

LUANE INES BRITO MONTEIRO

**APRIMORAMENTO DOS PROCESSOS DE DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO
DE RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO**

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

Orientador: Fernando Falco Pruski

Coorientador: Eber José de Andrade Pinto

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

M775a
2020 Monteiro, Luane Ines Brito, 1990-
Aprimoramento dos processos de dimensionamento e
operação de reservatórios de regularização / Luane Ines Brito
Monteiro. – Viçosa, MG, 2020.
1 tese eletrônica (116 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2020.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.402>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Reservatórios. 2. Abastecimento de água. 3. Evaporação.
4. Água - Conservação. 5. Água - Consumo. I. Pruski, Fernando
Falco, 1961-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 628.112

Bibliotecário(a) responsável: Euzebio Luiz Pinto CRB 6/3317

LUANE INES BRITO MONTEIRO

**APRIMORAMENTO DOS PROCESSOS DE DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO
DE RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO**

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

APROVADA: 28 de julho de 2020.

Assentimento:



Luane Ines Brito Monteiro
Autora



Fernando Falco Pruski
Orientador

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos e oportunidades concedidas.

Aos meus pais por todo amor, por estarem sempre presentes mesmo que distantes fisicamente, por todos os esforços impagáveis e pelo exemplo que são para mim.

Ao Magno por todo amor, companheirismo e ajuda nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos pelo carinho e pelo exemplo de persistência e determinação.

Às minhas sobrinhas Maria, Luna, Inês e Lia que são o motivo de nossas alegrias diárias.

Aos meus tios e primos pelo imenso carinho e pela torcida pelo meu sucesso.

Ao professor Fernando Falco Pruski pelos aprendizados, pelos longos bate-papos hidrológicos ou não hidrológicos e pela confiança ao longo de vários anos de orientação.

Ao professor Eber José de Andrade Pinto pela gentileza em se dispor a contribuir com esse o trabalho.

Ao professor José Rui de Castro Sousa e seus orientados Matheus e João Victor pela valiosa contribuição para a otimização dos processos empregados nesse trabalho.

Aos professores Aline de Araújo Nunes e Vital Pedro da Silva Paz que participaram da banca de defesa contribuindo para a melhoria deste trabalho.

Aos amigos do CRRH por tornarem meus dias mais leves e alegres, em especial a Clívia, Nívia e Priscila que me auxiliaram para iniciar minhas atividades na temática de reservatórios e a Cristiane, Fernanda, Josiane, Ligia e Tarcila pelas parcerias, sorrisos e aprendizados.

Às meninas da RBO Camila, Laura e Rayssa pela amizade, pela doce convivência e por serem sempre prestativas para assuntos pessoais e/ou profissionais.

Aos estagiários Fernando, Ícaro e Renan por me auxiliarem em diversos momentos com dedicação e bom humor.

Não poderia faltar o meu grande agradecimento à UFV pela minha formação profissional e pessoal, uma universidade que posso chamar de casa, que me acolheu desde a graduação através de amigos, professores e servidores que na maior parte dos casos se mostraram prestativos para me ajudar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro.

*“Os rios que eu encontro
vão seguindo comigo.
Rios são de água pouca,
em que a água sempre está por um fio.
Cortados no verão
que faz secar todos os rios.
Rios todos com nome
e que abraço como a amigos.
Uns com nome de gente,
outros com nome de bicho,
uns com nome de santo,
muitos só com apelido.
Mas todos como a gente
que por aqui tenho visto:
a gente cuja vida
se interrompe quando os rios.”*

João Cabral de Melo Neto

RESUMO

MONTEIRO, Luane Ines Brito, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2020. **Aprimoramento dos processos de dimensionamento e operação de reservatórios de regularização.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientador: Eber José de Andrade Pinto.

O aumento da demanda pelo uso da água impulsionada pelo crescimento da população poderá agravar os cenários de escassez hídrica, assim faz-se necessário o uso de ferramentas de planejamento e gestão de recursos hídricos que possam minimizar os possíveis conflitos pelo uso da água. Em condições em que a disponibilidade hídrica natural em um curso de água não é suficiente para atender as demandas dos usuários, a construção de reservatórios torna-se uma alternativa plausível, uma vez que estas estruturas operam a partir do armazenamento temporário do excedente nos períodos em que as vazões afluentes superam as vazões de saída do reservatório. A vazão máxima de regularização é limitada a vazão média de longo termo (Q_{mlt}) e o potencial de regularização está relacionado com as perdas por evaporação ocorridas na superfície da área inundada pelo reservatório. Para o dimensionamento de reservatórios considera-se que a capacidade de armazenamento deverá ser suficiente para suprir a demanda de água nos períodos secos, porém, durante o período de enchimento as reservas disponíveis podem não ser suficientes para atender as demandas projetadas. O presente trabalho foi dividido em dois capítulos que abordam questões relacionadas ao dimensionamento e operação de reservatórios de regularização. No capítulo 1 foi proposto um aprimoramento do modelo *Determination of Reservoir Capacity using Synthetic Series* (DRECASS) incorporando a perda de água por evaporação na superfície do lago considerando a variação diária da área inundada. A metodologia proposta a partir desse aperfeiçoamento foi denominada como DRECASS-EV e permitiu avaliar o potencial de regularização na seção de interesse para a construção do reservatório considerando as características climáticas locais, de forma que para regiões com maiores estimativas de evaporação obteve-se menor potencial de regularização. No capítulo 2 foi proposta uma metodologia para a avaliação das opções de operação de reservatórios de regularização durante o período de enchimento com base em análises que consideram o tempo de enchimento (TE) e a garantia de atendimento às demandas (G). A aplicação desta metodologia permitiu detectar as variações inerentes as condições climáticas das diversas regiões contempladas nos estudos de caso. O presente

trabalho, no âmbito dos dois capítulos, apresenta ferramentas relevantes para o processo de dimensionamento de reservatórios que poderá auxiliar na compatibilização entre custos e benefícios correlatos à construção dessas estruturas, bem como para a tomada de decisões quanto a operação de reservatórios durante o período de enchimento.

Palavras-chave: Regularização de vazões. Planejamento e gestão de recursos hídricos. Disponibilidade Hídrica. Evaporação de reservatórios.

ABSTRACT

MONTEIRO, Luane Ines Brito, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, July, 2020. **Improvement of the desing and operation processes for regularization.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-adviser: Eber José de Andrade Pinto.

The increased demand for water use driven by population growth may worsen water scarcity scenarios, so it is necessary to use water resource planning and management tools that can minimize possible conflicts over water use. In conditions where the natural water availability in a watercourse is not sufficient to meet the users demands, the construction of reservoirs becomes a plausible alternative, since these structures operate from the temporary storage of the surplus in the periods in which that the inflows exceed the outflows from the reservoir. The maximum regularization flow is limited to the long-term average discharge (Q_{mlt}) and the regularization potential is related to the evaporation losses that occur on the surface of the flooded area by the reservoir. For the dimensioning of reservoirs, it is considered that the storage capacity should be sufficient to supply the water demand in the dry periods, however, during the filling period the available reserves may not be sufficient to meet the projected demands. This work was divided into two chapters that address issues related to the design and operation of regularization reservoirs. In chapter 1, an improvement of the Determination of Reservoir Capacity model using Synthetic Series (DRECASS) was proposed, incorporating the loss of water by evaporation on the lake surface considering the daily variation of the flooded area. The proposed methodology from this improvement was called DRECASS-EV and allowed to evaluate the regularization potential in the section of interest for the construction of the reservoir considering the local climatic characteristics, so that for regions with higher evaporation estimates, less regularization potential was obtained. In chapter 2, a methodology was proposed to evaluate the options for operating regularization reservoirs during the filling period based on analyzes that consider the filling time (TE) and the guarantee of meeting demands (G). The application of this methodology allowed to detect the variations inherent to the climatic conditions of the different regions covered in the case studies. The present work, within the scope of the two chapters, presents relevant tools for the reservoir sizing process that can assist in the compatibility between costs and benefits related to the construction of these structures, as well as for decision making for reservoirs operation during the period filling.

Keywords: Regulation of Natural Inflows. Planning and Management of Water Resources.
Water Availability. Reservoir Evaporation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Esquema de geração de séries sintéticas temporais	32
Figura 1.2 - Etapas para o cálculo da capacidade do reservatório considerando a perda de água por evaporação no lago.....	36
Figura 1.3 – Mapa de localização das bacias hidrográficas estudadas	37
Figura 1.4 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Paracatu	39
Figura 1.5 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha	39
Figura 1.6 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Paraguaçu	40
Figura 1.7 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Jaguaribe.....	40
Figura 1.8 - Distribuição anual de precipitação e evaporação na superfície do lago do reservatório para a bacia do rio Paracatu (a), Jequitinhonha (b), Paraguaçu (c) e Jaguaribe (d)	41
Figura 1.9 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Paracatu (PC1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5 (a) e 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9 (b).....	47
Figura 1.10 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Jequitinhonha (JE1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5 (a) e 0,6; 0,7 e 0,8(b).....	48
Figura 1.11 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Paraguaçu (PG1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5.....	49
Figura 1.12 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Jaguaribe (JA1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,1 e 0,2.....	49
Figura 2.1 – Fluxograma de etapas metodológicas para a avaliação de opções de operação durante o período de enchimento de reservatórios.	69

Figura 2.2 – Esquema de geração de séries sintéticas temporais	72
Figura 2.3 – Mapa de localização das bacias contempladas nos estudos de caso	77
Figura 2.4 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 1994 e 1993	81
Figura 2.5 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 2001 e 2000	83
Figura 2.6 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas	87
Figura 2.7 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Paracatu (RPC)	87
Figura 2.8 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Jequitinhonha (RJE) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas.	90
Figura 2.9 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Jequitinhonha (RJE)	90
Figura 2.10 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Jequitinhonha (RJE) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 2013 e 2012	91
Figura 2.11 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Paraguaçu (RPG) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas	93
Figura 2.12 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Paraguaçu (RPG)	93
Figura 2.13 – Intervalos de confiança referentes ao tempo de enchimento (TE) dos reservatórios RPC a), RJE b) e RPG c)	99
Figura 2.14 – Intervalos de confiança referentes a garantia de atendimento às demandas (G) dos reservatórios RPC a), RJE b) e RPG c)	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Precipitação média anual, evaporação anual estimada por diferentes métodos e déficits hídricos correspondentes.....	43
Tabela 1.2 – Dados para o dimensionamento dos reservatórios nas seções de interesse	45
Tabela 2.1 – Informações sobre as seções de interesse consideradas nas simulações	78
Tabela 2.2 – Condições de operação simuladas	78
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados de garantia de atendimento às demandas (G) por reservatório	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Área de drenagem
Ad	Área inundada referente ao dia d
A _{SI}	Área de contribuição da seção de interesse
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
b	Variável reduzida
BHeq _M	Vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real média da região hidrologicamente homogênea
CE	Coefficiente de escoamento
CR	Capacidade do reservatório
CR _T	Capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T de interesse
CR _N	Capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série
D	Distribuição estatística
DRECASS	<i>Determination of Reservoir Capacity using Synthetic Series</i>
DRECASS-EV	<i>Determination of Reservoir Capacity using Synthetic Series</i> com a incorporação da perda de água por evaporação na superfície do lago
EV	Lâmina evaporada
E _a	Evaporação dada pela equação aerodinâmica
ET	Evapotranspiração
e _s	Pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar
F	Fator de correção dado pela altitude local
FDP	Função de distribuição de probabilidade
FC _T	Fator de correção para o período de retorno
G	Garantia de atendimento às demandas
IC	Intervalo de confiança
IDW	Interpolação pela ponderação do inverso do quadrado da distância
JA1	Reservatório na bacia do rio Jaguaribe na seção 1
JA2	Reservatório na bacia do rio Jaguaribe na seção 2
JA3	Reservatório na bacia do rio Jaguaribe na seção 3
JE1	Reservatório na bacia do rio Jequitinhonha na seção 1

JE2	Reservatório na bacia do rio Jequitinhonha na seção 2
JE3	Reservatório na bacia do rio Jequitinhonha na seção 3
MDA	Máximo déficit acumulado
MROS	<i>Modified Reservoir Operation Study</i>
N	Tamanho da amostra
N_f	Número de dias em que ocorre falha de atendimento da vazão prevista para regularização
P	Lâmina precipitada
Patm	Pressão atmosférica na localidade considerada
P_s	Pressão ao nível do mar
PALSAR	<i>Phase Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
Peq_{300}	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 300 mm
Peq_{400}	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 400 mm
Peq_{750}	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 750 mm
Peq_{ETR}	Vazão equivalente ao volume precipitado menos o valor da evapotranspiração real anual média da bacia
PC1	Reservatório na bacia do rio Paracatu na seção 1
PC2	Reservatório na bacia do rio Paracatu na seção 2
PC3	Reservatório na bacia do rio Paracatu na seção 3
PG1	Reservatório na bacia do rio Paraguaçu na seção 1
PG2	Reservatório na bacia do rio Paraguaçu na seção 2
PG3	Reservatório na bacia do rio Paraguaçu na seção 3
Q_a	Vazão afluente
Q_{mld}	Vazão média de longaduração
$Q_{SI,d}$	Vazão na seção de interesse no dia d
$q_{EF\ i,d}$	Vazão específica na estação fluviométrica i no dia d
$q_{mlt\ SI}$	Vazão média de longo termo específica na seção de interesse
$q_{mlt\ EFi}$	Vazão média de longo termo específica na estação fluviométrica i
Q_{reg}	Vazão regularizada
Q_p	Vazão equivalente a precipitação incidente sobre o lago do reservatório

Q_{ev}	Vazão equivalente à evaporação líquida na área inundada
R_n	Saldo de radiação
R^2	Coefficiente de determinação
RHH	Região hidrologicamente homogênea
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
R_n	Saldo diário de radiação
RJE	Reservatório na bacia do rio Jequitinhonha
RPC	Reservatório na bacia do rio Paracatu
RPG	Reservatório na bacia do rio Paraguaçu
R_s	Radiação solar incidente no reservatório
R_{TP}	Saldo de irradiância na temperatura de equilíbrio
s_e	Erro padrão
T	Período de retorno
T_a	Temperatura média do ar
T	Temperatura média mensal do ponto de orvalho
TE	Tempo de enchimento do reservatório
u_2	Velocidade do vento a 2,0 m da superfície
V	Volume do Reservatório
VM	Volume Morto
\bar{X}	Média da amostra
β	Fração da vazão média de longo termo (Q_{mli}) a ser regularizada
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar
Δ_{pl}	declividade da curva de pressão de saturação na temperatura de equilíbrio
ΔS	Saldo hídrico diário no reservatório
λ	Calor latente de vaporização
γ	Constante psicométrica
γ_1	Constante psicométrica corrigida
ρ	Peso específico da água
μ_y	Média da amostra reduzida em função do tamanho da amostra
σ_y	Desvio padrão da variável reduzida
Y_i	Variáveis reduzidas

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	18
REFERÊNCIAS	21
1 CAPÍTULO 1 - Modelo de dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando séries sintéticas com a incorporação da evaporação.....	24
RESUMO	24
1.1 INTRODUÇÃO.....	25
1.2 METODOLOGIA.....	27
1.2.1 Geração de séries sintéticas espaciais.....	28
1.2.2 Capacidade do reservatório	28
1.2.3 Área inundada.....	34
1.2.4 Procedimento de cálculo da CR considerando a perda de água por evaporação	34
1.3 ESTUDOS DE CASO E BASE DE DADOS	36
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
1.4.1 Estimativa da CR.....	46
1.4.2 Potencial de regularização	53
1.4.3 Análise da consideração do período de retorno.....	55
1.4.4 Considerações Finais	55
1.5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS	57
2 CAPÍTULO 2 - Integração do dimensionamento de reservatórios com a operação durante o período de enchimento	66
RESUMO	66
2.1 INTRODUÇÃO.....	67
2.2 METODOLOGIA.....	68
2.2.1 Dimensionamento de reservatórios	69
2.2.1.1 Capacidade do Reservatório (CR).....	69
2.2.1.2 Associação do período de retorno ao dimensionamento da CR.....	72
2.2.2 Condições de operação durante o período de enchimento	74
2.2.3 Análise do período de enchimento do reservatório	74
2.2.3.1 Tempo de Enchimento.....	74

2.2.3.2	Garantia de atendimento às demandas	75
2.2.3.3	Intervalos de confiança.....	75
2.3	ESTUDOS DE CASO E BASE DE DADOS	76
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
2.5	CONCLUSÃO.....	101
	REFERÊNCIAS	102
	CONCLUSÃO GERAL	105
	APÊNDICE	106

INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da demanda hídrica é impulsionado pelo crescimento da população, aumento das concentrações urbanas, da industrialização e, conseqüentemente, pelo aumento das demandas por alimentos e insumos agrícolas que exigem o uso da água para a irrigação durante o seu processo de produção. UNESCO (2015) estima que a demanda por água crescerá cerca de 55% até 2050. De acordo com UNEP (2016), caso seja mantida essa tendência de crescimento, a demanda por água irá exceder a disponibilidade hídrica em 40% até 2030.

A escassez de água se intensificará em áreas onde as captações de água não são conduzidas de forma sustentável, o que poderá restringir a produção agrícola, ameaçar os ecossistemas e afetar a renda e as oportunidades de subsistência de muitos residentes em áreas rurais e urbanas (FAO, 2012). Além disso, é esperado que as alterações climáticas impactem o ciclo da água, alterando os padrões de precipitação e afetando a disponibilidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (Kløve et al., 2014). Segundo esses autores, o aumento da variabilidade da precipitação pode influenciar o fluxo de água nos sistemas de superfície e as taxas de recarga e descarga de aquíferos. Diversos pesquisadores apontam como consequência uma tendência de aumento da frequência de eventos extremos, tanto de cheias como de secas preocupando a comunidade científica, os governos e a população de modo geral (Cook et al., 2014; IPCC, 2014; Assis et al., 2018; Hao et al., 2018).

Dentro deste contexto, a gestão de recursos hídricos é de suma importância para que se possa compatibilizar as demandas pelo uso da água com a disponibilidade hídrica. Quando a disponibilidade natural de água não é suficiente para atender as demandas, a regularização das vazões através da construção de reservatórios pode vir a ser uma alternativa plausível. Basicamente, um reservatório opera regulando as vazões afluentes que variam irregularmente ao longo do tempo, para fornecer vazões a uma taxa regular que deve ser determinada pela demanda de água para um ou mais usos (suprimento de água, irrigação, energia hidrelétrica), a partir do armazenamento temporário do excedente nos períodos em que as vazões afluentes excedem as vazões de saída do reservatório (Koutsoyiannis, 2005).

Essa prática permite o aumento da disponibilidade hídrica para uma magnitude de valor menor ou igual a vazão média de longo termo (Mathlouthi and Lebdi 2008; Chen et al. 2010), possibilitando que as outorgas de direito de uso da água sejam concedidas para um maior número de usuários, uma vez que os critérios de outorga a fio d'água são

fundamentados em um percentual pré-estabelecido das vazões mínimas observados em períodos de estiagem (Nunes e Pruski, 2015; Oliveira et al. 2013).

Dessa forma, os reservatórios configuram-se como estruturas de grande relevância para a gestão e planejamento de recursos hídricos sob condições de escassez hídrica, pois eles são úteis para o aumento da disponibilidade de água nos períodos de seca (Wisser et al., 2010), além de servir como uma estrutura de amortecimento das vazões de pico durante os períodos chuvosos.

Apesar de proporcionar inúmeros benefícios a construção de reservatórios interfere expressivamente no meio físico e social da região ao seu entorno gerando diversos impactos, tais como: inundação de grandes áreas forçando o deslocamento das populações; alteração do regime hidrológico de lóxico para lêntico o que, conseqüentemente, afeta diretamente no ciclo de vida da biota aquática, no processo de sedimentação e na eutrofização do curso d'água (Li et al., 2013; Santos et al., 2017; Song et al., 2016; Wang et al. 2012).

Além de todos os impactos mencionados, vale ressaltar que a construção de um reservatório se caracteriza como um projeto de elevado custo e, portanto, deve ser planejado de forma a minimizar os impactos negativos e maximizar os positivos. O dimensionamento da capacidade do reservatório é uma etapa fundamental neste tipo de projeto, pois o subdimensionamento do volume a ser armazenado resulta em não atendimento das demandas requeridas pelos usuários de jusante, enquanto que o superdimensionamento pode aumentar expressivamente a área de inundação, os impactos ambientais e o custo da obra. A dimensão ótima para um reservatório deverá ser considerada em função de um compromisso entre o custo de investimento na sua implantação e custo da escassez de água durante os períodos secos, sendo o primeiro custo diretamente proporcional e o segundo inversamente proporcional ao tamanho do reservatório (Tucci, 2002).

Em teoria os reservatórios poderiam regularizar uma vazão máxima igual a vazão média de longo termo (Q_{mlt}), entretanto, devido as perdas ocorridas por evaporação de água na superfície do lago, a vazão regularizada não atinge o valor da Q_{mlt} (Collischoon e Dornelles, 2015). De acordo com Friedrich et al. (2018), a evaporação é um componente chave no balanço de água de reservatórios sob regimes climáticos distintos, uma vez que dependendo da localização em que se encontra o reservatório, as perdas por evaporação podem, até mesmo, superar a demanda pelo uso da água (Wurbs e Ayla, 2014).

Segundo Fayaed e El-Shafie (2013) a quantificação da perda de água por evaporação na superfície livre do lago constitui um desafio no processo de dimensionamento da

capacidade de armazenamento de reservatórios. Ainda assim, Texeira e Mariño (2002) consideram que a contabilização da lâmina de água evaporada em reservatórios é crucial tanto na etapa de projeto como na de operação.

Apesar disso, a importância da evaporação de reservatórios é, em geral, subestimada em estudos hidrológicos, em razão dos desafios práticos e logísticos e das grandes incertezas relacionadas à sua estimativa (U.S. Bureau of Reclamation, 2012). Quando se subestima ou se despreza a evaporação do balanço de massa no reservatório, tende-se a subestimar a capacidade deste, o que não é desejável sob o ponto de vista da segurança hídrica.

Tendo em vista as questões apresentadas acima o presente trabalho aborda aspectos relacionados ao aprimoramento das técnicas relacionadas ao dimensionamento de reservatórios e a operação destes durante a fase de enchimento. Para tanto, o estudo foi dividido em dois capítulos escritos para formato de artigos científicos:

- Capítulo 1: Modelo de dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando séries sintéticas com a incorporação da evaporação;
- Capítulo 2: Integração do dimensionamento de reservatórios com a operação durante o período de enchimento

No primeiro capítulo é discutido a importância da consideração da perda de água por evaporação durante o processo de dimensionamento da capacidade do reservatório. Nesse artigo propõe-se um aperfeiçoamento do modelo, desenvolvido por Rodrigues (2017) para a determinação da capacidade de reservatórios em seções da hidrografia não monitoradas por estações fluviométricas a partir da geração de séries sintéticas. A incorporação da parcela referente a evaporação foi contabilizada em base diária. Além disso, também são discutidos aspectos relativos à seleção do método para a estimativa da evaporação e à capacidade máxima de regularização que é influenciada pelo potencial de perda de água por evaporação, sendo este distinto para diferentes localizações.

O segundo capítulo trata de aspectos relativos à operação de reservatórios durante a sua fase de enchimento. Para diferentes condições de operação durante o período de enchimento, analisou-se a variação do tempo de enchimento e a garantia de atendimento às demandas projetadas em função do ano de início considerado.

REFERÊNCIAS

Assis LC, Calijuri L, Silva DD, Rocha EO, Fernandes ALT, Silva FF (2018) A model-based site selection approach associated with regional frequency analysis for modeling extreme rainfall depths in MinasGerais state, Southeast Brazil. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 32(2): 469–484.

Chen H, Yang L, Yang ZF, Yu SW (2012). Sustainable reservoir operations to balance upstream human needs and downstream lake ecosystem targets. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. *Procedia Environmental Science* 13: 1444-1457. Doi:10.1016/j.proenv.2012.01.136.

Collischonn W, Dornelles F (2015) *Hidrologia para engenharias e ciências ambientais*. Editora ABRH, Porto Alegre.

Cook BI, Smerdon JE, Seager R, Coats S (2014) Global warming and 21st century drying. *Clim Dyn* 43:2607– 2627

Fayaed SS, El-Shafie A (2013). Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stoch Environment Research Risk Assessment*, 27: 1751-1772.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. *Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security*. FAO Water Reports, no. 38. Rome.

Friedrich K, Grossman RL, Huntington J, Blanken PD, Lenters J, Holman KD, Gochis D, Livneh B, Prairie J, Skeie E, Healey NC, Dahm K, Pearson C, Finnessey T, Hook SJ, Kowalski T (2018). Reservoir evaporation in the western United States – Current science, challenges and future needs. *American Meteorological Society*.

Hao, Z., Singh, V.P. , Hao, F. (2018). Compound extremes in hydroclimatology: A review. *Water* 10, 718.

IPCC, 2014. Climate change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.

Kløve B, Ala-Aho P, Bertrand G, Gurdak JJ, Kupfersberger H, Kværner J, Muotka T, Mykrä H, Preda E, Rossi P, Uvo CB, Velasco E, Pulido-Velazquez M (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518 (PB), 250-266.

Koutsoyiannis D (2005) Reliability concepts in reservoir design (SW-776). *The Encyclopedia of Water* 1-17.

Li J, Dong S, Peng M, Yang Z, Liu S, Li X, Zhao C (2013). Effects of damming on the biological integrity of fish assemblages in the middle Lancang-Mekong River basin. *Ecol. Indic.* 34: 94–102.

Mathlouthi M, Lebdi F (2008) Event in the case of a single reservoir: the Ghe`zala dam in Northern Tunisia. *Stoch Environ Res Risk Assess* 22(4):513–528.

Nunes AA, Pruski FF (2015) The effect of reservoir on water availability. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 20:7–15.

Oliveira JR, Pruski FF, Nunes AA (2013). Otimização do Aproveitamento da Disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 18(4): 157-172.

Rodrigues NC (2017). Dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização de vazões utilizando séries sintéticas. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Santos RMB, Fernandes LFS, Cortes RMV, Varandas SGP, Jesus JJB, Pacheco FAL(2017). Integrative assessment of river damming impacts on aquatic fauna in a Portuguese reservoir. *Science of the Total Environment*, 601-602: 1108-1118.

Song MY, Lee WO, Kim KH, Park YS, Bae MJ (2016). The impact of the Goesan dam on fish communities up-and downstream. *Ann. Limnol. Int. J. Limnol.*, 52: 151–162.

Texeira AS, Mariño MA (2002). Coupled Reservoir Operation-Irrigation Scheduling by Dynamic Programming.

