uma redução geral nas vazões médias anuais de longo prazo de cerca de 2% (BIEMANS et al., 2011), o que reduz os níveis de água de oceanos e mares em cerca de 30 mm (CHAO et al., 2008). Existem cerca de 50,000 barragens no mundo com alturas que variam de 30 m a 300 m, com uma capacidade total de armazenamento de cerca de 7,000 Km³, com uma área total de 500,000 Km², representando cerca de 30% da superfície do espelho de água doce do planeta, o valor ocupado corresponde a 0,33% da superfície terrestre (ZHOU et al., 2016; WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

3.3.1. Pequenos Reservatórios/Barragens

A Figura 1, ilustra uma pequena barragem de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil.



Figura 1. Pequenas barragens de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil.

Fonte: Próprio autor.

Atualmente, existem grandes barragens, projetadas para gerar eletricidade, navegar e evitar enchentes, construídas com concreto. Por outro lado, pequenas barragens são estruturas simples, comuns em todo o mundo, consistindo basicamente em uma barreira de solo compactado construída ao longo da direção do fluxo de água, onde há uma maior inclinação do terreno para acumular e aumentar as cotas de água (FOWLER, 2015; FAO, 2011).

Pequenos reservatórios têm capacidade para armazenar o escoamento durante a estação chuvosa e descarregar durante a estação seca (NATHAN e LOWE, 2012). Portanto, pequenas barragens são importantes para superar as secas sazonais. Embora informações sobre grandes

reservatórios estejam amplamente disponíveis, sobre pequenos reservatórios ao redor do mundo são raros (LIEBE et al., 2009). Downing (2010) concluiu que pequenos reservatórios, dos quais cerca de 10% são artificiais, e lagos naturais (menos de 1 km²) são maiores em volume armazenado e mais numerosos que os grandes reservatórios.

As pequenas barragens de terra são utilizadas principalmente para armazenar água durante a estação chuvosa e para ser utilizada em diversos usos durante a estação seca (WISSER et al., 2010; NATHAN e LOWE, 2012; FROMAGEOT et al., 2006; FAULKNER et al., 2008; BOELEE et al., 2009; CECCHI et al., 2009). E apesar dos seus grandes benefícios, a construção de novas pequenas barragens de terra é controversa. No entanto, o papel das pequenas barragens é indiscutível na obtenção da segurança hídrica e na prestação de serviços econômicos e hidrológicos essenciais ao desenvolvimento, principalmente em regiões de vulneráveis a secas severas (FROMAGEOT et al., 2006).

Considerando que a escassez de água está aumentando em muitas partes do mundo (BOUWER, 2000), pequenas barragens são uma estrutura indispensável para irrigação e manutenção da qualidade de vida das comunidades rurais (RODRIGUES, 2008), armazenando água para uso doméstico e agrícola e contribuindo para recarga de águas subterrâneas (OBLINGER et al., 2010; HABETS et al., 2018). As comunidades rurais e gestores de água carecem de medidas quantitativas e práticas de gestão para o uso sustentável de água para mitigar os impactos sobre os usuários a jusante (PAKHMODE et al., 2003).

Um grande número de reservatórios agrícolas, mesmo pequenos, pode ter um impacto hidrológico significativo a jusante na bacia (CAMPOS et al., 2000; HABETS et al., 2018). Existem inúmeras tentativas de contabilizar pequenos reservatórios em modelos hidrológicos (SILANS et al., 2000; GÜNTNER et al., 2004; PAYAN et al., 2008). Um problema frequentemente encontrado quando pequenos reservatórios são incluídos em modelos hidrológicos é que não há informações detalhadas sobre as relações cota-área-volume, nem sobre as estruturas hidráulicas que compõe os reservatórios (COLLISCHONN et al., 2011).

Um desafio básico na gestão de pequenos reservatórios é entender a dinâmica da água armazenada para atender aos requisitos básicos de uma região, principalmente ao viabilizar água para a agricultura e uso doméstico, promovendo o desenvolvimento econômico e bem-estar social das comunidades agrícolas (FOWE et al., 2015; RODRIGUES et al., 2012). Muitos dos processos hidrológicos que compõe a dinâmica de água em um pequeno reservatório (infiltração, evaporação) são difíceis de estimar diretamente, mesmo na escala local e são muitas vezes considerados resíduos na equação de balanço hídrico em um pequeno reservatório (KAMPF e BUCHES, 2010; DEKKER, 2007).

3.4. Balanço hídrico de um pequeno reservatório

O balanço hídrico é calculado com base no princípio de conservação de massa, onde a diferença entre as entradas e saídas totais é equilibrada pela variação no armazenamento ao longo de um período de tempo (HABETS et al., 2018; UNESCO, 2012). Na Figura 2 apresenta-se a representação esquemática dos diferentes fluxos que compõe o balanço hídrico de uma pequena barragem de terra.



Figura 2. Representação esquemática dos diferentes fluxos que compõe o balanço hídrico de uma pequena barragem de terra. Fonte: Adaptado de (HABETS et al., 2018).

O balanço hídrico de um pequeno reservatório em um determinado período de tempo pode ser expresso pela equação (1):

$$V(t) = V(t_0) + \int_{t_0}^t [Q_A(t) + P(t) + G(t) - Q_{EV}(t) - Q_I(t) - D_H(t) - Q_{SF}(t) - Q_{SV}(t)] dt \quad (1)$$

em que:

$V(t)$ = volume de água no reservatório no tempo (t);

$V(t_0)$ = volume de água no reservatório no tempo (t₀);

$Q_A(t)$ = vazão afluyente no tempo (t);

$P(t)$ = precipitação no tempo (t);

$G(t)$ = influxo de água subterrânea no tempo (t);

$Q_{EV}(t)$ = evaporação no tempo (t);

$Q_I(t)$ = infiltração no tempo (t);

$D_H(t)$ = demanda hídrica tempo (t);

$Q_{SF}(t)$ = vazão na tomada de fundo no tempo (t);

$Q_{SV}(t)$ = vazão no vertedor no tempo (t).

A precipitação direta na superfície do espelho d'água, influxo de água subterrânea e a vazão afluyente constituem os principais fluxos de entrada de água. Os fluxos de saída são a tomada de fundo, vertedouro, demanda hídrica, evaporação e infiltração. Todos esses fluxos podem variar consideravelmente de um reservatório para outro (HABETS et al., 2018).

3.5. Fluxos de entradas em pequenos reservatórios

3.5.1. Vazão afluyente

A vazão afluyente é a quantidade de água que entra no reservatório por unidade de tempo. Essa variável representa o escoamento superficial após a chuva. A vazão específica é a produção de água por unidade de área na bacia. A medição da vazão afluyente é uma atividade essencial para avaliar adequadamente o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e estabelecer planos de gestão (RAMOS et al., 2003).

Os dados disponíveis de vazão afluyente, estão disponíveis para grandes bacias devido à característica do setor elétrico brasileiro, onde a geração de energia provém principalmente dos recursos hídricos (SOUZA et al., 2012). Porém muito restritos dentro das médias e pequenas bacias, onde o desenvolvimento de atividades como construção de pequenas barragens, e o aumento da demanda de água, torna-se cada vez mais importante uma rede de monitoramento fluviométrico adequado para o aproveitamento da água (GOLDENFUM et al., 2001).

Nesse sentido, para o planejamento e a gestão de recursos hídricos o conhecimento vazão afluyente é importante para identificação da capacidade de pequenos rios e córregos para uso doméstico, irrigação, e auxiliar no planejamento da construção de pequenas barragens. A vazão afluyente pode ser estimada por diversos métodos e técnicas, para rios com baixa vazão e velocidade média, e os equipamentos mais comuns utilizados são os vertedores, estações limimétricas, flutuadores e calha parshall (VALENTE e GOMES, 2011).

Portanto, monitorar a vazões de pequenos rios e córregos é muito importante para quantificar o volume de água disponível em uma determinada bacia hidrográfica e para pequenas barragens. O monitoramento e análise de séries de vazões e o pilar para a compreensão dos diversos fenômenos e processos que a regem, é a base para o desenvolvimento de ações de exploração e conservação dos recursos hídricos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Assim, a vazão afluyente e a principal variável de fluxo de entrada dos componentes do balanço de água, são fundamentais para avaliar a dinâmica da água em grandes e pequenas barragens. Em geral, as séries resultantes podem ser analisadas e apresentadas, dependendo do objetivo do estudo, através de hidrogramas, curvas de permanência, curvas de utilização e diagramas de massa (COSTA et al., 2012).

3.5.2. Precipitação pluviométrica

A precipitação pluviométrica são águas proveniente da atmosfera que precipita na superfície da terra em estado líquido ou sólido, a condensação do vapor de água atmosférico, ou seja, o resfriamento do ar a uma temperatura abaixo do ponto de saturação é a primeira condição que ocorre para a precipitação se formar, considera-se que é o principal fluxo de entrada para uma bacia hidrográfica (WANG et al., 2015).

A precipitação é muito importante na caracterização do clima de uma região, e a ausência de precipitação por um longo período de tempo pode impactar no rendimento das atividades agrícolas (ARAI et al., 2010). A precipitação regular durante todo o ano na bacia é um fator decisivo para práticas agrícolas (NUNES et al., 2007), garantido o fornecimento de água para uso doméstico das comunidades rurais e urbanas (CRUZ et al., 2020).

Quando a chuva começa, parte dela é interceptada pela vegetação, outra parte penetra no solo e uma outra parcela pode ficar em depressões localizadas na bacia. Se a chuva continuar, o escoamento superficial começará após o preenchimento dessas depressões. Assim, a água que flui acima do solo sem infiltrar formará escoamento superficial, que juntamente com o fluxo de base constituem córregos, ribeirões e rios (SCHNEIDERMAN et al., 2007).

Nesse sentido, as chuvas são responsáveis pelo volume total de água transportado pelos canais fluviais, que é composto pelo escoamento superficial e pelo escoamento de base (ALENCAR et al., 2006). No entanto, o escoamento superficial resultante das precipitações é um componente importante na formação de inundações, e aumento de vazões dos cursos de água, transporte de sedimentos e assoreamento de pequenas barragens, reduzindo drasticamente sua vida útil (MIGUEZ et al., 2017).

E durante a estação chuvosa, um pequeno reservatório também recebe água em sua superfície de espelho d'água (HABETS et al., 2018; ANNON et al., 2009). Assim, quanto maior a área de espelho de água do reservatório, maior é a quantidade de precipitação recebida pelo reservatório. Para pequenos reservatórios, é comum desprezar essa entrada de água no reservatório.

3.5.3. Ascensão capilar e infiltração

As relações entre o reservatório de água da barragem e a superfície do solo, ou seja, o solo sobre o qual o reservatório foi construído, podem ser visualizadas em termos de troca de fluxo de água (Figura 3). Essas mudanças vão depender das estações do ano, da posição relativa do lençol freático, e também das propriedades físicas da camada de fundo do reservatório.

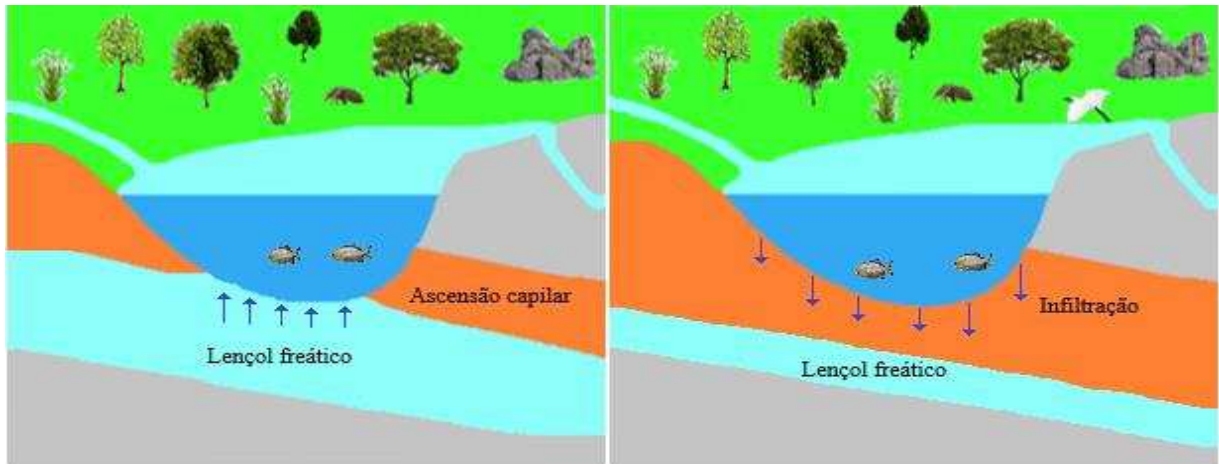


Figura 3. Influxo de água subterrânea e infiltração em uma pequena barragem de terra.

Fonte: Próprio autor.

Na estação chuvosa, pelo fato do lençol freático estar mais elevado, ele irá contribuir com a água da barragem. No período seco, a profundidade do lençol freático aumenta e a água da barragem começa a contribuir como recarga para o lençol freático. Relações matemáticas simplificadas permitem avaliar essas trocas, que de acordo com a segunda lei de Darcy, são do tipo linear ao coeficiente de permeabilidade ou simplesmente a permeabilidade.

O conhecimento da permeabilidade do solo é fundamental em estudos sobre o influxo de água subterrânea em barragem de terra (MASSUEL et al., 2014). Como parte das pesquisas sobre influxos de águas subterrâneas (ANTONINO et al., 2005; BOISSON et al., 2014) propuseram utilizar modelo matemático, para investigar a transferência de água do lençol freático em função da altura da água em um pequeno reservatório.

A taxa de infiltração aparenta ser maior do que a taxa de evaporação (HABETS et al., 2018). Nesse sentido, pequenos reservatórios desempenham um papel importante na sustentabilidade das águas subterrâneas, vários estudos têm investigado o funcionamento de redes de pequenos reservatórios interligados utilizados para irrigação em áreas rurais. Esses estudos apresentam taxas de infiltração na ordem 0,7 a 5,0 mm dia⁻¹ para solos do tipo Latossolo Vermelho; Argissolo amarelo (SHINOGI et al., 1998; RODRIGUES e DEKKER, 2008).

Independentemente da função e finalidade da construção de um pequeno reservatório, estimar a taxa de infiltração é muito importante, pois determina sua eficiência no armazenamento de água (RODRIGUES, 2007; HABETS et al., 2018). Na literatura científica, as estimativas de taxas de infiltração são frequentemente baseadas em observações de umidade do solo e cabeças piezométricas ou através da instalação de barril de percolação (SHINOGI et al., 1998; ANTONINO et al., 2005; MASSUEL et al., 2014; RODRIGUES e DEKKER, 2008).

3.6. Fluxos de saídas em pequenos reservatórios

3.6.1. Tomada de fundo

Na Figura 4, está ilustrado uma tomada de fundo em uma pequena barragem de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil.



Figura 4. Tomada de fundo em uma pequena barragem de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil. Fonte: Próprio autor.

Tomada de fundo ou descarregador de fundo é uma estrutura que permite que a água escoe na parte inferior de pequenos reservatórios de terra para atender uma vazão pré-determinada, visando atender a legislação. Normalmente não existem estrutura de controle de vazão, que é controlada pela carga hidráulica, ou seja, pela altura de água no reservatório acima da tubulação. O diâmetro da tubulação é projetado em função da vazão desejada, devendo evitar o acúmulo de sedimentos e detritos, tomando como base os aspectos topográficos e geotécnicos de cada local (SANTOS et al., 2011; COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Geralmente, para dimensionamento da tomada de fundo em pequenos reservatórios de terra são utilizados tubulação de PVC (policloreto de vinil) com diâmetros entre 200 a 300 mm. O escoamento gerado nesse tipo de estrutura pode ser livre, parcialmente livre ou submerso (MUSSALLI, 1969).

De acordo com as diretrizes práticas para pequenas barragens de terra desenvolvida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2006), para projetos de pequenas barragens, as dimensões hidráulicas da captação de fundo serão determinadas com base em estudos hidrológicos, ou seja, com base na vazão disponível para a barragem e na vazão máxima durante as enchentes eminentes, dependendo portanto das chuvas em relação à sua intensidade,

duração e frequência, e na determinação da vazão a jusante estabelecida pelo instrumento de outorga.

3.6.2. Vertedor ou sangradouro

Na Figura 5 apresenta-se um pequeno reservatório de terra, com destaque para um vertedor retangular dimensionado em uma pequena barragem de terra localizada em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil.



Figura 5. Vertedor retangular dimensionado em um pequeno reservatório de terra, localizado em uma microbacia hidrográfica na comunidade Fartura no município de São Miguel do Anta, Minas Gerais, Brasil. Fonte: Próprio autor.

O vertedouro é uma estrutura hidráulica que tem a função de evitar que o nível de água no reservatório ultrapasse uma altura de segurança, retirando o excesso de água (MOLLE et al., 1992; COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Na Tabela 2 estão as classificações dos principais vertedores utilizados em pequenos reservatórios de terra (AZEVEDO NETTO, 1977).

Tabela 2. Classificações dos principais vertedores utilizados em pequenas barragens de terra.

Forma	Natureza da soleira	Altura da soleira	Natureza da parede
Simple	Soleira delgada	Livre	Com contrações laterais
Composto	Soleira espessa	Afogado	Sem contrações laterais

Adaptado de (AZEVEDO NETTO, 1977).

Os sangradores do tipo vertedouros em barragens de terra atuam como dispositivo de controle da quantidade de água armazenada, controlando o seu nível quando este atinge valores que podem produzir riscos à estabilidade estrutural da barragem e inundar áreas acima de uma

cota preestabelecida. O seu dimensionamento é função das características construtivas da barragem, da topografia e da vazão máxima de projeto, associada a um período de retorno (TUCCI, 1993).

O subdimensionamento dessas estruturas hidráulicas é considerado a principal causa do rompimento de pequenas barragens de terra, estando associado a aproximadamente 20% a 50% dos acidentes com pequenas barragens (DAKER, 1983, TUCCI, 1993). Um levantamento realizado em 275 pequenos reservatórios na Bacia do Rio Piranha, no estado do Rio Grande do Norte, no nordeste do Brasil, indicou que mais de 88% do total das barragens tinham vertedouros subdimensionados (MOLLE et al., 1992).

3.6.4. Evaporação

A evaporação pode ser entendida como um processo natural de perda de água das estruturas de armazenamento (Figura 6), tornando as barragens um dos maiores “usuários” de água doce (HABETS et al., 2018). Somente na Austrália, estima-se que até metade da água armazenada em pequenos reservatórios é perdida por evaporação (CRAING, 2008; ROST et al., 2008), enquanto cerca de 10% do total de água disponível para irrigação é perdido por evaporação em pequenas barragens na Espanha (MARTÍNEZ ALVAREZ et al., 2008).

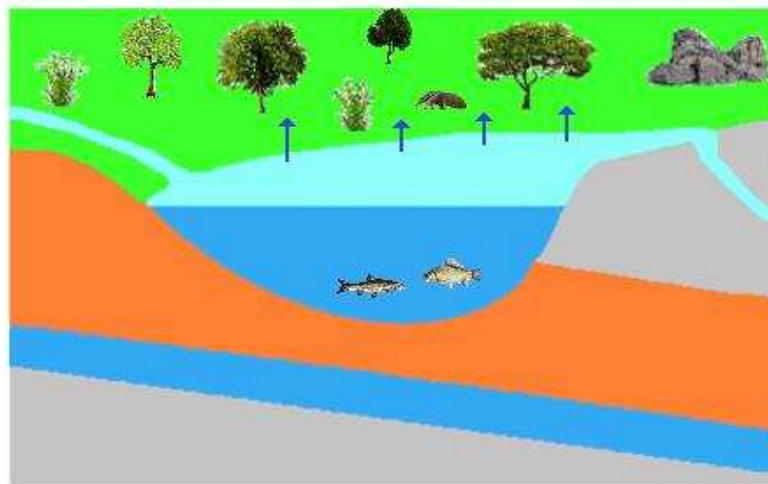


Figura 6. Perdas de fluxos por evaporação direta na superfície do espelho d’água em um pequeno reservatório. Fonte: Próprio autor.

A estimativa da evaporação não é simples, principalmente porque o armazenamento de calor no corpo d’água afeta o fluxo de energia na superfície do espelho d’água (ASSOULINE et al., 2008; MCMAHON et al., 2013). Além do tamanho da barragem, a borda do reservatório também é um fator que afeta a velocidade do vento e a advecção da umidade do ar (HABETS et al., 2018), reduzindo e aumentando as perdas por evaporação.

Althoff et al., (2019), propuseram uma relação entre a evaporação de um pequeno reservatório e a evaporação do tanque Classe A, que oscila com a profundidade e a área do reservatório e variam ao longo do tempo de 86% a 94%. Diferentes estimativas de perdas por evaporação de pequenos reservatórios com base em dados meteorológicos têm sido propostas (CULLER, 1961; MCJANNET et al., 2013; MORTON, 1983; BENZAGHTA e MOHAMAD, 2009; CRAING, 2008; ALTHOFF et al., 2019b). Essas perdas por evaporação de pequenos reservatórios podem ser muito relevantes.

Vários outros métodos foram usados para fornecer estimativas da evaporação em pequenas barragens, baseado principalmente em abordagens de balanço de energia (CULLER, 1961; GALLEGO-ELVIRA et al., 2010), medições de covariância turbulenta (ROSENBERRY et al., 2007; TANNY et al., 2008; MENGISTU e SAVAGE, 2010; NORDBO et al., 2011; MCJANNET et al., 2013), e abordagens de balanço de água (GIRARD, 1966; MARTÍNEZ ALVAREZ et al., 2007).