Tucci CEM (2002). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 4.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2016). Options for decoupling economic growth from water use and water pollution.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2015). *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. Água para um mundo sustentável*.

United State Bureau of Reclamation (USBR)(2012): Colorado River Basin water supply and demand study. Study Rep., 130 pp., www.usbr.gov/lc/region/programs/crbstudy/finalreport/index.html.

Wisser D, Frohling S, Douglas EM, Fekete BM, Schumann AH, Vörösmarty CJ (2010). The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production – A global-scale analysis. *Journal of Hydrology*, 384: 264-275. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.032.

Wang QG, Du YH, Su Y, Chen KQ (2012). Environmental Impact Post-Assessment of Dam and Reservoir Projects: Review. *Procedia Environmental Sciences*. 13:1439–1443.

Wurbs, Ayala RA (2014) Reservoir evaporation in Texas, USA. *J. Hydrol.*, 510: 1–9, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.12.011.

1 CAPÍTULO 1 - Modelo de dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando séries sintéticas com a incorporação da evaporação

RESUMO

Os reservatórios de regularização operam armazenando o excedente de água nos períodos chuvosos liberando-o gradativamente durante o período seco, dessa forma aumenta-se a disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem. A vazão máxima de regularização é limitada a vazão média de longo termo (Q_{mlt}), estando o potencial de regularização de um reservatório relacionado com as perdas por evaporação ocorridas na superfície da área inundada. O presente trabalho teve como objetivo aperfeiçoar o modelo *Determination of Reservoir Capacity using Synthetic Series*(DRECASS), que permite a determinação da Capacidade do Reservatório (CR) em seções da hidrografia não monitoradas por estações fluviométricas a partir da geração de séries sintéticas, através da incorporação da perda de água por evaporação na superfície do lago considerando a variação diária da área inundada, possibilitando avaliar o potencial de regularização com as condições climáticas da região de interesse. A metodologia proposta a partir desse aperfeiçoamento foi denominada como DRECASS-EV.O desenvolvimento metodológico deste trabalho se fundamenta na hipótese de que o potencial de regularização depende do potencial de evaporação na região. Para a estimativa da perda de água por evaporação utilizou-se os métodos de Penman (1948), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), Morton (1983) e deBruin-Keijman (1979) com o objetivo de avaliar o impacto causado no dimensionamento dos reservatórios a partir da consideração de diferentes metodologias. Para estudo de caso realizou-se o dimensionamento de reservatórios posicionados em cursos de água localizados nas bacias hidrográficas dos rios Paraguaçu, Paracatu, Jequitinhonha e Jaguaribe.Assim, obteve-se o maior potencial de regularização de vazões para os reservatórios dimensionados na bacia do rio Paracatu (90% da Q_{mlt}), e na sequência para os reservatórios nas bacias dos rios Jequitinhonha (70 a 90% da Q_{mlt}), Paraguaçu (50% da Q_{mlt}) e Jaguaribe (10 a 20% da Q_{mlt}). Em relação ao método considerado para a estimativa de evaporação, Penman, Linacre e deBruin-Keijman apresentam-se como alternativas mais seguras, já os de Kohler e Morton devem ser utilizados com muita cautela, pois apresentaram tendência de subestimativa dos valores de CR pondo em risco o atendimento das demandas pelo uso da água.

1.1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento da população e o aumento dos níveis de consumo acarretaram uma pressão pelos recursos hídricos sem precedentes (Dosdogru et al., 2020). De acordo com UNEP (2016), caso seja mantida essa tendência de crescimento, a demanda por água irá exceder a disponibilidade hídrica em 40% até 2030.

A escassez de água se intensificará em áreas onde as captações de água não são conduzidas de forma sustentável, o que poderá restringir a produção agrícola, ameaçar os ecossistemas e afetar a renda e as oportunidades de subsistência de muitos residentes em áreas rurais e urbanas (FAO, 2012). Além disso, é esperado que as alterações climáticas impactem o ciclo da água, alterando os padrões de precipitação e afetando a disponibilidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (Kløve et al., 2014).

Em condições em que a disponibilidade hídrica natural em um curso de água não é suficiente para atender as demandas dos usuários, a regularização das vazões através da construção de reservatórios torna-se uma alternativa plausível. Essa prática permite o aumento da disponibilidade hídrica para uma magnitude de valor correspondente a uma parcelada vazão média de longo termo (Qmlt) (Mathlouthi and Lebdi 2008; Chen et al. 2010), possibilitando que as outorgas de direito de uso da água sejam concedidas para um maior número de usuários, uma vez que os critérios de outorga a fio d'água são fundamentados em um percentual pré-estabelecido das vazões mínimas observados em períodos de estiagem (Nunes e Pruski, 2014; Oliveira et al. 2013), enquanto que em casos de regularização, a vazão de referência para a outorga passa a ser um percentual da vazão média de longo termo que é regularizada.

Dessa forma, os reservatórios configuram-se como estruturas de grande relevância para a gestão e planejamento de recursos hídricos sob condições de escassez hídrica, pois eles são úteis para o aumento da disponibilidade de água nos períodos de seca (Wisser et al., 2010), além de servirem como uma estrutura de amortecimento das vazões de pico durante os períodos chuvosos.

Basicamente, um reservatório opera regulando as vazões afluentes que variam irregularmente ao longo do tempo para fornecer vazões a uma taxa de regularização visando atender às expectativas de demandas dos setores usuários, porém, essa taxa deve ser definida a partir do potencial de regularização local considerando os fatores climáticos envolvidos no sistema hidrológico.

Em teoria os reservatórios poderiam regularizar uma vazão máxima igual a vazão média de longo termo (Q_{mlt}), entretanto, devido as perdas ocorridas por evaporação de água na superfície do lago, a vazão regularizada não atinge o valor da Q_{mlt} (Collischonn e Dornelles, 2015). De acordo com Friedrich et al. (2018), a evaporação é uma componente chave no balanço de água de reservatórios sob regimes climáticos distintos, uma vez que dependendo da localização em que se encontra o reservatório, as perdas por evaporação podem, até mesmo, superar a demanda pelo uso da água (Wurbs e Ayla, 2014). Em uma perspectiva global, estima-se que a perda por evaporação em reservatórios é superior ao consumo de água pelos usos domésticos e industrial (Zhao e Gao, 2019). Em regiões áridas e semi-áridas há estudos que estimam que a perda por evaporação pode representar entre 30 a 50% do volume armazenado (Maestre-Valero et al., 2013; Majidi et al., 2015; Okoniewska and Szuminska, 2020), enquanto na região nordeste de Xinjian na China (Shi et al., 2016) e em Queensland in Australia (Craig et al., 2005) estimou essa perda em, aproximadamente, 40% do volume armazenado. Na região do Texas nos Estados Unidos, estima-se que a evaporação equivale entre 40 a 60% das saídas de água no reservatório (Friedrich et al., 2018).

Nesse contexto, a quantificação da perda de água por evaporação na superfície livre do lago constitui um desafio tanto no processo de dimensionamento da capacidade de armazenamento quanto na fase de operação de reservatórios (Althoff et al., 2019; Fayaed e El-Shafie, 2013).

Ainda assim, a importância da evaporação de reservatórios é, em geral, subestimada em estudos hidrológicos, em razão dos desafios práticos e logísticos e das grandes incertezas relacionadas à sua estimativa (USBR, 2012). Quando se subestima ou se despreza a evaporação do balanço de massa no reservatório, tende-se a subestimar o dimensionamento deste, o que não é desejável sob o ponto de vista da segurança hídrica.

A estimativa da evaporação em reservatórios é de difícil obtenção quando comparada aos demais componentes do balanço hídrico (Coelho et al., 2018). Existem diversos métodos para calcular a lâmina evaporada em reservatórios que podem levar a conclusões distintas, sendo os métodos de Penman (1948), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), Morton (1983) e deBruin-Keijman (1979) frequentemente referenciados na literatura. Para facilitar a leitura, no presente trabalho referencia-se tais métodos apenas pelo nome de seus autores.

O método de Penman estima a evaporação com base em uma combinação de conceitos relativos à transferência de massa e ao saldo de radiação. O método de Kohler constitui em uma modificação da equação de Penman a partir de observações de tanques e lagos e

considera que o saldo de radiação na superfície para qualquer comprimento de onda deriva em função da temperatura e radiação global (Pereira et al., 1997). Linacre (1993) estima a evaporação em superfícies líquidas com base em dados geográficos de latitude e altitude, na temperatura do ar, na velocidade do vento e na precipitação. Morton (1983) se baseia na hipótese de que variações da evaporação potencial e a evaporação do lago são complementares, devido às variações da disponibilidade de água. O método de deBruin-Keijman utiliza uma relação empírica para estimativa da constante de Bowen na dedução da equação, sendo essa constante superestimada em relação à utilizada no método de Penman.

Outra dificuldade enfrentada no dimensionamento de reservatórios se refere a disponibilidade de dados fluviométricos. Em condição ideal deveria se dispor de séries de vazão observadas suficientemente longas e representativas. Entretanto, na prática este requisito é dificilmente atendido, principalmente para os casos em que as seções de rio estão associadas à pequenas áreas de drenagem (Spence et al. 2013). Visando superar essa dificuldade, Rodrigues (2017) desenvolveu uma metodologia para a determinação da capacidade de reservatórios em seções da hidrografia não monitoradas por estações fluviométricas a partir da geração de séries sintéticas, essa metodologia foi nomeada como “Determination of Reservoir Capacity using Synthetic Series” (DRECASS). Contudo, essa metodologia, também utilizada e validada por Ramos (2020) não incorporou aos cálculos do dimensionamento a perda de água por evaporação na superfície do lago.

Tendo em vista as questões apresentadas acima, o presente trabalho teve como objetivo aperfeiçoar o modelo DRECASS através da incorporação da perda de água por evaporação na superfície do lago considerando a variação diária da área inundada, e desta forma possibilitar a avaliação do potencial de regularização que deve variar de acordo com as condições climáticas da região considerada para dimensionamento. A metodologia proposta a partir desse aperfeiçoamento foi denominada como DRECASS-EV.

Para a aplicação da metodologia considerou-se o dimensionamento de reservatórios em quatro bacias hidrográficas brasileiras submetidas a regimes climáticos distintos: bacias dos rios Paracatu, Jequitinhonha, Paraguaçu e Jaguaribe.

1.2 METODOLOGIA

Na sequência são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da metodologia proposta.

1.2.1 Geração de séries sintéticas espaciais

Os reservatórios foram projetados para posições da hidrografia não monitoradas por estações fluviométricas. As séries de vazão para tais locais foram obtidas pela equação 1 que corresponde ao método de geração de séries sintéticas espaciais apresentado por Rodrigues (2017) no trabalho que desenvolveu o modelo DRECASS.

$$Q_{SI,d} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[q_{EFi,d} \left(\frac{q_{mlt_{SI}}}{q_{mlt_{EFi}}} \right) \right]}{n} \right\} A_{SI} \quad (1)$$

Em que: $Q_{SI,d}$ é a vazão na seção de interesse no dia d em $m^3 s^{-1}$; d é o dia; n é o número de estações fluviométricas consideradas; $q_{EFi,d}$ é a vazão específica na estação fluviométrica i no dia d em $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{SI}}$ é a vazão média de longo termo específica na seção de interesse (dado regionalização) em $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{EFi}}$ é a vazão média de longo termo específica na estação fluviométrica i (dado observado) em $m^3 s^{-1} km^{-2}$; e A_{SI} é a área de contribuição da seção de interesse em km^2 .

1.2.2 Capacidade do reservatório

Para o dimensionamento da capacidade do reservatório (CR) contabilizou-se diariamente o balanço entre os fluxos de entrada e de saída do reservatório por meio da equação 2.

$$\Delta S = Qa - Q_{reg} + Q_p - Q_{ev} \quad (2)$$

Em que, ΔS é o saldo hídrico diário no reservatório, Qa é a vazão afluente em $m^3 s^{-1}$; Q_{reg} é a vazão a ser regularizada em $m^3 s^{-1}$; Q_p é a vazão equivalente a precipitação incidente sobre o lago do reservatório em $m^3 s^{-1}$ e Q_{ev} é a vazão equivalente à evaporação na área inundada em $m^3 s^{-1}$.

O saldo hídrico pode assumir tanto valor positivo quanto negativo. A simulação para o dimensionamento de reservatórios tem como ponto de partida a consideração de que o reservatório começa cheio, assim, ao longo da análise contabiliza-se e acumula-se os déficits diários (valores de ΔS negativos) que devem ser convertidos para unidade de volume. Esses déficits representam a utilização das reservas de água armazenadas para o suprimento das

demandas hídricas. Logo, a Capacidade do Reservatório (CR), ou seja, o volume destinado ao acúmulo de água para fins de regularização de vazões, deverá ser equivalente ao Máximo Déficit Acumulado (MDA).

Como vazão afluyente, Q_a , considerou-se as vazões diárias calculadas na seção de interesse ($Q_{SI,d}$) pela equação 1. Para o cálculo de Q_P considerou-se a equação 3 que estima a vazão equivalente a precipitação incidente sobre o lago por meio da lâmina precipitada sobre o espelho de água e da área inundada:

$$Q_P = \frac{P A_d}{86,4} \quad (3)$$

Em que, Q_P é a vazão equivalente a precipitação incidente sobre o lago do reservatório em $m^3 s^{-1}$; P é a lâmina precipitada sobre o lago em mm e A_d é a área inundada referente ao dia d em km^2 .

A lâmina precipitada sobre o lago foi obtida a partir das séries de precipitação mensal média para a área de drenagem dos reservatórios analisados, para tanto utilizou-se o método de interpolação da Ponderação do Inverso da Distância (Inverse Distance Weighting - IDW), sendo este método recomendado para a espacialização de dados de chuva como apresentado nos trabalhos de Almeida (2017), Chen e Liu (2012) e Kurtzman et al. (2009). As potências iguais a 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram testadas e os resultados que apresentaram o menor valor da raiz quadrada do erro médio foram selecionados, conforme indica a metodologia apresentada por Almeida (2017).

Por meio da equação 4 calculou-se a vazão equivalente à evaporação na área inundada.

$$Q_{ev} = \frac{EV A_d}{86,4} \quad (4)$$

Em que, EV é a lâmina evaporada em $mm d^{-1}$ e A_d é a área inundada referente ao dia d em km^2 .

Com o objetivo de avaliar o impacto no dimensionamento de reservatórios ao considerar diferentes metodologias para a estimativa da evaporação utilizou-se cinco métodos consagrados na literatura para o cálculo da lâmina evaporada: Penman (1948), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), Morton (1983) e deBruin-Keijman (1979). Portanto, para cada condição

de dimensionamento simulada determinou-se cinco valores de CR correspondente a consideração de cada um desses métodos.

A estimativa da evaporação pelo método de Penman (1948) é uma solução analítica das equações do balanço de energia e da transferência de massa que pode ser expressa por uma única equação como apresentado pela equação 5.

$$E_v = 2,592 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda \rho} \right) + \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) 0,26 (0,5 + 0,54 u_2)(e_s - e_a) \quad (5)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm mês^{-1}), Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é o saldo de radiação (W m^{-2}), λ é o calor latente de vaporização (MJ Kg^{-1}), γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), u_2 é a velocidade do vento a dois metros de altura, e_s é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar (mbar); ρ é o peso específico da água (kg m^{-3}).

A equação proposta por Linacre (1993), apresentada na equação 6, é uma parametrização do método de Penman que requer apenas dados de latitude, altitude, precipitação, velocidade do vento, temperatura média do ar e dados do balanço de radiação.

$$E_v = (0,15 + 0,00042T + 10^{-6}h)[0,8R_s - 40 + 2,5F u(T_a - T_d)] \quad (6)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm mês^{-1}), T_a é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), R_s é a radiação solar incidente no reservatório (W m^{-2}), F é o fator de correção dado pela altitude local (adimensional), u é a velocidade do vento a 2,0 m da superfície, h é altitude local (m) e T_d é a temperatura média mensal do ponto de orvalho ($^\circ\text{C}$).

O método de Kohler et al. (1955) também foi derivado da equação de Penman (1948) a partir da observação da evaporação ocorrida em vários tanques e lagos. Esse método pode ser expresso pela equação 7.

$$E_v = 0,7 \left(\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma_1} + \frac{\gamma_1 E_a}{\Delta + \gamma_1} \right) \quad (7)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm d^{-1}), E_a é a evaporação dada pela equação aerodinâmica (mm d^{-1}), R_n é saldo diário de radiação medido sobre a superfície de água livre, em equivalente de lâmina de água evaporada (mm d^{-1}), γ_1 é a constante psicométrica

corrigida (kPa/°C) e Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa/°C).

Morton (1983) propôs o modelo CRLE (*Complementary Relationship Lake Evaporation*) que se baseia na relação de complementariedade entre a evapotranspiração real e potencial. Esse modelo é expresso pela equação 8.

$$E_v = 13 + 1,12 \left(1 + \frac{0,66 \frac{P_{atm}}{P_s}}{\Delta_{pl}} \right) R_{TP} \quad (8)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm d⁻¹), P_{atm} é a pressão atmosférica na localidade considerada (mbar), P_s é a pressão ao nível do mar (mbar), Δ_{pl} é a declividade da curva de pressão de saturação na temperatura de equilíbrio (mbar/°C) e R_{TP} é o saldo de irradiância na temperatura de equilíbrio (W m⁻²).

A estimativa pelo método de deBruin-Keijman (1979), equação 9, consiste numa relação semi-empírica que determina a taxa de evaporação em função da umidade do ar acima do corpo de água, do calor armazenado no reservatório e da constante psicrométrica.

$$E_v = \left(\frac{\Delta}{0,85\Delta + 0,63\gamma} \right) \frac{R_N}{\lambda \rho} 86,4 \quad (9)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm d⁻¹), Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa/°C), γ_1 é a constante psicrométrica corrigida (kPa/°C), saldo diário de irradiação medido sobre a superfície de água livre (Wm⁻²), λ é o calor latente de vaporização (MJkg⁻¹) e ρ é o peso específico da água (kg/m³).

Em razão das séries de dados meteorológicos serem escassas e apresentarem um alto percentual de falhas, utilizou-se os dados correspondentes às normais climatológicas referentes aos anos 1981 a 2010 que são disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A vazão a ser regularizada foi definida a partir da consideração de demandas fixas como expressa na equação 10.

$$Q_{reg} = \beta Q_{mtl} \quad (10)$$

Em que, β é a fração da vazão média de longo termo (Q_{mlt}) a ser regularizada.

Para cada um dos valores de β considerados foi avaliado se os déficits foram compensados dentro do próprio ano (regra de operação anual) ou se foram transferidos para o próximo (regra de operação plurianual). Ao considerar a regra de operação anual, obteve-se para cada ano o maior volume de déficit acumulado gerando-se, portanto, uma série de valores de capacidade do reservatório para a qual aplicou-se uma função de distribuição de probabilidade (FDP) a fim de se obter um valor de CR associado a um determinado período de retorno (T).

No caso de operação plurianual, todos os anos da série de dados foram analisados conjuntamente obtendo-se o maior volume de déficit acumulado da série. Para a associação de um período de retorno a esse modo de operação utilizou-se a metodologia desenvolvida por Nunes e Pruski (2015), *Modified Reservoir Operation Study* (MROS), na qual gera-se séries sintéticas temporais por meio da realocação dos anos como exemplificado na Figura 1.1. Para cada série gerada obteve-se um valor de CR resultando-se, ao final, em uma série de valores de CR para a qual também se aplicou uma FDP possibilitando a associação do período de retorno ao dimensionamento.

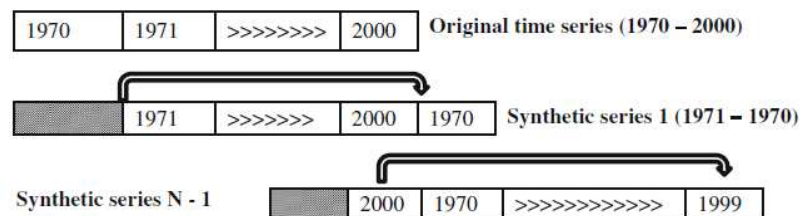


Figura 1.1 – Esquema de geração de séries sintéticas temporais

Fonte: Nunes e Pruski, 2015.

Há diversas funções de distribuição de probabilidades utilizadas para análise estatística de variáveis hidrológicas, contudo, a avaliação da melhor função não faz parte do objetivo deste trabalho. Portanto, assim como Nunes e Pruski (2015), optou-se por utilizar a FDP de Gumbel, uma vez que esta função é frequentemente utilizada para estudos hidrológicos (Abreuet *al.*, 2018; Bescownet *al.*, 2015; Brannum 2021; Junqueira Junior *et al.*, 2015; Samantaray e Sahoo, 2020) visto que é capaz de explicar os valores máximos com uma inclinação positiva (USDA, 2007).

Para a aplicação da FDP de Gumbel que permite associar o valor de CR a um período de retorno utilizou-se o método apresentado em Kite (1988) que propõe que o valor do fator de frequência aplicado sobre a variável reduzida seja calculado como apresentado na equação 11.

$$K = \frac{b - \mu_y}{\sigma_y} \quad (11)$$

Sendo:

$$b = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (12)$$

Em que, b é a variável reduzida, μ_y é a média da amostra reduzida em função do tamanho da amostra, σ_y é o desvio padrão da variável reduzida, T é o período de retorno.

O μ_y e o σ_y são obtidos sobre a série das variáveis reduzidas \mathcal{Y}_i , que são função do tamanho da amostra N , como expresso na equação 8.

$$\mathcal{Y}_i = -\ln\left(-\ln\left(\frac{N + 1 - i}{N + 1}\right)\right) \quad (13)$$

Logo:

$$\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N \mathcal{Y}_i}{N} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^N (\mathcal{Y}_i - \mu_y)^2}{N} \quad (15)$$

A aplicação da FDP de Gumbel pressupõe a independência dos dados. Apesar dessa característica não ser verificada em muitos casos práticos, ela é comumente admitida em estudos em razão de facilitar os cálculos fornecendo resultados próximos aos que seriam obtidos caso de a independência dos dados fosse considerada (Belitsky e Moreira, 2007).

Nunes e Pruski (2015) propuseram um fator de correção para o período de retorno de interesse, uma vez que há uma tendência em se obter valores repetidos de CR ao utilizar o modelo de geração de séries sintéticas com base na realocação de anos conforme apresentado

na Figura 1.1. Esse fator de correção considera a relação entre o valor de capacidade do reservatório estimado pela distribuição de Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série, como expresso na equação 16.

$$FC_T = \frac{CR_T}{CR_{TN}} \quad (16)$$

Em que, FC_T é o fator de correção para o período de retorno T de interesse (adimensional), CR_T é a capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T de interesse (hm^3), CR_{TN} capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série (hm^3).

1.2.3 Área inundada

Para a conversão das lâminas precipitadas e evaporadas em unidade de vazão foi necessário ter o conhecimento da área inundada diária. Esta área foi obtida através de uma equação potencial ajustada pelo método dos mínimos quadrados que descreve o valor de área em função do volume do reservatório ($A = f(V)$). Para extração das informações de área inundada e volume correspondente utilizou-se como base o modelo digital de elevação Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado a partir do produto RTC (Radiometrically Terrain-Corrected), com resolução de 12,5 m, proveniente da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).

Para a obtenção do volume diário presente no reservatório procedeu-se previamente o dimensionamento da CR desconsiderando a perda de água por evaporação, como descrito no item subsequente.

1.2.4 Procedimento de cálculo da CR considerando a perda de água por evaporação

Na Figura 1.2 são apresentadas as etapas para a obtenção de CR considerando a perda de água por evaporação.

Antes da incorporação da perda de água por evaporação procedeu-se um primeiro dimensionamento do reservatório por meio dos procedimentos apresentados nos itens 1.2.1 e 1.2.2, porém os termos relativos às vazões equivalentes à precipitação e evaporação (Q_P e Q_{ev}) foram desconsiderados da Equação 2. Nesta ocasião obteve-se um primeiro valor de CR,

denominado como CR1'. Posteriormente foi somado ao CR1' o valor equivalente ao volume morto (VM) do reservatório, o resultado dessa soma foi denominado como CR1, que corresponde ao primeiro dimensionamento do reservatório desconsiderando os fatores associados a perda por evaporação e a precipitação direta sobre o lago.

Um segundo dimensionamento foi realizado considerando que no primeiro dia de simulação o reservatório estaria cheio com o volume equivalente a CR1. Os procedimentos para o dimensionamento foram os mesmos utilizados para a obtenção do CR1, entretanto, dessa vez considerou-se todos os termos da Equação 2. Para esse segundo dimensionamento atribui-se para a capacidade do reservatório determinada a nomenclatura CR2'. Somando o valor de CR2' ao VM obteve-se o CR2. Dessa forma, o valor de CR2 será maior do que o valor de CR1, uma vez que ao se contabilizar a saída de água por evaporação, torna-se necessário armazenar um maior volume de água para suprir as demandas. Assim, a área inundada relativa ao segundo dimensionamento é maior do que a área relativa ao primeiro dimensionamento. Por este motivo fez-se n dimensionamentos sucessivos considerando o mesmo procedimento utilizado para calcular o CR2 até que os valores da capacidade do reservatório se tornassem convergentes. Como critério de convergência adotou-se: $CR_n - CR_{n-1} < 0,01 \text{ hm}^3$.

Ressalta-se que em talvegues mais encaixados no relevo os valores de CRs calculados tendem a estabilizar mais rápido, uma vez que o incremento de área correspondente à sobrelevação do nível de água no reservatório passa a ser pouco expressivo a partir de uma determinada elevação, resultando em pequena variação de perdas de água por evaporação e, conseqüentemente, pequenas divergências entre os dimensionamentos de CR a partir de rodadas consecutivas.

O dimensionamento do volume morto deve considerar a estimativa de sedimentos acumulados ao longo da vida útil do reservatório (Koutsoyiannis, 2005), entretanto este dimensionamento não faz parte dos objetivos deste trabalho. Assim, utilizou-se como referência a publicação da FAO (2011) intitulada "Manual sobre pequenas barragens de terra" na qual recomenda-se destinar 5% da capacidade total de armazenamento para o VM. Neste trabalho convencionou-se como VM 10% do volume de CR1', uma vez que CRn será, certamente, maior do que CR1'.

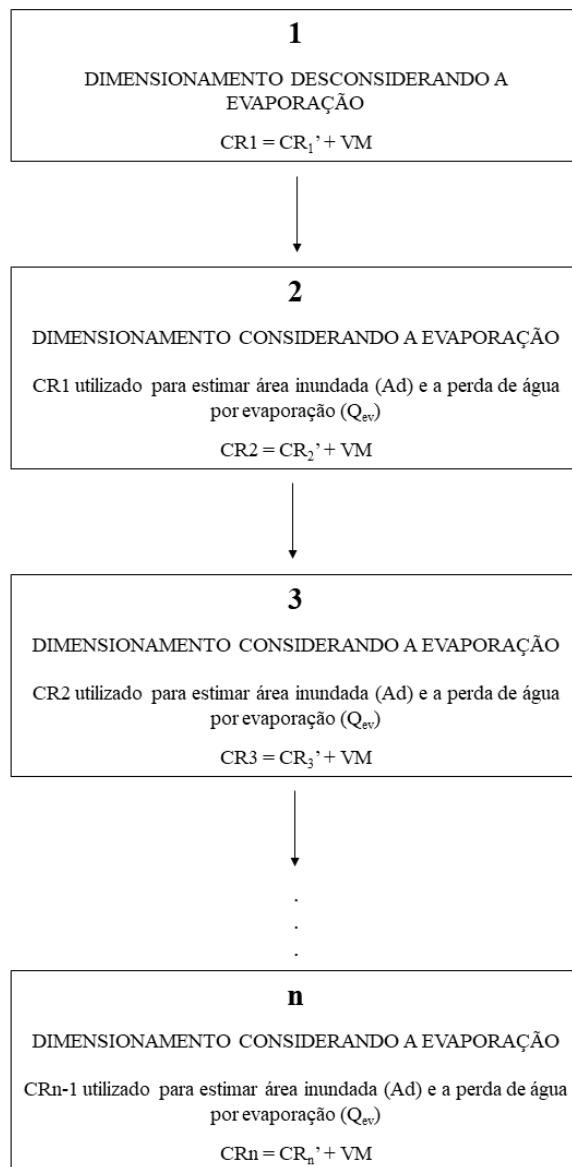


Figura 1.2 - Etapas para o cálculo da capacidade do reservatório considerando a perda de água por evaporação no lago

1.3 ESTUDOS DE CASO E BASE DE DADOS

Com o objetivo de testar os aprimoramentos propostos a partir da consideração da perda de água por evaporação no dimensionamento de reservatórios de regularização selecionou-se seções de cursos de água localizadas em quatro bacias hidrográficas com diferentes regimes climáticos, sendo elas as bacias dos rios Paracatu, Jequitinhonha, Paraguaçu e Jaguaribe (Figura 1.3).

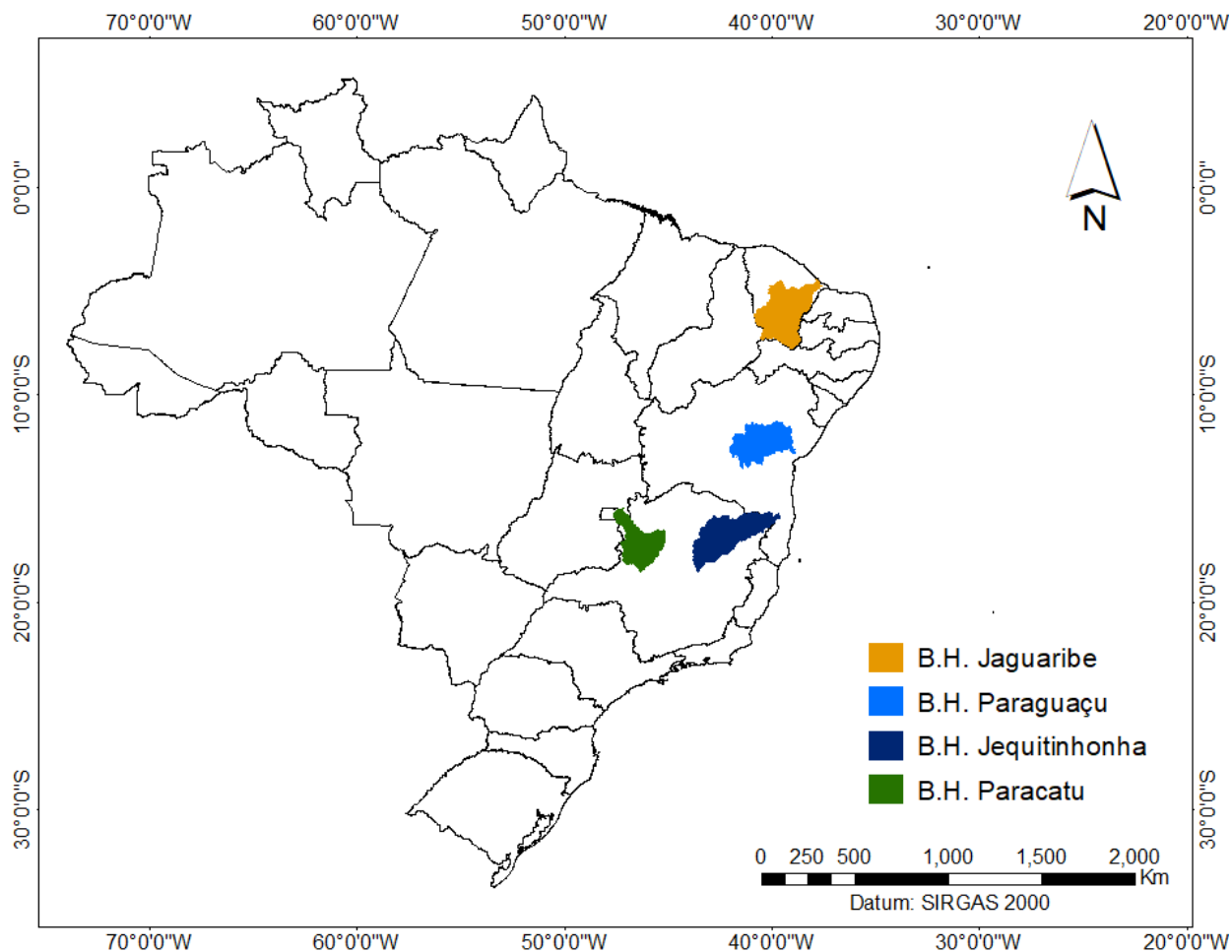


Figura 1.3 – Mapa de localização das bacias hidrográficas estudadas

A bacia do rio Paracatu, situada no bioma cerrado possui clima tropical chuvoso típico, do tipo Aw (IGAM, 2006), com temperaturas elevadas e precipitação concentrada entre os meses de outubro a abril. Nessa bacia a exploração agrícola é expressiva sendo a irrigação responsável por 78% da demanda de água (Pruski et al., 2007). Nas últimas duas décadas centenas de reservatórios de pequeno porte foram construídos com finalidade de suprir a demanda de água para a agricultura (Rodrigues et al., 2012). Estudos como o de Althoff et al. (2019) reforçam a importância da consideração da perda de água por evaporação nos lagos para o dimensionamento e operação dos reservatórios nessa bacia.

A bacia do rio Jequitinhonha possui regimes climáticos que variam entre úmido e semiárido e índices pluviométricos anuais entre 600 a 1600 mm (Ferreira e Silva, 2012), sendo que as chuvas ocorrem de forma concentrada entre os meses de outubro a março. Em relação a rede fluvial, na região semiárida há uma predominância de rios intermitentes (Vieira et al., 2020), para os quais constata-se escoamento superficial logo após a ocorrência

eventos chuvosos, porém, se mantém secos na maior parte do ano. Nessa bacia, sobretudo na região do Vale do Jequitinhonha, a atividade agrícola é expressiva, sendo a irrigação uma prática necessária para a superação das adversidades climáticas. Siste et al. (2010) destaca a importância dos açudes para o armazenamento de água durante o longo período de seca para fornecimento de água com regularidade aos cultivos irrigados.

As características climáticas na bacia do rio Paraguaçu também são diversas. Na região oeste da bacia, na qual se encontra a Chapada Diamantina, assim como na região do baixo Paraguaçu que está mais próxima ao litoral, há um predomínio de clima úmido. Já na porção central da bacia (médio Paraguaçu), a qual abrange maior extensão territorial (67%), predomina o clima semiárido (Valerio et al., 2017). As atividades agrícolas são expressivas nessa bacia, sendo a maior parte das outorgas de uso da água concedidas para fins de irrigação (Gonçalves, 2014).

A bacia do rio Jaguaribe está localizada predominantemente na região do semiárido nordestino, com índice médio de precipitação de 700 mm ano⁻¹. Mais de 60% da precipitação ocorre de forma concentrada entre os meses de fevereiro a maio, este fator somado a presença de solos cristalinos em mais de 80% da área da bacia resulta na ocorrência de rios intermitentes (Campos et al., 2014). Diante desse contexto, a construção de reservatórios de regularização tornou-se essencial para o suprimento de água das populações que vivem nessa região.

Para a aplicação da metodologia proposta selecionou-se, para cada uma das bacias hidrográficas contempladas, três seções de interesse localizadas em trechos da hidrografia não monitorados por estações fluviométricas. Para tanto, buscou-se selecionar seções, dentro de uma mesma bacia hidrográfica, com magnitude de vazões e áreas de drenagem distintas visando representar o dimensionamento de reservatórios associados a diferentes ordens de grandeza.

Na Figura 1.4, 5, 6 e 7, apresentam-se os mapas de localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento dos reservatórios nas bacias dos rios Paracatu, Jequitinhonha, Paraguaçu e Jaguaribe, respectivamente.

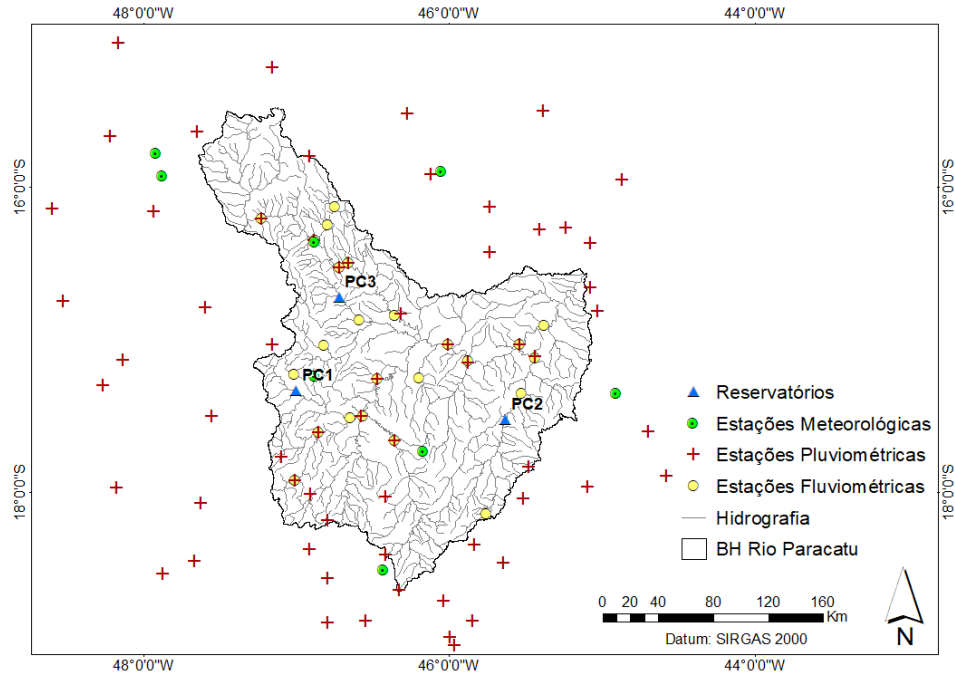


Figura 1.4 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Paracatu

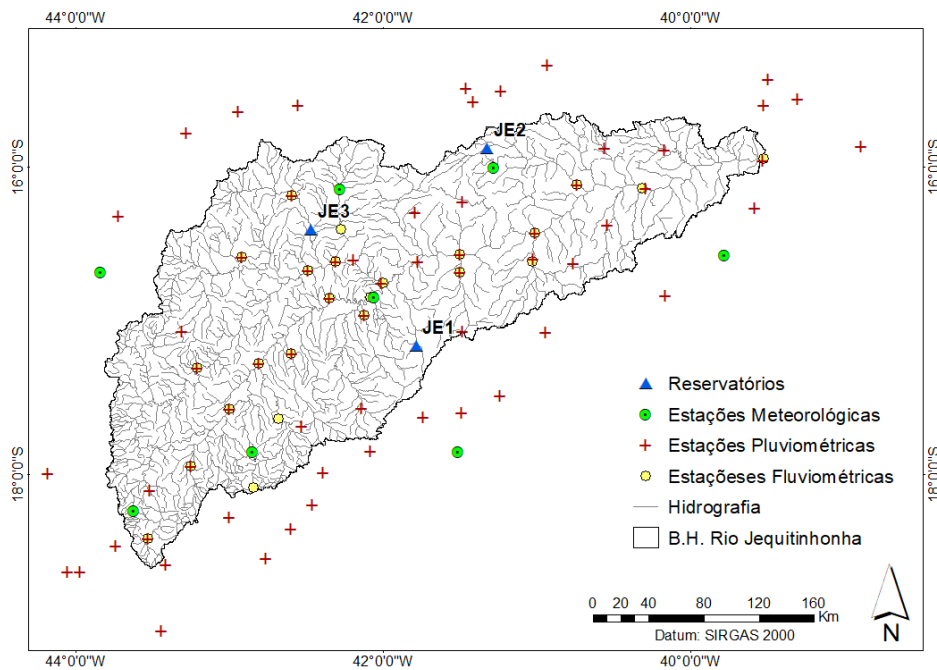


Figura 1.5 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha

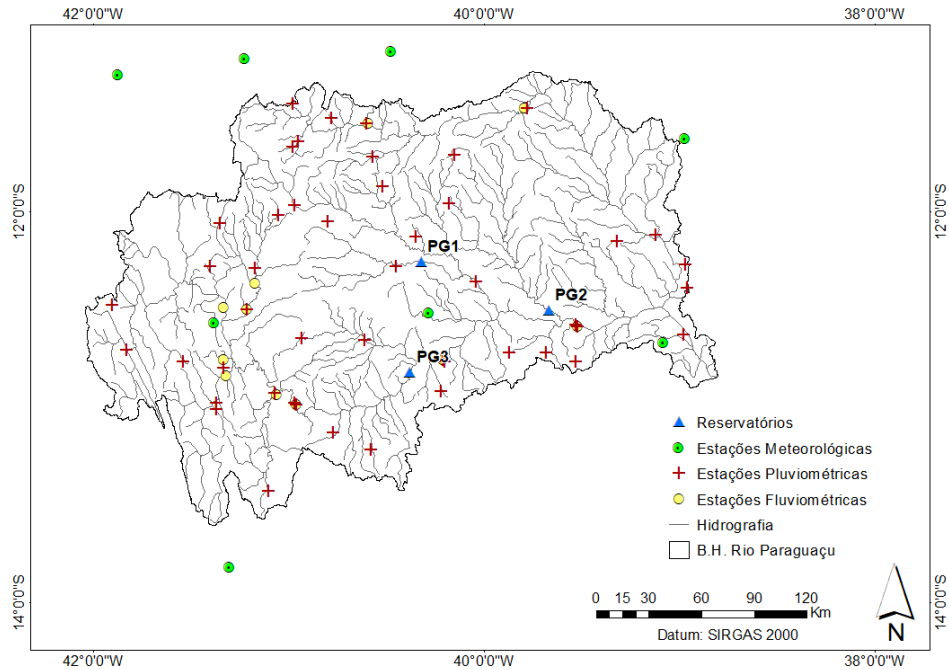


Figura 1.6 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Paraguaçu

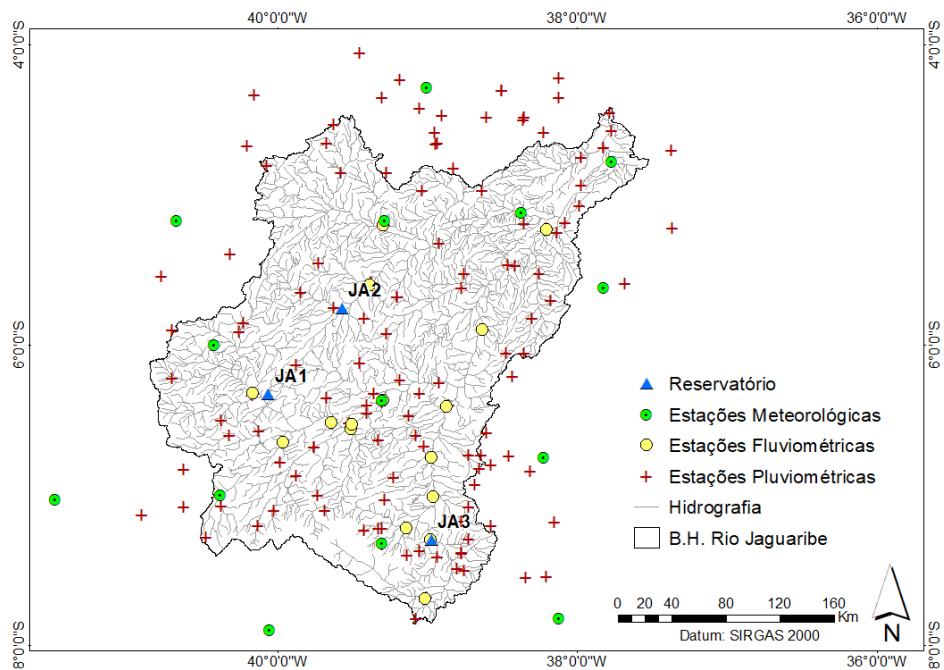


Figura 1.7 – Localização das seções hidrográficas selecionadas para o dimensionamento de reservatórios na bacia do rio Jaguaribe

As diferenças entre os regimes climáticos para as bacias hidrográficas em estudo podem ser observadas na Figura 8, na qual apresentam-se as distribuições anuais de precipitação e evaporação na superfície do lago do reservatório. Esses gráficos correspondem

ao reservatório 1 de cada bacia em estudo, PC1, JE1, PG1 e JA1, e são representativos para a caracterização climática dos demais reservatórios dimensionados nas mesmas bacias.

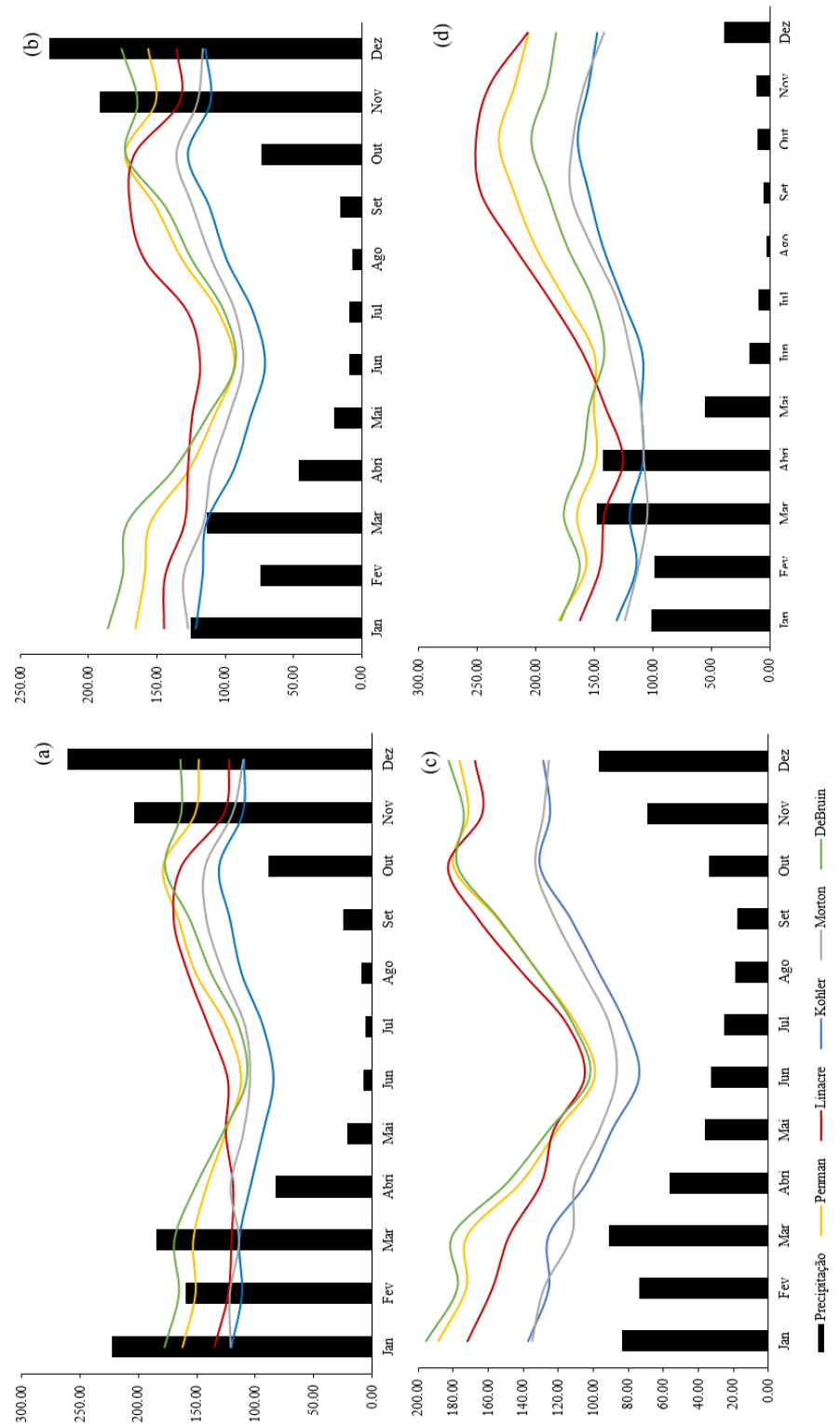


Figura 1.8 - Distribuição anual de precipitação e evaporação na superfície do lago do reservatório para a bacia do rio Paracatu (a), Jequitinhonha (b), Paraguaçu (c) e Jaguaribe (d)

Observa-se que a bacia do rio Paracatu apresenta os menores déficits anuais entre as lâminas evaporadas e precipitadas. Entretanto, deve-se destacar a ocorrência de chuvas concentradas entre os meses de outubro a abril. Com base nas informações contidas na Figura 1.8, o mês de julho apresenta o menor valor de precipitação média mensal (6 mm), enquanto que em dezembro ocorre a máxima (261 mm). Durante o período de seca, maio a setembro, a lâmina evaporada, estimada pelos métodos de Penman, Linacre e deBruin-Keijman, supera a precipitação em mais de 100 mm.

Na bacia do rio Jequitinhonha o período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março. No geral a lâmina evaporada supera a lâmina precipitada, com exceção dos meses de novembro e dezembro que correspondem aos meses de maiores índices pluviométricos, 192 e 229 mm, respectivamente, expressivamente maior do que os demais conforme apresenta-se na Figura 1.8. Agosto é o mês mais seco com precipitação média de apenas 7 mm.

Apesar de apresentar baixos índices pluviométricos, a distribuição de chuvas na bacia do rio Paraguaçu é mais uniforme em relação as demais bacias em estudo. Como pode ser observado na Figura 1.8, o mês de setembro apresenta o menor valor de média mensal, 18 mm. Destaca-se que a evaporação supera a precipitação em todos os meses do ano.

Na bacia do rio Jaguaribe a incidência de precipitação é concentrada no início do ano, entre janeiro e abril, sendo a maior lâmina precipitada igual a 148 mm em março e a menor igual a 3 mm em agosto, conforme apresentado na Figura 1.8. Considerando a estimativa da evaporação pelos cinco métodos apresentados, as diferenças entre as lâminas evaporadas e precipitadas variam entre 92 a 242 mm durante os meses mais secos do ano, maio a dezembro.

Na Tabela 1 apresentam-se, para todos os reservatórios considerados no estudo, os totais anuais precipitados e as lâminas evaporadas estimadas por diferentes métodos, bem como a diferença entre as lâminas evaporadas e precipitadas, a qual nomeou-se como Déficit Hídrico (Def).

Ao comparar os valores anuais dos totais precipitados com os totais evaporados estimados observa-se que, no geral, a lâmina evaporada supera a lâmina precipitada com exceção do reservatório PC1 do Paracatu considerando a evaporação estimada pelo método de Kohler. Para este método obteve-se as menores diferenças entre os valores evaporados e precipitados para a maior parte dos casos estudados.

Tabela 1.1 – Precipitação média anual, evaporação anual estimada por diferentes métodos e déficits hídricos correspondentes

	PC1		PC2		PC3	
	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)
Precipitação	1366.59	-	1245.72	-	1271.26	-
EV Penman	1739.72	27.3	1771.88	42.24	1762.56	38.65
EV Linacre	1608.67	17.71	1577.9	26.67	1626.32	27.93
EV Kohler	1276.07	-6.62	1314.42	5.51	1306.97	2.81
EV Morton	1455.04	6.47	1465.36	17.63	1444.04	13.59
EV DeBruin-Keijman	1788.43	30.87	1863.24	49.57	1808.9	42.29
	JE1		JE2		JE3	
	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)
Precipitação	904.9	-	838.05	-	913.85	-
EV Penman	1701.37	88.02	1667.06	98.92	1677.08	83.52
EV Linacre	1703.34	88.24	1621.75	93.51	1682.94	84.16
EV Kohler	1275.2	40.92	1231.46	46.94	1241.59	35.86
EV Morton	1372.95	51.72	1380.79	64.76	1366.86	49.57
EV DeBruin-Keijman	1777.21	96.4	1803.33	115.18	1759.99	92.59
	PG1		PG2		PG3	
	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)
Precipitação	745.58	-	670.1	-	636.03	-
EV Penman	1843.17	147.21	1817.36	171.21	1817.89	185.82
EV Linacre	1790.87	140.2	1751.24	161.34	1769.21	178.16
EV Kohler	1343.49	80.2	1323.55	97.52	1327.86	108.77
EV Morton	1379.55	85.03	1355.76	102.32	1376.11	116.36
EV DeBruin-Keijman	1869.53	150.75	1870.52	179.14	1862.24	192.79
	JA1		JA2		JA3	
	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)	Total (mm)	Def.% (EV-P) (mm)
Precipitação	641.96	-	745.67	-	873.7	-
EV Penman	2201.53	242.94	2224.46	198.32	2154.71	146.62
EV Linacre	2225.26	246.63	2192.1	193.98	1920.35	119.8
EV Kohler	1582.54	146.52	1597.46	114.23	1556.88	78.2
EV Morton	1596	148.61	1589.77	113.2	1602.89	83.46
EV DeBruin-Keijman	2064.44	221.58	2126.57	185.19	2137.58	144.66

* PC – reservatórios na bacia do rio Paracatu nas seções 1, 2 e 3; JE – reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha nas seções 1, 2 e 3; PG – reservatórios na bacia do rio Paraguaçu nas seções 1, 2 e 3; JA – reservatórios na bacia do rio Jaguaribe nas seções 1, 2 e 3; Def% (EV-P) – déficit hídrico dado pela diferença entre as lâminas precipitada e evaporada expresso em percentual.