3.7. Impacto de pequenos reservatórios na hidrologia

Pequenos reservatórios de terra impactam na hidrologia porque afetam o ciclo natural da água que ocorreria sem um reservatório. Para entender como as redes de pequenos reservatórios impactam a hidrologia na escala de bacia hidrográfica, é necessário entender o comportamento de um único reservatório. Isto é, como ele pode afetar a vazão de um córrego e a disponibilidade hídrica da bacia (NATHAN e LOWE, 2012; FOWLER et al., 2015; HABETS et al., 2018).

Reservatórios com características semelhantes podem ter impactos diferentes dependendo de sua localização ao longo da rede de drenagem e do seu tamanho, principalmente porque o fluxo não é o mesmo, portanto uma representação do reservatório em forma de cascata é uma maneira de representar explicitamente as interações hidrológicas entre os reservatórios, considerando as características físicas, capacidade de armazenamento de cada reservatório, sua contribuição para o fluxo a jusante e suas interações com o curso de água, solo e o aquífero subterrâneo, dentre outros fatores (HABETS et al., 2018).

Pequenos reservatórios levam aos chamados efeitos cumulativos ou de grupo que não são fáceis de estimar, mesmo quando se considera apenas a hidrologia (HABETS et al., 2018; DEITCH et al., 2013). Há ampla evidência de que os efeitos cumulativos de pequenos reservatórios são significativos (CANTER e KAMATH, 1995; NEAL et al., 2001; SCHREIDER et al., 2002).

A Figura 7 ilustra redes de pequenos reservatórios em cascata em uma bacia hidrográfica, e o funcionamento de um único reservatório.

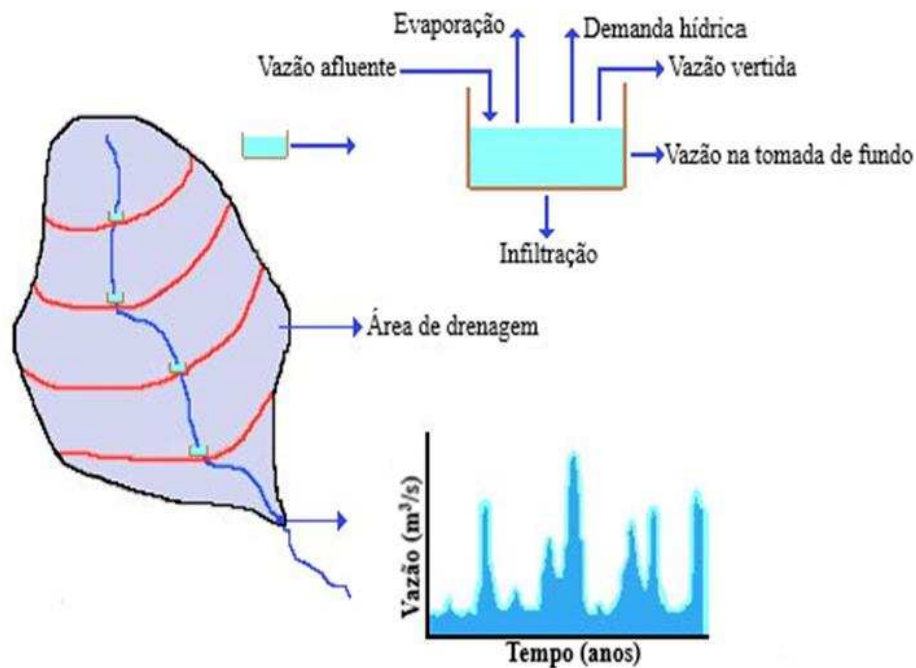


Figura 7. Esquema representativo de redes de pequenos reservatórios em cascata em uma bacia hidrográfica, e o funcionamento de um único reservatório.

Fonte: adaptado de (NATHAN e LOWE, 2012).

Pequenos reservatórios podem ser construídos em qualquer lugar ao longo de um curso de água. Nesse sentido, o efeito cumulativo de vários reservatórios em cascata é distribuindo na área de drenagem da bacia hidrográfica variando no espaço e no tempo (NATHAN e LOWE, 2012).

A maioria dos estudos sobre efeitos hidrológicos cumulativos tem se concentrado nas vazões afluentes, com reduções que variam de 0,2% a 6%, com valores médios de 13,4% (HABETS et al. 2018). No entanto, há evidências de que a concentração de pequenos reservatórios pode levar a diferentes impactos nas vazões dos cursos de água (NATHAN e LOWE, 2012).

Portanto, há um consenso geral de que pequenos aglomerados de reservatórios levam à redução da vazão anual do rio, relatando reduções médias anuais de vazão variando 0,2% a 36% e aumento de 44% na vazão mínima (WISSER et al., 2010; HABETS et al., 2018; NATHAN e LOWE, 2012). Em média, com base em cerca de 30 referências, constatou-se uma redução de 8,3% na vazão média anual.

Mas, no entanto, os efeitos de pequenos reservatórios na série de vazões, e na evolução do uso do solo e práticas agrícolas não são considerados na maioria dos estudos (HABETS et

al., 2018). Porém, é certo que as mudanças no uso da terra e a construção de pequenos reservatórios influenciam significativamente na hidrologia das bacias hidrográficas (WANG et al., 2015) resultando na diminuição no armazenado e dos níveis das vazões específicas (RODRIGUES et al., 2019). Assim, os impactos das mudanças no uso do solo, variam certamente de acordo com as práticas de ocupação da terra antes e depois da construção de pequenos reservatórios.

De fato, vários estudos concluíram que um grande número de pequenas barragens, implementadas individualmente, pode ter o mesmo ou maior impacto na vazão afluente do que uma única grande barragem (CALLOW e SMETTEM, 2009; MALVEIRA et al., 2012; GÜTNER et al., 2004). Estimar a dinâmica de água e os efeitos cumulativos de pequenos sistemas de reservatórios, tornou-se um problema global, pois os números e as concentrações aumentam, por exemplo, cerca de 3% ao ano somente nos Estados Unidos (BERG et al., 2016).

Essa tendência crescente na construção de pequenos reservatórios provavelmente persistirá, pois, esses sistemas hídricos são frequentemente suscetíveis a flutuações hidroclimáticas, principalmente no contexto das mudanças climáticas globais (VAN DER ZAAG e GUPTA, 2008; PACHAURI et al., 2014).

Nesse sentido, a partir de uma revisão da literatura científica, os efeitos cumulativos e individuais na dinâmica hídrica de pequenos reservatórios tornaram-se um problema global, pois os números e as concentrações aumentam a cada ano, trazendo desafios para o planejamento e para a gestão de recursos hídricos (BERG et al., 2016; HABETS et al., 2018).

3.8. Modelagem e Sistema dinâmico (SD)

Um modelo pode ser definido como uma representação simplificada de certos fenômenos do mundo real. Ao se idealizar um modelo simplificações são feitas e pressuposições assumidas. Com base nos processos que se quer representar, se identifica as equações.

A modelagem matemática é bastante utilizada para quantificar os efeitos cumulativos de pequenos reservatórios e a sua dinâmica (HABETS et al., 2018, ZOMORODIAN et al., 2018). Embora existam várias abordagens para se avaliar a dinâmica de água, a grande maioria dos métodos de modelagem são baseados no balanço hídrico em pequenos reservatórios (HUGHES e MANTEL, 2010; HABETS et al., 2018).

A maioria das modelos de balanço hídrico em pequenos reservatórios levam em conta a evaporação e a infiltração, cuja estimativa raramente é bem conhecida. Quando a infiltração é levada em consideração, ela é considerada apenas do ponto de vista da recarga, não considerando o seu efeito de redução no armazenamento de água (GÜNTNER et al., 2004).

Os modelos matemáticos ou dinâmicos utilizam as equações para representar suas variáveis do sistema físico e seus parâmetros possuem significado físico podendo ser estimados através de medidas reais em campo (KHAN et al., 2009; PEREIRA et al., 2012; SIMONOVIC, 2002; STERMAN, 2000; XI et al., 2013; YANG et al., 2005). Portanto, os modelos causais dinâmicos são diagramas que servem para descrever uma situação e o problema de acordo com o que almeja cada observador.

A Figura 8, está ilustrando um diagrama causal dinâmico de recursos hídricos com destaque para os princípios fluxos de entradas, oferta, estoque e demanda por água.

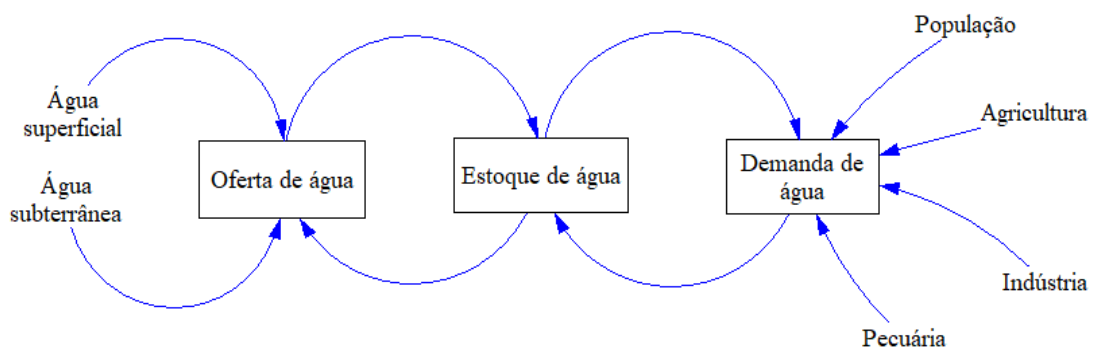


Figura 8. Diagrama causal dinâmico de recursos hídricos.

Fonte: Adaptado (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009).

No processo de modelagem proposto por Sanches-Román et al., (2009) é identificado que o abastecimento de água é definido pelos fluxos de entradas de águas superficiais e as águas subterrâneas. Essas duas entradas garantem o estoque de água, o que garante a oferta da demanda total suportada pela bacia hidrográfica. A demanda de água na bacia, por sua vez, é composta pelas necessidades da população, pecuária, setores industriais e agrícolas.

Nesse sentido, os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de se representar os diferentes processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, integrando componentes causais da natureza e fatores humanos, podendo ser definidos como uma representação matemática do fluxo de água e seus componentes (KHAN et al., 2009; WAGENER et al., 2004; SIMONOVIC, 2002; PEREIRA et al., 2012; SIMONOVIC, 1992; LI e SIMONOVIC 2002).

Assim, as bacias hidrográficas e reservatórios de água podem ser implementados na maioria dos modelos hidrológicos com base na abordagem SD, pois os diferentes fluxos do balanço hídrico de uma pequena barragem são governados pelo princípio de conservação de massa, onde a diferença entre as entradas e saídas totais é equilibrada pela variação no

armazenamento ao longo do tempo. As bacias hidrográficas reúnem todas as superfícies coletoras em torno de um ou mais canais principais que levam a uma única saída, que é o escoamento ou vazão de saída (VALENTE e GOMES, 2011; SANTOS, 2012; BARRELLA, 2001).

O conceito de SD foi introduzido pela primeira vez por Forrester em (1958) como um método de modelagem e simulação para gestão industrial nos Estados Unidos. O SD foi popularizado pelo Clube de Roma na década de 70. Eles são derivados da teoria da dinâmica não linear e controle de feedback ou retroalimentação (XI et al., 2013). A abordagem SD tem se mostrado adequada não apenas para processos industriais (BARLAS, 2007; PEREIRA et al., 2012; STERMAN, 2000), mas também para aplicações em sistemas hídricos e ambientais (SIMONOVIC, 1992; SIMONOVIC, 2002; WANG, 1995; YANG et al., 2005).

Nesse sentido, o uso do SD no campo da pesquisa ambiental e de recursos hídricos cresceu significativamente desde a década de 1990, sendo considerado fundamental na análise e planejamento de sistemas relacionados a bacias hidrográficas e seus serviços hidrológicos (LOUCKS et al., 1981).

Os contínuos avanços na tecnologia computacional, favoreceram o desenvolvimento dos modelos SD, que são utilizados em hidrologia e recursos hídricos para gerar resultados que não estão prontamente disponíveis e não são facilmente obtidos, permitindo inatingível simulação de cenários e melhorando a tomada de decisão (LABADIE.,1987; MASHALY et al., 2020).

A modelagem hidrológica baseada na abordagem SD tem sido utilizada como ferramenta para avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, em escalas espaciais e temporais., Esses modelos possibilitam conhecer a resposta da bacia hidrográfica às variações climáticas periódicas, mudanças nas condições de uso e manejo do solo, possibilitando simular e prever condições distintas e, por consequência, se pode tomar medidas preventivas, antes da ocorrência de determinado evento climático e hidrológico ocorra (WAGENER et al., 2004; SPRUILL et al., 2000; SIMONOVIC, 2002; SIMONOVIC, 2000; PEREIRA et al., 2012).

Uma das principais áreas de aplicação do modelo de sistema dinâmico é a análise e operação de grandes reservatórios e gestão de recursos hídricos, previsão de secas, avaliação de escassez de água, balanço hídrico ao nível do solo e planejamento de irrigação (SUŠNIK et al.,2012; AHMAD e SIMONOVIC, 2000; PEREIRA et al., 2012; RODRIGUES et al., 2021; KHAN et al., 2009; MASHALY et al., 2020). Simonovic (2002) usou a abordagem SD para desenvolver um modelo de escala global de gestão de recursos hídricos. Li e Simonovic (2002) usaram uma abordagem de dinâmica de sistemas para prever inundações de degelo em bacias

hidrográficas norte-americanas e a implementaram para avaliar as consequências das mudanças climáticas no desempenho do sistema de segurança contra inundações.

A modelagem SD é amplamente utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão na gestão e planejamento de recursos hídricos (DAVIES e SIMONOVIC, 2011, PHAN et al., 2021; KARIMLOU et al., 2020). Os modelos SD auxiliam os planejadores a otimizar possíveis medidas de gestão de recursos hídricos em diferentes cenários (DAVIES e SIMONOVIC, 2011). Portanto, o SD pode ajudar os gestores de recursos hídricos a identificar tendências de problemas, entender suas causas raiz e avaliar medidas de gestão apropriadas na tomada de decisões (SIMONOVIC, 2009; MIRCHI et al., 2012).

Os EUA (18%), China (35%), Canadá (9%) e Irã (10%) lideram a lista de países que utilizam técnicas de modelagem SD na pesquisa sobre água. Apenas 2% das publicações foram realizadas por países da América do Sul (MASHALY et al., 2020; PHAN et al., 2021). Mas até o momento, não se conhece nenhuma publicação que utilize a modelagem SD como ferramenta de apoio à decisão para analisar o sistema e otimizar os impactos negativos e positivos da implantação de pequenos reservatórios.

A escolha da metodologia a ser utilizada em cada caso dependerá das características do sistema e da disponibilidade de dados, dos objetivos e das limitações especificadas para cada estudo em que se deseja implementar a abordagem dinâmica de sistema (YEH., 1985; SIMONOVIC., 1992; WURBS., 2005; MASHALY et al., 2020; PHAN et al., 2021).

Esta revisão da literatura abordou diferentes aspectos relacionados ao tema pequenas barragens e como elas vem sendo construídas e manejadas e utilizadas e os principais impactos e benefícios que elas ocasionam na hidrologia e na sociedade. No entanto, o melhor entendimento da dinâmica de água em pequenas barragens, principalmente utilizando a abordagem SD, permanece como uma lacuna ainda em aberto na literatura científica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A pesquisa foi conduzida na bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho (BHRBV), localizada entre as coordenadas geográficas ($15^{\circ} 55' 56''$ S e $47^{\circ} 23' 53''$ W (ZONA 23 /DATUM SIRGAS 2000) (Figura 9).

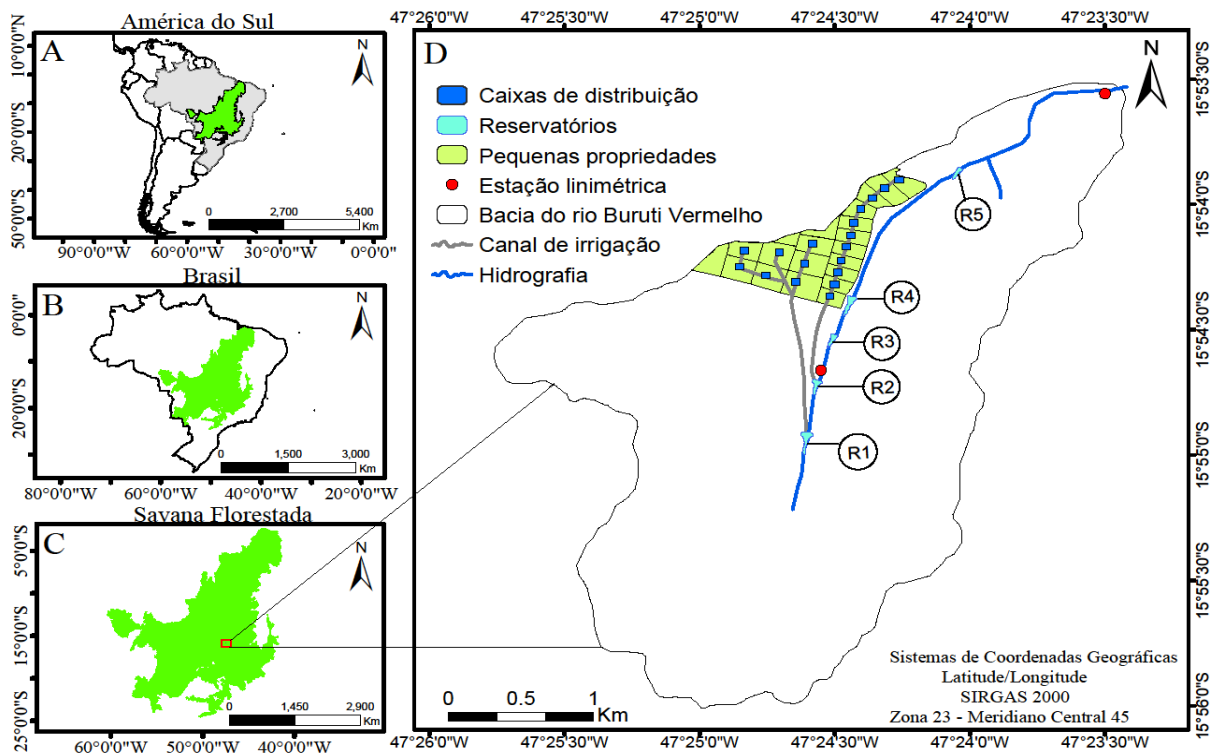


Figura 9. Bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho (D), com destaque para os pequenos reservatórios dispostos em cascata R1, R2, R3, R4 e R5. Fonte: Próprio autor.

O rio Buriti Vermelho possui, ao longo do seu curso, cinco pequenas barragens. As análises realizadas neste trabalho tiveram como foco a segunda barragem (R2). A pequena barragem tem uma superfície de água de 0,25 ha, uma capacidade de armazenamento de 3317,1 m³, e cerca de 85 m de comprimento (RODRIGUES, et al., 2009).

Na Tabela 3 apresenta-se informações sobre as características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho. Essa bacia possui área de drenagem de aproximadamente 10,3 km² e está localizada na porção leste do Distrito Federal, região central do Brasil. Com base na classificação apresentada por Horton (1945), e refinada por Strahler (1964), a bacia é classificada como de primeira ordem. O rio Buriti Vermelho, e seu rio principal, é um afluente do rio Estreito, que deságua no rio Preto, que percorre pelo rio Paracatu até alcançar o rio São Francisco, que é uma importante fonte de água para o Semiárido brasileiro (RODRIGUES et al., 2007; RODRIGUES e LIEBE, 2013; WENDT et al., 2015).

Tabela 3. Características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

Características	Valor
Área de Drenagem	10,3 km ²
Perímetro	15,74 km
Comprimento do leito principal	4,23 km
Elevação média	915 m
Declividade equivalente	0,0302 m m ⁻¹
Fator de forma	0,51
Coefficiente de compacidade	1,17
Densidade de drenagem	0,43 km km ⁻²
Ordem	1
Tempo de concentração	22,48 min
Declividade do rio principal	0,169 m km ⁻¹

Fonte: Próprio autor.

Segundo a classificação de Köppen o clima da região é do tipo tropical (Aw) com clima úmido e seco. A estação seca tem duração de maio a setembro e a chuvosa de outubro a abril. A precipitação média anual é de 1.200 mm e as temperaturas são geralmente amenas ao longo do ano, entre 22° C e 27°C, em média (INMET, 2020).

No levantamento de solo realizado na BHBV verificou-se que o Latossolo Vermelho foi encontrado como a classe principal, representando aproximadamente 94,9% da área de drenagem da bacia, seguido por Cambissolos com 3,0% e Gleissolos com 2,1%. Localizado na parte centro-sul da faixa de dobramentos do Distrito Federal, o rio Buriti Vermelho é dominado por rochas do grupo Bambuí, dominado por unidades metassedimentares depositadas em ambiente datado do período Neoproterozóico. Em menor quantidade, pequenas unidades são encontradas refletidas em camadas de calcário e dolomita, entre outras (EMBRAPA, 1999; CASTRO et al., 2009).

O relevo é do tipo plano e suave ondulado, é designado por planaltos, depressões e áreas dissecadas resultantes da atuação de processos morfoclimáticos, que foram extremamente favoráveis a elaboração de superfícies de aplainamento e ao aprofundamento dos cursos d'água, compreendendo toda a extensa área situada a oeste do vale médio e superior do São Francisco, como também do divisor oriental da bacia do Parnaíba; seus limites ocidentais entram em contato com a Planície Amazônica e a Planície do Alto Paraguai (TOMAZZOLI, 1990).

A vegetação nativa é constituída predominantemente de savana florestada (Cerrado), e áreas bem menos expressivas de florestas subcaducifólias e de galeria, este tipo de vegetação é característico de regiões de clima semiúmido, constituindo-se principalmente de gramíneas, arbustos, onde muitas árvores apresentam se caducifólios em determinados períodos na estação seca, tendo como principal característica uma fisionomia florestal com aspectos xenomórficos, com árvores tortuosas e as folhas espessas e coriáceas (RIBEIRO e WALTER, 1998).

Com relação a comunidade, a bacia é composta por pequenos agricultores com áreas da propriedade variando entre 1 a 4 hectares e produtores com áreas com até 200 hectares (CASTRO et al., 2009). Os produtores rurais que utilizam água do reservatório 2, compõem 11 pequenas propriedades com área total de 23 ha, e através de um canal de irrigação coletivo promovem a irrigação de suas lavouras de soja, milho, feijão e trigo (MANETA et al., 2009b).

O canal de irrigação recebe água da segunda barragem por meio de um tubo longo, cuja vazão é controlada pela variação da altura da água (carga hidráulica) no reservatório. O canal de irrigação, com escoamento livre, possui um formato circular revestido de concreto, com 665 m de comprimento, 0,30 m de diâmetro, declividade média de $0,0034 \text{ m m}^{-1}$ e a diferença de nível da comunidade ao reservatório e de 3,31 m.

4.2. Fluxograma representativo do desenvolvimento do modelo sistema dinâmico (SD)

O desenvolvimento do modelo SD foi dividido em duas etapas (Figura 10). Na primeira etapa, o modelo calcula a vazão efluente de um reservatório isolado sem considerar a demanda. Na segunda etapa de desenvolvimento do modelo, foi acrescentado um módulo de demanda, para isso manteve-se a vazão na tomada de fundo como zero, possibilitando simular a dinâmica de água no reservatório e o risco de não atendimento da demanda.

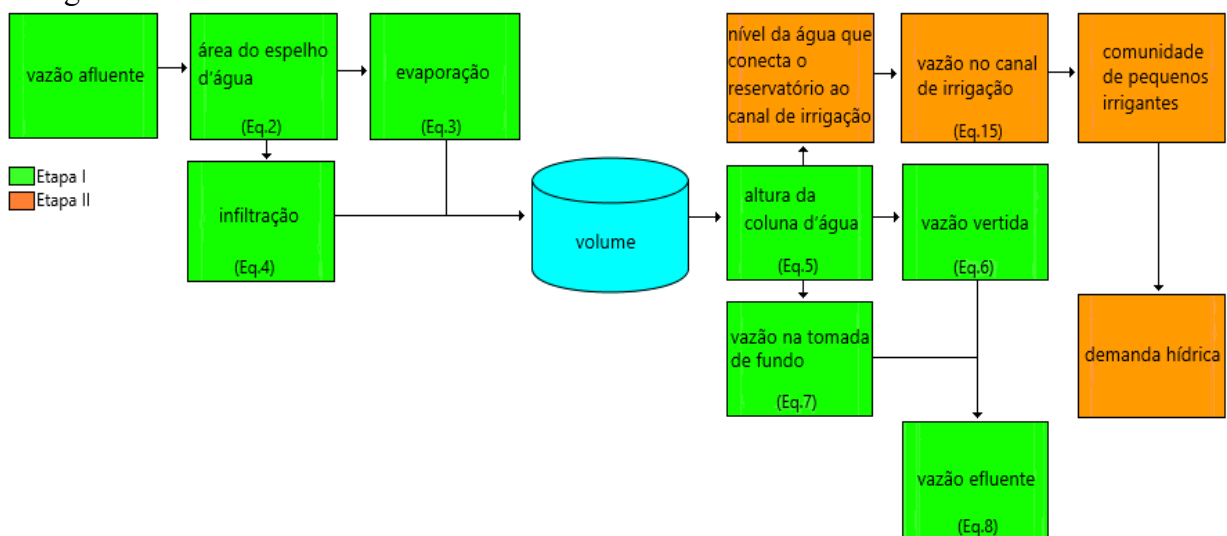


Figura 10. Fluxograma representativo do modelo de simulação da dinâmica de água na pequena barragem e do risco de não atendimento da demanda hídrica (SiPREDH). Fonte: Próprio autor.

4.3. Desenvolvimento do modelo SD para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados

O modelo SD para simular a dinâmica de água nos pequenos reservatórios foi desenvolvido utilizando o *software* Vensim-PLE, o qual permite construir modelos de simulação dinâmica incluindo equações que representam mudanças em função do tempo (VENTANA SYSTEM, 2013).

No desenvolvimento do modelo, as seguintes premissas foram assumidas: (i) a infiltração da água no solo foi considerada uniforme no leito da barragem, sendo a área considerada para infiltração equivalente a 65% da área do espelho d'água; (ii) a taxa de evaporação ocorrerá de forma uniforme e em toda a superfície do espelho d'água; (iii) a água infiltrada não retorna para o sistema hídrico; (iv) a quantidade precipitada sobre o espelho d'água da barragem foi desprezada; (v) a ascensão capilar foi desprezada; (vi) a vazão afluyente ao reservatório foi computada em base diária; (vii) a simulação foi realizada em intervalos de tempos de cinco minutos, para isso os valores das variáveis vazão afluyente, evaporação e infiltração foram discretizados em tempo de cinco minutos.

Na Figura 11 apresenta-se as principais variáveis de entrada e saída de água em uma pequena barragem. Onde a diferença entre a entrada e a saída total é equilibrada pela mudança no armazenamento de água no reservatório ao longo do tempo (UNESCO 2012; HABETS et al., 2018).

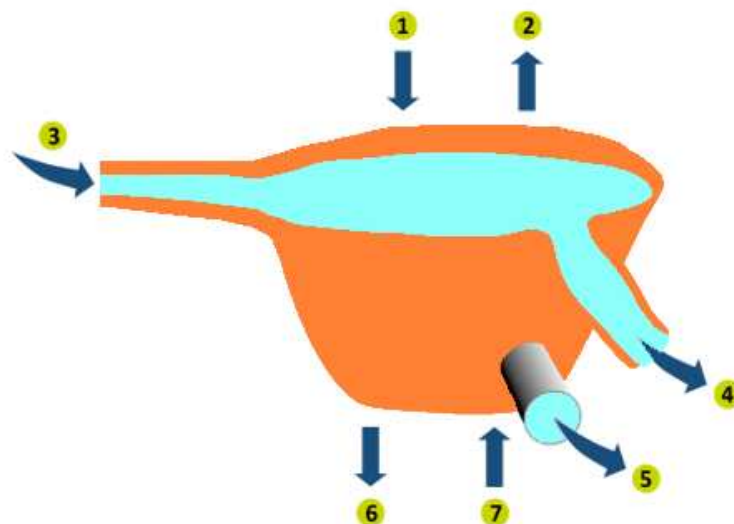


Figura 11. Representação esquemática das principais variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água de uma pequena barragem. 1 = precipitação; 2 = evaporação; 3 = vazão afluyente; 4 = vazão de saída no vertedor; 5 = tomada de fundo; 6 = infiltração; 7 = ascensão capilar. Fonte: Adaptado de (RODRIGUES e ALTHOFF, 2021).

4.3.1. Vazão afluyente ao reservatório

Para avaliação da dinâmica de água em uma pequena barragem foi utilizado o reservatório 2, apresentado na Figura 9, como referência. Os dados diários de vazão afluyente ao reservatório foram obtidos de uma estação linimétrica conectada a um linígrafo programado para armazenar valores de vazão a cada cinco minutos, obtidos da base de dados da Embrapa Cerrados (RODRIGUES, 2016) para o período de outubro de 2009 a setembro de 2011.

4.3.2. Área do espelho d'água

De posse dos dados de vazão afluyente ao reservatório 2, para cada intervalo de tempo de 5 min, foi calculado a área do espelho d'água pela equação 2.

$$A_{ES} = \alpha_1 (t Q_A)^{k_1} \quad (2)$$

em que:

A_{ES} = área do espelho d'água, ha;

t = intervalo de tempo, s, ($t = 300$);

Q_A = vazão afluyente, $m^3 s^{-1}$;

α_1, k_1 = coeficientes, adimensionais.

Foram considerados os coeficientes, α_1 e k_1 com valores iguais a 1,09 e 0,000513 respectivamente, estabelecidos com base nas relações do volume, área e profundidade, ajustados para pequenas barragens localizadas no Cerrado (RODRIGUES e LIEBE, 2013).

4.3.3. Evaporação

Uma vez calculada a área do espelho d'água, é calculada a quantidade de água evaporada, conforme equação 3 (ALTHOFF et al., 2019b).

$$Q_{EV} = 0,0034722 (0,924 + 0,057 T_x) A_{ES} \quad (3)$$

em que:

Q_{EV} = evaporação, $m^3 s^{-1}$;

T_x = temperatura máxima, °C.

Foi considerada temperatura máxima de 31,2°C registrada na estação meteorológica instalada próxima ao reservatório (ALTHOFF et al., 2019b).

4.3.4. Infiltração

Uma das pressuposições do modelo é que a taxa de infiltração ocorre de forma uniforme no leito da barragem, ou seja, a variabilidade espacial das características do solo, que interferem na infiltração, foi desprezada. A área da barragem sujeita a infiltração foi estimada com base na área do espelho de água do reservatório.

A área do espelho d'água sempre é maior do que a área do fundo do reservatório disponível para infiltração. Em virtude disto e para não superestimar o volume infiltrado, foi considerado um reservatório no formato trapezoidal (PINHATI et al., 2020). Desta forma, para fins de cálculo da infiltração, a área do espelho de água foi dividida por dois, calculada pela equação 4. Neste caso, a infiltração nas partes laterais da barragem foi desprezada, que é justificado devido a superfície específica vertical desse local, o que resultando em uma diminuição das forças de absorção d'água (ANTONINO et al., 2005).

Neste estudo, a estimativa do valor médio da infiltração na barragem foi igual a 5,2 mm dia⁻¹ calculada com base nas informações apresentadas por Rodrigues e Dekker (2008).

$$Q_i = \frac{\left(\frac{I_{\text{med}} \left(A_{\text{ES}} \frac{10,000}{2} \right)}{1.000} \right)}{t} \quad (4)$$

em que:

Q_i = infiltração, m³ s⁻¹;

I_{med} = infiltração média, mm dia⁻¹.

4.3.5. Altura da água no reservatório

Após o cálculo da infiltração, o volume atual de água armazenado foi calculado em função dos volumes infiltrado e evaporado. De posse do volume atual armazenado, a altura atual da água no reservatório, no tempo i , foi calculada pela equação 5.

$$\log(H_i) = \frac{\log\left(\frac{V_{\text{atual}}}{k}\right)}{\alpha}$$

em que:

H_i = a altura da água no reservatório no tempo i , m;

α , k = coeficientes relacionados à forma do reservatório, adimensionais.

Foram considerados os coeficientes, α e k com valores equivalentes a 2,74 e 114,58 respectivamente, estabelecidos com base nas relações do volume, área e profundidade, ajustados para pequenas barragens localizadas na região do Cerrado brasileiro (RODRIGUES e LIEBE, 2013).

4.3.6. Vazão do vertedor

De posse da altura atual de água no reservatório, a vazão do vertedor foi calculada. Sempre que H_i for maior que a altura útil (H_u), ocorrerá vazão no vertedor (Figura 12). No cálculo da vazão, equação 6, foi assumido um vertedor em formato trapezoidal. As características físicas dos vertedores das barragens foram obtidas da base de dados da Embrapa Cerrados (RODRIGUES, 2016).

$$Q_{sv} = 1,86 L H_v^{1.5} \quad (6)$$

em que:

Q_{sv} = vazão de saída no vertedor, $m^3 s^{-1}$;

L = largura do vertedor, m;

H_v = altura d'água no vertedor, m.

Na Figura 12, apresenta-se o corte transversal na parede de uma pequena barragem de terra, com destaque para o vertedor e as alturas de água na barragem.

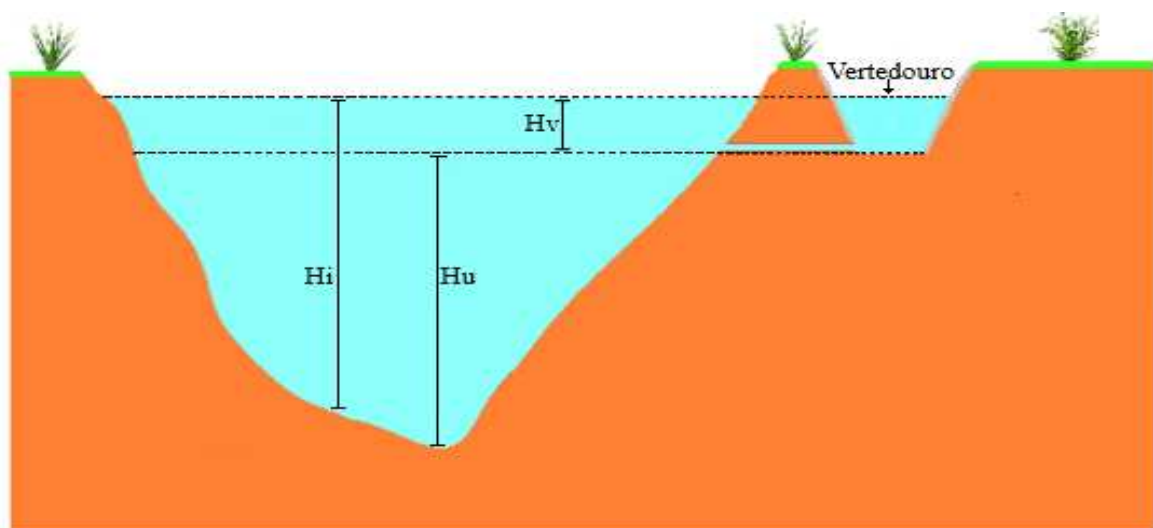


Figura 12. Corte transversal na parede de uma pequena barragem de terra, com destaque para o vertedor trapezoidal e as alturas de água na barragem. (H_i = a altura de água no reservatório no tempo i ; H_u = altura útil e H_v = altura d'água no vertedor). Fonte: Próprio autor.

4.3.7. Vazão de saída na tomada de fundo

De posse dessas informações e conhecendo-se a área da seção transversal do tubo da tomada de fundo, a vazão de fundo da barragem foi calculada pela equação 7 (ANA, 2006).

$$Q_{SF} = A C_V \sqrt{2 g H_i} \quad (7)$$

em que:

Q_{SF} = vazão de saída pela tomada de fundo, $m^3 s^{-1}$;

A = área da seção transversal do tubo, m^2 ;

g = aceleração da gravidade, $m s^{-2}$;

C_V = coeficiente de correção da velocidade (0,82).

4.3.8. Vazão de saída do reservatório

A dinâmica da água foi simulada por meio do balanço hídrico no reservatório, calculada pela equação 8. A variável de interesse é a vazão efluente do reservatório que irá contribuir com a vazão de entrada do próximo reservatório à jusante.

$$Q_S = Q_{SF} + Q_{SV} \quad (8)$$

em que:

Q_S = vazão efluente do reservatório, $m^3 s^{-1}$.

4.4. Avaliação e calibração do modelo SD desenvolvido para simular a dinâmica de água em pequenos reservatórios isolados

Para avaliação do modelo SD, foram utilizados dados de variação do nível d'água no reservatório R2. Os dados de variação de nível foram obtidos da base de dados da Embrapa Cerrados (RODRIGUES, 2016) para o período de outubro de 2009 a setembro de 2011. Antes da calibração e validação, foi realizada uma primeira rodada para o aquecimento (spin-up) do modelo. O período de aquecimento do modelo é justificado pelas grandes incertezas que se tem no início da modelagem, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente das características da infiltração. Para esse procedimento foi realizado um esquema de teste de divisão da amostra em três períodos (WEI et al., 2012; ALTHOFF e RODRIGUES, 2021). Os primeiros 3 meses foram utilizados para o aquecimento do modelo, 14 meses para a calibração e os últimos 7 meses para a validação.

A calibração do modelo SD foi realizada de maneira automatizada pelo *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018). Dentre as opções disponíveis no *software* R para os procedimentos de calibração, optou-se pelo implementada no pacote airGR. Nesse processo o usuário pode implementar sua própria função objetivo e definir o intervalo para a calibração e estabelecer o melhor ajuste (CORON et al., 2017b).

O desempenho do modelo foi avaliado a partir de métricas estatísticas para comparação dos valores simulados e observados do conjunto de testes, para o período de calibração e validação. As métricas adotadas foram o erro absoluto relativo médio (MARE, Eq. 9), erro médio absoluto (MAE, Eq. 10) (ABRO et al., 2020), raiz do erro quadrático médio (RMSE, Eq.11), coeficiente de determinação (R^2 , Eq.12), índice de eficiência de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE, Eq.13) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e índice de eficiência de Kling-Gupta (KGE, Eq. 14) (GUPTA et al., 2009).

$$\text{MARE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|(\text{Sim}_i - \text{Obs}_i)|}{\text{Obs}_i} \quad (9)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{Sim}_i - \text{Obs}_i| \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\text{Sim}_i - \text{Obs}_i)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}_i}) \cdot (\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}_i})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}_i})^2}} \quad (12)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{QObs}_i - \text{Osim}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{OObs}_i - \text{Qmean}_i)^2} \quad (13)$$

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (14)$$

sendo:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}_i})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Sim}_i - \overline{\text{Sim}_i})^2}}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

n = número de observações;

μ_s e μ_o = médias aritméticas dos dados simulados e observados;

σ_s e σ_o = desvios padrão dos dados simulados observados;

CV_s e CV_o = coeficientes de variação dos dados simulados e observados;

O_i e S_i = valores dos dados observados e simulados (SPP's) no dia i ;

\bar{O} e \bar{S} = médias aritméticas dos dados observados e simulados (SPP's), respectivamente.

A Tabela 4 apresenta os valores dos limites estatísticos que foram utilizados como diretriz de interpretação do desempenho dos dados de precipitação por satélite (MARARAKANYE et al., 2020).

Tabela 4. Valores de limiares estatísticos para interpretação do desempenho do modelo sistema dinâmico.

Avaliações de desempenho	R ²	NSE
Muito bom	> 0,7 - 1	> 0,75 - 1
Bom	> 0,6 - 0,7	> 0,65 - 0,75
Satisfatório	> 0,5 - 0,6	> 0,50 - 0,65
Insatisfatório	≤ 0,50	≤ 0,50

Adaptado de (MARARAKANYE et al., 2020).

4.5. Avaliação do comportamento das principais variáveis que influenciam na dinâmica de água de pequenas barragens

Para avaliar o comportamento das principais variáveis que influenciam na dinâmica de água, foi realizada uma análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade é definida como uma função que investiga as variações nas saídas do modelo de acordo com as mudanças nas variáveis enquanto mantém outras inalteradas (WANG et al., 2010; SONG et al., 2015). O resultado da análise, possibilita identificar as variáveis aos quais o modelo é mais sensível, contribuindo para melhorar os processos de calibração e validação do modelo.

Na análise de sensibilidade, o volume do reservatório foi selecionado como variável alvo, e variou-se os valores das principais variáveis do desenvolvendo do modelo SD: Q_A , Q_I , Q_{EV} , A_{ES} , Q_{SV} , Q_{SF} , H_i , Q_s , aumentando e diminuindo automaticamente em $\pm 10\%$ no valor de cada variável para o período de setembro 2009 a outubro 2011, seguido de um teste de condição extrema (ALIFUJIANG et al., 2017; SCHMALZ e FOHRER 2009; PHAN et al., 2018).

4.6. Simulação e avaliação da dinâmica de água em um pequeno reservatório isolado

Após ser realizado a análise de sensibilidade o modelo SD calibrado e validado foi utilizado para simular a dinâmica da água no pequeno reservatório isolado, destacando as perdas de água por evaporação e infiltração ao longo do tempo.

4.7. Avaliar o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista-SiPREDH

Adicionalmente no modelo SD desenvolvido, foram feitos alguns ajustes e adaptações, excluindo e incluindo novas variáveis de estado, auxiliares e de fluxos com o propósito de avaliar o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista em projeto de irrigação que atende uma comunidade agrícola de pequenos irrigantes.

Para avaliar o risco, a série de vazões foi estendida em intervalos de cinco minutos para o período de outubro 2009 a junho de 2015, utilizando o modelo GR5J (LE MOINE, 2008). GR é um conjunto de modelos hidrológicos concentrados projetados para simulação e previsão de vazão em várias etapas de tempo (CORON et al., 2017a).

O modelo pode ser implementado em uma ou em um conjunto de bacias com dados limitados, e as principais variáveis de entradas físicas exigidas pelo modelo são a evapotranspiração potencial e a precipitação (ALTHOFF et al., 2022). O modelo GR5J foi executado utilizando o pacote airGR (CORON et al., 2017b) no *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018).

A demanda hídrica do projeto de irrigação foi estimada por meio do Modelo de Simulação de Estratégias de Irrigação (MSEI) (RODRIGUES e MOREIRA, 2015).

De posse das informações, foi calculada, pela equação 15 (CANHOLI, 2005), a vazão disponível no canal de irrigação.

$$Q_{ABS} = \frac{1}{n} A Rh^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

em que:

Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação, $m^3 s^{-1}$;

n = coeficiente de rugosidade, $s^{-1} m^{-\frac{1}{3}}$;

A = área da seção transversal ao escoamento, m^2 ;

Rh = raio hidráulico, m ;

I = declividade média, $m m^{-1}$.

Conhecendo a vazão de afluente, o nível da água no canal de irrigação e a demanda hídrica da comunidade ao longo do tempo, calculou-se o risco de não atendimento da demanda hídrica, considerando a capacidade do pequeno reservatório em atender a demanda hídrica da comunidade em pelo menos 80% do tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelo de simulação dinâmica - SD

Os *loops* de realimentação ou ciclo de *feedback* no modelo SD, mostram a causalidade direta entre todas as variáveis. Na Figura 13 apresenta-se o diagrama de laço causal do modelo SD, que é baseado na causa relações entre as variáveis e suas associações. Cada seta aponta para as principais variáveis auxiliares, estado e de fluxos de entrada e saída de água em uma pequena barragem. Como nenhuma das variáveis existe sozinhas, isso leva a *loops* no sistema, que mostra intuitivamente o desenvolvimento do modelo SD.