Na Tabela 1.2 são apresentadas as características das seções fluviométricas consideradas para o dimensionamento dos reservatórios, bem como as equações de

regionalização da vazão média de longo termo (Q_{mlt}) que foram utilizadas para a geração das séries sintéticas nas seções de interesse.

Para as bacias do Paracatu e Jequitinhonha utilizou-se equações ajustadas por Ribeiro (2020) que utilizam como variável independente a vazão equivalente ao balanço hídrico ($BHeq_M$). O cálculo dessa variável, apresentado na equação 17, leva em consideração a evapotranspiração real obtida a partir de produtos de sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM.

Para as bacias dos rios Paraguaçu e Jaguaribe ajustou-se equações de regionalização, considerando como variáveis independentes a Peq_{300} e Peq_{400} , respectivamente. Essas variáveis representam a vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração de 300 (Peq_{300}) ou 400 mm (Peq_{400}). Esses valores de abstrações correspondem a perdas por evapotranspiração (ET) que ocorrem na bacia representando a parcela de precipitação que não é convertida em vazão. Para a definição desta variável avaliou-se as características climáticas de cada uma das bacias hidrográficas analisando-se os volumes precipitados de forma que a parcela relativa a abstração fosse inferior ao volume precipitado anual. Esse conceito segue os princípios descritos por Pruski et al. (2013) que constatou que o uso da variável correspondente à vazão equivalente a precipitação abstraída de um fator relacionado a evapotranspiração resultou em melhor ajuste estatístico para as equações de regionalização quando comparada a variáveis como área e precipitação. A Peq_{300} e a Peq_{400} foram calculadas utilizando-se as equações 18 e 19, respectivamente.

$$BHeq_M = \frac{(P - ETR_M)A}{k} \quad (17)$$

$$Peq_{300} = \frac{(P - 300)A}{k} \quad (18)$$

$$Peq_{400} = \frac{(P - 400)A}{k} \quad (19)$$

Em que, P = precipitação média anual na área de drenagem considerada, $mm \cdot ano^{-1}$; A = área de drenagem, km^2 ; ETR_M = evapotranspiração real anual média da bacia, $mm \cdot ano^{-1}$; k = fator de conversão de unidades, o qual é igual a 31.536; Peq_{300} = vazão equivalente ao

volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 300 mm.ano⁻¹ , m³s⁻¹; Peq₄₀₀ = vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 400 mm.ano⁻¹ , m³s⁻¹; BHeq = vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR, m³s⁻¹ , BHeqM = vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR_M, m³s⁻¹.

Tabela 1.2 – Dados para o dimensionamento dos reservatórios nas seções de interesse

Reservatório	Lat	Long	AD (km ²)	Qmlt (m ³ s ⁻¹)	A=f(V)	Eq. Regionalização	R ²	Se
PC1	-17,334	-47,008	528	7,74	A = 0,6154V ^{0,6506}	Qmlt = 0,6359 BHeq _M ^{0,9900}	0,995	0,091
PC2	-17,524	-45,634	2476	27,04	A = 0,4998V ^{0,6761}	Qmlt = 0,6816 BHeq _M ^{0,9734}	0,998	0,058
PC3	-16,724	-46,724	5685	83,8	A = 2,3847V ^{0,5612}	Qmlt = 0,7390 BHeq _M ^{0,9447}	0,999	0,058
JE1	-17,165	-41,787	92	0,46	A = 0,1635V ^{0,7738}	Qmlt = 0,9859 BHeq _M ^{0,9365}	0,925	0,458
JE2	-15,881	-41,322	602	1,84	A = 0,1159V ^{0,9731}	Qmlt = 0,9859 BHeq _M ^{0,9365}	0,925	0,458
JE3	-16,408	-42,472	2792	14,69	A = 0,2245V ^{0,6569}	Qmlt = 0,9859 BHeq _M ^{0,9365}	0,925	0,458
PG1	-12,26	-40,32	1915	3,4	A = 0,4114V ^{0,72054}	Qmlt = 0,0315 Peq300 ^{1,2399}	0,883	0,508
PG2	-12,504	-39,668	4729	7,8	A = 0,4788V ^{0,75136}	Qmlt = 0,0315 Peq300 ^{1,2399}	0,883	0,508
PG3	-12,825	-40,378	20050	43,33	A = 1,3577V ^{0,6550}	Qmlt = 0,0315 Peq300 ^{1,2399}	0,883	0,508
JA1	-6,324	-40,061	709	0,92	A = 0,6758V ^{0,65523}	Qmlt = 0,1667 Peq400 ^{0,9092}	0,909	0,400
JA2	-5,753	-39,568	2118	2,99	A = 0,6764V ^{0,69491}	Qmlt = 0,1667 Peq400 ^{0,9092}	0,909	0,401
JA3	-7,299	-38,973	4275	8,72	A = 1,9189*V ^{0,60641}	Qmlt = 0,1667 Peq400 ^{0,9092}	0,909	0,402

* PC – reservatórios na bacia do rio Paracatu nas seções 1, 2 e 3; JE – reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha nas seções 1, 2 e 3; PG – reservatórios na bacia do rio Paraguaçu nas seções 1, 2 e 3; JA – reservatórios na bacia do rio Jaguaribe nas seções 1, 2 e 3; AD – área de drenagem do reservatório; R² – coeficiente de determinação da equação de regionalização ajustada; Se – erro padrão médio; Qmlt – vazão média de longo termo; A – área inundada; BHeq_M – vazão equivalente ao balanço hídrico; Peq400 – vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração de 400 mm; Peq300 – vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração de 300 mm.

Para os estudos de regionalização apresentados por Ribeiro (2020) para as bacias do Jequitinhonha e Paracatu e para a regionalização de vazão desenvolvida no âmbito do presente trabalho utilizou-se dados consistidos de estações fluviométricas e pluviométricas disponíveis na plataforma do Hidroweb da Agência Nacional de Águas. Essas são listadas no Apêndice A.

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor compreensão das análises realizadas os resultados e discussão são apresentados em três subitens. No primeiro apresentam-se os resultados obtidos para o dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando-se diversos métodos de

evaporação. O terceiro subitem apresenta as discussões relativas ao potencial de regularização nas seções hidrográficas estudadas. Por último, no quarto subitem apresenta-se uma análise da consideração do período de retorno para o dimensionamento da CR.

1.4.1 Estimativa da CR

Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 são apresentados os resultados obtidos para o dimensionamento de reservatórios nas bacias hidrográficas dos rios Paracatu, Jequitinhonha, Jaguaribe e Paraguaçu. Todos os gráficos apresentados são referentes aos reservatórios 1 de cada bacia, sendo estes representativos do comportamento dos demais reservatórios dimensionados para uma mesma bacia. Ressalta-se que os resultados obtidos para a CR se referem a valores pontuais, entretanto eles foram apresentados por linhas contínuas com o objetivo de facilitar a análise comparativa entre os resultados obtidos para os diferentes períodos de retorno e pela consideração de diferentes métodos de estimativa de evaporação.

O dimensionamento da CR considerando a perda de água por evaporação na superfície do lago tende a ser superior a CR dimensionada sem considerar este fator, uma vez que a Q_{ev} entra no cálculo do dimensionamento como fluxo de saída sendo necessário um maior volume de armazenamento para que se possa suprir as demandas requeridas pela regularização.

As maiores diferenças encontradas entre as CRs dimensionadas com e sem a consideração da EV atingiram 67,51%, 189,62%, 283,29% e 581,58% nas bacias do Paracatu, Jequitinhonha, Paraguaçu e Jaguaribe, respectivamente. Essas diferenças podem variar em função das características climáticas, do método de evaporação selecionado para o dimensionamento, da geometria do reservatório e da magnitude do volume armazenado.

Em relação as condições climáticas os resultados apresentados na Figuras 4 e Tabela 1.2 evidenciam uma tendência de crescimento da taxa de evaporação em função do aumento da latitude e, conseqüentemente, as diferenças observadas entre as CRs obtidas sem e com a consideração da EV também seguem a mesma tendência, ou seja, as maiores diferenças foram observadas para os reservatórios dimensionados na bacia do rio Jaguaribe e na sequência nas bacias dos rios Paraguaçu, Jequitinhonha e Paracatu.

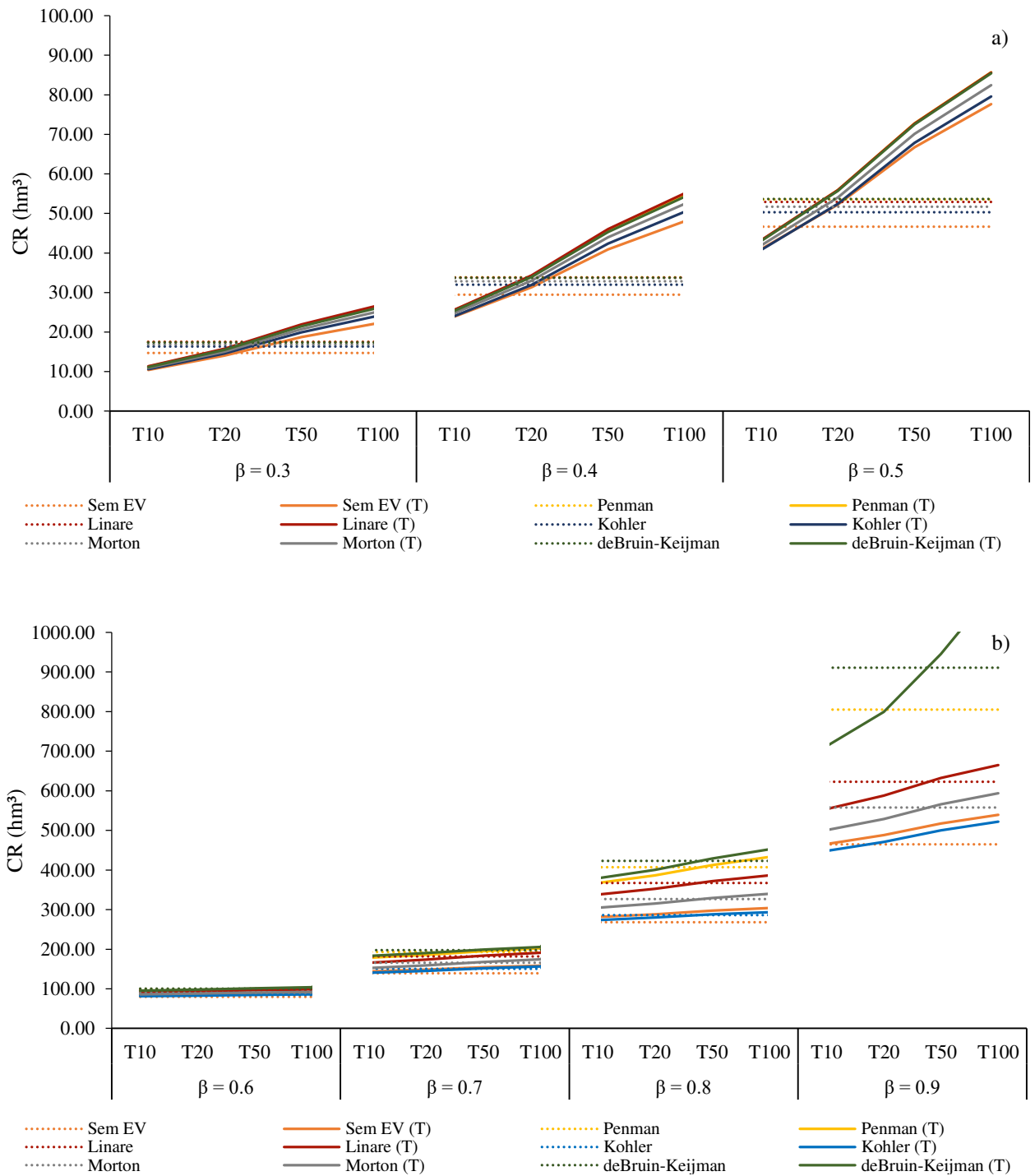


Figura 1.9 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Paracatu (PC1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5 (a) e 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9 (b)

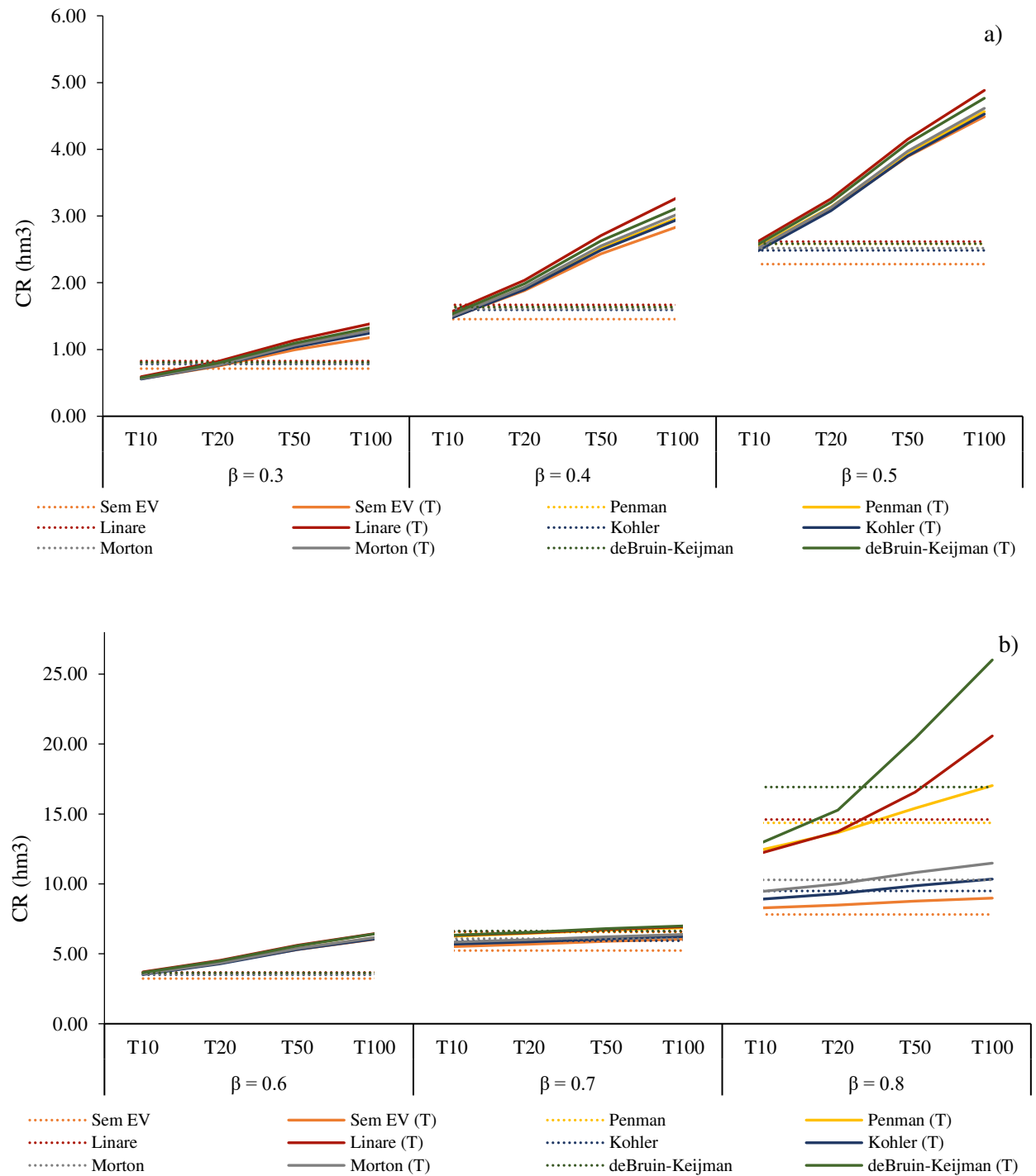


Figura 1.10 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Jequitinhonha (JE1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5 (a) e 0,6; 0,7 e 0,8(b)

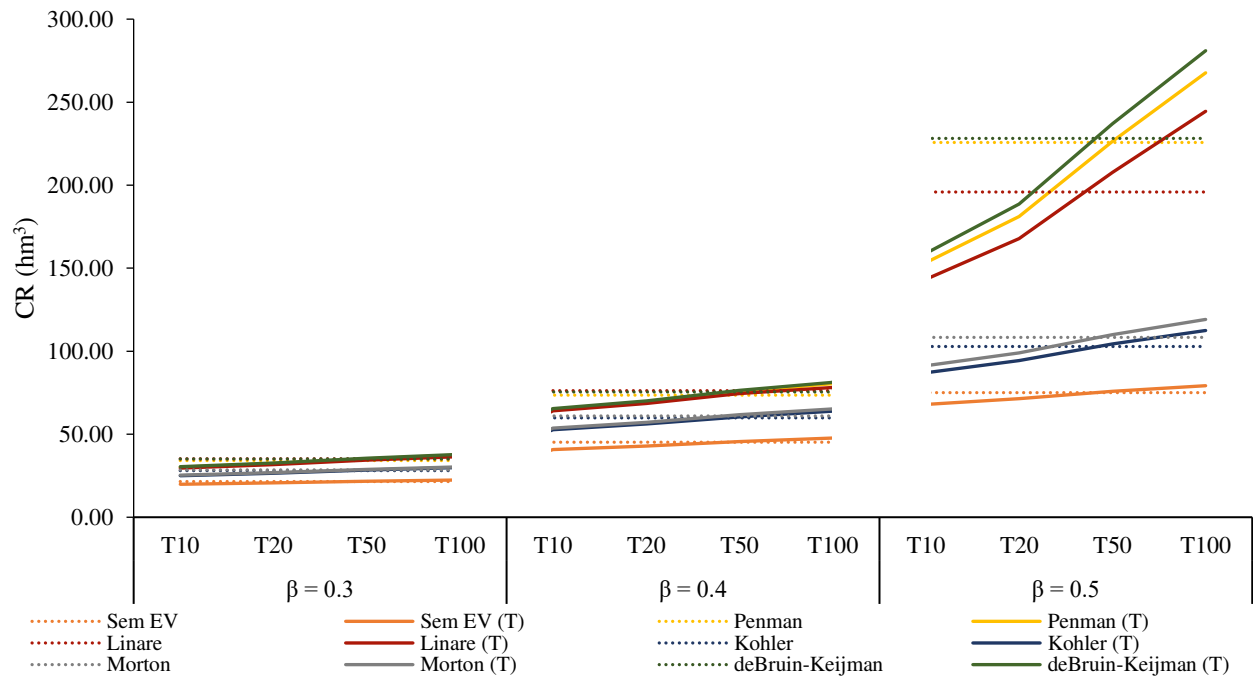


Figura 1.11 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Paraguaçu (PG1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,3; 0,4 e 0,5

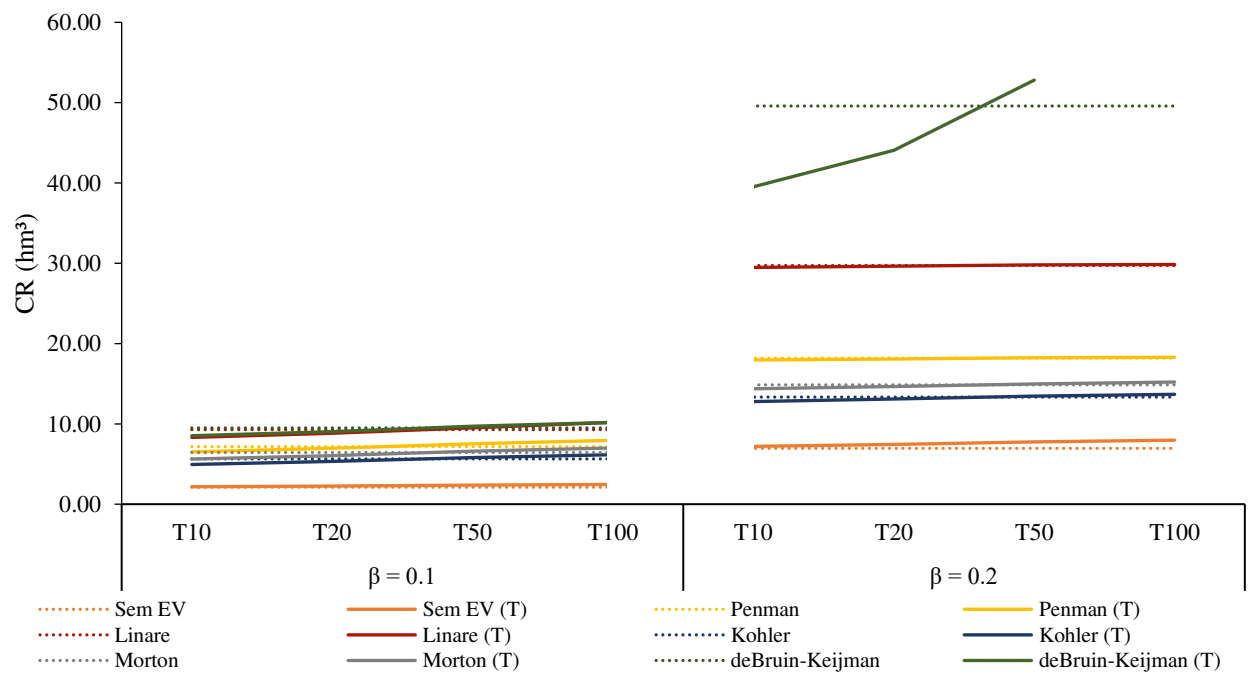


Figura 1.12 - Capacidade do Reservatório (CR) para o reservatório 1 do Jaguaribe (JA1), considerando diferentes métodos de estimativa de evaporação, períodos de retorno (T) e percentuais de regularização (β) iguais a 0,1 e 0,2

Ainda que a bacia do rio Paracatu esteja inserida em condições de clima tropical chuvoso, o prolongamento de um período de cinco meses com baixos índices pluviométricos torna relevante a consideração da perda de água por evaporação no dimensionamento de reservatórios.

Os resultados apresentados nas Figuras 5 a 8 evidenciam as diferenças entre os valores de CR obtidos a partir da consideração de diferentes metodologias de estimativa da evaporação na superfície do lago. Nas bacias dos rios Paracatu, Jequitinhonha e Paraguaçu obteve-se maiores valores de CR considerando o método de deBruin-Keijman, seguido pelos métodos de Penman, Linacre, Morton e Kohler. Na bacia do rio Jaguaribe, entretanto, essa ordem se altera para deBruin-Keijman, Linacre, Penman, Morton e Kohler.

As análises comparativas ao método de Penman, indicado por diversos autores como método padrão devido ao seu embasamento teórico, mostra que no reservatório PC1, os valores de CR obtidos pelo método de deBruin-Keijman é o que mais se aproxima dos valores obtidos pelo método de Penman, diferenciando-se, em média, cerca de 2,5%. Para esse mesmo reservatório observou-se valores muito próximos entre a CR obtida sem a consideração da EV e a CR obtida considerando a EV estimada pelo método de Kohler, esses valores divergiram, em média, em apenas 0,44%, indicando que a escolha desse método pode acarretar em subestimativas da CR.

No reservatório JE1 os resultados obtidos com a consideração da estimativa da evaporação pelos métodos de deBruin-Keijman, Penman e Linacre foram similares. Em média, quando se considera a EV estimada por Linacre e de-Bruin-Keijman, os valores de CR obtidos superam em 4,72 e 6,32%, respectivamente, os valores de CR calculados ao estimar a lâmina de evaporação pelo método de Penman. Em contrapartida, os resultados de CR obtidos ao se utilizar os métodos de Kohler e Morton para a estimativa da EV mostram-se mais próximos aos resultados obtidos desconsiderando a perda de água por evaporação no processo de dimensionamento, divergindo entre 1 a 16%.

Para o PG1, assim como para os demais reservatórios dimensionados nesta bacia, obteve-se diferenças expressivas entre os valores de CR obtidos considerando as metodologias DRECASS e DRECASS-EV independentemente do método selecionado para o cálculo da estimativa da evaporação. Para o método de Kohler obteve-se uma diferença mínima entre esses resultados de 32%. A diferença máxima de 232% foi obtida ao utilizar o método de deBruin-Keijman.

Para o JA1 obteve-se diferença mínima de 21% entre a CR dimensionada com e sem a consideração da EV, sendo esta estimada pelo o método de Kohler. Para o mesmo reservatório obteve-se diferença máxima de 186% ao utilizar o método de Penman para a estimativa da EV.

Analisando os três reservatórios dimensionados na bacia do Jaguaribe constatou-se que ao considerar um valor de $\beta = 0,2$ e a lâmina de evaporação estimada pelo método de deBruin-Keijman obteve-se valores de CR expressivamente superiores aos demais calculados considerando os demais métodos de estimativa da EV considerados neste estudo. Para esse percentual de regularização, as CRs obtidas utilizando o método deBruin-Keijman podem superestimar entre 120 a 190% em relação aos valores de CR obtidos quando utilizado o método de Penman para a estimativa da EV. Além disso, constatou-se que não foi possível dimensionar a CR para o período de retorno de 100 anos ao utilizar o método de deBruin-Keijman, uma vez que a lâmina de evaporação estimada foi muito elevada, de forma que o valor da Q_{ev} somado ao da Q_{reg} superou a vazão média de longo termo, motivo pelo qual observa-se a descontinuidade da linha que representa os valores de CR obtidos considerando este método de evaporação.

A escolha do método para a estimativa da evaporação da água em superfícies livres deve levar em consideração a disponibilidade de dados edafoclimáticos e as características da região para a qual pretende-se estudar (Ronseberry et al., 2007), uma vez que não existe na literatura uma indicação precisa do melhor método que deva ser utilizado.

Diante dos resultados apresentados, ressalta-se que, para fins de dimensionamento, os métodos de Kohler e Morton devem ser utilizados com muita cautela, uma vez que a utilização destes pode resultar em subestimativas dos valores de CR pondo em risco o atendimento das demandas pelo uso da água. Ressalta-se que diversos autores também observaram essa tendência de subestimativa para ambos os métodos em reservatórios localizados em regiões climáticas distinta. Utilizando o método de Kohler Leão et al. (2013) observaram subestimativa da lamina evaporada para a barragem de Banabuí no Ceará, assim como Vieira et al. (2016) para os reservatórios de Sobradinho (BA) e Três Marias (MG), e Coelho et al. (2018) para os reservatórios de Tucuruí (PA) e Lajeado (TO). Em relação a aplicação do método de Morton, Roque e Sansigolo (2001) contataram subestimativa da evaporação para o reservatório de Taquaraçu (SP), Pereira et al. (2009) para o lago de Sobradinho, Coelho et al. (2018) para o reservatório de Lajeado (TO) e Vieira et al. (2016) para os reservatórios de Sobradinho (BA) e Três Marias (MG).

A subestimativa da lâmina evapora pelo método de Kohler pode estar associada ao fato deste método utilizar paracálculo a velocidade do vento a 15,2 cm acima do Tanque Classe A, sendo esta expressivamente menor do que a velocidade a 2 metros de altura, considerada pelo método de Penman. Quanto ao método de Morton, Pereira et al. (2009) e Coelho et al. (2018) relatam insensibilidade à velocidade do vento, de tal forma que os valores de lâmina evaporada calculados tendem a aproximar dos resultados obtidos por Penman para condições de baixa velocidade do vento, enquanto que, para maiores velocidades os resultados obtidos pelos dois métodos tendem a se afastar.

Em contrapartida, com base nos resultados apresentados no presente estudo, os métodos de Penman, Linacre e deBruin-Keijman apresentam-se como alternativas mais seguras.

Sobre a utilização do método de Linacre Leão et al. (2013) obtiveram, segundo indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas (1997), resultados “muito bom” e “bom” para estimativas da evaporação nos reservatórios de Boqueirão e Patos, respectivamente. Vieira et al. (2016) concluiu que tal método superestimou a lâmina evaporada em relação aos resultados obtidos pelo método de Penman para os reservatórios de Sobradinho (BA) e Três Marias (MG). O mesmo foi constatado anteriormente por Pereira et al. (2009) para o lago de Sobradinho (BA).

Em relação adeBruin-Keijman, Coelho et al. (2018) contataram, com base em estudos desenvolvidos para os reservatórios de Tucuruí (PA) e Lajeado (TO), que este método é insensível a velocidade do vento, dessa forma em períodos com maior velocidade a subestimativa em relação ao efeito dessa variável é compensada pela superestimativa em relação à constante de Bowen, o que resulta em estimativas de evaporação aproximadas entre os métodos de Penman e deBruin-Keijman, como visto por Coelho et al. (2018) para os reservatórios de Tucuruí (PA) e Lajeado (TO).

Dentro deste contexto, destaca-se o método Penman que devido ao seu embasamento teórico é considerado por diversos pesquisadores como o método padrão em razão de produzir estimativas mais realistas da evaporação quando aplicado a regiões de características climáticas distintas (Linacre, 1993; Mekonnen e Hoektra, 2012; Pereira et al, 2013), além de ser o que melhor se aproxima das estimativas do balanço de energia de Bowen (Donohue et al., 2010; Elsawwaf et al., 2010; Vieira et al., 2016), logo, por esta razão uso desse método deverá ser preferível aos demais. No entanto, recomenda-se fortemente a utilização de

métodos de estimativas da evaporação que tenham sido validados em estudos anteriores para a região de interesse ao dimensionamento do reservatório.

1.4.2 Potencial de regularização

Teoricamente seria possível regularizar, no máximo, 100% da Q_{mlt} , caso não houvesse perdas por evaporação na superfície do lago. Entretanto, o aumento da porcentagem de regularização da vazão média de longo termo proporciona aumento da CR, da área de inundação e, conseqüentemente, da perda de água por evaporação. A porcentagem máxima de regularização depende das condições climáticas locais que irá interferir diretamente no processo de evaporação, assim, quanto maior for a taxa de evaporação menor será a capacidade de regularização. A consideração de um valor de β que superasse o potencial de regularização, além de resultar na construção de uma obra de magnitude superestimada geraria uma expectativa de disponibilidade hídrica maior do que a real.

No presente estudo obteve-se como valores máximos de regularização $\beta = 0,9$ e $0,5$ para os reservatórios estudados nas bacias dos rios Paracatu e Paraguaçu, respectivamente. Na bacia do Jequitinhonha foi possível regularizar até 70% da Q_{mlt} para o JE2, 80% para JE1 e 90% para JE3. Já na bacia do rio Jaguaribe obteve-se valores máximos de $\beta = 0,2$ para os reservatórios JA1 e JA3 e de $\beta = 0,1$ para JA2. Para os valores de β superiores aos valores máximos apresentados o somatório da vazão média equivalente a perda de água por evaporação com a vazão regularizada ($Q_{ev} + Q_{reg}$) supera a Q_{mlt} .

Ressalta-se que a avaliação do potencial de regularização dos reservatórios deve ser ponderada pela análise dos custos envolvidos na construção destes. A dimensão ótima para um reservatório deverá ser considerada em função de um compromisso entre o custo de investimento na sua implantação e custo da escassez de água durante os períodos secos, sendo o primeiro custo diretamente proporcional e o segundo inversamente proporcional ao tamanho do reservatório (Tucci, 2002).

Na bacia do rio Paracatu destaca-se a possibilidade de regularização de até 90% da Q_{mlt} , porém, para atender essa demanda seria necessário a construção de reservatórios com elevada magnitude de CR. Para o PC3, por exemplo, demanda-se um volume de armazenamento de 13.149 hm^3 para regularizar $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (equivalente a $\beta = 0,9$) considerando $T = 100$ anos e evaporação estimada por Penman. Para o mesmo reservatório e com iguais critérios de dimensionamento, obteve-se CR = 312, 609, 905, 1.112, 3.204 e 6.591 hm^3 para $\beta = 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7$ e $0,8$, respectivamente. Esses resultados indicam que um

incremento de 10% no percentual de regularização poderá acarretar em aumento de até 2,7 vezes do volume necessário para armazenamento.

Na Figura 1.6 que trata do reservatório JE1, observa-se que são expressivas as diferenças entre CRs dimensionadas considerando $\beta = 0,7$ e $0,8$, sendo que os volumes dimensionados para $\beta = 0,8$ seriam cerca de 2,2 vezes superiores aos dimensionados para $\beta = 0,7$. No caso dos reservatórios dimensionados para a bacia do rio Jaguaribe a elevação do valor de $\beta = 0,1$ para $\beta = 0,2$ provocaria um aumento de 2,5 vezes no valor da CR.

Para os reservatórios do Paraguaçu, apesar de ser possível a regularização de $\beta = 0,5$, o valor de CR correspondente a este β é aproximadamente três vezes maior do que o CR resultante ao adotar $\beta = 0,4$. Ampliando essa análise para uma situação real observa-se que para regularizar $22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no PG3 para uma condição de $\beta = 0,5$, $T = 100$ e EV estimada por Penman seria necessário destinar 3.120 hm^3 para o armazenamento de água. Comparativamente, o reservatório da Pedra do Cavalo construído na região próxima da foz da bacia do rio Paraguaçu dispõe de 4.836 hm^3 e tem o potencial de regularização de $79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Geohidro, 2016), ou seja, demanda-se cerca de 61 hm^3 para a regularização de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto que o PG3 na condição de regularização de 50% da Qmlt necessita de 142 hm^3 para regularizar a mesma vazão unitária. Em contrapartida se PG3 fosse dimensionado para $\beta = 0,4$, mantendo-se as demais variáveis de dimensionamento, seriam demandados 1.041 hm^3 para regularizar $17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que corresponderia a 61 hm^3 para $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ou seja, neste caso tem-se uma demanda volumétrica necessária para a regularização de vazões similar ao reservatório da Pedra do Cavalo.

Vale ressaltar que, apesar de proporcionar inúmeros benefícios, a construção de reservatórios interfere expressivamente no meio físico e social da região ao seu entorno gerando diversos impactos, tais como: inundação de grandes áreas forçando o deslocamento das populações; alteração do regime hidrológico de lótico para lântico o que, conseqüentemente, afeta diretamente o ecossistema alterando, sobretudo, o ciclo de vida da biota aquática, o processo de sedimentação, a eutrofização do curso d'água, e, de modo geral, a bioquímica e a hidromorfologia local (Du et al., 2020; Habets et al., 2018; Krajenbrink et al., 2019; Santos et al., 2017; Song et al., 2016; Tonkin et al., 2018).

Portanto, deve-se analisar com cautela as demandas pelo uso da água para que se possa avaliar se um pequeno incremento no percentual de aproveitamento da Qmlt justificaria um grande aumento da CR implicando em obras com custos mais elevados e maiores impactos ambientais.

1.4.3 Análise da consideração do período de retorno

Observando-se os déficits acumulados evidenciou-se que os reservatórios estudados operaram em regime plurianual a partir de $\beta = 0,6$ e $0,7$ nas bacias dos rios Paracatu e Jequitinhonha, respectivamente. Já para as bacias dos rios Paraguaçu e Jaguaribe todos os reservatórios operam em regime plurianual, independentemente do valor de β .

Ressalta-se que, em condições de regime de operação plurianual, a metodologia MROS constitui uma ferramenta relevante para a associação do período de retorno, entretanto, conforme apresentado nas Figuras 9 e 10, nota-se que a inclinação das linhas é mais acentuada para a condição de dimensionamento em regime anual, sendo a aplicação do período de retorno mais sensível a esta condição, ou seja, variações de T implicam em maiores diferenças entre os valores de CR obtidos quando considerado o regime de operação anual. A falta de sensibilidade ao período de retorno pode ser observada, por exemplo, para os dimensionamentos realizados considerando $\beta = 0,6$ no Paracatu (Figura 1.9), $\beta = 0,7$ no Jequitinhonha (Figura 1.10) e $\beta = 0,2$ no Jaguaribe (Figura 1.12). Para tais condições obtiveram-se baixas variações de CR em relação às variações de T .

Contudo, assim como Nunes e Pruski (2015), o CR obtido se torna mais sensível ao período de retorno na medida em que o valor de β aumenta, uma vez que o período de déficit hídrico se torna mais longo e, conseqüentemente, a realocação dos anos na série de dados resulta em valores distintos de CR.

1.4.4 Considerações Finais

Apesar da metodologia DRECASS desenvolvida por Rodrigues (2017) e validada por Vieira et al. (2020) configurar-se como uma alternativa útil para o dimensionamento de reservatórios em regiões onde não há a disponibilidade de informações fluviométricas, sendo esta situação frequentemente enfrentada por profissionais de engenharia durante o desenvolvimento de projetos, este método carecia de melhorias para incorporação da lâmina de água evaporada na superfície do reservatório. Nesse sentido, o aprimoramento proposto pelo DRECASS-EV além de permitir o dimensionamento de reservatórios com maior assertividade possibilitou avaliar o potencial de regularização de vazões em função das características climáticas na região de interesse.

Os resultados mostraram que os potenciais de regularização dos reservatórios limitam-se pelas condições climáticas locais, sobretudo, de forma mais severa nas regiões sob condições de clima semiárido que se caracterizam pelas elevadas taxas de evaporação. Para

aumentar o potencial de regularização nessas regiões seria necessário a utilização de barreiras físicas para cobertura de parte do reservatório diminuindo-se a incidência solar sobre o seu lago, reduzindo, portanto, a perda de água por evaporação. Alguns trabalhos mostram alternativas para a redução da evaporação no lago com a utilização de objetos opacos flutuantes, como esferas flutuantes (Abdallah, et al. 2021; Assouline e Narkis, 2021; Mady e Lehmann, 2021) ou até mesmo de placas fotovoltaicas flutuantes (Gorjian et al., 2021; Hernandez et al., 2019) que, adicionalmente, agregam a função de geração de energia.

Outro aspecto importante a ser considerado em estudos futuros seriam os impactos associados às mudanças climáticas no dimensionamento dos reservatórios, uma vez que são previstas alterações no ciclo hidrológico devendo-se aumentar a taxa de evaporação e intensificar a ocorrência de eventos extremos de chuvas intensas e secas prolongadas (IPCC, 2014; Hao et al., 2018; Maestre-Valero et al., 2013). Além disso, com as mudanças climáticas espera-se o aumento de temperatura que, por consequência, provocará aumento da demanda pelo uso da água resultando em problemas de escassez a ser enfrentado no âmbito da gestão de recursos hídricos (Condon et al., 2020; Konapala et al., 2020).

1.5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados conclui-se que o modelo DRECASS-EV proporciona avanços significativos ao dimensionamento de reservatórios de regularização considerando a incorporação da perda de água por evaporação com base na variação diária da área inundada. A não consideração da lâmina evaporada resulta em valores de CR subdimensionados comprometendo a segurança hídrica em razão do não atendimento às demandas pelo uso da água consideradas na fase de projeto.

É importante destacar que o método utilizado para a estimativa da evaporação interfere consideravelmente no valor de CR obtido. Nesse sentido, recomenda-se fortemente a utilização de métodos de estimativa da evaporação que tenham sido validados em estudos anteriores para a região de interesse ao dimensionamento do reservatório. Os métodos de Penman, Linacre e deBruin-Keijman apresentam-se como alternativas mais seguras, dentre estes três o método de Penman se destaca por sua fundamentação teórica e por produzir estimativas mais realistas da evaporação quando aplicado a regiões de características climáticas diversas. Já os de Kohler e Morton devem ser utilizados com muita cautela, pois podem resultar em subestimativas dos valores de CR pondo em risco o atendimento das demandas pelo uso da água.

As análises realizadas a partir da consideração da perda de água por evaporação no dimensionamento da CR também se mostraram útil para a avaliação do potencial de regularização na seção de interesse para a construção do reservatório. Para os estudos de caso avaliados obteve-se o maior percentual de regularização da Qmlt para os reservatórios dimensionados na bacia do rio Paracatu, e na sequência para os reservatórios dimensionados nas bacias dos rios Jequitinhonha, Paraguaçu e Jaguaribe.

O potencial de regularização de vazões varia de acordo com as características climáticas locais e deve ser sempre avaliado tendo em vista as consequências associadas à construção dos reservatórios, portanto, deve-se analisar com cautela as demandas pelo uso da água para que se possa avaliar se um pequeno incremento no percentual de aproveitamento da Qmlt justificaria um grande aumento da CR implicando em obras com custos mais elevados e maiores impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

Abreu MC, Cecílio RA, Pruski FF, Santos GR, Almeida LT, Zanetti SS (2018). Critérios para escolha de distribuições de probabilidades em estudos de eventos extremos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.33, n. 4, 601-613. Doi: 10.1590/0102-7786334004.

Almeida LT (2017). Espacialização de chuvas intensas: uma nova proposta. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Meteorologia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa.

Althoff D, Rodrigues LN, da Silva DD, Bazame HC (2019). Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. *Agricultural Water Management*, 216: 105-112. Doi: 10.1016/j.agwat.2019.01.028.

Belitsky V, Moreira FM (2007). Emprego do método “Peaks-Over-Threshold” na estimação de riscos; uma exposição abrangente, detalhada mas simples. Instituto de Matemática Estatística, Universidade de São Paulo.

Bescow S, Caldeira TL, Mello, CR, Faria LC, Guedes HA (2015). Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 4, p. 123-133. Doi: 10.1016/j.ejrh.2015.06.007.

Brannum S (2021) Characterizing Multi-Decadal Trends in Streamflow and Design Floods in the Southeastern United States. Senior Honors Thesis. Department of Geological Sciences University of North Carolina at Chapel Hill.

Bruin HAR de, Keijman JQ (1979) The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*, 18(7):898-903.

Camargo, AP; Sentelhas, PC (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5: 89-97.

Campos JNB, Souza Filho FA, Lima HVC (2014). Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil.

Chen FW, Liu CW (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environment*, 10:209–222. Doi: 10.1007/s10333-012-0319-1.

Chen H, Yang L, Yang ZF, Yu SW (2012). Sustainable reservoir operations to balance upstream human needs and downstream lake ecosystem targets. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. *Procedia Environmental Science* 13: 1444-1457. Doi:10.1016/j.proenv.2012.01.136.

Coelho CD, da Silva DD, Sedyama GC, Moreira MC, Pereira SB, Lana AMQ (2018). Estimates of monthly and annual evaporation rates and evaporated volumes per unit time in the Tucuruí-PA and Lajeado-TO hydroelectric power plant reservoirs based on different methods. *Engenharia Agrícola*. 38(1): 38-46. Doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p38-46/2018.

Collischonn W, Dornelles F (2015) Hidrologia para engenharias e ciências ambientais. Editora ABRH, Porto Alegre.

Condon, L.E., Atchley, A.L., Maxwell, R.M., 2020. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nat. Commun.* 11. Doi:10.1038/s41467-020-14688-0.

Donohue RJ, Mcvicar TR, Roderick ML (2010). Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology*, 386: 186-197.

Dosdogru F, Kalin L, Wang R, Yen H (2020). Potential impacts of land use/cover and climate changes on ecologically relevant flows. *J. Hydrol.* 584, 124654.

Du J, Wu X, Wang Z, Li J, Chen X. (2020). Reservoir-Induced Hydrological Alterations Using Ecologically Related Hydrologic Metrics: Case Study in the Beiji River, China. *Water*. 12: 2-19. Doi: 10.3390/w12072008.

Elsawwaf M, Willems, P.; Feyen J (2010). Assessment of the sensitivity and prediction uncertainty of evaporation models applied to Nasser Lake, Egypt. *Journal of Hydrology*, 395:10-22.

Fayaed SS, El-Shafie A (2013). Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stoch Environment Research Risk Assessment*, 27: 1751-1772.

Ferreira VO, Silva MM (2012). O clima da bacia do rio Jequitinhonha, em Minas Gerais: Subsídios para a gestão de recursos hídricos.

Friedrich K, Grossman RL, Huntington J, Blanken PD, Lenters J, Holman KD, Gochis D, Livneh B, Prairie J, Skeie E, Healey NC, Dahm K, Pearson C, Fennessey T, Hook SJ, Kowalski T (2018). Reservoir evaporation in the western United States – Current science, challenges and future needs. American Meteorological Society.

GEOHIDRO (2016). Plano de abastecimento de água da região metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara. Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento. Contrato no 001/2014.

Gonçalves MJS (2014). Gestão quantitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu no estado da Bahia – Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia.

Habets F, Molénat J, Carluer N, Douez O, Leenhardt D (2018). The cumulative impacts of small reservoir on hydrology: A review. *Science of the total Environment*, 643: 850-867. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.188.

Hao, Z., Singh, V.P. , Hao, F. (2018). Compound extremes in hydroclimatology: A review. *Water* 10, 718.

INMET Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas referentes aos anos 1981 a 2010. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (2006). Comitê da Sub- Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu: resumo executivo. Belo Horizonte.

IPCC, 2014. *Climate change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Junqueira-Junior JA, Mello CR, Alves GJ (2015). Eventos extremos de precipitação no Alto do Rio Grande, MG: Análise probabilística. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 301-308. Doi: /10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p301-308.

Kohler MA, Nordensen TJ, Fox WE (1955) Evaporation from pans and lakes. *U.S. Weather Bureau Research* 38:1-21.

Konapala G, Mishra AK, Wada Y, Mann, ME, (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nat. Commun.* 11, 1–10.

Koutsoyiannis D (2005) Reliability concepts in reservoir design (SW-776). *The Encyclopedia of Water* 1-17.

Krajenbrink HJ, Acreman M, Dunbar MJ, Hannah DM, Laizé CLR, Wood, P. J. (2019) Macroinvertebrates community responses to river impoundment at multiple spatial scales. *Science of the Total Environment*, v. 650, p. 2648–2656. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.264

Kurtzman, D. Navon S, Morin E (2009) Improving interpolation of daily precipitation for hydrologic modelling: spatial patterns of preferred interpolators. *Hydrological Processes*, 23 3281-3291. Doi: 10.1002/hyp.7442.

Leão RAO, Soares AA, Teixeira AS, Silva DD (2013). Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. *Engenharia Agrícola*, 33(1): 129-144.

Linacre ET (1993) Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64:237-256.

Maestre-Valero JF, Martínez-Granados D, Martínez-Alvarez V, Calatrava J, (2013). Socio-economic impact of evaporation losses from reservoirs under past, current and future water availability scenarios in the semi-arid Segura Basin. *Water Resour. Manag.* 27, Doi: 1411–1426. 10.1007/s11269-012-0245-4

Mathlouthi M, Lebdi F (2008) Event in the case of a single reservoir: the Ghe`zala dam in Northern Tunisia. *Stoch Environ Res Risk Assess* 22(4):513–528.

Mekonnen MM, Hoekstra AY (2012) The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16:179-187.

Morton FI (1983) Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 66:1-76.

Nunes AA, Pruski FF (2015) Improving the determination of reservoir capacities for drought control. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29:183–191.

Oliveira JR, Pruski FF, Nunes AA (2013). Otimização do Aproveitamento da Disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 18(4): 157-172.

Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (2011). Manual sobre pequenas barragens de terra. Roma. ISBN 978-92-5-906547-3.

Penman HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society* 193:120-145.

Pereira AR, Villa Nova NA, Sedyama GC (1997). Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 183p.

Pereira SB, Pruski FF, Silva DD, Ramos MM (2009). Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(3):346-352.

Pruski FF, Rodriguez RG, Novaes LF, Silva DD, Ramos MM, Teixeira AF (2007). Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 11 (2): 199-210.

Pereira AR, Sedyama GC, Nova NAV (2013). Evapotranspiração. Campinas, FUNDAG. 323p.

Pruski FF, Rodriguez RG, Novaes LF, Silva DD, Ramos MM, Teixeira AF(2007).Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelosabastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(2): 199-210.

Pruski FF, Nunes AA, Pruski PL, Rodriguez RG (2013). Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalente of precipitation as an explanatory variable. *Journal of Hydrology*, 476: 52-71.

Ribeiro RR (2020). Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Rodrigues LN, Sano EE, Steenhuis TS, Passo DP (2012). Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah region. *Water Resources Management*, 26: 873-882. Doi: 10.1007/s11269-011-9941-8.

Rodrigues NC (2017). Dimensionamento da capacidade de reservatórios deregularização de vazões utilizando séries sintéticas. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Roque RO, Sansigolo CA (2001). Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1): 21-28.

Rosenberry DO, Winter TC, Buso DC, Likens GE (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 340: 149-166.

Samantaray S, Sahoo A (2020). Estimation of flood frequency using statistical method: Mahanadi River basin, India. *H₂Open Journal*, v. 3 No 1: 189-207. Doi: 10.2166/h2oj.2020.004.

Santos RMB, Fernandes LFS, Cortes RMV, Varandas SGP, Jesus JJB, Pacheco FAL(2017). Integrative assessment of river damming impacts on aquatic fauna in a Portuguese reservoir. *Science of the Total Environment*, 601-602: 1108-1118.

Siste CE, Sarmiento OF, Leite VM (2010) Açudes comunitários: uma estratégia para a segurança hídrica e alimentar no Vale do Jequitinhonha (MG). *Agriculturas*, 7(3): 15-17.

Song MY, Lee WO, Kim KH, Park YS, Bae MJ (2016). The impact of the Goesan dam on fish communities up-and downstream. *Ann. Limnol. Int. J. Limnol.*, 52: 151–162.

Spence C, Whitfield PH, Pomeroy JW, Pietroniro A, Burn DH, Peters DL, Hilaire AS (2013). A review of the Prediction in Ungauged Basins (PUB) decade in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 38(4): 253-262.

Tucci CEM (2002). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 4.

United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2007) Part 654 Stream Restoration Design. *National Engineering Handbook*. Chapter 5 Stream Hydrology.

United State Bureau of Reclamation (USBR)(2012): Colorado River Basin water supply and demand study. Study Rep., 130 pp., www.usbr.gov/lc/region/programs/crbstudy/finalreport/index.html.

Valerio ELS, Monte BEO, Mamédio FMP, Goldenfun JA (2017). Panorama da seca na bacia do rio Paraguaçu-BA. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis – SC.

Vieira NPA, Pereira SB, Martinez MA, DA Silva DD, Silva FB (2016). Estimativa da evaporação nos reservatórios de sobradinho e três marias usando diferentes modelos. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. 36(3): 433-448. Doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p433-448/2016.

Vierira PR, Pruski FF, Souza JR (2020). Dimensioning of reservoir for semiarid regions using synthetic series. *Rev. Brasileira de Eng. Agrícola e Ambiental*. v. 24, n. 9: 581-589. Doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p581-589.

Wisser D, Frohking S, Douglas EM, Fekete BM, Schumann AH, Vörösmarty CJ (2010). The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production – A global-scale analysis. *Journal of Hydrology*, 384: 264-275. Doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.032.

Wurbs, Ayala RA (2014) Reservoir evaporation in Texas, USA. *J. Hydrol.*, 510: 1–9, Doi:10.1016/j.jhydrol.2013.12.011.

2 CAPÍTULO 2 - Integração do dimensionamento de reservatórios com a operação durante o período de enchimento

RESUMO

A operação de reservatórios de regularização é um processo que exige a tomada de decisões pelos seus gestores e envolve a realização de testes por modelos hidrológicos, entretanto, são raros os estudos que abordam essas questões durante a fase de enchimento. Para o dimensionamento de reservatórios considera-se que a capacidade de armazenamento deverá ser suficiente para suprir a demanda de água nos períodos secos, porém, durante o período de enchimento as reservas disponíveis podem não ser suficientes para atender as demandas projetadas. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia que permita avaliar as opções de operação de reservatórios de regularização durante o período de enchimento com base em análises que consideram o tempo de enchimento (TE) e a garantia de atendimento às demandas (G). TE e G foram calculados considerando diferentes anos para o início de enchimento e para sintetizar os resultados permitindo análises conclusivas calculou-se os intervalos de confiança (IC) associados a um nível de confiança de 95%. Com o objetivo de contemplar diferentes regimes fluviométricos e condições climáticas diversas, selecionou-se três seções de cursos de água localizadas em três bacias hidrográficas distintas: bacia do rio Paraguaçu, bacia do rio Jequitinhonha e bacia do rio Paracatu. Os resultados obtidos mostram que a aplicação da metodologia proposta foi capaz de detectar as variações inerentes as condições climáticas das regiões contempladas. As variações interanuais nos regimes de vazões foram refletidas nos resultados de TE de forma que quanto maior for essa variação maior será a dependência do primeiro ano da série considerada para a análise de enchimento e maior será a amplitude dos valores de TE obtidos para as diversas simulações. Por outro lado, as variações intra-anuais observadas nos regimes de vazões mostraram-se mais influentes nos resultados de G. Para os estudos de caso associados a regimes de vazões com maior grau de variação intra-anual obteve-se, em média, menores níveis de garantia de atendimento às demandas.

2.1 INTRODUÇÃO

De acordo com UNESCO (2015), estima-se que a demanda por água crescerá cerca de 55% até 2050. Além disso, é previsto que a demanda pelo uso da água irá exceder a disponibilidade hídrica em 40% até 2030 (UNEP, 2016). Diante do cenário exposto evidencia-se a importância da gestão eficiente dos recursos hídricos.