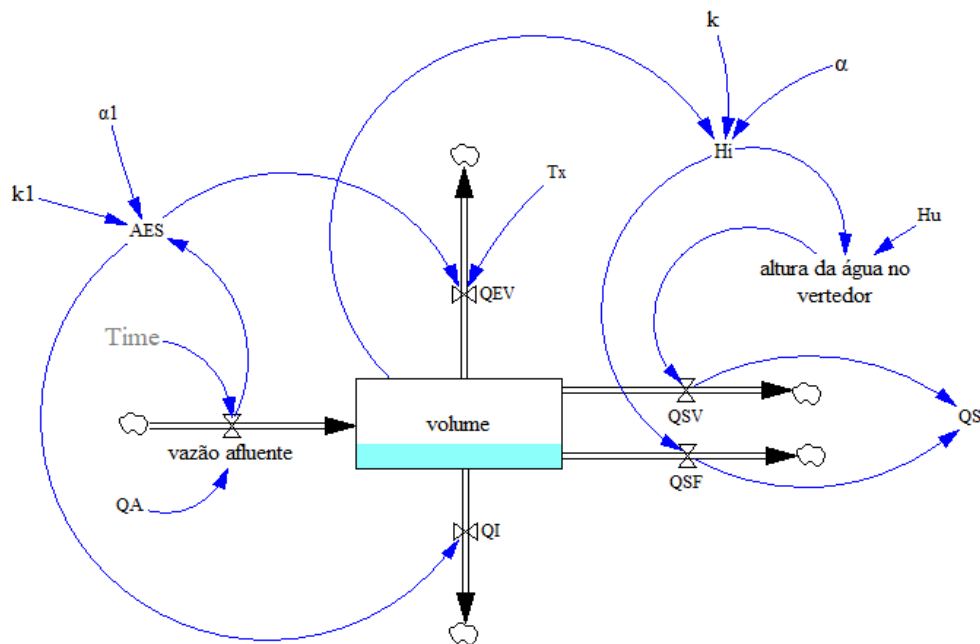


Figura 13. Diagrama de laço causal do modelo sistema dinâmico para avaliar a dinâmica de água de pequenas barragens. (Q_A = vazão afluyente; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_i = altura do nível d'água; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_S = vazão efluente, H_u = altura útil, T_x = temperatura máxima, α ; k ; α_1 ; k_1 = coeficientes adimensionais).

Os conectores (setas direcionadas) ou variáveis auxiliares setas em azul, são utilizadas para estabelecer o relacionamento entre todas as variáveis do modelo SD (FORD, 1999). Eles são representados graficamente pelo *software* como setas e a direção da seta indica os relacionamentos de dependência, seguindo um sistema lógico matemático para operar o sistema que é muito semelhante às redes neurais artificiais (RNA), influenciando nas variáveis de fluxos e estado (AHMAD e SIMONOVIC, 2000; PLUMB et al., 2005; SUŠNIK et al., 2012; LUO et al., 2009). Eles carregam informações de um elemento do modelo SD para outro elemento. Os conversores podem aceitar entradas na forma de relações algébricas, apropriado para lidar com

problema de reservatório e gestão de recursos hídricos, pois possuem a capacidade de interagir com todas as variáveis que compõem o modelo SD (KHAN et al., 2009; SIMONOVIC, 2000; ZOMORODIAN et al., 2018; STERMAN, 2000).

O modelo SD é dividido em nove variáveis principais: vazão afluente, área do espelho d'água, infiltração, evaporação, volume armazenado, altura da água no reservatório, vazão no vertedouro, vazão na tomada de fundo, vazão efluente. Cada variável desempenha um papel importante em todo o sistema. Essas variáveis comunicam e influenciam umas às outras. As equações fornecidas às variáveis de fluxos e auxiliares são os principais componentes do modelo SD, essas equações descrevem a lei da variação para a variável de estado (volume armazenado) (WANG et al., 1999).

A vazão afluente ao reservatório é a principal variável de fluxo, sendo fornecidos ao modelo SD como entrada. Na Figura 14 apresenta-se a variação temporal da vazão afluente. Observa-se valores variando de $0,024 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, registrados na estação linimétrica.

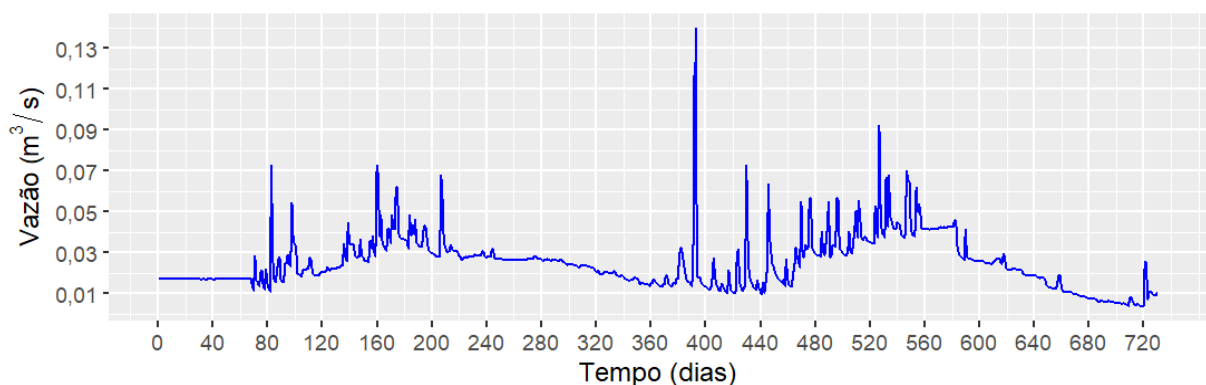


Figura 14. Dinâmica temporal da vazão afluente ao reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

Assim que o modelo SD estiver calibrado e validado, o usuário pode simplesmente executar a simulação e avaliar a dinâmica de água, sendo possível simular as perdas por evaporação e infiltração, o nível da água e a variação do volume armazenado ao longo do tempo.

5.2. Calibração e validação do modelo SD

Na Figura 15 apresenta-se a variação do nível de água observado e simulado no reservatório. Foram utilizados 90 dias para aquecimento do modelo (12,5% dos dados), 420 dias para calibração (58,3% dos dados) e 210 dias para validação (29,2% dos dados). Observa-se uma tendência similar no comportamento dos dados simulados e observados.

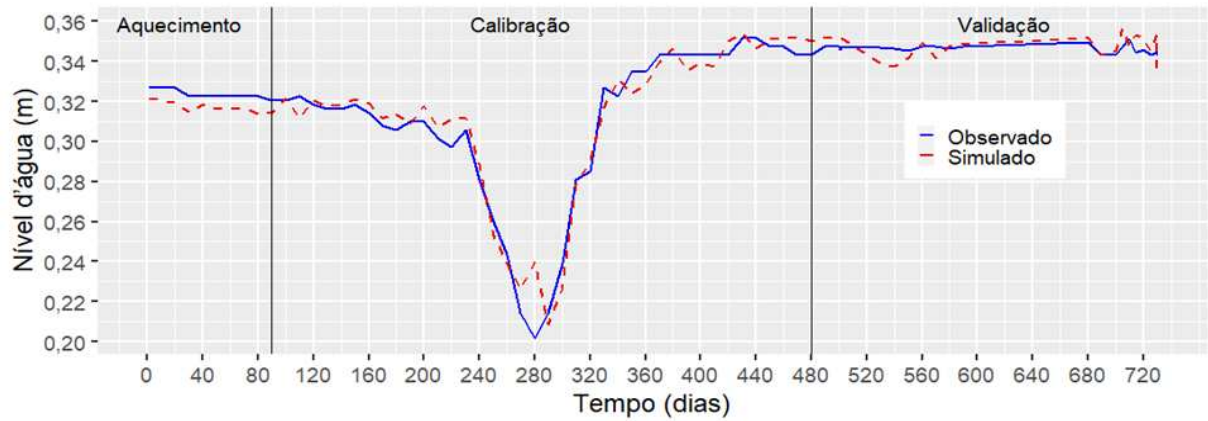


Figura 15. Nível d'água observado e simulado para o período de aquecimento, calibração e validação no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

Os critérios estatísticos de desempenho do modelo SD obtidos na calibração e validação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Critérios de desempenho do modelo sistema dinâmico obtidos na calibração e validação.

Variável	Período	MARE	MAE	RMSE	R ²	NSE	KGE
Nível d'água	Calibração	0,00808	0,00506	0,00460	0,87	0,894	0,974
	Validação	0,00917	0,00577	0,00545	0,96	0,919	0,983

(MARE = erro absoluto relativo médio; MAE = erro médio absoluto; RMSE = raiz do erro quadrático médio; R² = coeficiente de determinação; NSE = índice de eficiência de Nash-Sutcliffe Efficiency; KGE = índice de eficiência de Kling-Gupta).

Durante o período de aquecimento do modelo foram obtidos os seguintes índices: R² = 0,667, MARE = 0,0026 e correlação de Pearson positiva igual a 0,811.

Os resultados obtidos permitem enquadrar o modelo SD na categoria “muito bom”, conforme classificação proposta por Mararakanye et al., (2020). Na calibração foram obtidos os seguintes índices: R² = 0,87, MARE = 0,00808 e correlação de Pearson positiva igual a 0,8972. O desempenho do modelo melhorou durante a fase de validação, com R² = 0,96, MARE = 0,00917 e correlação de Pearson positiva igual a 0,9613.

A validação é uma etapa importante da modelagem (MASHALY et al., 2020; PHAN et al., 2021). Ainda que dois anos de dados observados, divididos para a calibração e validação, possa ser considerado um período pequeno de tempo para avaliação do desempenho do modelo SD, outros trabalhos obtiveram resultados satisfatórios para um conjunto de dados ainda menor

(CUI et al., 2019; HARLIN., 1991). Perrin et al., (2007) mencionou que em um bom modelo, resultados satisfatórios podem ser obtidos com aproximadamente 350 dias de dados escolhidos aleatoriamente dentro de um período de tempo mais longo. Brigode et al. (2013) comentam que a eficiência obtida no modelo na validação é geralmente semelhante às obtidas com um período de três anos de calibração.

De acordo com Orth et al., (2015), é importante que um o modelo tenha a complexidade apropriada para representar os processos físicos, mas se o modelo é excessivamente complexo, ele sofre parametrização excessiva, porém, se forem muito simples, podem perder processos relevantes. A complexidade não leva necessariamente a melhor desempenho dos modelos hidrológicos, e o desempenho pode variar muito, dependendo da variável hidrológica ou condições hidrológicas (ALTHOFF e RODRIGUES, 2021; BENNETT et al., 2013).

5.3. Análise de sensibilidade do modelo SD

Para avaliar a sensibilidade do modelo SD, o volume de água armazenada no reservatório (variável de estado) foi escolhido como variável alvo. Com base na estrutura do modelo SD desenvolvimento, oito variáveis foram selecionadas para análise de sensibilidade: Q_A , Q_I , Q_{EV} , A_{ES} , Q_{SV} , Q_{SF} , H_i , Q_S . Os resultados da análise de sensibilidade do modelo SD são apresentados na Tabela 6 e na Figura 16.

Tabela 6. Resultado da análise de sensibilidade do modelo sistema dinâmico aplicado a um reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

	Q_A		A_{ES}		Q_{EV}		Q_I	
(%)	+10	-10	+10	-10	+10	-10	+10	-10
ΔV_o	4,54	1,62	4,18	2,15	3,46	2,68	5,52	4,64
	H_i		Q_{SV}		Q_{SF}		Q_S	
(%)	+10	-10	+10	-10	+10	-10	+10	-10
ΔV_o	3,75	3,13	4,30	3,75	3,88	2,39	3,98	2,16

(% = alteração das variáveis; ΔV_o = variação do volume (%); Q_A = vazão afluente; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_i = altura do nível d'água; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_S = vazão efluente).

No geral, a variação no volume de água armazenado no reservatório apresentou baixa sensibilidade para variações nos valores da altura do nível d'água e para variações da evaporação e no vertedouro, ou seja, as variações dessas variáveis pouco influenciaram na variação do volume de água armazenado no reservatório.

Por outro lado, a variação do volume de água armazenado foi muito mais sensível às variáveis de fluxos vazão afluente, vazão efluente, vazão na tomada de fundo, infiltração, e a área do espelho d'água.

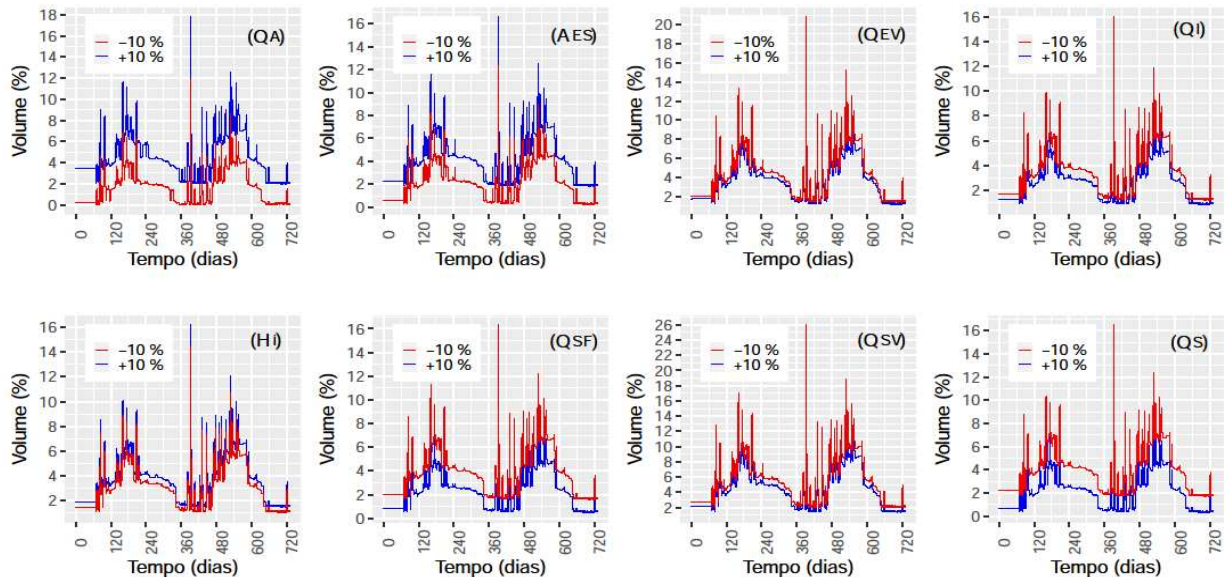


Figura 16. Variação no volume da barragem em função da variação de $\pm 10\%$ no valor de Q_A , A_{ES} , Q_{EV} , Q_I , H_i , Q_{SF} , Q_{SV} e Q_S no período de setembro 2009 a outubro 2011. (Q_A = vazão afluente; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_i = altura do nível d'água; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_S = vazão efluente).

Analisando os resultados da análise de sensibilidade do modelo SD, observa-se que o volume de água armazenado no reservatório é mais sensível às seguintes variáveis: vazão afluente, área do espelho d'água, vazão efluente, vazão na tomada de fundo, infiltração, evaporação, altura da coluna d'água e a vazão vertedouro.

O volume de água armazenado foi mais sensível às variações da vazão afluente. Uma variação de +10% no valor da vazão afluente implicou em uma variação média de 4,54% no volume de armazenado e uma diminuição de -10% implicou em uma variação média de 1,62%. Uma variação de +10% nos valores da vazão efluente, vazão na tomada de fundo, infiltração, evaporação, vazão no vertedouro, altura do nível d'água e área do espelho d'água ocasionou uma alteração média igual a 3,98%, 3,88%, 5,52%, 3,46%, 4,30%, 3,75% e 4,18%, respectivamente, na variação do volume armazenado na barragem.

No entanto ao analisar uma variação de -10% nos valores da vazão efluente, vazão na tomada de fundo, infiltração, evaporação, vazão no vertedouro, altura do nível d'água e área do espelho d'água, ocasionou uma variação média igual a 2,16%, 2,39%, 4,64%, 2,68%, 3,75%, 3,13% e 2,15% respectivamente, na variação do volume armazenado na pequena barragem.

Quando a vazão afluente é menor, as perdas por evaporação e infiltração excede as perdas pelo vertedouro, o nível de água no reservatório diminui. Quando, ao contrário a vazão afluente é maior a vazão no vertedouro é maior do que a evaporação e infiltração o reservatório é preenchido, levando o pequeno reservatório a transbordar, e devido a sua hidráulica e ao fato de operar somente em alguns períodos do ano, existe uma pequena incerteza de causar uma maior sensibilidade no volume armazenado, no entanto para evaporação e infiltração existe uma maior sensibilidade havendo maiores incertezas, pois, esses fluxos de saída sempre está ocorrendo com maior e baixa intensidade ao longo de todo o tempo.

5.3.1. Teste de condição extrema

A estrutura de um modelo SD deve permitir combinações extremas do volume armazenado (variável de estado). Ao examinar a estrutura do modelo SD para uma condição extrema pode-se verificar quais as variáveis, que estão mais impactando na dinâmica de água em um reservatório (JI et al., 2006; ALIFUJIANG et al., 2017). A condição extrema utilizada para este teste foi de reduzir a evaporação e a infiltração no reservatório a zero (Figura 17).

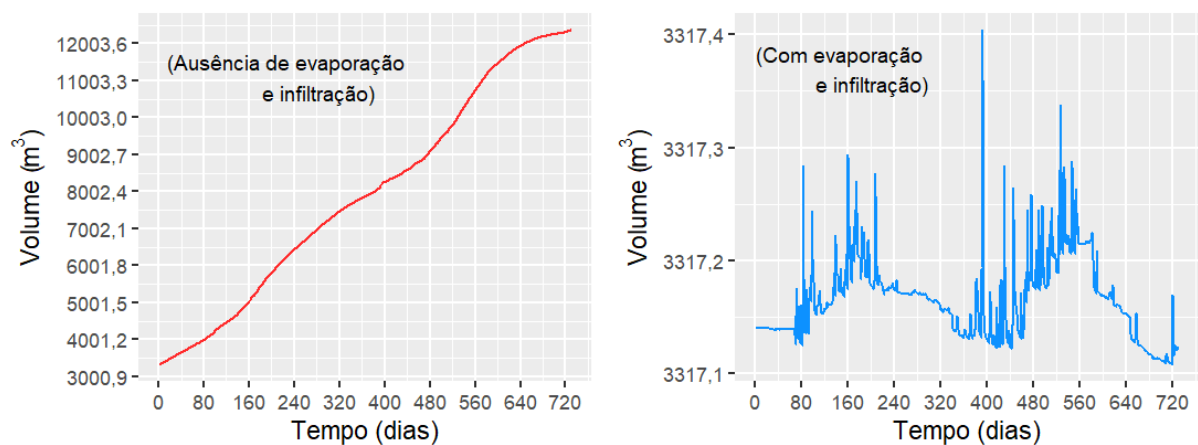


Figura 17. Variação do volume de água armazenada na barragem com e sem evaporação e infiltração na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

Como a ausência dos primeiros fluxos de saída, evaporação e infiltração, os resultados mostraram que o volume de água armazenada na barragem aumentou progressivamente. No período da simulação, equivalente a setecentos e vinte dias, sem considerar a evaporação e a infiltração, o volume de água na barragem variou $3317,1 \text{ m}^3$ a $12364,8 \text{ m}^3$, um aumento médio equivalente a $12,3 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Considerando o mesmo período, mas agora considerando os efeitos da evaporação e da infiltração, o volume variou de $3317,1$ a $3317,4 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ com um aumento médio equivalente a $0,013 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$.

5.4. Simulação e avaliação da dinâmica de água no reservatório

Os resultados da simulação do comportamento das principais variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água na barragem são apresentados na Figura 18.