Quando as demandas pelo uso da água superam a disponibilidade hídrica natural é pertinente a adoção de medidas para regularizar o fluxo de vazões naturais. A regularização de vazões é um processo que tem como objetivo a melhoria do aproveitamento dos recursos hídricos superficiais. Para tanto são construídos reservatórios ao longo da hidrografia com capacidade de acumular água durante o período úmido para que seja disponibilizada nos períodos secos. Dessa forma os reservatórios de regularização modificam o regime hidrológico de jusante, tendendo a aumentar a vazão mínima disponível, limitando-se a vazão média de longo termo (Ribeiro et al., 2018), sendo, portanto, uma relevante ferramenta para a gestão de recursos hídricos.

Os reservatórios de regularização podem ser projetados para atender a usos múltiplos como o fornecimento de água para a irrigação e abastecimento urbano, a geração de energia elétrica, o controle de inundações, dentre outros (Araújo et al., 2018). A operação e gerenciamento de reservatórios é um processo que exige a tomada de decisões pelos seus gestores e que pode ser dificultado por conflitos existentes entre os diversos setores usuários (Fayaed e Al-Shafie, 2013).

As estratégias de operação de reservatórios são usualmente testadas por modelos hidrológicos como parte das ferramentas de apoio à decisão para gestão integrada da água (Loucks et al., 2005). No entanto, são raros os estudos que abordam essas estratégias de operação durante a fase de enchimento.

Os impactos sofridos pelos usuários a jusante de reservatórios durante a fase de enchimento são dependentes da condição hidrológica ao longo desse período, bem como da política de enchimento implementada e da operação de reservatórios existentes na mesma bacia hidrográfica (Bates et al., 2013; King & Block, 2014; Wheeler, 2016).

No processo de dimensionamento de um reservatório considera-se que a capacidade de armazenamento deverá ser suficiente para suprir a demanda de água nos períodos secos (Xu et al., 2017). Entretanto, embora essa seja uma premissa considerada na fase de dimensionamento, não é possível garantir o suprimento das demandas pelo uso da água

consideradas no projeto de dimensionamento da estrutura durante a fase de enchimento. O suprimento de água durante essa fase carece de investigações mais aprofundadas.

A partir das considerações apresentadas acima, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia que permita avaliar as opções de operação de reservatórios de regularização durante o período de enchimento com base em análises que consideram o tempo de enchimento e a garantia de atendimento às demandas projetadas.

2.2 METODOLOGIA

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma com as etapas metodológicas utilizadas no presente estudo. Conforme apresentado nesta Figura o procedimento metodológico utilizado é iniciado pela determinação da capacidade do reservatório (CR). Na sequência são definidas as condições de operação a serem analisadas para o período de enchimento. Após essa definição é realizada a análise desse período por meio da avaliação do tempo de enchimento (TE) e da garantia de atendimento às demandas (G). Por último é calculado o intervalo de confiança associado à essas duas variáveis que servirá de suporte para análises mais conclusivas.

Nos itens subsequentes detalham-se as etapas metodológicas aplicadas para a avaliação do tempo de enchimento e garantia de atendimento às demandas.

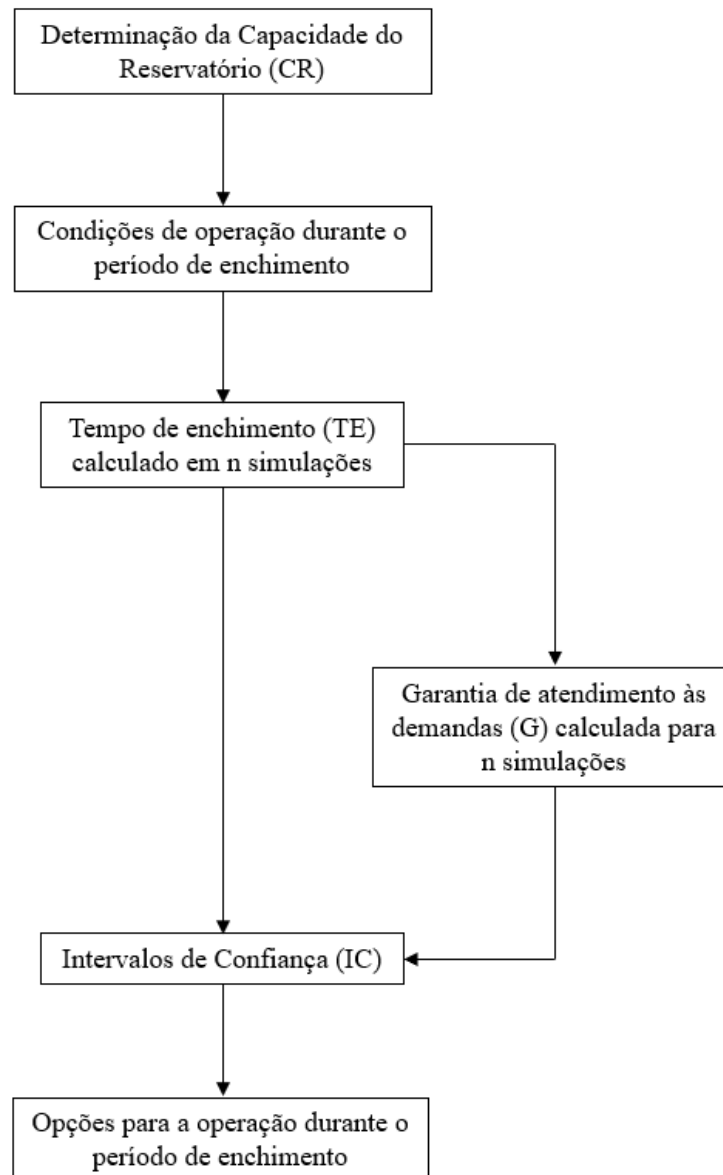


Figura 2.1 – Fluxograma de etapas metodológicas para a avaliação de opções de operação durante o período de enchimento de reservatórios.

2.2.1 Dimensionamento de reservatórios

2.2.1.1 Capacidade do Reservatório (CR)

O dimensionamento dos reservatórios foi realizado utilizando como base a metodologia DRECASS-EV (Monteiro, 2020) que é uma proposta de modificação do método “*Determination of Reservoir Capacity Using Synthetic Series*” com a incorporação da perda de água por evaporação na superfície do lago considerando a variação diária da área inundada. Esse método propõe a geração de séries sintéticas para viabilizar o dimensionamento de reservatórios em seções da hidrografia com a ausência de dados fluviométricos. As séries

foram geradas a partir de informações advindas de um estudo prévio de regionalização de vazões por meio da equação 1 proposta por Rodrigues (2017).

$$Q_{SI,d} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[q_{EF,i,d} \left(\frac{q_{mlt_{SI}}}{q_{mlt_{ES_i}}} \right) \right]}{n} \right\} A_{SI} \quad (1)$$

Em que: $Q_{SI,d}$ é a vazão na seção de interesse no dia d , $m^3 s^{-1}$; d é o dia; n é o número de estações fluviométricas consideradas; $q_{EF,i,d}$ é a vazão específica na estação fluviométrica i no dia d , $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{SI}}$ é a vazão média de longo termo específica na seção de interesse (dado regionalização), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{ES_i}}$ é a vazão média de longo termo específica na estação fluviométrica i (dado observado), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; e A_{SI} é a área de contribuição da seção de interesse, km^2 .

Para o dimensionamento contabilizou-se diariamente o balanço entre os fluxos de entrada e de saída do reservatório por meio da equação 2.

$$\Delta S = Qa - Q_{reg} + Q_p - Q_{ev} \quad (2)$$

Em que, ΔS é o saldo hídrico diário no reservatório, Qa é a vazão afluente ($m^3 s^{-1}$); Q_{reg} é a vazão prevista para regularização ($m^3 s^{-1}$); Q_p é a vazão equivalente a precipitação incidente sobre o lago do reservatório ($m^3 s^{-1}$) e Q_{ev} é a vazão equivalente à evaporação líquida na área inundada ($m^3 s^{-1}$).

O ΔS pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. A simulação para o dimensionamento de reservatórios teve como ponto de partida a consideração de que o reservatório começa cheio, assim, ao longo da análise acumularam-se os déficits diários (valores de ΔS negativos). Esses déficits foram convertidos para unidade de volume, sendo a CR do reservatório equivalente ao máximo déficit acumulado (MDA). Essa simulação representa a utilização das reservas de água armazenadas para o suprimento das demandas hídricas.

A vazão afluente (Qa) foi obtida a partir da geração da série sintética utilizando a equação 1. A vazão prevista para regularização (Q_{reg}) é definida como um percentual (β) da vazão média de longo termo (Q_{mlt}). Para o cálculo da Q_p e Q_{ev} utilizou-se equações 3 e 4.

$$Q_p = \frac{P A_d}{86,4} \quad (3)$$

$$Q_{ev} = \frac{EV A_d}{86,4} \quad (4)$$

Em que, P é a lâmina de precipitação diária em mm d⁻¹, EV é a lâmina evaporada em mm d⁻¹ e Ad é a área inundada referente ao dia d em km².

A lâmina precipitada sobre o lago foi obtida a partir das séries de precipitação mensal média para a área de drenagem dos reservatórios analisados, para tanto utilizou-se o método de interpolação da Ponderação do Inverso da Distância (Inverse Distance Weighting - IDW), sendo este método recomendado para a espacialização de dados de chuva como apresentado nos trabalhos de Almeida (2017), Chen e Liu (2012) e Kurtzman et al. (2009). As potências iguais a 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram testadas e os resultados que apresentaram o menor valor da raiz quadrada do erro médio foram selecionados, conforme indica a metodologia apresentada por Almeida (2017).

Seguindo a metodologia apresentada por Monteiro (2020), fez-se um primeiro dimensionamento do reservatório desconsiderando Qp e Qev da equação 2 para obter os volumes armazenados diariamente. Com esses volumes conhecidos aplicou-se a equação que determina a área em função do volume $A = f(V)$, que foi ajustada a uma função polinomial através do método dos mínimos quadrados. Para a obtenção dos pontos (V, A) utilizou-se um modelo digital de elevação para determinação da relação entre os valores de elevação, área e volume.

Para determinação das áreas de drenagem dos reservatórios bem como para a obtenção das relações entre as áreas inundadas e volumes dos reservatórios utilizou-se o Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado a partir do produto RTC (Radiometrically Terrain-Corrected), com resolução de 12,5 m, proveniente da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).

Com o conhecimento dos valores diários de áreas inundadas fez-se um novo dimensionamento da CR, pois ao contabilizar a saída de água por evaporação além da vazão de regularização, torna-se necessário armazenar um maior volume de água para suprir as demandas. Assim, a área inundada relativa ao segundo dimensionamento é maior do que a área relativa ao primeiro dimensionamento. Por este motivo fez-se n dimensionamentos

sucessivos até que os valores da capacidade do reservatório se tornassem convergentes, situação para a qual considerou-se que: $CR_n - CR_{n-1} < 0,01 \text{ hm}^3$.

A perda de água por evaporação foi estimada pelo método de Penman (1948) apresentada na equação 5, a partir de dados de normais climatológicas para o período de 1981 a 2010 fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ressalta-se que dentre as diversas metodologias disponíveis para o cálculo da evaporação em lagos, o método de Penman destaca-se pelo seu embasamento teórico, sendo considerado por diversos pesquisadores como o método padrão em razão de produzir estimativas mais realistas da evaporação quando aplicado a regiões de características climáticas distintas (Linacre, 1993; Mekonnen e Hoektra, 2012; Pereira et al, 2013).

$$E_v = 2,592 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda \rho} \right) + \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) 0,26 (0,5 + 0,54 u_2) (e_s - e_a) \quad (5)$$

Em que, E_v é a evaporação (mm mês^{-1}), Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é o saldo de radiação W m^{-2} , λ é o calor latente de vaporização (MJ Kg^{-1}), γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), u_2 é a velocidade do vento a dois metros de altura, e_s é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar (mbar); ρ é o peso específico da água (kg m^{-3}).

2.2.1.2 Associação do período de retorno ao dimensionamento da CR

No presente trabalho projetou-se reservatórios com características de operação em regime pluri-anual, logo, para associação de um período de retorno (TR) ao dimensionamento da CR utilizou-se a metodologia apresentada por Nunes e Pruski (2015), a qual propõe a geração de séries sintéticas temporais por meio da realocação dos anos como exemplificado na Figura 2.2.

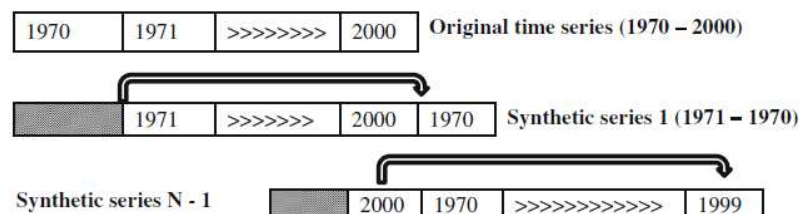


Figura 2.2 – Esquema de geração de séries sintéticas temporais

Fonte: Nunes e Pruski, 2015.

Para cada série gerada obteve-se um valor de CR, assim, sendo a série original for composta de n anos, ao final, gera-se uma série com n valores de CR. Para essa série foi aplicada a função de distribuição de probabilidade de Gumbel que possibilitou associar um valor de TR ao cálculo do dimensionamento do reservatório. Esse método de dimensionamento foi denominado por Nunes e Pruski (2015) como “*Modified Reservoir Operation Study*” (MROS).

Para a aplicação da FDP de Gumbel que permite associar o valor de CR a um período de retorno utilizou-se o método apresentado em Kite (1988) que propõe que o valor do fator de frequência aplicado sobre a variável reduzida seja calculado como apresentado na equação 6.

$$K = \frac{b - \mu_y}{\sigma_y} \quad (6)$$

Sendo:

$$b = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (7)$$

Em que, b é a variável reduzida, μ_y é a média da amostra reduzida em função do tamanho da amostra, σ_y é o desvio padrão da variável reduzida, T é o período de retorno.

O μ_y e o σ_y são obtidos sobre a série das variáveis reduzidas y_i , que são função do tamanho da amostra N, como expresso na equação 8.

$$y_i = -\ln\left(-\ln\left(\frac{N+1-i}{N+1}\right)\right) \quad (8)$$

Logo:

$$\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (9)$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2}{N} \quad (10)$$

A aplicação da FDP de Gumbel pressupõe a independência dos dados. Apesar dessa característica não ser verificada em muitos casos práticos, ela é comumente admitida em estudos em razão de facilitar os cálculos fornecendo resultados próximos aos que seriam obtidos caso de a independência dos dados fosse considerada (Belitsky e Moreira, 2007).

Nunes e Pruski (2015) propuseram um fator de correção para o período de retorno de interesse, uma vez que há uma tendência em se obter valores repetidos de CR ao utilizar o modelo de geração de séries sintéticas com base na realocação de anos conforme apresentado na Figura 2.1. Esse fator de correção considera a relação entre o valor de capacidade do reservatório estimado pela distribuição de Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série, como expresso na equação 16.

$$FC_T = \frac{CR_T}{CR_{TN}} \quad (16)$$

Em que, FC_T é o fator de correção para o período de retorno T de interesse (adimensional), CR_T é a capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T de interesse (hm^3), CR_{TN} capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série (hm^3)

2.2.2 Condições de operação durante o período de enchimento

Neste estudo define-se como condição de operação o percentual da Q_{mlt} a ser regularizada (β) durante determinada fase de operação. Buscando-se avaliar as alternativas para operação dos reservatórios durante a fase de enchimento, simulou-se diferentes valores de β durante o período de enchimento.

2.2.3 Análise do período de enchimento do reservatório

2.2.3.1 Tempo de Enchimento

O período de enchimento não é contemplado no projeto de dimensionamento da capacidade do reservatório, uma vez que se considera como premissa a condição inicial em que o reservatório se encontra cheio. Com o objetivo de superar essa limitação, utilizou-se a equação 2, que contabiliza os balanços de entrada e saída do reservatório, para simular a

variação do armazenamento de água durante o período de enchimento, porém, como condição inicial foi estabelecido que o reservatório se encontra vazio.

A simulação do período de enchimento foi conduzida somando os valores positivos de ΔS e subtraindo os negativos ao longo do tempo até que o saldo acumulado do volume de água armazenado no reservatório atingisse o valor correspondente a CR previamente dimensionada conforme metodologia apresentada no item 2.2.1. O tempo de enchimento (TE) foi definido como o intervalo contabilizado entre o início do período de enchimento até que o volume de água acumulado no reservatório atingisse o valor da CR.

2.2.3.2 Garantia de atendimento às demandas

Durante o período de enchimento do reservatório é esperado que, por alguns dias, a vazão defluente ao reservatório possa ser inferior àquela prevista para regularização. Neste trabalho essa ocorrência foi caracterizada como uma falha no sistema. Visando avaliar esta vulnerabilidade, calculou-se através da equação 11 a garantia de atendimento às demandas durante o período de enchimento.

$$G = \left(1 - \frac{N_f}{TE}\right) 100 \quad (11)$$

Em que, G é a garantia de atendimento às demandas em %, N_f é o número de dias em que ocorre falha de atendimento à vazão prevista para regularização e TE é o tempo de enchimento expresso em dias.

No presente trabalho considerou-se que as falhas de atendimento à vazão prevista para regularização ocorrem quando o volume útil do reservatório é esgotado.

2.2.3.3 Intervalos de confiança

Considerando que os valores de TE e G variam em função do ano selecionado para o início da simulação, utilizou-se as séries sintéticas temporais propostas pelo método MROS para que fosse possível simular as diferentes condições de início do período de enchimento. Dessa forma, obteve-se os valores de TE e G para cada uma das séries sintéticas.

Para a determinação das incertezas associadas aos valores de TE e G calculados para as diversas séries geradas definiu-se os intervalos de confiança (IC). Como o tamanho da

amostra de dados é pequena, recorreu-se a técnica de reamostragem Bootstrap, sendo esta recomendada para reduzir e prover desvios padrões mais confiáveis (Maddala, 2003).

O Bootstrap é um procedimento de reamostragem que usa dados de uma amostra para gerar uma distribuição de amostragem, coletando repetidamente amostras aleatórias da amostra conhecida com reposição. Ao utilizar a técnica de Bootstrap utiliza-se a única amostra disponível como se fosse a população e dela é extraída diversas reamostras que irão compor a distribuição Bootstrap que será utilizada em substituição a distribuição amostral (Silva Filho, 2014).

A partir da amostra gerada pela técnica de Bootstrap aplicou-se a equação 12 para calcular os ICs utilizando a média populacional (μ) como parâmetro de interesse com o nível de significância $\alpha = 0,05$ correspondente a um nível de confiança de 95%.

$$IC (1 - \alpha) : \bar{X} - D \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{X} + D \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (12)$$

Em que, \bar{X} é a média da amostra gerada pela técnica de reamostragem de Bootstrap, s é o desvio padrão da amostra gerada pela técnica de reamostragem de Bootstrap, N é o tamanho da amostra gerada pela técnica de reamostragem e D é a distribuição estatística selecionada. Neste trabalho utilizou-se $n = 1.000$ e distribuição t de Student.

2.3 ESTUDOS DE CASO E BASE DE DADOS

Com o objetivo de contemplar diferentes regimes fluviométricos e condições climáticas diversas, selecionou-se três seções de cursos de água localizadas em três bacias hidrográficas distintas: bacia do rio Paraguaçu, bacia do rio Jequitinhonha e bacia do rio Paracatu. A localização dessas bacias é apresentada na Figura 2.3. A lista das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas utilizadas para o estudo encontram-se no Apêndice A.

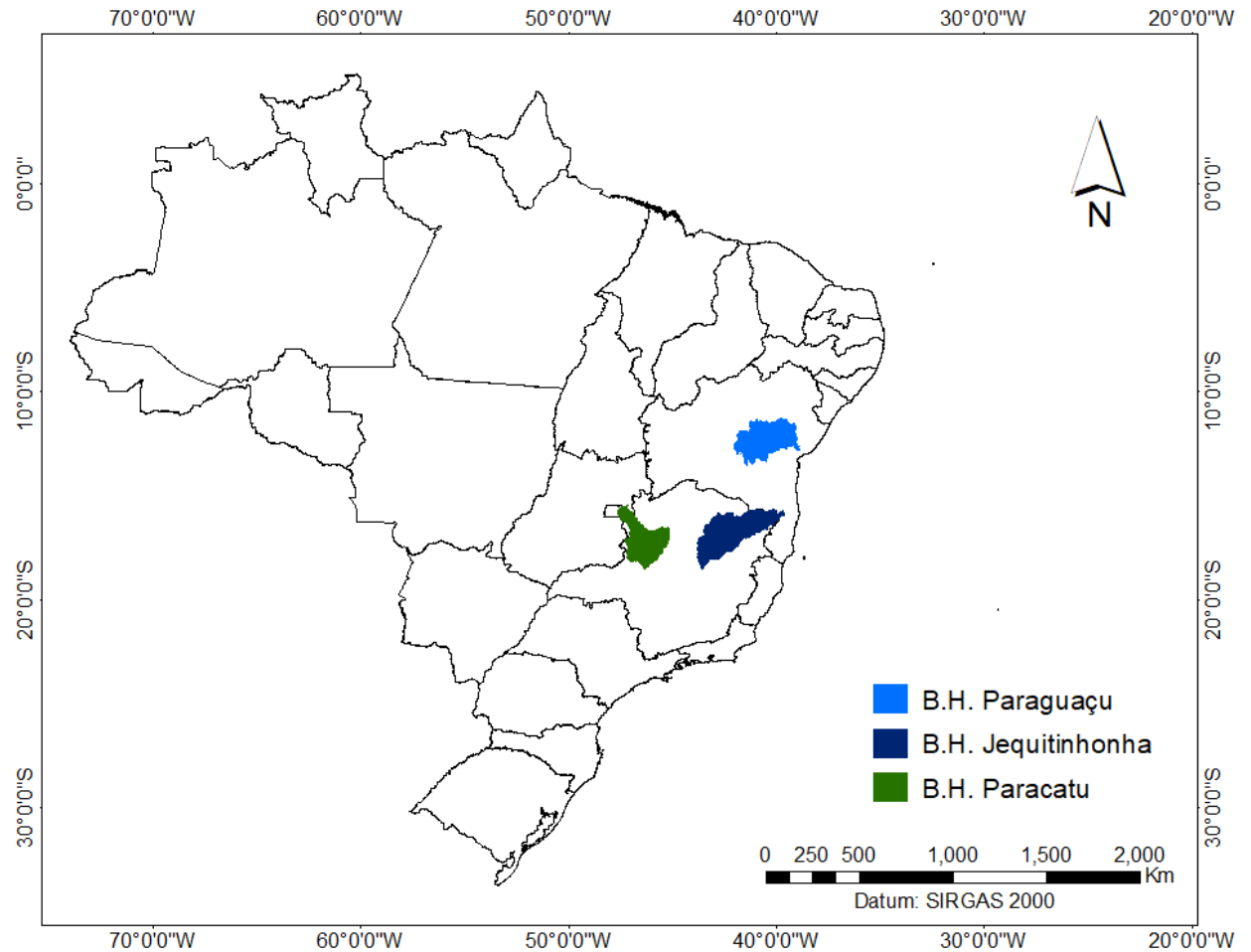


Figura 2.3 – Mapa de localização das bacias contempladas nos estudos de caso

Para determinação das áreas de drenagem dos reservatórios bem como para a obtenção das relações entre as áreas inundadas e volumes dos reservatórios utilizou-se o Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado a partir do produto RTC (Radiometrically Terrain-Corrected), com resolução de 12,5 m, proveniente da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).

Na Tabela 2.1 são apresentados os dados referentes às seções da hidrografia para as quais foram simuladas as condições operacionais durante o período de enchimento dos reservatórios.

As equações de regionalização para as bacias hidrográficas dos rios Paracatu e Jequitinhonha foram ajustadas por Ribeiro (2020) enquanto que a equação de regionalização para a bacia do rio Paraguaçu foi ajustada por Monteiro (2020).

Tabela 2.1 – Informações sobre as seções de interesse consideradas nas simulações

Reserv.	Latitude	Longitude	AD (Km ²)	Qml t
RPC	-17,334	-47,008	528	7,74
RJE	-15,881	-41,322	602	1,84
RPG	-12,26	-40,32	1915	3,40
Reserv.	A=f(V)	Eq. Regionalização	R ²	Se
RPC	$A = 0.61544 * V^{0.65060}$	$Q_{mlt} = 0,6359 BHeq_M^{0,9900}$	0,995	0,09 1
RJE	$A = 0.11594 * V^{0.97313}$	$Q_{mlt} = 0,9859 BHeq_M^{0,9365}$	0,925	0,45 8
RPG	$A = 0.41141 * V^{0.72054}$	$Q_{mlt} = 0,03151$ $Peq3001.23992$	0,883	0,50 8

* RPC – reservatórios na bacia do rio Paracatu; RJE – reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha; RPG – reservatórios na bacia do rio Paraguaçu; AD – área de drenagem; Qmlt – vazão média de longo termo; A=f(V) – função que relaciona a área de inundação com o volume do reservatório; BHeq_M – vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real média da região hidrologicamente homogênea (m³s⁻¹); PeqETR – vazão equivalente ao volume precipitado menos o valor da evapotranspiração real anual média da bacia (m³s⁻¹); Peq300 – vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem menos um fator de abstração de 300 mm (m³s⁻¹); R² – coeficiente de determinação; Se – erro padrão.

Nos estudos de caso todos os reservatórios foram dimensionados considerando período de retorno igual a 100 anos. Em razão das características climáticas Monteiro (2020) analisou o custo-benefício associado aos percentuais de regularização nas regiões selecionadas para o estudo de caso no presente trabalho. Nesse sentido, os reservatórios RPC, RJE e RPG foram dimensionados para os valores de β iguais 70, 60 e 40%, respectivamente, uma vez que para a regularização de maiores percentuais de vazão seria necessário um incremento de volume muito elevado.

Além da condição compatível com a condição de regularização estabelecida para o dimensionamento, avaliou-se outras condições que condicionam o reservatório a operar com a vazão regularizada menor do que a prevista na fase de dimensionamento.

Tabela 2.2 – Condições de operação simuladas

Reservatório	Condição 1	Condição 2	Condição 3
RPC	$\beta = 70\%$	$\beta = 60\%$	$\beta = 50\%$
RJE	$\beta = 60\%$	$\beta = 50\%$	$\beta = 40\%$
RPG	$\beta = 50\%$	$\beta = 40\%$	$\beta = 30\%$

* RPC – reservatórios na bacia do rio Paracatu; RJE – reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha; RPG – reservatórios na bacia do rio Paraguaçu; β – porcentagem da vazão média de longo termo a ser regularizada.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira etapa do presente estudo consistiu no dimensionamento de reservatórios. O período de enchimento foi analisado considerando o intervalo de tempo necessário para que os volumes armazenados atingissem os valores de CR determinados para cada um dos reservatórios estudados.