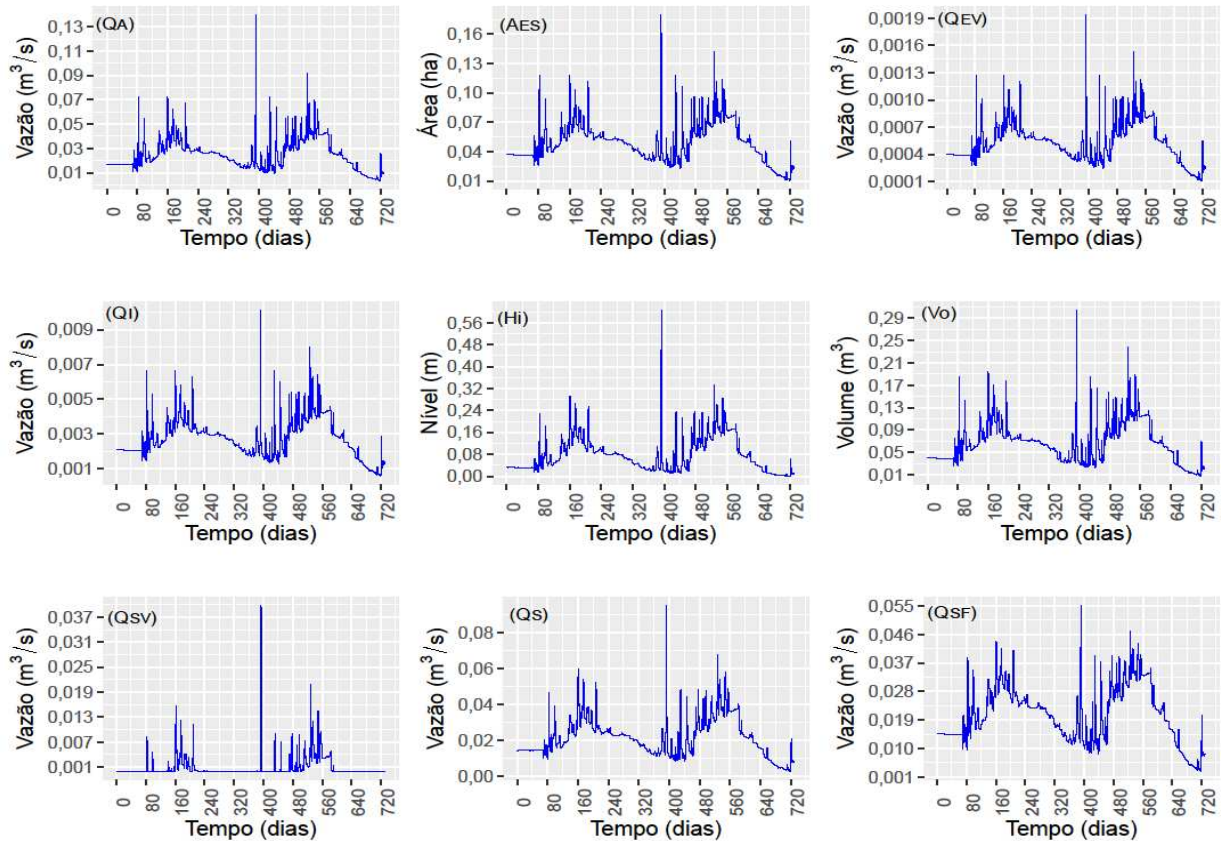


Figura 18. Simulação do comportamento das principais variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água. (Q_A = vazão afluente; H_i = altura do nível d'água; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_I = infiltração; Q_{EV} = evaporação; Q_{SV} = vazão no vertedouro; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_S = vazão efluente, V_O = volume).

Analisando os resultados, observa-se que os valores da vazão afluente (Figura 18 - Q_A) ao reservatório variaram de $0,0248 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com valor médio igual a $0,0347 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Constata-se um decréscimo da vazão em dois períodos, de 180 a 340 e de 540 a 720, correspondente aos períodos de 30 de março a 10 setembro de 2010 e 20 de abril a 29 setembro de 2011, respectivamente. Esses períodos são períodos de seca na região. Durante esses períodos observa-se um decaimento médio da vazão de $0,00301 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Durante o período chuvoso observa-se uma grande variabilidade nos valores de vazão com média de $0,00452 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Todo o processo da simulação do modelo SD se inicia com a vazão afluente principal variável de fluxo de entrada no balanço de água em pequenas barragens, cujo comportamento influencia direta ou indiretamente todas as outras variáveis. Todas as variáveis seguem a mesma

tendência da vazão afluente. Observa-se que os valores da área do espelho d'água do reservatório (Figura 18 - A_{ES}) variaram de 0,010 ha a 0,21 ha, com valor médio igual a 0,048 ha. Durante o período da seca, a área do espelho d'água reduziu em média 0,051 ha dia⁻¹.

No início da simulação, o comportamento do volume armazenamento inicial apresentou uma baixa variação com média de 0,0021 m³, o que pode ser justificado pelas grandes incertezas do desconhecimento das condições iniciais, principalmente das características da infiltração. No entanto, pode estar relacionado ao fato do pequeno reservatório apresentar seu regime próprio de operação, que está em função do seu volume de água armazenado e da sazonalidade da vazão afluente, e devido a situações de desconhecimento dessa relação, o modelo SD impõe no início da simulação baixas oscilações no volume e nas demais variáveis de fluxos.

A variação do volume de água armazenado no reservatório apresentou comportamento semelhante ao da área do espelho d'água. Nos dias em que foram registradas as maiores áreas do espelho d'água, observou-se as maiores perdas por infiltração e evaporação, havendo, nesses dias, maior variação do volume armazenado (Figura 18 - V_O), variando de 0,0077 m³ a 0,307 m³, com uma variação média de 0,0655 m³.

Os níveis de água no reservatório variaram de 0,01 m a 0,6 m, com uma variação média igual a 0,077 m. A vazão na tomada de fundo (Figura 18 - Q_{SF}) variou de 0,0243 m³ s⁻¹ a 0,0721 m³ s⁻¹ com valor médio de 0,0321 m³ s⁻¹; já o nível máximo d'água alcançado no vertedouro variou entre 0,29 m a 0,6 m, com valor médio de 0,42 m, gerando uma vazão variando entre 0,00079 m³ s⁻¹ a 0,0522 m³ s⁻¹, com média igual a 0,00251 m³ s⁻¹, ocorrendo em cerca de 37,7% no tempo. A vazão efluente variou de 0,0251 m³ s⁻¹ a 0,124 m³ s⁻¹, com uma média igual a 0,0330 m³ s⁻¹.

Na Tabela 7 apresentam-se os valores máximo, médio e mínimo das variáveis de Q_A , Q_I , Q_{EV} , V_O , Q_{SF} , Q_{SV} e Q_S para o reservatório avaliado.

Tabela 7. Valores máximo, médio e mínimo das variáveis de fluxos e estado no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil.

Variável	Q_A	Q_I	Q_{EV}	V_O	Q_{SF}	Q_{SV}	Q_S
Unidade	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)
Máxima	0,133	0,0101	0,00189	0,307	0,0721	0,0522	0,1243
Média	0,035	0,0027	0,00052	0,0655	0,0306	0,00251	0,0330
Mínima	0,024	0,0003	0,00011	0,0077	0,0243	0,00079	0,0250

(Q_A = vazão afluente; Q_I = infiltração; Q_{EV} = evaporação; V_O = volume; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_S = vazão efluente).

Analisando a Tabela 7, constatou-se que, após descontadas as saídas por infiltração e evaporação, a vazão efluente variou de $0,0251 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,1243 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média igual a $0,0330 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Em relação a vazão afluente, constatou-se, devido as saídas por infiltração e evaporação, uma redução de 4,8 % na vazão média, e um aumento de 1,2% na vazão mínima. HABETS et al. (2018), avaliando pequenas barragens, observaram em termos globais uma diminuição na vazão afluente em 0,2% a 6,0% na vazão média e aumento de 44% na vazão mínima.

Na Figura 19 apresentam-se os volumes e as porcentagens de cada variável de fluxo em relação ao volume afluente ao reservatório. Analisando a Figura, observa-se que infiltração, que do ponto de vista dos usuários da barragem pode ser vista como uma perda, representou 8,1% do volume afluente. A evaporação, por sua vez, que também é uma perda, representou 6,3%. Juntos, esses dois componentes, foram responsáveis pela retirada de aproximadamente 14,4% da água do reservatório.

Cerca de $21.466,8 \text{ m}^3$ (80,9%) da água deixou o reservatório pela tomada de fundo, enquanto $2.226,9 \text{ m}^3$ (4,7%) deixou a barragem pelo vertedouro. Ou seja, um total de $23.693,8 \text{ m}^3$, 86,9% da vazão efluente, tem potencial para ser reutilizadas a jusante. Esse resultado era esperado, uma vez que o vertedor funciona como uma estrutura de segurança da barragem (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015), enquanto a tomada de fundo tem a finalidade de liberar uma quantidade de água visando cumprir as exigências legais da legislação de recursos hídricos (ANA, 2006).

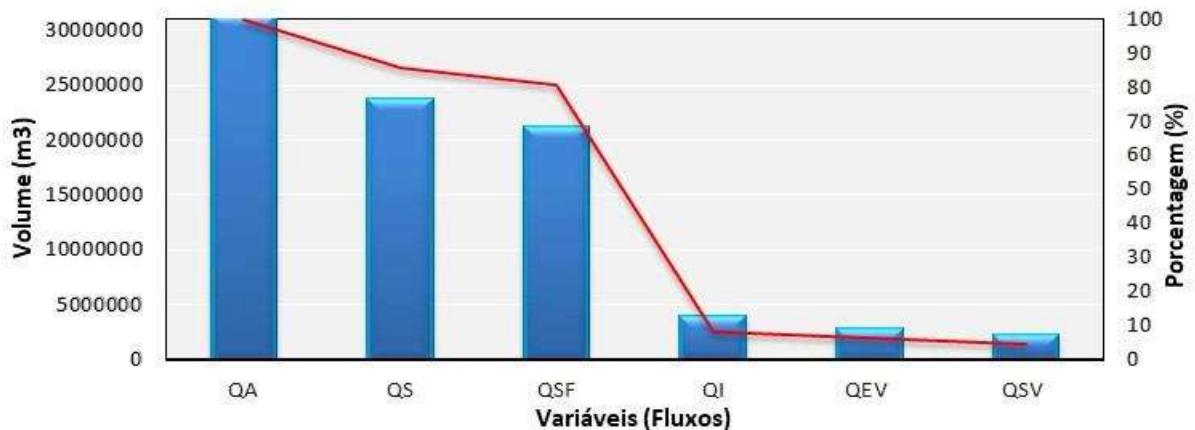


Figura 19. Volume e a porcentagem das variáveis de fluxos de acordo com a dinâmica de água no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil. (QA = vazão afluente; QS = vazão efluente; QSF = vazão na tomada de fundo; QI = infiltração; QEV = evaporação; QSV = vazão no vertedouro).

Os resultados indicaram que quanto maiores os valores de área de espelho d'água maiores foram as perdas por infiltração e evaporação. As perdas por infiltração e evaporação são significativas e impactam a gestão da água da barragem. Essas saídas de água do reservatório acarretaram uma diminuição no volume de água armazenado e na vazão afluente de 14,4%, sendo 8,1% devido a infiltração e 6,3% devido a evaporação. Isto é, um valor equivalente a 6.582,1 m³ de água que deixaram o reservatório e que poderiam estar disponíveis para outros usos. Nesse sentido, minimizar as perdas por evaporação e infiltração é importante para manter a segurança hídrica da barragem, principalmente durante a estação seca.

Um fator de grande importância para manter o armazenado com maior segurança em pequenos reservatórios e que o volume útil não pode ser inferior aos usos consultivos da água para o consumo diário estimado para irrigação, uso doméstico e às perdas por evaporação (ANA, 2022). A obtenção dos valores de saída para irrigação, evaporação, possibilitando avaliar a quantidade de água perdida ou adicionada ao construir um reservatório (KAN e DIAS, 1999), dessa forma, cálculos confiáveis de saída por evaporação em reservatórios são fundamentais, para a gestão e planejamento dos recursos hídricos (PEREIRA et al., 2009).

A maior área do espelho de água obtida durante a simulação foi igual a 0,201 ha, representando aproximadamente 0,00201% da área total da bacia do rio Buriti Vermelho. Uma vez que a evaporação é vista como uma perda para o sistema hídrico, é importante que no planejamento de construção das barragens sejam definidos locais para instalação que possibilitem a barragem armazenar um grande volume com pequena área de espelho d'água. Estudos demonstram que pequenos reservatórios com área de espelho d'água de 0,08 ha têm capacidade de exercer uma melhoria em termos de fornecimento de água ao longo de toda a estação seca, mesmo incluindo as perdas por evaporação e a infiltração (PINHATI et al., 2020).

A evaporação pode representar uma perda de água significativa em pequenas barragens (HABETS et al., 2018; ALTROFF et al., 2020). Os resultados obtidos indicaram uma evaporação média equivalente a 0,000526 m³ s⁻¹, com valores máximo e mínimo iguais a 0,00189 m³ s⁻¹ e 0,00011 m³ s⁻¹, respectivamente. Resultados obtidos por Nicola (2005) e Fowe et al., (2015), avaliando as taxas de evaporação em reservatórios nas regiões da bacia do Volta em Burkina Faso na África ocidental, obtiveram valores variando de 0,00201 m³ s⁻¹ a 0,0046 m³ s⁻¹, respectivamente. Machiwal et al., (2016) avaliando reservatórios na região árida do norte da Índia, cometam que a evaporação pode alcançar valores da ordem de 0,01127 m³ s⁻¹. Valores médios de evaporação em algumas regiões do mundo variaram entre 0,00396 m³ s⁻¹, 0,00712 m³ s⁻¹ e 0,00021 m³ s⁻¹ (FOWE et al., 2015; ALTROFF et al., 2020; LIEBE, 2005).

Essa diferença nas taxas de evaporação depende do clima local que é muito relevante no balanço de energia, devido a variação na temperatura do ar diária que influencia nas perdas por evaporação (WANG et al., 2011; ASSOULINE et al., 2008). Em razão da evaporação, a quantidade de água armazenada no reservatório é reduzida em média $5,1 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Embora pareça ser um valor baixo, considerando que cada pessoa consome em média 180 litros de água por dia para atender a diferentes necessidades (FAO, 2018), esse fluxo evaporação direto pode atender às necessidades de consumo de 28 pessoas por dia.

Pequenos reservatórios são infraestruturas estratégicas para regiões, como o Cerrado brasileiro, onde a disponibilidade hídrica apresenta um comportamento sazonal (ALTHOFF et al., 2021). Além disso, como efeito indireto, ele contribui com a recarga dos aquíferos (HABETS et al., 2018). Assim, quando se analisa a bacia hidrográfica, embora a água infiltrada no reservatório seja uma perda para o usuário, para o sistema hídrico da bacia ela não se constitui em uma perda, pois pode ser utilizada pelos usuários a jusante (HABETS et al., 2018; SHINDE et al., 2010).

Neste trabalho, a infiltração total analisada durante o período foi aproximadamente 2,06 % maior que a evaporação, variando de $0,00038 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0101 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média igual a $0,00275 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Devido ao efeito por infiltração, os resultados indicaram uma redução no volume armazenado no reservatório equivalente a $7,6 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$.

Independentemente da função e do objetivo de construção de um pequeno reservatório, é bastante importante estimar a taxa de infiltração, pois ela, de maneira direta, determina a eficiência do reservatório em armazenar água (RODRIGUES, 2007). A taxa de infiltração pode variar ao longo do tempo, diminuindo durante a vida útil do reservatório (HABETS et al., 2018; OBLINGER et al., 2010).

A infiltração é diretamente afetada pelas propriedades físicas do solo, principalmente pela condutividade hidráulica do aquífero e leito da barragem (FOWLER, 2015; HABETS et al., 2018; SHINOGI et al., 1998). Ao analisar estudos realizados em outras regiões, observa-se valores de infiltração variando de $0,000135 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0233 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (PONRAJAH, 1984; SHINOGI et al., 1998; CULLER, 1961; FOWLER et al., 2012; MACHIWAL et al., 2016; RODRIGUES e DEKKER, 2008), indicando a variabilidade da magnitude dessa variável. Os resultados obtidos neste trabalho estão dentro da faixa de variação dos valores apresentados.

Nesse sentido, a infiltração é uma variável importante que deve ser levada em consideração em um projeto de uma pequena barragem. Por exemplo, no reservatório avaliado neste trabalho, considerando uma infiltração constante com valor igual a $0,0101 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em 23 dias o reservatório estaria completamente vazio. Desprezando-se o efeito da infiltração e

considerando uma evaporação média igual $0,00052 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o reservatório estaria completamente vazio após 989 dias. Machiwal et al., (2016) observaram que uma taxa média de infiltração igual a $0,0038 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ poderia diminuir o volume armazenado em um pequeno reservatório na região árida no norte da Índia, em aproximadamente 85 dias, concluindo que (32%) do volume armazenado foi perdida por infiltração.

A tomada de fundo é uma infraestrutura obrigatória em barragens, ela visa manter uma vazão mínima no curso de água, ou seja, ela serve para cumprir uma obrigação legal e ambiental. Nesse sentido, com exceção de quando o rio eventualmente venha a secar, a vazão na tomada de fundo na maioria dos casos sempre será maior que zero. Em pequenas barragens, de maneira geral, a vazão efluente na tomada de fundo é influenciada pela variação da carga hidráulica, a exceção é quando existe algum sistema de controle.

Durante o período avaliado, observou-se que vertedouro operou em 33,7% do tempo. Mais de 60% do volume de água escoado pelo vertedouro ($1.336,2 \text{ m}^3$) foi observado entre os dias 360 a 550 no período de 04 setembro de 2010 a 20 março de 2011, esse aumento no valor da vazão no vertedouro pode ser explicado pelas chuvas ocorridas no período. Estudos realizados em vários pequenos reservatórios, com área de espelho d'água média igual a 200 ha, indicaram que a quantidade média de água extravasada anualmente em vertedouros é da ordem de 6,24 milhões de m^3 , representado em média 16% da vazão efluente em pequenas barragens (FOWE et al., 2015; MARÍN-COMITRE et al., 2020).

5.5. Avaliação da dinâmica de água em uma pequena barragem ao longo tempo e do risco de não atendimento da demanda hídrica prevista

Na Figura 20 apresenta-se o diagrama de laço causal do modelo SiPREDH. O modelo foi ampliado para avaliar o comportamento hidrológico de pequenas barragens em uma bacia hidrográfica do Cerrado e o risco de não atendimento da demanda hídrica prevista.

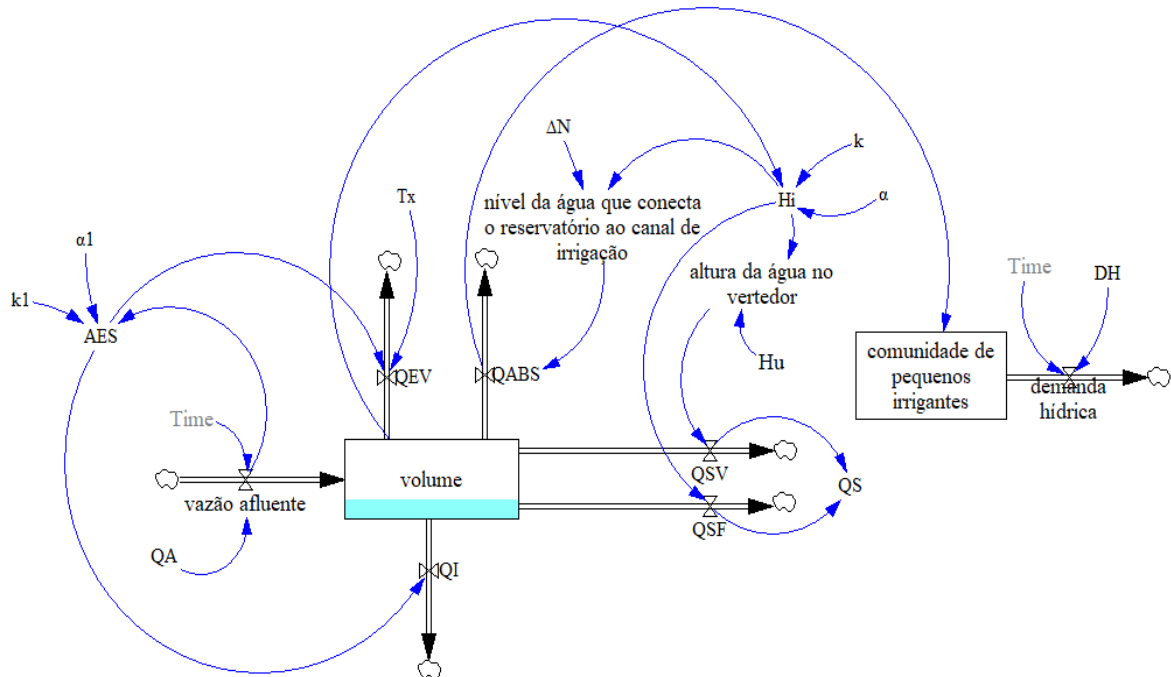


Figura 20. Diagrama de laço causal do modelo SiPREDH para avaliar risco de não atendimento da demanda hídrica prevista. (ΔN = diferença de nível da comunidade ao reservatório; D_H = demanda hídrica; Q_A = vazão afluyente; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_i = altura do nível d'água; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_S = vazão efluente, Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação, H_u = altura útil, T_x = temperatura máxima, α ; k ; α_1 ; k_1 = coeficientes adimensionais).

As novas variáveis de fluxos, auxiliares e de estado incluídas ao modelo SiPREDH, garante, ao longo do tempo, o abastecimento de água da comunidade agrícola para uso doméstico e da irrigação. Essa demanda raramente é conhecida com precisão a priori, sendo necessário estimar o volume de água demandado.

A demanda hídrica da comunidade corresponde à irrigação das lavouras de soja, milho, feijão e trigo. O maior consumo de água ocorre no início de março e abril devido a redução da chuva. À medida que o período de seca avança de meados maio a setembro, a demanda por irrigação aumenta para uma necessidade constante média de cerca de aproximadamente de $0,0019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com pequenas oscilações e diminuindo gradualmente à medida que as plantações são colhidas (MANETA et al., 2009b).

O modelo SD SiPREDH utiliza nove variáveis principais: vazão afluente, área do espelho d'água, infiltração, evaporação, volume, altura da coluna d'água, vazão no canal de irrigação, demanda hídrica e a vazão no vertedouro. Essas variáveis estão de forma direta ou indireta interligadas entre si, e desempenhando um componente importante em todo o sistema.

Após inserir a série de vazão afluente, que foi estendida utilizando o modelo hidrológico GR5J (LE MOINE, 2008), e a demanda hídrica da comunidade, como os fluxos de entrada e saída no modelo SD, foi realizada simulação da dinâmica da água na barragem (Figura 21).