Para o RPC a CR determinada foi igual a 202,32 hm³. Esse valor foi associado a um período de retorno de 100 anos. Para esse reservatório é apresentado na Figura 2.4 um exemplo com as curvas de enchimento obtidas para diferentes condições de operação considerando como base a série sintética de vazões gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 1994 e 1993. Na mesma figura é apresentado o hidrograma de vazões correspondente ao período de enchimento com o objetivo de proporcionar melhor compreensão das variações dos volumes armazenados no reservatório durante esse período.

A curva de enchimento correspondente ao $\beta = 50\%$ é representada pela linha laranja. No início do primeiro ano é observada a ascensão da curva de enchimento associada a um período chuvoso com contribuição expressiva do escoamento superficial. Na sequência, é observado um período de redução do volume armazenado em decorrência do período de recessão do escoamento subterrâneo. O segundo período de ascensão do hidrograma ocorre ao final do primeiro ano promovendo o retorno do enchimento de forma que a linha correspondente a condição de operação para $\beta = 50\%$ atinge o valor determinado para a CR no início do segundo ano. Para essa condição de operação o reservatório enche em 1,20 anos. Após esse período o volume excedente passa a ser vertido, sendo essa condição representada pelo trecho horizontal da curva de enchimento. Nota-se que os vertimentos são intercalados por intervalos de depleção e recuperação do volume armazenado.

A linha verde representa a condição de operação cujo $\beta = 60\%$. Essa linha segue a mesma tendência inicial descrita para a linha laranja, entretanto apresenta menor taxa de crescimento representada pela declividade positiva, e maiores taxas de decaimento, representada pela declividade negativa. Assim, a taxa de crescimento ao longo do final do primeiro ano e início do segundo não é suficiente para que o volume acumulado atinja o valor projetado para CR, dessa forma a curva para a condição de $\beta = 60\%$ passa por mais três ciclos de ascensão e declínio, que são consequências das variações observadas no hidrograma, antes de encher o reservatório. Para essa condição o reservatório necessita de 4,09 anos para atingir o valor 202,32 hm³ e começar a verter os volumes excedentes.

A terceira condição de operação simulada, $\beta = 70\%$, corresponde ao percentual de regularização utilizado como critério de dimensionamento do RPC. A curva de enchimento referente a esse valor de β é representada pela linha azul claro. Nesse caso o período de enchimento foi prolongado por 10,25 anos durante os quais foram observados 11 ciclos de deplecionamento e recuperação dos volumes acumulados no reservatório. Para o caso exemplificado na Figura 2.4 observou-se diferenças expressivas dos valores de TE resultantes da consideração de diferentes condições de operação.

As vazões requeridas para regularização em cada uma das condições simuladas foram representadas na Figura 2.4 por linhas pontilhadas horizontais. A área compreendida acima de uma dessas linhas e abaixo do hidrograma de vazões afluentes corresponde ao volume disponível para enchimento do reservatório. Durante o período de recessão do escoamento subterrâneo há uma tendência de que a linha referente ao hidrograma seja inferior as linhas que representam as vazões requeridas para a regularização indicando que para esse período será consumido parte do volume armazenado no reservatório para atender a vazão requerida. Observa-se que os períodos de recessão que antecedem as linhas verticais que marcam o TE para cada uma das condições de operação são mais amenos de forma que a linha que representa a recessão do hidrograma encontra-se mais próxima das linhas referentes às vazões requeridas para a regularização.

O aumento do valor de β implica em maior vazão requerida para a regularização e, conseqüentemente, menor vazão efetiva para o enchimento, assim as taxas de decaimento da curva de enchimento passam a ser mais negativas enquanto que o excedente acumulado do reservatório durante o período úmido é menor acarretando numa taxa de enchimento inferior.

Destaca-se na Figura 2.4 as falhas de atendimento às vazões requeridas para a regularização no início e final do oitavo ano de enchimento, para a condição de operação correspondente a $\beta = 70\%$. Ao considerar $\beta = 50$ e 60% não foi observada nenhuma situação de esgotamento do volume útil, portanto, seriam atendidas às vazões previstas para regularização durante todo o período de enchimento. Assim, para $\beta = 50$ e 60% tem-se $G = 100\%$ e para $\beta = 70\%$, $G = 97,99\%$. Ressalta-se que os resultados de $G = 100\%$ foram obtidos em função da amostra de dados disponíveis. Em hidrologia nunca teremos 100% de certeza, uma vez que as análises são baseadas em uma série histórica que contempla um curto período de informações.

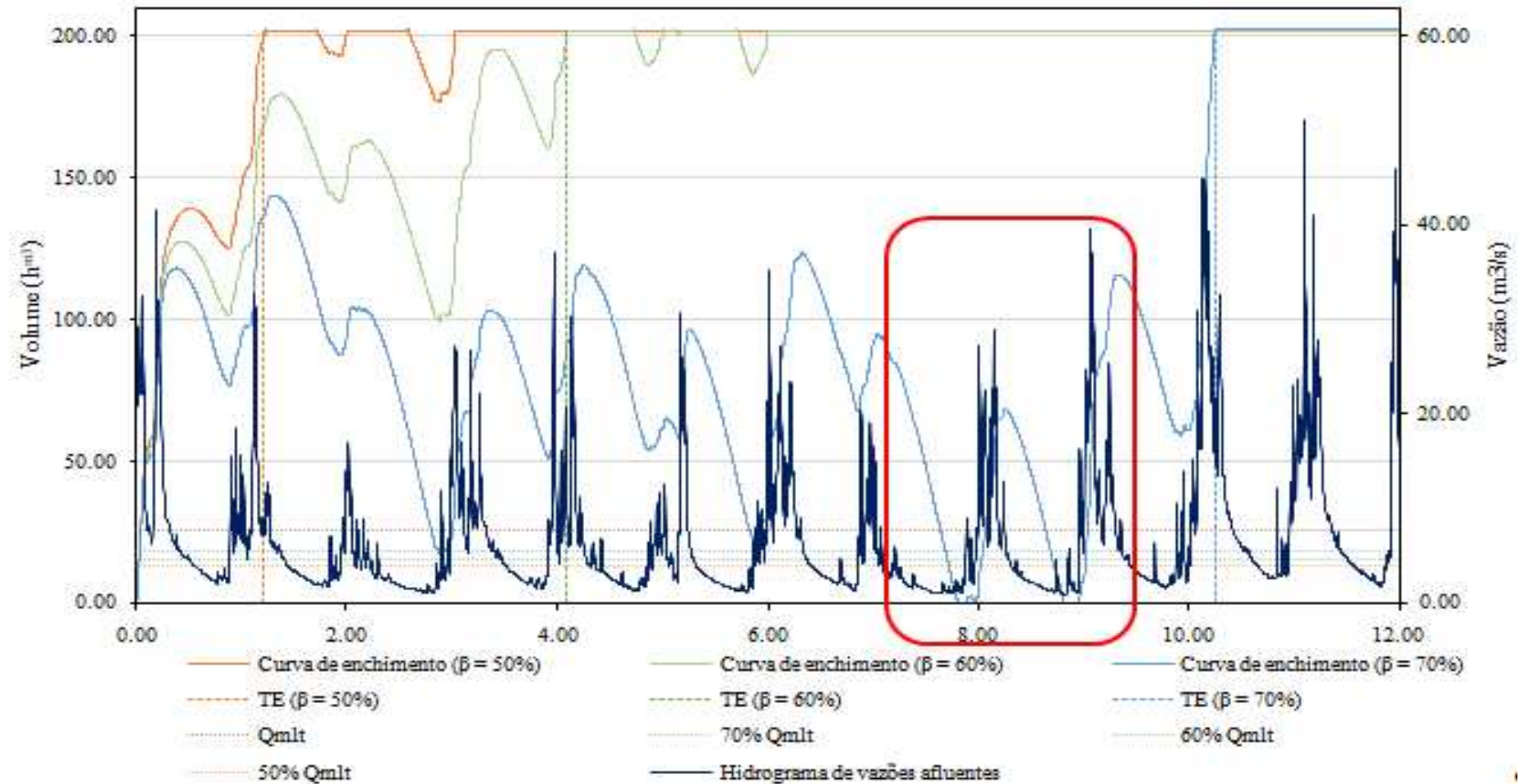


Figura 2.4 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 1994 e 1993

Como forma de exemplificar outras situações possíveis para o período de enchimento, apresentam-se na Figura 2.5 as curvas de enchimento obtidas para o RPC considerando as diferentes condições de operação, bem como o respectivo hidrograma de vazões afluentes para o período de enchimento correspondente a análise realizada considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 2001 e 2002. Ressalta-se que o ano de 2001 apresenta o menor valor de vazão média anual registrado na série histórica de dados.

As variações do hidrograma apresentado na Figura 2.5 são refletidas nas curvas de enchimento. O início do primeiro ano é marcado por um curto período de enchimento no qual as vazões requeridas para a regularização são supridas. Na sequência observa-se um período de estiagem que se estende até o final de outubro com a ocorrência de vazões de baixa magnitude associada ao escoamento subterrâneo. Consequentemente, o reservatório funciona na maior parte do primeiro ano de enchimento em condição a fio d'água perdendo a sua função de regularização, logo, a garantia de atendimento às demandas para o primeiro ano é baixa.

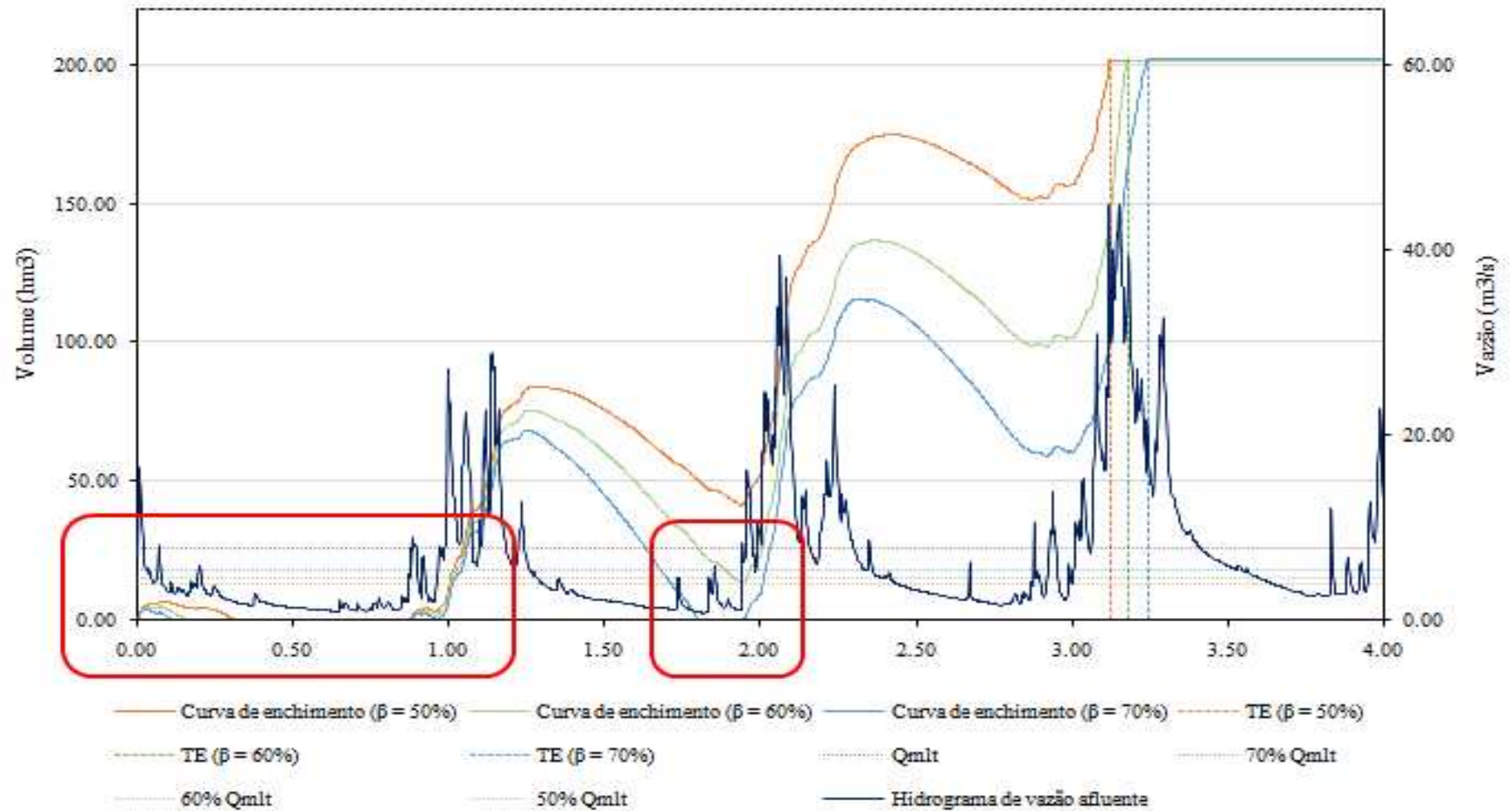


Figura 2.5 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 2001 e 2000

O segundo ano de enchimento inicia com a ocorrência de altos índices fluviométricos proporcionando enchimento do reservatório, entretanto, o período posterior de recessão do escoamento provoca inversão de tendência nas curvas de enchimento que atingem declividades negativas acentuadas. Para a condição de operação correspondente a $\beta = 70\%$ esgota-se o volume armazenado ao final do segundo ano e o reservatório permanece vazio por 51 dias.

No terceiro ano observa-se que o volume de escoamento disponível para o enchimento do reservatório é superior em relação aos anos anteriores, conseqüentemente, o enchimento ocorre numa taxa de crescimento mais acentuada criando reservas volumétricas capazes de suportar um período posterior de esvaziamento. No início do ano subsequente as curvas de enchimento retomam o crescimento e o reservatório atinge o valor determinado de CR na fase de dimensionamento.

Ao contrário do que foi constatado para a Figura 2.4, as curvas de enchimento apresentadas na Figura 2.5 para os diferentes valores de β foram muito similares, como conseqüência os respectivos tempos de enchimento também apresentaram valores aproximados. Para $\beta = 50, 60$ e 70% , o TE foi igual a 3,12; 3,18 e 3,24 anos, respectivamente. Apesar dessa similaridade observada para o TE obtidos para as três condições de operação simuladas, evidenciou-se diferenças consideráveis em relação à garantia de atendimento às demandas. Para $\beta = 50, 60$ e 70% obteve-se valores de G iguais a 82,18; 78,26 e 72,61%, respectivamente.

Na Figura 2.6 é apresentada a síntese de todos os resultados referentes a cada uma das séries sintéticas geradas e às diferentes condições de operação simuladas para o RPC. Observam-se padrões diversos de tempo de enchimento, que contemplam desde situações em que o reservatório enche em poucos meses independentemente da condição de operação adotada, a casos em que levaria mais de 11 anos para atingir o valor determinado de CR com diferenças expressivas entre os valores de TE obtidos para a consideração de diferentes β .

Conforme esperado, o tempo de enchimento cresce com o aumento da vazão requerida para a regularização, embora de acordo com o ano de início da série o TE pode ser pouco sensível a variação de β , confirmando a natureza estocástica das variáveis hidrológicas envolvidas no processo de enchimento como vazão e precipitação. De forma geral as diferenças entre os TE se acentuam nos períodos mais secos e reduzem nos períodos chuvosos. Também é nos períodos mais secos que se observam os menores percentuais associados à garantia de atendimento as demandas. Apesar desse comportamento ser

esperado, a metodologia proposta capta as variações ocorridas para as diversas situações simuladas permitindo quantificar essas tendências e projetar as condições de operação do reservatório para um período normalmente não contemplado nas metodologias de dimensionamento.

Ao analisar os valores de TE e G não se evidencia uma relação clara entre essas variáveis, uma vez que valores altos ou baixos de TE podem estar associados a elevados níveis de garantia. Porém, ambas variáveis podem ser compreendidas mais facilmente quando analisado o comportamento das vazões médias ao longo dos anos, por esse motivo apresentam-se na Figura 2.7 as vazões médias anuais que serviram de subsídio para as discussões afetas aos resultados de TE e G. Nessa mesma figura são identificadas por linhas horizontais as vazões correspondentes a 50, 60 e 70% da Qmlt que auxiliam o entendimento dos resultados de TE obtidos para diferentes condições de operação e a partir da consideração de anos distintos para iniciar o processo de enchimento do reservatório.

Analisando as Figuras 6 e 7, observou-se que o TE e as vazões anuais apresentam relação negativa, uma vez que baixos valores de TE geralmente se associam a elevados valores de vazão média anual no primeiro ano da série. Conforme apresentado na Figura 2.7, os anos de 1978 a 1983, 2003 a 2007 e 1992 foram caracterizados por valores de vazões médias anuais de elevada magnitude, conseqüentemente, como pode ser constatado na Figura 2.6, o período de enchimento foi mais curto para as simulações que utilizaram séries sintéticas iniciadas por um desses anos.

Retomando ao exemplo apresentado na Figura 2.4 observa-se na Figura 2.7 que a vazão média anual de 1994 é superior as vazões previstas para a regularização considerando as três condições de operação simuladas de forma que é gerado um excedente volumétrico. No ano de 1995, apesar da vazão média ainda permanecer superior a 50, 60 ou 70 % da Qmlt, o volume excedente é reduzido. No início desse ano o reservatório atinge o volume correspondente a CR considerando a condição de operação para $\beta = 50\%$, no entanto, para as demais condições simuladas o volume excedente não é suficiente para prover o enchimento total. Nos dois anos subsequentes as vazões médias anuais decrescem reduzindo o volume disponível para enchimento. Em 1997 a vazão média anual volta a crescer e no início de 1998 os volumes acumulados atingem o valor de 202,32 hm³ para a condição de operação correspondentes a $\beta = 60\%$. Entre os anos de 1998 e 2004, sendo este último ano correspondente ao período de enchimento para a condição de $\beta = 70\%$, são observados sete ciclos de ascensão e depleção da curva de enchimento. Entre esses anos verificou-se na Figura

2.7 que as vazões médias anuais de 1998, 1999, 2001 e 2002 foram inferiores a 70% da Qmlt, e que os volumes excedentes gerados nos anos de 2003 e 2004 foram determinantes para que os volumes acumulados no reservatório numa condição de operação de $\beta = 70\%$ atingissem o valor determinado de CR em março de 2004.

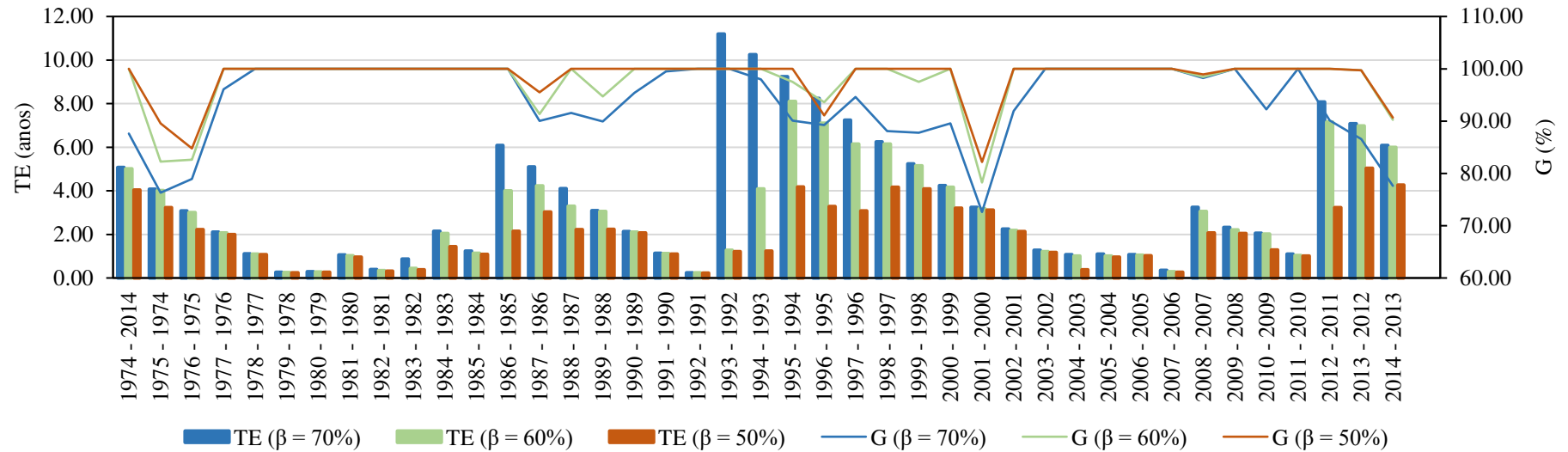


Figura 2.6 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Paracatu (RPC) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas

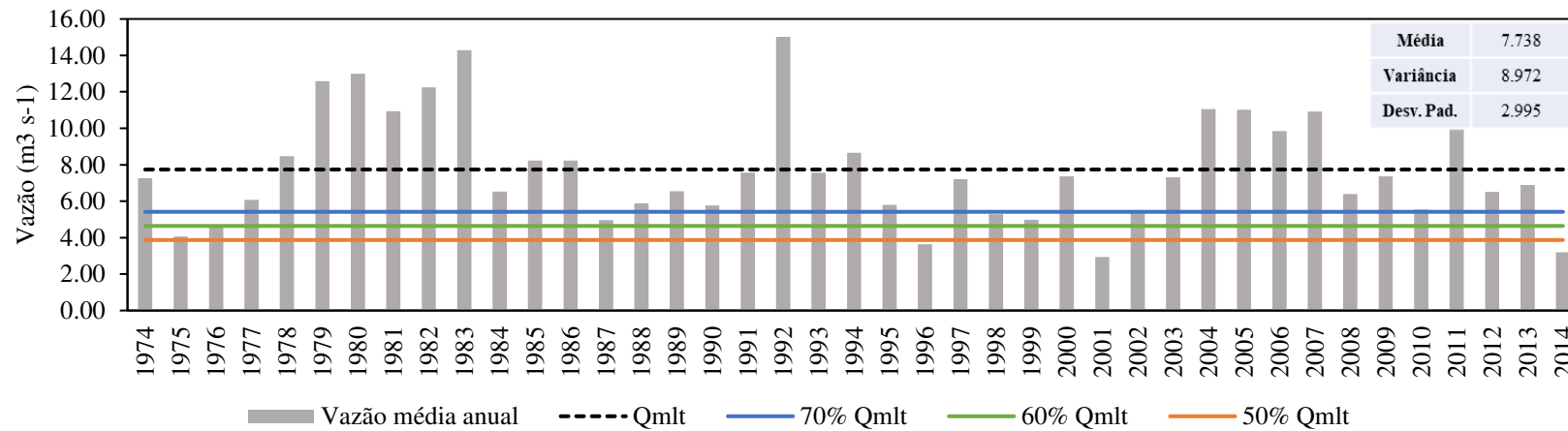


Figura 2.7 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Paracatu (RPC)

A CR determinada para o RJE foi de 25,73 hm³. Na Figura 2.8 são apresentados os resultados de TE e G obtidos para esse reservatório considerando todas as séries sintéticas geradas e diferentes condições de operação simuladas. Em relação ao exemplo anterior observa-se maior uniformidade e menor amplitude entre os resultados de TE, constatando-se pouca sensibilidade de TE em relação às variações de β .

Na Figura 2.9 são apresentadas as vazões médias anuais correspondentes a seção selecionada para análise de regularização do RJE que auxiliam na compreensão dos resultados apresentados na Figura 2.8. Observa-se que a série de vazões apresentada para o RJE possui baixa variabilidade interanual além de baixos valores de desvio padrão. Essas características influenciaram para que os valores de TE obtidos para esse reservatório fossem mais uniformes em relação aos demais estudos de caso.

No RJE a relação entre baixos valores de TE e elevados valores de vazões médias anuais é evidenciada de forma mais clara apenas para o ano de 1992 que corresponde ao ano de valor de vazão máxima observado na série histórica, distinguindo-se dos demais em razão da sua magnitude ser cerca de 2,7 vezes o valor da Q_{mlt} obtida para a série histórica. Investigando-se os registros históricos das estações fluviométricas e pluviométricas observou-se que esse ano possui valores mais elevados de precipitação e vazão em relação aos demais caracterizando-se como um ano atípico na série de dados. Assim, conforme apresentado na Figura 2.8, para a série 1992 – 1993, foram necessários 29 dias para encher o reservatório, considerando como condição de operação a regularização de 60% da Q_{mlt}, e 28 dias para as demais condições consideradas.

A relação entre G e os valores de vazões para o primeiro ano da série não é evidente, assim as falhas de atendimento não são, necessariamente, mais frequentes ao longo do primeiro ano de enchimento.

Ao contrário do que foi constatado para o TE, os resultados de G para o RJE apresentaram elevada amplitude de variação (45,05 a 100,00%) e sensibilidade às variações das condições de operação representadas pelo valor de β . Observa-se alguns casos em que o TE apresenta poucas variações em relação aos valores de β considerados, porém os níveis de garantia são expressivamente divergentes para as três condições de operação simuladas. Essa constatação foi observada de forma mais acentuada para as séries de 1989-1988, 2001-2000 e 2013-2012. Na Figura 2.10 encontram-se detalhadas as curvas de enchimento e o hidrograma de vazões afluentes correspondentes à simulação realizada para a série 2013-2012.

O hidrograma de vazões afluentes apresentado na Figura 2.10 reflete a ocorrência de eventos de chuvas intensas em períodos concentrados intercalados por longos períodos de estiagem. Observa-se que o ano de 2013 é marcado por um longo período de estiagem. Contudo, no final de outubro e início de novembro desse ano é observado a ascensão do escoamento superficial até atingir o pico de vazão de $34,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto que durante o período de recessão a vazão afluyente foi da ordem de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. O volume de escoamento superficial gerado por esse evento de elevada magnitude é suficiente para o reservatório encher em pouco mais de um mês para qualquer uma das três condições de operação simuladas. Os valores de TE obtidos para $\beta = 40, 50$ e 60% foram iguais a 362, 363 e 364 dias, essas diferenças não são visíveis na escala em que é apresentada a Figura 2.10, portanto, as linhas correspondentes aos valores de TE para cada uma das condições de operação parecem ser coincidentes.