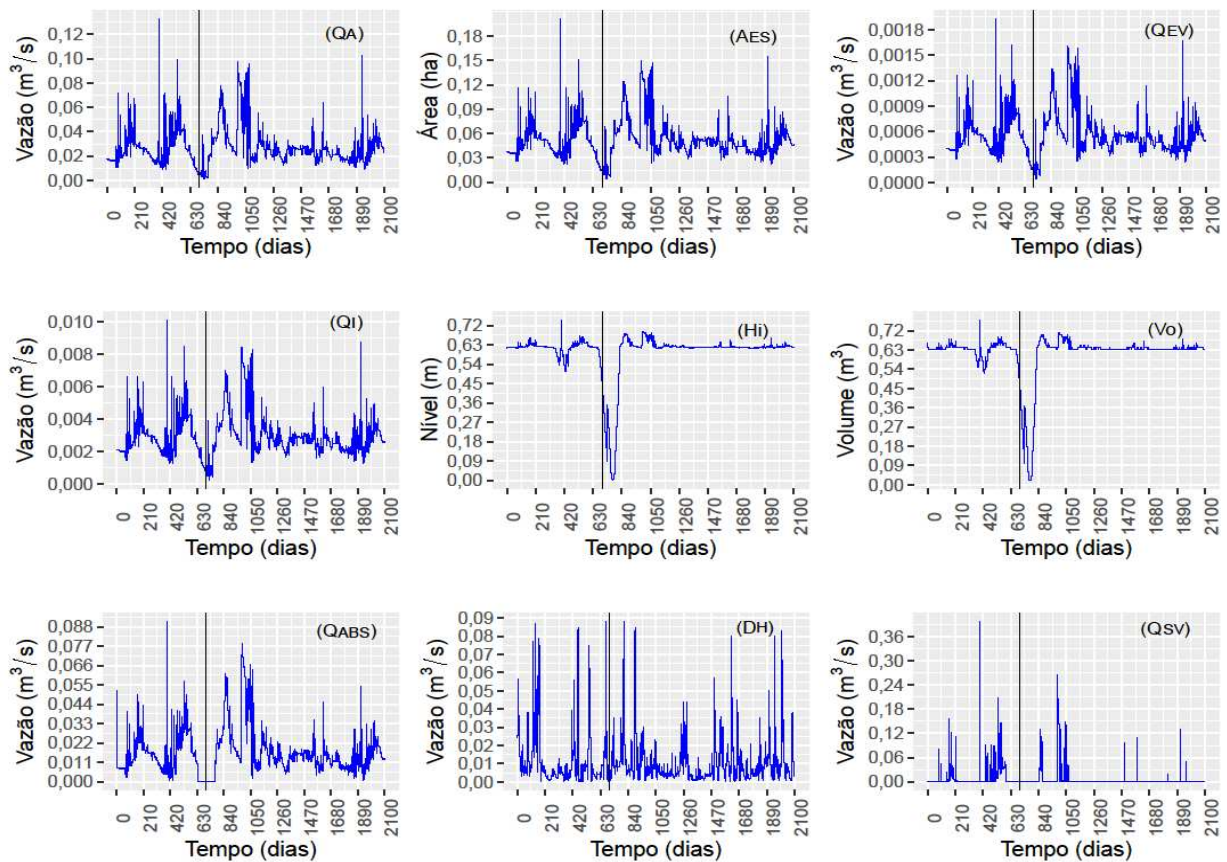


Figura 21. Simulação do comportamento das variáveis de entrada e saída que impactam na dinâmica de água no reservatório, com base nos dados históricos de setembro 2009 a outubro 2011 e estendido a junho de 2015. (D_H = demanda hídrica; Q_A = vazão afluente; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_i = altura do nível d'água; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação).

Após a inserção no modelo da retirada de água para atender a demanda hídrica da comunidade (RAC), o volume de água armazenado no reservatório, variou de $0,02 \text{ m}^3$ a $0,77 \text{ m}^3$, com média igual a $0,061 \text{ m}^3$. Esse valor foi 6,15% menor que o valor médio observado na simulação sem RAC. Nesse mesmo período, o nível da água no reservatório (Figura 21-Hi) variou de $0,08 \text{ m}$ a $0,74 \text{ m}$, com média $0,64 \text{ m}$.

Na etapa da simulação sem (RAC), a variação do volume de água armazenado no pequeno reservatório variou de $0,0077 \text{ m}^3$ a $0,307 \text{ m}^3$, com uma variação média de $0,0655 \text{ m}^3$. E no mesmo período o nível de água no reservatório variou de $0,01 \text{ m}$ a $0,6 \text{ m}$, com uma variação média igual a $0,077 \text{ m}$. Nesse sentido, essa diferença encontrada entre as duas etapas da simulação pode ser atribuída a sazonalidade da vazão afluyente, e a vazão no canal de irrigação.

Analisando os resultados, observa-se que os valores da vazão afluyente ao reservatório variaram de $0,0022 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com valor médio igual a $0,0468 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A área do espelho d'água da barragem variou de $0,003 \text{ ha}$ a $0,21 \text{ ha}$, com média de $0,051 \text{ ha}$ (Figura 21-AES). Durante a estação seca, o valor da área do espelho d'água decaiu em média $0,062 \text{ ha}$. A infiltração variou de $0,000215 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0101 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com uma variação média de $0,00292 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a evaporação variou entre $0,000215 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,00193 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média de $0,000558 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A demanda hídrica da comunidade variou entre $0,00133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0881 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média de $0,0212 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Constatou-se um consumo de água elevado pela comunidade em dois períodos, de 170 a 295, 680 a 860, correspondente ao período de 29 de março a 25 de julho de 2010 e 13 de abril a 29 setembro de 2011, respectivamente. Esses períodos são de seca na região do Cerrado, onde os produtores utilizam mais água para promover a irrigação. Durante esses períodos observa-se um consumo médio de $0,00261 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A altura máxima da coluna d'água alcançada no vertedouro, variou entre $0,2 \text{ m}$ a $0,3 \text{ m}$, com média de $0,06 \text{ m}$, gerando uma vazão máxima de $0,0325 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com uma variação média de $0,0035 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorrendo em 23,7% do tempo, contribuindo com uma perda de 4,3% do volume armazenado total. Sendo que em torno de 95,7% do tempo, o volume armazenado permaneceu abaixo do nível operacional do vertedouro, o que corresponde ao armazenamento no reservatório abaixo do volume de $3317,1 \text{ m}^3$, que ao longo do tempo, foi perdido por evaporação, infiltração e dissipado gradativamente pelo canal de irrigação.

A variação da vazão no canal de irrigação apresentou comportamento semelhante ao da área do espelho d'água na barragem. Os dias em que foram registradas as menores áreas do espelho d'água, foram observadas as menores perdas por infiltração e evaporação, havendo menor vazão no canal de irrigação (Figura 21- Q_{ABS}), variando entre $0,0056 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0912 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média de $0,0165 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Na Figura 22 apresenta-se a variação do nível de água na barragem em relação altura do canal de irrigação que conduz água do reservatório para a comunidade de pequenos irrigantes (N_{CR}). Sempre que o nível de água estiver abaixo do N_{CR}, indica que a comunidade não está recebendo água para promover a irrigação, área em vermelho abaixo da linha horizontal destacada em verde.

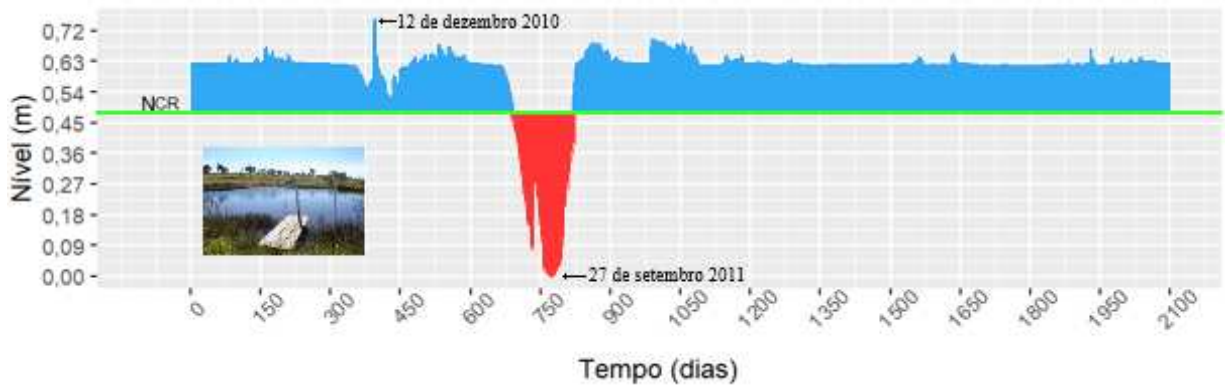


Figura 22. Variação do nível de água em relação altura do canal que conduz água do reservatório para a comunidade. (N_{CR} = nível da água que conecta o reservatório ao canal de irrigação).

Observasse na Figura 22, que o nível d'água no canal variou de 0,005 m a 0,73 m, com média de 0,12 m, alcançado o nível máximo no dia 12 de dezembro 2010 e mínimo no dia 27 de setembro 2011. Com base nesse resultado, conclui-se que em 86,2% do tempo a água ficou acima do N_{CR} , dessa porcentagem 4,3% foi vertido pelo vertedouro, atendendo em 81,9% a demanda hídrica. Onde o volume de água total entregue pelo canal foi igual a 54.480,4 m³, e um volume total de água de aproximadamente 59.183,2 m³ foi demandado pela comunidade, havendo, portanto, um déficit 6.701,8 m³, devido em especial as saídas por evaporação e infiltração, que foram necessários para atender ao longo de todo tempo a demanda hídrica da comunidade.

Na Tabela 8 apresentam-se os valores máximo, médio e mínimo das variáveis Q_A , Q_I , Q_{EV} , V_O , D_H , Q_{SV} , Q_{ABS} e N_{CR} para o reservatório avaliado.

Tabela 8. Valores máximo, médio e mínimo das variáveis de fluxos e estado e o nível de água no reservatório em relação à tubulação que conecta o reservatório ao canal de irrigação.

Variável	Q_A	Q_I	Q_{EV}	V_O	D_H	Q_{SV}	Q_{abs}	N_{CR}
Unidade	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m)
Máximo	0,133	0,0101	0,0019	0,77	0,0881	0,0325	0,0912	0,73
Médio	0,0468	0,0029	0,0005	0,61	0,0212	0,0035	0,0165	0,55
Mínimo	0,0022	0,0002	0,0004	0,02	0,0011	0,0012	0,0056	0,005

(Q_A = vazão afluyente; Q_I = infiltração; Q_{EV} = evaporação; V_O = volume; D_H = demanda hídrica; Q_{SV} = vazão no vertedouro; Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação; N_{CR} = nível da água que conecta o reservatório ao canal de irrigação).

Analisando a Tabela 8, constatou-se que, após descontadas as saídas por infiltração e evaporação, o nível de água em relação altura do canal que conduz água do reservatório para a comunidade variou de 0,005m a 0,73m, com uma variação média de 0,55 m. Percebesse que quanto menor a vazão afluyente, menor e o nível da água que conecta o reservatório ao canal de irrigação, sendo que é necessária uma vazão afluyente com média de $0,0468 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para garantir a demanda hídrica média da comunidade em $0,0212 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ao longo do tempo.

5.5.1. Risco de não atendimento da demanda hídrica prevista

Na Figura 23 e Tabela 9 apresentam-se os resultados do risco de não atendimento da demanda hídrica prevista para a barragem avaliada.

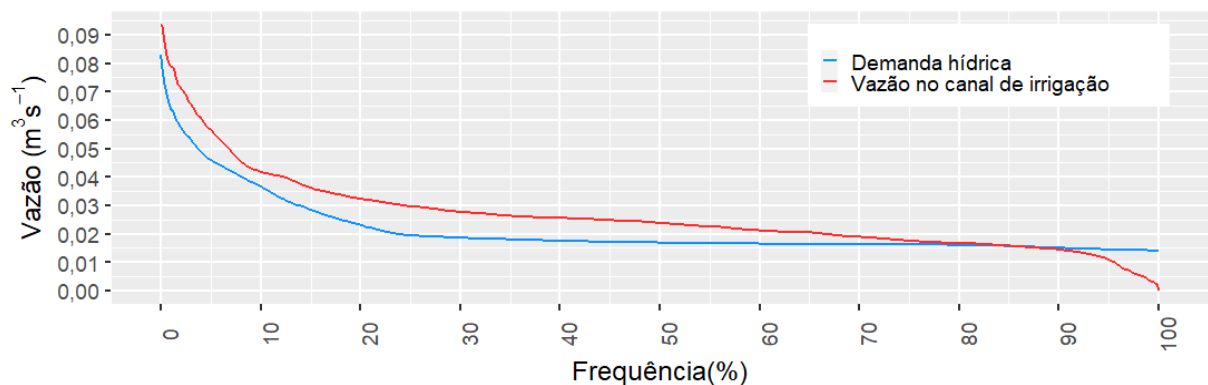


Figura 23. Curvas de permanência de demanda (D_H) e de oferta hídrica (Q_{ABS}) no reservatório isolado na bacia do rio Buriti vermelho, DF, Brasil.

A frequência com que a vazão $0,0161 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ é igualada ou excedida no canal de irrigação é de 82%, ou seja, em apenas 18% do tempo tem água suficiente para atender a essa demanda. Isso sugere que a barragem foi capaz de atender a demanda hídrica da comunidade com uma permanência de 82% do tempo. Nesse sentido, a barragem permite atender uma demanda de $0,0161 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ maior ou igual durante 82% do tempo, com o risco de não atendimento de 18% do tempo, devido principalmente as perdas por evaporação, infiltração e vertedouro.

Tabela 9. Resultado do risco de não atendimento da demanda hídrica prevista na bacia do rio Buriti vermelho, DF, Brasil.

Fr (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	95
$D_H (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0,036	0,025	0,019	0,018	0,0178	0,0169	0,0166	0,0162	0,014
$Q_{ABS} (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	0,041	0,032	0,027	0,025	0,0231	0,0211	0,0182	0,0164	0,001

(Fr = frequência de ser igualada ou superada; D_H = demanda hídrica; Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação).

Ao analisar $Q_{10\%}$ e a $Q_{95\%}$ da demanda hídrica e da vazão no canal de irrigação, (Figura 23, Tabela 9), constata-se que o reservatório pode atender a demanda hídrica da comunidade de 10% a 82% do tempo. No canal de irrigação, a $Q_{95\%}$ foi igual a $0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a demanda hídrica da comunidade, igual a $0,014 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Se as perdas por evaporação e infiltração na barragem fossem reduzidas em 48%, mantendo-se a área do espelho d'água a igual a 0,0963 ha, a vazão $Q_{95\%}$ no canal de irrigação passaria de $0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para $0,021 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Essa vazão gerada seria da mesma forma o suficiente para atender a demanda hídrica de $0,0141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com permanência de 95% do tempo, e similarmente ao analisar aleatoriamente a $Q_{20\%}$ da oferta hídrica passaria de $0,0321 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para $0,0532 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, aumentado conseqüentemente ao longo de todo o tempo a disponibilidade de água pelo canal irrigação.

Dessa forma com essas práticas de manejo e dimensionamento do reservatório, aumenta a oferta hídrica no canal de irrigação, estendendo conseqüentemente a capacidade da barragem em atender demanda hídrica da comunidade de 82% para pelo menos 95% do tempo, conseqüentemente a barragem oferece o risco de não atender a demanda hídrica da comunidade em pelo menos 5% do tempo, devido ao simples fato do controle das perdas por evaporação, infiltração.

A quantidade de água que pode ser armazenada em pequenos reservatórios depende de uma série de fatores, entre eles, o relevo (ASSOULINE et al., 2008). O volume armazenado está relacionado com a área do espelho de água, que, por sua vez, influência nas perdas de fluxos por evaporação e infiltração. O entendimento da forma como esses fatores se relacionam é importante para entender dinâmica da disponibilidade hídrica ao longo do tempo, principalmente em uma região com suscetibilidade a escassez hídrica. Assim, incertezas associadas à estimativa da área do espelho d'água, trazem inseguranças na estimativa da capacidade da barragem em atender as demandas planejadas, podendo acarretar conflitos entre os usuários (HE et al., 2017; LIN et al., 2017).

Neste trabalho, a infiltração foi maior que a evaporação em uma proporção de cerca de 6 a 8%. Observou-se uma variação média na infiltração igual a $0,0029 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Fowe et al., (2015) obtiveram valores iguais a $0,0046 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no Lago Boura no sul de Burkina Faso na África ocidental. Nesse estudo, os autores constataram que o volume total de água infiltrada nos períodos 2012/2013 e 2013/2014 foi de cerca de 1,16 e 1,06 milhões de m^3 , respectivamente. Vale destacar que a infiltração muitas vezes não é considerada na avaliação da disponibilidade hídrica em pequenos reservatórios, e possui a tendência diminuir ao longo do tempo (HABETS et al., 2018; SHINOGI et al., 1998).

A evaporação média registrada durante o período de simulação foi de $0,00055 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Estudos conduzidos por Nicola (2005), em reservatórios nas regiões da bacia do Volta em Burkina Faso, e por Liebe (2005), em um pequeno reservatório de 5,01 ha localizado na região do Alto Leste de Gana, mostraram variações de $0,00201 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,0046 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no primeiro caso, e uma evaporação média igual a $0,00052 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no segundo caso. No primeiro caso, a evaporação medida foi cerca de 6,8% menor que a obtida neste estudo, indicando a grande variabilidade dessa variável, que é difícil de ser medida e estimada. No entanto, para melhorar as práticas de irrigação, atender as perdas por evaporação e fundamental para as necessidades de gestão e planejamento da água (FOWE et al. 2015).

Na Figura 24 apresentam-se o volume das variáveis de fluxos de saída, bem como o volume de água demandado pela comunidade. Nos quais um volume de aproximadamente $54.480,4 \text{ m}^3$ (81,9%) foi retirado pelo canal de irrigação, e um volume em torno de $59.183,2 \text{ m}^3$ foi demandado pela comunidade. O volume de água perdidos por evaporação, infiltração e vertido pelo vertedor foram iguais a $5.366,3 \text{ m}^3$ (5,7%), $7.036,5 \text{ m}^3$ (8,1%) e $3.323,1 \text{ m}^3$ (4,3%), respectivamente. Juntas, essas três perdas representaram aproximadamente um volume $15.725,9 \text{ m}^3$, representando 19,4% do volume, que poderia ser utilizado em parte para aumentar a oferta hídrica disponibilizado pelo canal de irrigação e atender com segurança a demanda hídrica da comunidade, descartando a possibilidade do risco de não atendimento.

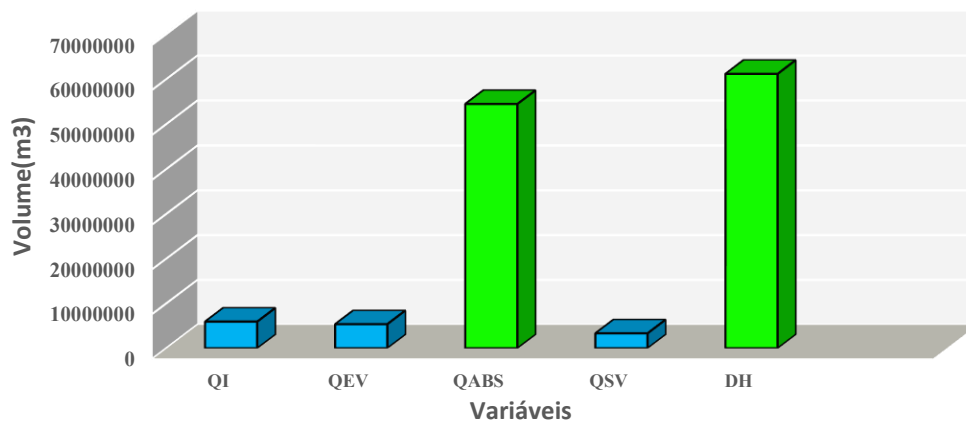


Figura 24. Volume das variáveis de fluxos e demanda hídrica da comunidade no reservatório isolado na bacia do rio Buriti Vermelho, DF, Brasil. (D_H = demanda hídrica; Q_{ABS} = vazão no canal de irrigação; Q_I = infiltração; Q_{EV} = evaporação; Q_{SV} = vazão no vertedouro).

Ao analisar o volume de água perdidos por evaporação, infiltração, vertedouro e a disponibilidade para a demanda hídrica, os resultados podem ser comparados aos obtidos por Fowe et al., (2015). Esses autores realizaram o balanço hídrico do Lago Boura, no sul de

Burkina Faso, na África ocidental. Os resultados mostraram que apenas 20% do volume de água no reservatório, estimado em 4,2 e 3,5 milhões m^3 , para os anos de 2012 e 2013, respectivamente, estavam disponíveis para atender à demanda de água de uma pequena comunidade rural, enquanto até 60% foram perdidos por evaporação e infiltração. Dos 20% do volume utilizado pela comunidade, a irrigação representou 73% da demanda por água, enquanto os usos domésticos e dessedentação animal representaram 3%.

Em 85,9% do tempo o nível d'água ficou acima da tubulação que faz a ligação da barragem com o canal de irrigação, atendendo a demanda hídrica da comunidade em 82% do tempo. Os resultados mostraram que para atender a demanda hídrica da comunidade em até 95% do tempo, seria necessário um reservatório com capacidade de armazenamento de 1.889,3 m^3 e uma área do espelho d'água máxima igual a 0,0963 ha e uma redução das perdas por evaporação e infiltração em pelo menos 48%.

Uma pequena barragem com essas características na região do Cerrado teria capacidade de regularizar ao longo do tempo uma vazão de aproximadamente $0,0193 m^3 s^{-1}$. Neste caso, a vazão $Q_{95\%}$ no canal, passaria a ser de $0,021 m^3 s^{-1}$, sendo suficiente para atender a vazão $Q_{95\%}$ da demanda hídrica, com risco de não atender a demanda hídrica de pelo menos 18% para 5% do tempo. Em países como Espanha, os gestores, mesmo com o controle da evaporação e infiltração, mantêm nas barragens, no período de seca, um volume de segurança, o que reduz os riscos de não haver água para a irrigação e outros usos (MARTINEZ ALVAREZ et al., 2008).

Nessa perspectiva, essas informações devem ser levadas em consideração na implementação de novos pequenos reservatórios, que serão construídas futuramente na região do Cerrado, principalmente para suprir as demandas por irrigação e outros usos da água. Trabalho realizado por Pinhati et al., (2020) indicaram que o impacto de um único reservatório sobre a disponibilidade de água é proporcional a seu tamanho, mas também está relacionado à sua localização na bacia. Quanto maior a área de drenagem a montante, maior a sua capacidade de armazenamento será. Segundo os autores, reservatórios individuais, com áreas de drenagem a montante $< 3 km^2$, tiveram pouco impacto sobre a disponibilidade de água local. Por exemplo, reservatórios com área do espelho de água $< 0,08 ha$ não contribuem para aumentar a disponibilidade local de água durante toda a estação seca.

Obviamente, não é possível eliminar as saídas por evaporação e infiltração, o que garantiria um volume de água mais seguro em pequenas barragens, a única viabilidade e reduzir ao máximo esses fluxos de saídas. Atualmente existem diversas estratégias técnicas que podem ser utilizadas para reduzir as perdas por infiltração e evaporação. No caso da infiltração, a implementação de camadas de argila compactada ou geomembrana podem contribuir para

reduzir a infiltração substancialmente. No caso da evaporação, tem-se métodos baseados em tratamentos químicos, que visam formar um filme monocamada, cobrindo total ou parcialmente a superfície dos reservatórios (HABETS et al., 2018).

Além disso, pode-se utilizar uma fina camada de plástico na superfície do espelho d'água. Esses dois métodos apresentam a desvantagem de prejudicar a biota aquática. Alternativas menos invasivas, como, por exemplo, implantação de painéis solares dentro da barragem, além de contribuir para reduzir a evaporação, é interessante no sentido contribuir para a segurança energética. Outras estratégias envolvem o uso de quebra ventos nas bordas do reservatório (BARNES, 2008; LUND, 2006; ASSOULINE et al., 2011; RECA et al., 2015; ALONSO et al., 1990; RODRIGUES et al., 2019; MACHIWAL et al., 2016).

Os resultados indicaram que o reservatório oferece um risco de não atender a demanda hídrica da comunidade em pelo menos 18% do tempo, devido as perdas por evaporação e infiltração e o subdimensionado da barragem. Assim, um plano de gestão de controle da água mais efetivo da irrigação, principal usuária do recurso hídrico é indispensável para alcançar a segurança hídrica. E além do manejo e gestão da água para intensificação agrícola, melhorar a sua utilização, o planejamento adequado para a construção de novas barragens é vital para o gerenciamento dos recursos hídricos na região do Cerrado, especialmente considerando que as perdas por evaporação e infiltração e diretamente relacionada com a área do espelho d'água implicando diretamente na capacidade de uma barragem em armazenar e liberar água.

6. CONCLUSÕES

Um modelo de dinâmica de sistema foi desenvolvido para simular a dinâmica da água em um reservatório isolado na bacia do rio buriti vermelho. As simulações foram realizadas para o período de outubro 2009 a setembro 2011 e estendido para avaliar a demanda hídrica a junho de 2015.

A calibração e validação indicou um bom desempenho do modelo nas simulações, com as seguintes estatísticas na validação: $R^2 = 0,962$; $NSE = 0,919$; $KEG = 0,983$; $MARE = 0,00917$; $MAE = 0,00577$; $RMSE = 0,00545$.

O resultado com base na análise de sensibilidade, onde o volume armazenado (variável de estado) foi selecionado como variável alvo, indicou a seguinte ordem de sensibilidade do modelo às variáveis avaliadas: $Q_A > A_{ES} > Q_S > Q_{SF} > Q_I > Q_{EV} > H_i > Q_{SV}$ (Q_A = vazão afluente; H_i = altura do nível d'água, Q_S = vazão efluente; Q_{SF} = vazão na tomada de fundo; Q_I = infiltração; Q_{EV} = evaporação; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{SV} = vazão no vertedouro).

A área do espelho d'água variou de 0,21 ha a 0,010 ha, com valor médio igual a 0,048 ha. Constatou-se que houve uma redução de aproximadamente 4,8% na vazão média e um aumento de 1,2% na vazão mínima, em consequência das perdas por evaporação e infiltração.

A evaporação e a infiltração representaram uma retirada de água da barragem equivalente a 14,4% da vazão afluente.

O vertedouro operou cerca de 37,7% do tempo, contribuindo com uma retirada de água equivalente a 4,7% da vazão afluente. E a tomada de fundo representou 80,9% da vazão afluente.

Cerca de 81,6% do volume total de água armazenada na barragem estava disponível para atender à demanda hídrica da comunidade.

A pequena barragem oferece um risco de não atender a demanda hídrica da comunidade em pelo menos 18% do tempo.

7. RECOMENDAÇÕES

Como recomendação para sequencia deste trabalho sugere-se avaliar a dinâmica da água na bacia hidrográfica, ou seja, considerar as demais barragens em forma de cascata.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRO, M. I.; ZHU, D.; KHASKHELI, M. A.; ELAHI, E. Statistical and qualitative evaluation of multi-sources for hydrological suitability inflood-prone areas of Pakistan. **Journal of Hydrology**, v.588, p.125117, 2020.
- ADWUBI, A.; AMEGASHIE, B. K.; AGYARE, W. A.; TAMENE, L.; ODAI, N. S.; QUANSAH, C.; VLEK, P, VLEK, P. Assessing sediment inputs to small reservoirs in Upper EastRegion, Ghana. **Lakes Reservoirs Res. Manage**, n.14, p.279-287, 2009.
- AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. P. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 190-198, 2000.
- AHMADI, M.H.; ZARGHAMI, M. Should water supply for megacities depend on outside resources? A Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz, Iran. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p. 163-170, 2019.
- AHN, J. M.; KWON, H. G.; YANG, D. S.; KIM, Y. Assessing environmental flows of coordinated operation of dams and weirs in the geum river basin under climate change scenarios. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 912–925, 2018.
- ALENCAR, D.; SILVA, C. L. D.; OLIVEIRA, C. A. D. S. Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 103-112, 2006.
- ALIFUJIANG, Y.; ABUDUWAILI, J.; MA, L.; SAMAT, A.; GROLL, M. System dynamics modeling of water level variations of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. **Water**, v. 9, n. 12, p. 989, 2017.
- ALONSO, E.; DEGOUTTE, G.; GIRARD, H. Results of seventeen years of use of geomembranes in dams and basins. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products**, p. 437-442, 1990.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. **Journal of Hydrology**, v. 600, p. 126674, 2021.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the cerrado biome. **Irriga, Botucatu**, v.1, n.1, p. 56–61, out.2019b.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; BAZAME, H. C. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 105-112, 2019a.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; DA SILVA, D. D. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah. **Climate Change**, v.159, n.2, p.215, 2020.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; DA SILVA, D.D. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, n. 11, p. 1-14, 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; DA SILVA, D.D. Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Modelling and Software**, p. 105315, 2022.

ANA - **Agência Nacional de Águas**. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília: Agência Nacional de Águas; Ministério do Meio Ambiente, p.123, 2006.

ANA - **Agência Nacional de Águas**. Eventos Hidrológicos Críticos: Eventos Críticos e Salas Situação. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br>. Acesso em: 9 de novembro de 2021.

ANA - **Agência Nacional de Águas**. Usos da Água: Demandas Consultivas. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br>. Acesso em: 10 de julho de 2022.

ANNOR, F. O.; VAN DE GIESEN, N.; LIEBE, J.; VAN DER ZAAG, P.; TILMANT, A.; ODAI, S. N. Design of small reservoirs using radar images in a semi-arid environment: a case study in eastern Ghana. **Earth Physics and Chemistry, Parts A / B / C**, v. 34, n. 4-5, p. 309-315, 2009.

ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C.; MONTENEGRO, S. M. L. G.; NETTO, A. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; LIRA, C. A. B. O. Subirrigation of land bordering small reservoirs in the semi-arid region in the Northeast of Brazil: monitoring and water balance. **Agricultural Water Management**, v. 73, n. 2, p. 131-147, 2005.

ARAI, F. K., GONÇALVES, G. G., PEREIRA, S. B., COMUNELLO, É., VITORINO, A. C., DANIEL, O. Espacialização da precipitação e erosividade na Bacia Hidrográfica do Rio Dourados-MS. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 922-931, 2010.

ASSOULINE, S.; TYLER, S. W.; TANNY, J.; COHEN, S.; BOU-ZEID, E.; PARLANGE, M. B.; KATUL, G. Evaporation from three water bodies of different sizes and climates: Measurements and scaling analysis. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 1, p. 160-172, 2008.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, p.699, 1998.

BARELLA, W.; PETRERE, JR, M.; SMITH, W.; MONTAG, L. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.). **Matas Ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BARLAS, Y. System dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. **Encyclopedia for Life Support Systems**. 2002.

BARNES, G.T. The potential of monolayers to reduce water evaporation from large stocks. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 4, p. 339-353, 2008.

BENNETT, N. D.; CROKE, F.W.; GUARISO, G.; GUILLAUME, J. H.A.; HAMILTON, S. H.; JAKEMAN A.J.; MARSILI-LIBELLI, S.; NEWHAM, L.T.H.; NORTON, J.P.; PERRIN, C.; PIERCE, S. A.; ROBSON, B.; SEPPELT R.; VOINOV, A.A.; FART, B. D.;

ANDREASSIAN, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 1-20, 2013.

BENZAGHTA, M. A.; MOHAMAD, T. A. Evaporation from reservoir and reduction methods: An overview and assessment study. In: **International Engineering Convention. Damascus, Syria and Medinah, Kingdom of Saudi Arabia**. Damascus Syria, p. 18, 2009.

BERG, M. D.; POPESCU, S. C.; WILCOX, B. P.; ANGERER, J. P.; RHODES, E. C.; MCALISTER, J.; FOX, W. E. Small farm ponds: overlooked features with important impacts on watershed sediment transport. **Jawra Journal of the American Water Resources Association**, v. 52, n. 1, p. 67-76, 2016.

BIEMANS, H.; HADDELAND, I.; KABAT, P.; LUDWIG, F.; HUTJES, R. W. A.; HEINKE, J.; GERTEN, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, 2011.

BOELEEE, E.; CECCHI, P.; KONÉ, A. Health Impacts of Small Reservoirs in Burkina Faso. **Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute**. 50p. IWMI) Working Paper136.doi:10.3910/2009.202.Availableathttp://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Working_Papers/working/wp136. 2009.

BOISSON, A.; BAISET, M.; ALAZARD, M.; PERRIN, J.; VILLESSECHE, D.; DEWANDEL, B.; MARÉCHAL, J. C. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1620-1633, 2014.

BOUWER, H. Integrated water management: emerging issues and challenges. **Agricultural water management**, v. 45, n. 3, p. 217-228, 2000.

BRASIL. **Ministério da Integração Nacional**. A irrigação no Brasil: situação e diretrizes. Brasília, 2014.

BRIGODE, P.; OUDIN, L.; PERRIN, C. Instability of hydrological model parameters: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 410-425, 2013.

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

CAMPOS, J.N.B.; VIEIRA NETO, J.; QUEIROZ, E.A. Impacto cumulativo da pequena açudagem: Estudo de caso do açude Várzea do Boi, em Tauá-CE. **Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 1, pp. 231-237, 2000.

CANHOLI, A.P. Drenagem urbana e controle de enchentes. Oficina de Textos. **São Paulo**, p.302, 2005.

CANTER, L. W.; KAMATH, J. Questionnaire checklist for cumulative impacts. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 15, n. 4, p. 311-339, 1995.

- CASTRO, K. B. D.; MARTINS, É. D. S.; REATTO, A.; LIMA, L. A. D. S.; RODRIGUES, L. N., CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; GOMES, M. P. Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** 244. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, 2009.
- CASTRO, R. A. DE; MACHADO, E. Análise de sensibilidade de parâmetros hidrológicos na bacia do Rio Das Pedras Guarapuava-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 05, p. 1746-1756, 2019.
- CECCHI, P.; GOURDIN, F., KONÉ, S.; CORBIN, D.; ETIENNE, J.; CASENAVE, A. Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire: inventaire et potentialités hydrologiques. **Science et Changements Planétaires/Sécheresse**, v. 20, n. 1, p. 112-122, 2009.
- CHAO, B. F.; Y. H. WU.; Y. S. LI. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level, **Science**, 320(5873), p.212–214, 2008.
- CHEN, Z.; WEI, S. Application of system dynamics to water security research. **Water Resources Management**, v. 28, n. 2, p. 287-300, 2014.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; MARENGO, J. Assessment of climate change in South America under the RCP 4.5 and 8.5 scale-down scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, pág. 512, 2014.
- CHRISTOFOLETTI, A. Some recent Brazilian studies in fluvial geomorphology. **Progress in Physical Geography**, v. 4, n. 3, p. 414-420, 1980.
- COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D. D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGH-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, v.52, p.878-895, 2007.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, p. 336, 2015.
- CORON, L.; PERRIN, C.; DELAIGUE, O.; THIREL, G.; MICHEL C. **airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling**. R package version 1.0.9.64, 2017.
- CORON, L.; THIREL, G.; DELAIGUE, O.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. **Environmental Modelling & Software**, v.94, p.166–171, 2017.
- COSTA, V. A. F.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Modelos regionais para Curvas de Permanência de vazões de rios perenes, intermitentes e efêmeros, com emprego da distribuição Burr XII estendida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 171-180, 2012.

CRAING, I. P. Loss of storage water through evaporation with particular reference to arid and semi-arid zone pastoralism in Australia (Working paper no. 19, The Water Smart Literature Reviews), 2008.

CRUZ, G. C.; RIBEIRO, E. M.; ARAÚJO, V. M.; DE PAULA ASSIS, T. R. A seca no cotidiano: agricultura familiar e estiagem em comunidades rurais do Gerais de Januária, MG. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 28, n. 3, p. 700-720, 2020.

CUI, D.; CHEN, X.; XUE, Y.; LI, R.; ZENG, W. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale-a case study of Kunming. **J. Water Resources Management**, v.234, p.189-199, 2019.

CULLER, R.C.; HADLEY, R.F.; SCHUMM, S. A. Hydrology of the Upper Cheyenne River Basin. United States Department of the Interior, **Geological Survey**, 1961.

DAKER, A. Captação, elevação e melhoramento da água. **A Água na Agricultura**. Ed. Rio de Janeiro, v.2, n.7, p.297-318, 1983.

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

DAWADI, S.; AHMAD, S. Changing climatic conditions in the Colorado River Basin: implications for water resources management. **Journal of Hydrology**, v. 430, p. 127-141, 2012.

DEITCH, M. J.; MERENLENDER, A. M.; FEIRER, S. Cumulative effects of small reservoirs on river flow in watersheds on the northern coast of California. **Water Resources Management**, v. 27, n. 15, p. 5101-5118, 2013.

DEKKER, T. **Modeling the buriti vermelho catchment-** in search of the best model with low data availability. 2007. Thesis (Master) – Tu Delf, Delf, 2007.

DEVINE, K. A.; MEKIS, É. Field accuracy of canadian rain measurements. **Atmosphere Ocean**.v.46, n.2, p. 213-227, 2008.

DOWNING, J. A. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. **Limnetica**, v. 29, n. 1, p. 0009-24, 2010.

DU, B.; ARNOLD, J. G.; SALEH, A.; JAYNES D. B. Development and application of SWAT to landscapes with tiles and potholes. **Transaction of the ASAE**, v.48, p.1121-1133, 2005.

DUBREUIL, P.; GIRARD, G. Influence of a Very Large Number of Small Reservoirs on the Annual Flow Regime of a Tropical Stream. **Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects**, v.17, p.295-299, 1973.

EHSANI, N.; VÖRÖSMARTY, C.J.; FEKETE, B.M.; STAKHIV, E.Z. Reservoir Operations Under Climate Change: Storage Capacity Options to Mitigate Risk. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 435-446, 2017.

EMBRAPA - **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. (1999) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa: Produção de Informação.

FABRE, J.; RUELLAND, D.; DEZETTER, A.; GROUILLET, B. Simulating past changes in the balance between water demand and availability and assessing their main drivers at the river basin scale. **Hydrology and Earth System**, v. 19, n. 3, p. 1263-1285, 2015.

FALEIRO, F. G.; DE FARIAS, N. A. L. **Savanas: demandas para pesquisa**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009.

FAO. Handbook on small earth dams: guide to location, design and construction. **Rome: United Nations Food and Agriculture Organization**, p.120, 2011.

FAO. Water use of livestock production systems and supply chains – Guidelines for assessment (Draft for public review). **Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership**. FAO, Rome, Italy, 2018.

FAULKNER, J. W.; STEENHUIS, T.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M.; LIEBE, J. R. Water use and productivity of two small reservoir irrigation schemes in Ghana's Upper East Region. **Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage**, v. 57, n. 2, p. 151-163, 2008.

FORD, F. A. Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems. **Island Press**, 1999.

FORRESTER, J. W. Industrial Dynamics. A major breakthrough for decision makers. **Harvard Business Review**, v. 36, n. 4, p. 37-66, 1958.

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.

FOWLER, K.; MORDEN, R.; LOWE, L.; NATHAN, R. Advances in assessing the impact of hillside farm dams on streamflow. **Australasian Journal of Water Resources**, v. 19, n. 2, p. 96-108, 2015.

FROMAGEOT, A.; CECCHI, P.; PARENT, F.; COPPIETERS, Y. Ruptures économiques sans ruptures sociales: le maraîchage et la santé des paysanneries sénoufo entre résilience et vulnérabilité. In: **Annales de Géographie**. Armand Colin, p. 49-68, 2006.

GALLEGO-ELVIRA, B.; BAILLE, A.; MARTÍN-GÓRRIZ, B.; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, V. Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi-arid climate (southeastern Spain). **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 24, n. 6, p. 758-766, 2010.

GIRARD, G. Estimation de l'évaporation sur les réservoirs de barrages en région intertropicale semi-aride. **Extrait de la publication**, n. 70, p. 233-244, 1966.

GOLDENFUM, J. A.; PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. (2001).

GÜNTNER, A.; KROL, M. S.; ARAÚJO, J. C. D.; BRONSTERT, A. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region/Modélisation simple du bilan hydrologique de systèmes de réservoirs de surface dans une grande région semi-aride pauvre en données. **Hydrological Sciences Journal**, v.49, n.5, 2004.

GUPTA, H.V.; KLING, H.; YILMAZ, K.K.; MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error an NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, 377(1-2), p.80-91, 2009.

GUSE, B.; PFANNERSTILL, M.; GAFUROV, A.; KIESEL, J.; LEHR, C.; FOHRER, N. Identifying the connective strength between model parameters and performance criteria. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5663-5679, 2017.

HABETS, F.; MOLÉNAT, J.; CARLUER, N.; DOUEZ, O.; LEENHARDT, D. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. **Science of The Total Environment**, v. 643, p. 850-867, 2018.

HABETS, F.; PHILIPPE, E.; MARTIN, E.; DAVID, C. H.; LESEUR, F. Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 10, p. 4207, 2014.

HANAK, E.; LUND, J. R. Adapting California water management to climate change. **Climate Change**, v. 111, n. 1, p. 17-44, 2012.

HARLIN, J. Development of a process-oriented calibration scheme for the hydrological model of HBV. **Hydrology Research**, v. 22, n. 1, p. 15-36, 1991.

HE, X.; WADA, Y.; WANDERS, N.; SHEFFIELD, J. Intensification of hydrological drought in California by human water management. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 4, p. 1777-1785, 2017.

HUBER, M.; KNUTTI, R. Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 1, p. 31-36, 2012.

HUGHES, D. A.; MANTEL, S. K. Estimating the uncertainty in simulating the impacts of small farm dams on streamflow regimes in South Africa. **Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 4, p. 578-592, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Dados Meteorológicos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Access in: Outubro de 2020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PAINEL CLIMATE CHANGE. Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: **Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1-32, 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PAINEL CLIMATE CHANGE. **Climate Change**. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Switzerland: IPCC, p.14, 2022.

JAYATILAKA, C. J.; SAKTHIVADIVEL, R.; SHINOBI, Y.; MAKIN, I. W.; WITHARANA, P. A. Simple water balance modelling approach for determining water availability in an irrigation tank cascade system. **Journal of Hydrology**, v.273, n.14, p.81-102, 2003.

JI, J.; YANG, R.; SUN, Z.H.; YUAN, H.Y. Validation and evaluation of large eddy simulation-based field-zone mode for smoke movement in building fires. **Progress in Safety Science Technology**, v. 6, p. 721-724, 2006.

KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. Quantifying the water balance in a planar hillslope plot: effects of measurement errors on flow prediction. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 1-2, p. 191-202, 2010.

KAN, A.; DIAS, N. L. Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.4, n.3, p.29-38, 1999.

KARIMLOU, K. Developing a model for decision-makers in dynamic modeling of urban water system management. **Water Resources Management**, v. 34, n. 2, p. 481-499, 2020.

KENNON, F. W. Hydrologic effects of small reservoirs in Sandstone Creek watershed, Beckham and Roger Mills Counties, western Oklahoma. **US Government Printing Office**, 1966.

KHAN, S.; YUFENG, L.; AHMAD, A. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, n. 12, p. 1363-1372, 2009.

KLINK, C.A. Political intervention in the Savannahs of the Cerrado of Brazil: Changes in land use and effects on conservation. **Maned Wolf Ecology and Conservation: Multidisciplinary Perspectives**; Consorte-Mc Crea, AG, Ferraz Santos, E., Eds, p. 293-308, 2014.

KROL, M. S.; DE VRIES, M. J.; VAN OEL, P. R.; DE ARAÚJO, J. C. Sustainability of small reservoirs and large scale water availability under current conditions and climate change. **Water Resources Management**, v. 25, n. 12, p. 3017-3026, 2011.

LABADIE, J.W.; FONTANE, D.G.; TABIOS, G.Q.; CHOU, N.F. Stochastic analysis of reliable hydropower capacity. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 113, n. 3, p. 422-437, 1987.

LE MOINE, N. The surface watershed seen from the underground: a way to improve the performance and realism of rain-flow models. **Doctorate in Geosciences and Natural Resources, Pierre and Marie Curie University Paris VI**. 2008.

LÉLLIS, B. C.; CARVALHO, D. F.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J. M., DOMÍNGUEZ, A. Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.192, p. 294-305, 2017.

LI, L.; SIMONOVIC, S. P. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2645-2666, 2002.

- LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: a case study in the Upper East region of Ghana. **Earth Physics and Chemistry, Parts A / B / C**, v. 30, n. 6-7, p. 448-454, 2005.
- LIN, Q.; WU, Z.; SINGH, V. P.; SADEGHI, S. H. R.; HE, H.; LU, G. Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, South China. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 512-524, 2017.
- LOUCKS, D. P. Planning and analysis of water resources systems. Prentice-Hall., 1981.
- LU, W.; LEI, H.; YANG, D.; TANG, L.; MIAO, Q. Quantify the impacts of the construction of small dams on hydrological changes in the Jiulong river basin, southeastern China. **Journal of Hydrology**, v.567, p.382-392, 2018.
- LUND, J.R. Drought storage allocation rules for surface reservoir systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 132, n. 5, p. 395-397, 2006.
- LUO, Y.; KHAN, S.; CUI, Y.; PENG, S. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. **Paddy Water Environ**, v. 7, n. 1, p. 1-9, 2009.
- 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, n. 1, p. 57-65, 2017.
- MAGLIANO, P.N., MURRAY, F., BALDI, G., AURAND, S., PÁEZ, R.A., HARDER, W., JOBBÁGY, E.G. Rainwater harvesting in dry Chaco: regional distribution and local water balance. **J. Arid Environ**, 123, 93–102, 2015.
- MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.
- MANETA, M. P.; TORRES, M. O.; WALLENDER, W. W.; VOSTI, S.; HOWITT, R.; RODRIGUES, L.N; BASSOI, L. H.; PANDAY, S. A spatially distributed hydroeconomic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. **Water Resources Research**, v. 45, n. 11, 2009.
- MANETA, M. P; TORRES, M.O; VOSTI, S. A.; WALLENDER, W. W.; ALLEN, S.; BASSOI, L.H.; YOUNG, J. Assessing agriculture–water links at the basin scale: hydrologic and economic models of the São Francisco River Basin, Brazil. **Water International**, v. 34, n. 1, p. 88-103, 2009.
- MARARAKANYE, N.; LE, J. J.; FRANKE, A. C. Using satellite-based weather data as input to SWAT in a data poor catchment. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v.117, p.102871, 2020.
- MARÍN-COMITRE, U.; SCHNABEL, S.; PULIDO-FERNÁNDEZ, M. Hydrological Characterization of Watering Ponds in Rangeland Farms in the Southwest Iberian Peninsula. **Water**, v. 12, n. 4, p. 1038, 2020.

MARTINEZ ALVAREZ, V.; GONZÁLEZ-REAL, M. M.; BAILLE, A.; VALERO, J. M.; ELVIRA, B. G. Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 9, p. 1056-1066, 2008.

MASHALY, A.F.; FERNALD, A.G. Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resources as a Promising Modeling Approach for Water Management. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1432, 2020.

MASSUEL, S. Managed aquifer recharge in South India: what to expect from small percolation tanks in hard rock. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 157-167, 2014.

MATTEAU, M.; ASSANI, A.A.; MESFIOUI, M. Application of multivariate statistical analysis methods to the hydrologic impact studies. **Journal of Hydrology**, v.371, n.1-4, p.120-128, 2009.

MCJANNET, D.; COOK, F.; MCGLOIN, R.; MCGOWAN, H.; BURN, S.; SHERMAN, B. Long-term energy flux measurements over an irrigation water storage using scintillometry. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 93-107, 2013.

MCMAHON, T. A.; PEEL, M.C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T.R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, 17 (4), 1331–1363, 2013.

MEES, A. Qualidade da Água em Reservatórios. 2020.

MENGISTU, M. G.; SAVAGE, M. J. Open water evaporation estimation for a small shallow reservoir in winter using surface renewal. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 1-2, p. 27-35, 2010.

MIGUEZ, M.; VERÓL, A.; DI GREGORIO, L. T. **Gestão de riscos e desastres hidrológicos**. Elsevier Brasil, 2017.

MIRCHI, A. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. **Water resources management**, v. 26, n. 9, p. 2421-2442, 2012.

MITRA, A. K.; MOMIN, I. M.; RAJAGOPAL, E. N.; BASU, S.; RAJEEVAN, M. N.; KRISHNAMURTI, T. N. Chuvas de monções indianas diárias em grade por 14 temporadas: Valores de análise de medidor TRMM e IMD mesclados. **Journal of Earth System Science**, v. 122, n. 5, p. 1173-1182, 2013.

MOLLE, F.; CADIER, E. Manual do pequeno açude; construir; conservar e aproveitar pequenos açudes no Nordeste Brasileiro. **Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Recife (Brasil)**. Diretoria de Planejamento Global, 1992.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. MODEL. Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the Asabe**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORTON, F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, n. 1-4, p. 1-76, 1983.

MUSSALLI, Y.G. **A Study of Flow Conditions in Shaft Spillways**. Doctoral thesis. Georgia Institute of Technology. 1969.

MUSTAPHA, M.K. Problems, challenges and management of small, shallow tropical African reservoirs: a case study of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria. **International Magazine of Lakes and Rivers**, v. 2, n. 1, p. 163-174, 2009.

NASH, J. E. River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 398-409, 1970.

NATHAN, R.; LOWE, L. The hydrologic impacts of farm dams. **Australasian Journal of Water Resources**, v. 16, n. 1, p. 75-83, 2012.

NEAL, B. P.; SHEPHARD, P.; AUSTIN, K. A.; NATHAN, R. J.; MERZ, S. K. The effect of catchment farm dams on streamflows—Victorian case studies. In: **Proceedings of the 3rd International Hydrology and Water Resources Symposium**, p. 836-841, 2000.

NICOLA, M. Development of a water balance for the Atankwidi catchment, West Africa—A case study of groundwater recharge in a semi-arid climate. **Cuvillier Verlag**, 2006.

NORDBO, A.; LAUNIAINEN, S.; MAMMARELLA, I.; LEPPÄRANTA, M.; HUOTARI, J.; OJALA, A.; VESALA, T. Long-term energy flux measurements and energy balance over a small boreal lake using eddy covariance technique. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D2, 2011.

NUNES, E. L.; AMORIM, R. C. F. D.; SOUZA, W. G. D.; RIBEIRO, A.; SENNA, M. C. A.; LEAL, B. G. Zoneamento agroclimático da cultura do café para a bacia do Rio Doce. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 297-302, 2007.

OBLINGER, J. A.; MOYSEY, S. M. J. A pragmatic method for estimating seepage losses for small reservoirs with application in rural India. **Journal of Hydrology**, v. 385, n. 1-4, p. 230-237, 2010.

OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **Science**, v. 313, n. 5790, p. 1068-1072, 2006.

OLIVEIRA, V.A. DE.; MELLO, C.R.; DE, VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

ORTH, R. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 147–159, 2015.

PACHAURI, R.K.; ALLEN, M.R.; BARROS, V.R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R., VAN YPSELER, J.P. **Climate change 2014: summary report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, 2014.

PAKHMUDE, V.; KULKARNI, H.; DEOLANKAR, S. B. Hydrological-drainage analysis in watershed-programme planning: a case from the Deccan basalt, India. **Hydrogeology Journal**, v. 11, n. 5, p. 595-604, 2003.

PAYAN, J. L.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; MICHEL, C. How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model. **Water Resources Research**, v. 44, n. 3, 2008.

PEREIRA, R. M.; HAIE, N.; MACHADO, G. J. Vensim PLE to create models for water management. **World**, v. 3, p. 4, 2012.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; DA SILVA, D. D., RAMOS, M. M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 346-352, 2009.

PERRIN, C.; OUDIN, L.; ANDREASSIAN, V.; ROJAS-SERNA, C.; MICHEL, C., MATHEVET, T. Impact of limited water flow data on rainfall efficiency and parameters - runoff models. **Journal of Hydrological Sciences**, v. 52, no. 1, p. 131-151, 2007.

PHAN, T. D.; BERTONE, E.; STEWART, R. A Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, p. 100031, 2021.

PINHATI, F. S. C.; RODRIGUES, L. N.; SOUZA, S. A. Modeling the impact of reservoirs on farms on the availability of water in the dry season in a hydrographic basin in the Brazilian cerrado. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106296, 2020.

PIPER, B.S.; PLINSTON, D.T.; SUTCLIFFE, J.V. The water balance of Lake Victoria. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 25-37, 1986.

PIRES, G.F.; ABRAHÃO, G.M.; BRUMATTI, L.M.; OLIVEIRA, L.J.; COSTA, M.H.; LIDDICOAT, S.; LADLE, R.J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.228, p.286-298, 2015.

PLUMB, A. P.; ROWE, R. C.; YORK, P.; BROWN, M. Optimisation of the predictive ability of artificial neural network (ANN) models: a comparison of three ANN programs and four classes of training algorithm. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 25, n. 4-5, p. 395-405, 2005.

PONRAJAH, R. A. Derivation and applications of optimal incremental bus costs. 1984.

PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. O modelo Muskingum Cunge Todini em rios com planície de inundação. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 298-309, 2015.

POOLMAN, M. I. **Developing small reservoirs: A participatory approach can help**. Doctoral dissertation. Technical University Delft, 2005.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2018.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v. 38, p. 146-155, 2013.

RAMIREDDYGARI, S. R.; SOPHOCLEOUS, M. A.; KOELLIKER, J. K.; PERKINS, S. P.; GOVINDARAJU, R. S. Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 236, n. 3-4, p. 223-246, 2000.

RAMOS, M. M.; OLIVEIRA, R. A. Medição de vazão em pequenos cursos d'água. **Senar**, Brasília, p.64, 2003.

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 60, n. 1, p. 57, 2003.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

RECA, J.; GARCÍA-MANZANO, A.; MARTÍNEZ, J. Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 250-257, 2015.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Embrapa Cerrados- Capítulo em livro científico**, 1998.

RODRIGUES, A. L.; VILLA, P. M.; RODRIGUES, A. C.; MATA, R. A. Diagnóstico participativo de uma microbacia hidrográfica no sudeste do Brasil: premissas de ordenação ambiental e agrícola. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.01, p. 343-354, 2019.

RODRIGUES, A. L.; VILLA, P. M.; RODRIGUES, L.N. Water balance estimate of beans using a dynamic systems model based on crop coefficient (Kc) variation. **Revista Engenharia na Agricultura-Reveng**, v. 29, p. 81-89, 2021.

RODRIGUES, L. N. Bacia Experimental do Rio Buriti Vermelho, na ecorregião do Planalto Central. In: RODRIGUES, L. N.; SCHULER, A. E. (Eds.). **Água: Desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Brasília - DF: Embrapa, p. 233–255, 2016.

RODRIGUES, L. N.; ALTROFF, D. Capítulo 26: Pequenas barragens na agricultura irrigada. In: Alysson Paolionelli; Durval Dourado Neto; Everardo Chartuni Mantovani. (Org). **Diferentes abordagens sobre a agricultura irrigada no Brasil: história, política pública, economia e recursos hídricos**. 1ed. Piracicaba: ESALQ- USP, p.447-461, 2021.

RODRIGUES, L. N.; DEKKER, T. Avaliação da taxa de infiltração em pequenas barragens. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 80, p. 57-61, 2008.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Brasília, DF: Embrapa Cerrados - **Livro técnico (INFOTECAE)**, 2017.

RODRIGUES, L. N.; LIEBE, J. Estimation of small storage capacities of reservoirs with remote sensing in the Brazilian Cerrado region. **Water resource management**, v. 26, n. 4, p. 873-882, 2012.

RODRIGUES, L. N.; LIEBE, J. S. Reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Regions of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management-WRIM**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2013.

RODRIGUES, L. N.; MARIOTI, J.; VARGAS, L. P.; SANO, E. E.; MARTINS, E. S. Experimental do rio Buriti Vermelho: instrumentação, monitoramento e análise preliminar de dados. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS**, p. 1-19, 2009.

RODRIGUES, L.N.; MOREIRA, J. M. M. A. P. Desenvolvimento de um modelo de simulação de estratégias de irrigação. **In Anais do III Inovagri International Meeting**. INOVAGRI-EI, Fortaleza, Ceará, Brasil, p.1817-1825, 2015.

RODRIGUES, L.N.; SANO, E. E.; AZEVEDO, J.A.; SILVA, E.M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na Bacia do Rio Preto. **Revista Espaço e Geografia**, v. 10, n. 2, 2007.

ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G. E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 3-4, p. 149-166, 2007.

ROST, S.; D. GERTEN.; A. BONDEAU.; W. LUNCHT.; J. ROHWER.; S. SCHAPHOFF. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. **Water Resources Research**, 44, 2008.

SABER, G.; WILD, C. **Nonlinear Regression**. Hoboken. 2003.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R, M.; FOLEGATTI, M, V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G. Water resources situation at Piracicaba, Capivari and Jundiáí watersheds using a dynamic systems model. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 578-590, 2009.

SANTHI, C.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; DUGAS, W.A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L.M. Validation of the Swat Model on a Large Rwer Basin with Point and Nonpoint Sources. **J. Am. Journal da American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.

SANTOS, A. M. D.; TARGA, M. D. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 7, p. 195-211, 2012.

SANTOS, S.V.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16 n.4, p.49-60, 2011.

SAVENIJE, H.H.G. Water Scarcity Indicators; the Deception of the Numbers. **Earth Physics and Chemistry, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, n. 3, p. 199-204, 2000.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value. **Hydrological Processes**, v. 21, n. ARTICLE, p. 2075-2080, 2007.

SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities from different landscapes using the SWAT ecohydrological model. **Advances in Geosciences**, v. 21, p. 91-98, 2009.

SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S.; THONGS, D. J.; EASTON, Z. M.; ZION, M. S.; NEAL, A. L.; TODD WALTER, M. Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 21, n. 25, p. 3420-3430, 2007.

SCHREIDER, S. Y.; JAKEMAN, A. J.; LETCHER, R. A.; NATHAN, R. J.; NEAL, B. P.; BEAVIS, S. G. Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray–Darling basin, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 262, n. 1-4, p. 84-98, 2002.

SHINDE, M. G.; GORANTIWAR, S. D.; SMOUT, Ian K. Application of watershed-based tank system model for rainwater harvesting and irrigation in India. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 10, p. 659-667, 2011.

SHINOGI, Y.; MAKIN, I.W.; WITHARANA, D.D.P. **Simulation of the Balance in a Dry Zone Cascade**, p.68 of Session 2. 1998.

SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do PEIXE- Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre**, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.

SILVA, A. J.; MONTEIRO, M. S. L.; SILVA, M. V. Contrapontos da consolidação do agronegócio no cerrado brasileiro. **Sociedade e Território**, v. 7, 2015.

SILVA, F. B.; SANTOS, J. R. N.; FEITOSA, F. E. C. S.; SILVA, I. D. C.; ARAÚJO, M. L. S. D.; GUTERRES, C. E.; SANTOS, J.S.; RIBEIRO, C, V; BEZERRA, D. S.; NERES, R. E. Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 330-336, 2016.

SIMONOVIC, S. P. Analysis of reservoir systems: closing the gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 3, p. 262-280, 1992.

SIMONOVIC, S. P. Methods and tools for a systems approach. **Managing Water Resources**, p. 576, 2009.

SIMONOVIC, S. P. World water dynamics: global modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, v. 66, n. 3, p. 249-267, 2002.

SIMONOVIC, S. P.; FAHMY, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 295-304, 1999.

SMERDON, B. D. A synopsis of climate change effects on groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 125-128, 2017.

SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M., XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 739-757, 2015.

SOUZA, F. A. DE; SILVA, C. L. D.; MAGGIOTTO, S. R.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. P. D. Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 10-17, 2012.

SOUZA, R.; SOUZA, E. S. D.; ANTONINO, A. C.; LIMA, J. R. D. S. Water balance in pasture area in semi-arid region of Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 449-455, 2015.

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S.R.; TARABA, J. L. Daily and monthly flow simulation of small watershed streams using the SWAT model. **ASAE Transactions**, v. 43, n. 6, p. 1431, 2000.

STERMAN, J. **Business Dynamics**. McGraw-Hill, Inc., 2000.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

SUŠNIK, J.; VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; SAVIĆ, D. A.; KAPELAN, Z. Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. **Science of the Total Environment**, v. 440, p. 290-306, 2012.

TANNY, J.; COHEN, S.; ASSOULINE, S.; LANGE, F.; GRAVA, A.; BERGER, D.; PARLANGE, M. B. Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 1-2, p. 218-229, 2008.

THE ECONOMIST. The miracle of the Cerrado: Brazil has revolutionized its own farms. **Can it do the same for others**. Aug 26th, 2010.

TOMAZZOLI, E. R. A evolução geológica do Brasil-Central. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 2, p. 11-26, 1990.

TREW, B. **Ticking Time Bomb: The Water Crisis Which Threatens Chances for Peace in the Middle East**. In: INDEPENDENT PREMIUM, Londres, 2019. Disponível em: <https://www.independent.co.uk/news/world/middle-east/palestine-israel-conflict-gazawest-bank-peace-plan-water-crisis-a8736866.html>. Acesso em: 23 fev. 2022.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH/EDUSP, p.943,1993.

TUNDISI, J.G. Perspectives for ecological modeling of tropical and subtropical reservoirs in South America. **Ecological Modeling**, v. 52, no. 1-2, p. 7-20, 1990.

UNESCO. International Glossary of Hydrology. **UNESCO, Geneva 2**, Switzerland. 2012.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. **Conservação de Nascentes e Produção de Água em Pequenas Bacias Hidrográficas**. Viçosa, Editora Aprenda fácil. p.267, 2011.

VAN DE GIESEN, N.; LIEBE, J.; JUNG, G. Adapting to climate change in the Volta Basin, West Africa. **Current Science**, v.98, n.8, p.1033-1037, 2010.

VAN DER ZAAG, P.; GUPTA, J. Dimension issues in the governance of water storage projects. **Water Resources Research**. v. 44, n. 10, 2008.

VENTANA SYSTEMS. Vensim User's Guide Version 6; **VENTANA Systems Inc.: Harvard, MA, USA**, 2013.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mcgraw-hill, p245, 1975.
VÖRÖSMARTY, C. J.; SAHAGIAN, D. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. **Bioscience**, v. 50, n. 9, p. 753-765, 2000.

WANG, G. Y.; SHEN, Y. P.; WANG, N. L.; WU, Q. B. The effects of climate change and human activities on the lake level of the Issyk-Kul during the past 100 years. **Journal of Glaciology and Geocryology**, v. 32, n. 6, p. 1097-1105, 2010.

WANG, J.; JIANG, D.; GU, D. The prediction and study on the water resources carrying capacity of the arid area based on SD model. **Geography and Territorial Research**, v. 15, n. 2, p. 18-22, 1999.

WANG, L.; ZOU, C.; O'DONNELL, F.; GOOD, S.; FRANZ, T.; MILLER, G. R.; BOND, B. Characterizing ecohydrological and biogeochemical connectivity across multiple scales: a new conceptual framework. **Ecohydrology**, v. 5, n. 2, p. 221-233, 2012.

WANG, Z. Y.; LEE, J. H. W.; MELCHING, C. S. River dynamic and integrated River management. **Springer Heidelberg Dordrecht London NY**, p.855. 2015.

WEI, S.; YANG, H.; SONG, J.; ABBASPOUR, K. C.; XU, Z. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. **European Journal of Operational Research**, v. 221, n. 1, p. 248-262, 2012.

WENDT, D. E., RODRIGUES, L. N., DIJKSMA, R., VAN DAM, J. C. Assessing groundwater potential use for expanding irrigation in the Buriti Vermelho watershed. **Irriga**, v. 1, p. 81-94. 2015.

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. **Journal of Hydrology**, v. 384, n. 3-4, p. 264-275, 2010.

WORLD DAM COMMISSION–World Commission. Dams and development - a new structure for decision making. **Dams and Development: A New Framework for Decision-making**. UK /USA: Earthscan, 2000.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Manual on Stream Gauging**, vol 1, Fieldwork. Geneva, 2010.

WU, H.; ADLER, R. F.; HONG, Y.; TIAN, Y.; POLICELLI, F. Evaluation of global flood detection using satellite-based rainfall and a hydrologic model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 4, p. 1268-1284, 2012.

WURBS, R. A. Modeling the management of the river reservoir system, water allocation and supply reliability. **Journal of Hydrology**, v. 300, n. 1-4, p. 100-113, 2005.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2015: **Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO, ed. 2015.

XI, XI.; POH, K, L. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. **Procedia Computer Science**, v. 16, p. 157-166, 2013.

YANG, X.G.; BOUMAN, B.A.M.; WANG, H.Q.; WANG, Z.M.; ZHAO, J.F.; CHEN, B. Performance of temperate aerobic rice under different water regimes in North China. **Agricultural Water Management**, v. 74, n. 2, p. 107-122, 2005.

YEH, W.W.G. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. **Water Resources Research**, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, 1985.

ZHOU, T. The contribution of reservoirs to global variations in water storage on the Earth's surface. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 1, p. 309-325, 2016.

ZHOU, Y.; GUO, S.; LIU, P.; XU, C. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for mixed cascade reservoir systems. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 248-257, 2015.

ZOMORODIAN, M.; LAI, S.H.; HOMAYOUNFAR, M.; IBRAHIM, S.; FATEMI, S.E.; EL-SHAFIE, A. The state of the art of the application of systems dynamics in the integrated modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, v. 227, p. 294-304, 2018.