O volume de escoamento superficial gerado durante o primeiro ano da série 2013-2012 garante o enchimento, entretanto, como os eventos chuvosos ocorrem de forma concentrada dentro de um curto espaço de tempo no final de 2013, não há garantia de suprimento das vazões requeridas para a regularização durante o período de estiagem antecedente. As diferenças entre os valores de G obtidos para a série 2013-2012 de acordo com o valor de β ocorre em razão de que na medida em que se aumenta a vazão requerida para a regularização reduz-se o volume efetivamente disponível para o enchimento do reservatório, assim, observa-se na Figura 2.10 que quanto maior o valor de β mais rápido é o decaimento da curva de enchimento e maior é o número de dias em que o volume útil é esgotado. Dessa forma, para $\beta = 40, 50$ e 60% , obteve-se $G = 86,74; 64,74$ e $45,05\%$, respectivamente.

Após o enchimento do reservatório ocorre um período de vertimento caracterizado pelas linhas horizontais na Figura 2.10 correspondente a um volume de $25,73 \text{ hm}^3$. Nota-se que após um longo período de recessão a linha azul clara que representa a condição de operação $\beta = 60\%$ passa por um período de decaimento indicando esvaziamento do reservatório e recupera-se na sequência em resposta a ascensão do hidrograma.

A CR determinada para o RPG foi de $80,55 \text{ hm}^3$. Na Figura 2.11 são apresentados os TE e G obtidos para as simulações referentes ao RPG. Assim como para o RPC foram identificados diversos padrões de enchimento..

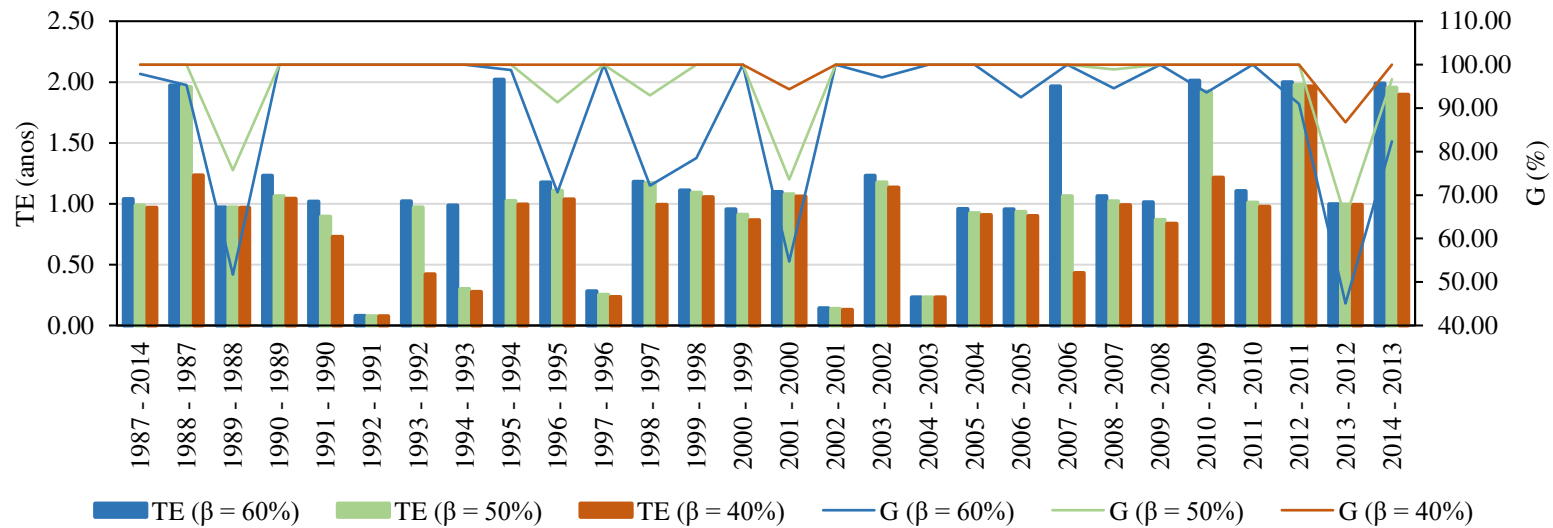


Figura 2.8 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Jequitinhonha (RJE) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas.

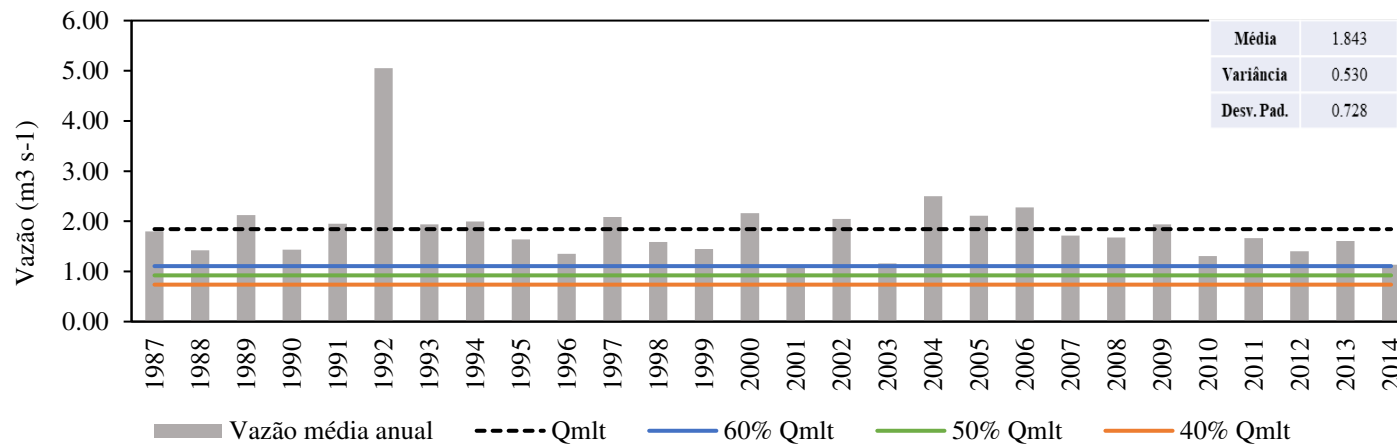


Figura 2.9 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Jequitinhonha (RJE)

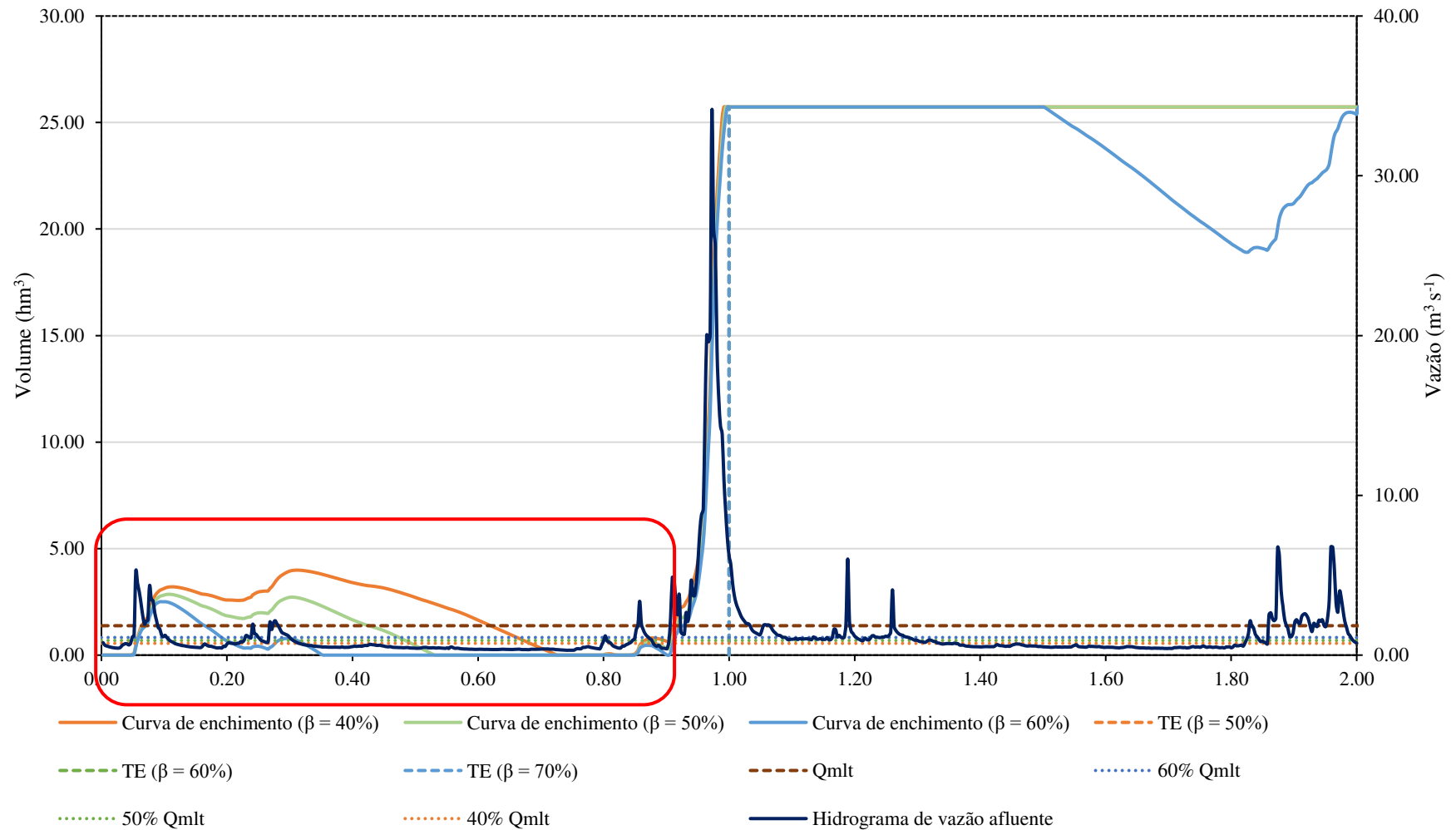


Figura 2.10 – Curvas de enchimento e tempo de enchimento (TE) para as diferentes condições de operação e hidrograma de vazões afluentes para o reservatório do Jequitinhonha (RJE) considerando a série sintética gerada para a qual o primeiro e o último ano foram, respectivamente, 2013 e 2012

Na Figura 2.12 são apresentadas as vazões médias anuais obtidas para a seção correspondente a análise de regularização do RPG, nesta figura observa-se valores elevados de variância e desvio padrão para a série de dados apresentada com as vazões médias anuais variando entre $0,659$ e $10,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Essas observações são importantes para a compreensão da heterogeneidade dos resultados apresentados na Figura 2.11. Destacam-se por apresentarem tempo de enchimento inferiores a um ano para qualquer um dos valores de β considerados as seguintes séries: 1974-1973; 1978-1977; 1979-1978; 1980-1979; 1981-1980; 1985-1984; 1989-1988; 1992-1991; 1997-1996; 2002-2001 e 2004-2003.

Como pode ser observado na Figura 2.12, os anos de início dessas séries são caracterizados por apresentarem elevados valores de vazões médias anuais, sendo estes consideravelmente superiores à vazão requerida para a regularização independentemente do valor de β adotado, logo o volume excedente de escoamento superficial gerado é suficiente para promover o enchimento do reservatório em um curto espaço de tempo. Assim como para o RJE observa-se que para algumas simulações o TE é muito similar para os três valores de β enquanto que os níveis de garantia de atendimento às demandas apresentam divergências expressivas. Isso ocorre de maneira mais evidente para as séries 1996-1995 e 2001-2000.

Conforme observa-se na Figura 2.12, a vazão média anual para o ano de 1996 é inferior à 40% da Q_{mlt} e para o ano de 2001 é muito próxima a esse percentual, já para os anos subsequentes de 1997 e 2002 a vazão média anual supera a Q_{mlt} . A causa para a obtenção de resultados semelhantes para TE e divergentes para G pode ser atribuída a um comportamento hidrológico semelhante ao apresentado na Figura 2.10 caracterizado pela ocorrência de um longo período de estiagem seguido por um curto período com índices pluviométricos de elevada magnitude capaz de gerar o montante de volume de escoamento superficial necessário para que o enchimento ocorra rapidamente.

Para algumas séries simuladas observou-se divergências acentuadas tanto para TE quanto para G conforme o percentual de regularização adotado para a fase de enchimento. Destaca-se a série 2008 – 2007 para a qual obteve-se o maior tempo de enchimento (8,14 anos) associado ao $\beta = 40\%$ e as maiores diferenças de TE entre as demais condições de operação consideradas. Para essa série o TE pode ser reduzido para 3,30 anos adotando-se $\beta = 30\%$ ou para 1,84 anos para $\beta = 20\%$. Em relação aos valores de G, observou-se variações entre 47,36 a 100,00%.

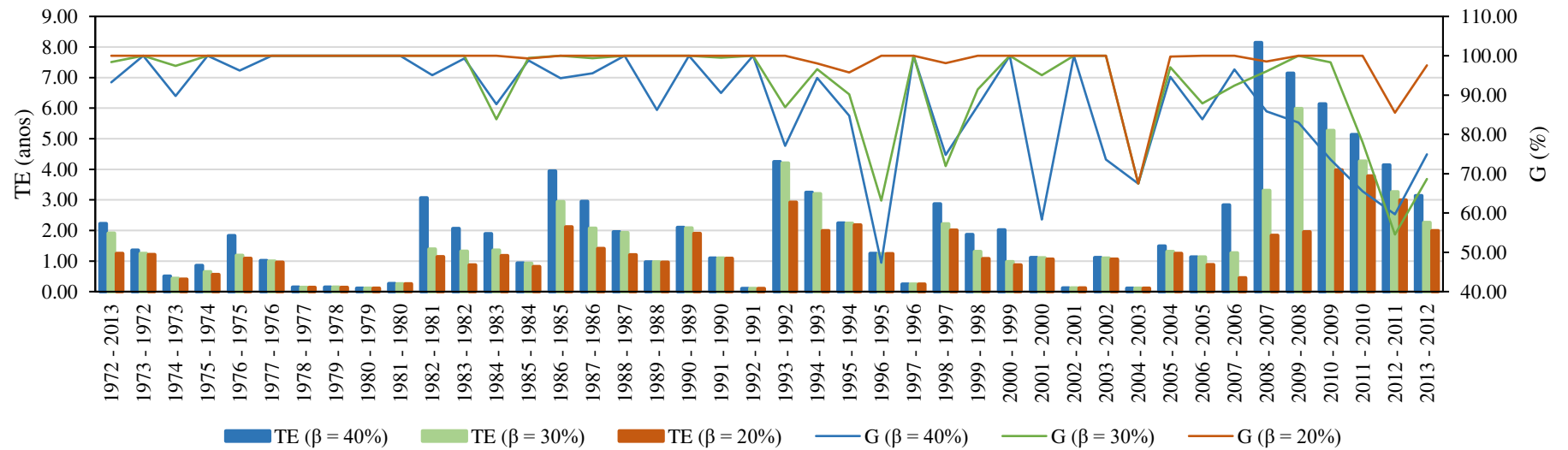


Figura 2.11 – Tempo de enchimento (TE) e garantia de atendimento às demandas (G) calculados para o reservatório do Paraguaçu (RPG) considerando todas as séries sintéticas geradas e condições de operação simuladas

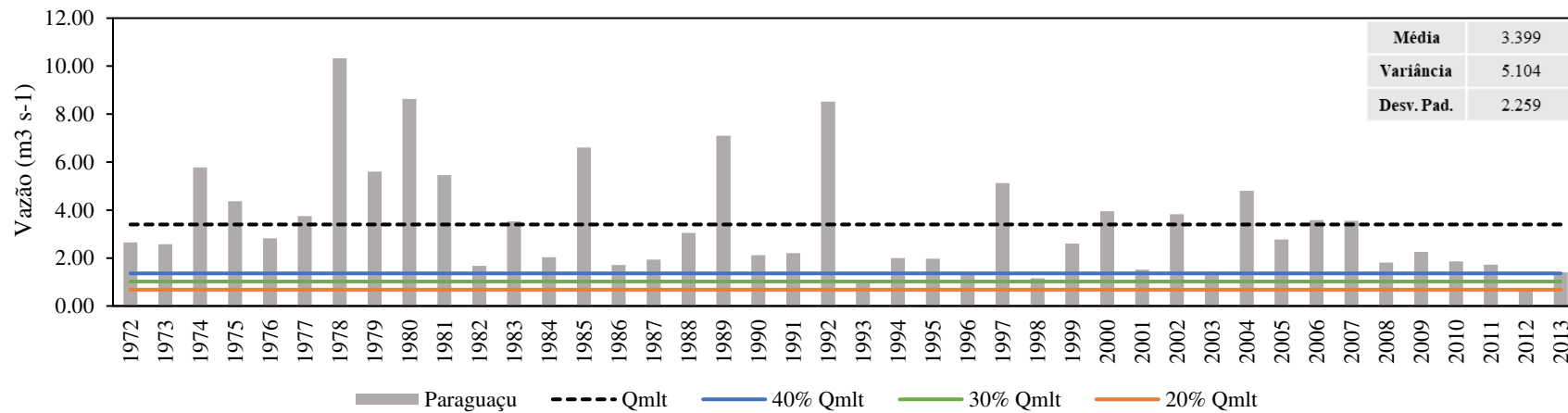


Figura 2.12 – Vazões médias anuais na seção correspondente a análise de regularização do reservatório do Paraguaçu (RPG)

Analisando conjuntamente as séries de vazões médias anuais para os três reservatórios estudados observou-se que as séries referentes às seções hidrográficas do RPC e do PRG possui maior variabilidade interanual em comparação a série de correspondente ao RJE. Esse fato corrobora para que a dependência do ano de início da série em relação ao tempo de enchimento seja mais forte para o RPC e RPG. Como consequência foi constatada maior amplitude de variação dos valores de TE para os estudos de caso do RPC e RPG. Para o RPC o TE variou entre 0,23 e 11,19 anos, para o RJE entre 0,08 a 2,02 anos e para o RPG entre 0,10 e 8,14 anos.

A partir da análise dos resultados apresentados para os três reservatórios constatou-se uma tendência, para o RPC e RPG, de que os baixos valores de G estão associados aos anos de início de série com baixos valores de vazão média anual, tendo sido verificado que a falha de atendimento às demandas acontece com maior frequência no primeiro ano de enchimento. Para o RPC destacam-se os anos de 1975, 1976, 2001 e 2014, e para o RPG os anos de 1996, 1998, 2001, 2004, 2010, 2011, 2012 e 2013.

Para o RJE não é evidenciada a relação entre o ano de início da série e o nível de garantia de atendimento às demandas. Nesse reservatório destacam-se pelos baixos valores de G obtidos para as séries com os anos iniciais iguais a 1989, 1996, 1998, 2001 e 2013.

Na Tabela 2.3 são sintetizados os resultados de G obtidos para os três estudos de caso a partir da aplicação da metodologia proposta. Para cada valor de β são atribuídos os percentuais do número de séries em que o nível de garantia especificado é obtido em relação ao número de séries totais.

Conforme apresentado na Tabela 2.3 o nível de garantia varia em função do β havendo uma tendência de redução de G com o aumento do percentual de regularização, fato que já vem sendo constatado desde os primeiros exemplos apresentados nas Figuras 4 e 5. Entretanto, a síntese apresentada na Tabela 2.3 permite quantificar essa tendência, além de evidenciar que a metodologia desenvolvida foi capaz de captar as variações inerentes aos três estudos de caso analisados. Os reservatórios avaliados se encontram submetidos a condições climáticas específicas que implicam em divergências na distribuição da precipitação, no regime de vazões afluentes ao reservatório e na taxa de evaporação do lago. Essas variações interferem no potencial de regularização, como discutido por Monteiro (2020), no tempo de enchimento, como pode ser verificado a partir de uma análise comparativa entre as Figuras 6, 8 e 11, e no nível de garantia de atendimento às demandas como observado através dos resultados sintetizados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados de garantia de atendimento às demandas (G) por reservatório

RPC						
G (%)	$\beta = 70\%$		$\beta = 60\%$		$\beta = 50\%$	
	NS	PS	NS	PS	NS	PS
99	19	46%	31	76%	34	83%
95	23	56%	34	83%	36	88%
90	30	73%	38	93%	38	93%
80	37	90%	40	98%	41	100%
70	41	100%	41	100%	41	100%
RJE						
G (%)	$\beta = 60\%$		$\beta = 50\%$		$\beta = 40\%$	
	NS	PS	NS	PS	NS	PS
99	13	46%	21.00	75%	26.00	93%
95	17	61%	23.00	82%	26.00	93%
90	21	75%	25.00	89%	27.00	96%
80	22	79%	25.00	89%	28.00	100%
70	25	89%	27.00	96%	28.00	100%
RPG						
G (%)	$\beta = 40\%$		$\beta = 30\%$		$\beta = 20\%$	
	NS	PS	NS	PS	NS	PS
99	14.00	33%	23.00	55%	35.00	83%
95	19.00	45%	30.00	71%	40.00	95%
90	24.00	57%	33.00	79%	40.00	95%
80	32.00	76%	36.00	86%	41.00	98%
70	37.00	88%	38.00	90%	41.00	98%

* RPC – reservatórios na bacia do rio Paracatu; RJE – reservatórios na bacia do rio Jequitinhonha; RPG – reservatórios na bacia do rio Paraguaçu; β – percentual de regularização; G – garantia de atendimento às demandas; NS – número de séries; PS – percentual do número de séries em que a garantia especificada é obtida em relação ao número de séries totais.

O nível de garantia obtido para cada um dos reservatórios estudados também pode ser relacionado com a ocorrência e magnitude de déficits hídricos da região, sendo o valor de déficit dado pela diferença entre a lâmina de evaporação e de precipitação. Analisando a base de dados para o período considerado nos estudos de caso, constata-se que o maior e menor valor de déficit hídrico médio anual foi obtido para a localização de implantação do RPG (1098 mm) e RPC (373 mm), respectivamente, enquanto que para a localização do RJE obteve-se um valor de déficit igual a 829 mm. Além disso, analisando o comportamento médio dos déficits em escala mensal verificou-se que para a região do RPC a lâmina evaporada supera a precipitada durante sete meses entre abril a outubro, para a região do RJE caracterizam-se dez meses de déficits entre janeiro a outubro e para a localização do RPG o

déficit hídrico ocorre durante todos os meses do ano. Tendo em vista essas considerações e os resultados apresentados na Tabela 2.3, conclui-se que os níveis de garantia de atendimento às demandas durante o período de enchimento tendem a ser mais baixos em regiões com maior déficit hídrico médio anual e com maior número de meses em que a lâmina evaporada supera a precipitada.

A quantificação dessas tendências através da aplicação da metodologia proposta pode ser utilizada como uma ferramenta de gestão de recursos hídricos, uma vez que os níveis de garantias calculados possibilitam fazer análises pontuais abrangendo as fragilidades climáticas da região para que se possa chegar a um procedimento de operação adequado ao nível de garantia de atendimento às demandas que uma população e/ou empreendimento possa suportar.

Operar o reservatório durante a fase de enchimento com o seu potencial máximo de regularização previsto na fase de projeto é uma condição que implica risco consideravelmente elevado de desabastecimento. A obtenção de um nível de garantia de 90%, por exemplo, foi obtida apenas para 73, 75 e 57% das séries analisadas para os estudos de caso do RPC, RJE e RPG, respectivamente, ao considerar o potencial máximo de regularização utilizado como referência para a determinação da CR. Em contrapartida, observa-se na Tabela 2.3 um aumento expressivo da garantia de atendimento às demandas ao adotar condições de operação associadas a menores valores de β .

Quando o reservatório se destina ao atendimento às demandas de populações que já convivem com situações de escassez hídrica, por exemplo, a gravidade do problema poderá justificar a decisão de operar o reservatório na sua capacidade máxima de regularização desde o início do seu período de enchimento, ainda que o nível de garantia de atendimento às demandas para essa condição seja mais baixo e que a população sujeite-se a um maior risco de ocorrência de períodos de racionamento dentro de um curto espaço de tempo. Por outro lado, se a construção do reservatório visa atender as demandas provindas de um crescimento planejado da população ou do desenvolvimento de atividades agrícolas ou industriais que possam ser projetadas para atender a um crescimento progressivo, a adoção de condições de operação associadas a valores de β menores poderá se constituir como uma alternativa mais atrativa, visto que há uma tendência de enchimento mais rápido e de maiores garantias de atendimento às demandas durante a fase de enchimento.

Diante do exposto pode-se afirmar que a análise da garantia de atendimento às demandas durante o período de enchimento é de suma importância para que as decisões

relativas ao planejamento do uso da água durante esse período possam ser tomadas de maneira mais assertiva.

Os resultados dos intervalos de confiança calculados para o TE e G são apresentados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. O IC representado para cada um dos reservatórios refere-se ao intervalo de estimativas prováveis associado a um grau de confiabilidade de 95%. Tanto para TE quanto para G observa-se que há uma tendência de que os maiores valores de β estejam associados a maiores amplitudes de IC, logo, ao considerar valores mais baixos de β é possível inferir com maior exatidão sobre essas variáveis. Essa tendência é menos visível para a análise do TE no RJE, como visto anteriormente os valores de TE obtidos para esse reservatório apresentaram pouca sensibilidade à variação de valores de β .

As diferenças visualizadas na Figura 2.13 para os três estudos de caso em relação as amplitudes calculadas dos intervalos de confiança associados ao TE relacionam-se as medidas de dispersão observadas para as séries de vazões médias anuais nas seções correspondentes a análise de regularização apresentadas nas Figuras 7, 9 e 12. Conforme apresentado nessas figuras, o desvio padrão é menor para a série correspondente ao RJE e maior para a série referente ao RPC. Com base nessas análises conclui-se que uma maior variabilidade interanual do regime de vazões implica em maior dependência do ano de início da série e, conseqüentemente, em maior amplitude de resultados referentes ao TE.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 2.14 observa-se que a diferença entre as amplitudes de IC em função de β são mais expressivas para o RJE, em comparação aos demais reservatórios estudados, o RJE também apresenta as maiores amplitudes de variação em relação ao valor médio de G, enquanto que para o RPC obteve-se as menores amplitudes do IC associado a essa variável. Os elevados valores de amplitude de IC obtidos para o RJE e RPG se justificam pelo fato de ser observada alta variabilidade intra-anual das vazões correspondentes as seções utilizadas como referência para a análise de regularização desses reservatórios. As regiões correspondentes ao RJE e RPG são marcadas pela ocorrência de eventos de precipitação de alta intensidade concentrados em poucos meses o que, conseqüentemente, ocasiona em regimes de vazões caracterizados por longos períodos de estiagem, como exemplificado na Figura 2.10, para os quais são registradas com maior frequência a ocorrência de falhas de atendimento às vazões requeridas para a regularização.

O IC agrega informação ao valor médio apresentado das variáveis analisadas. A partir da análise do IC é possível se posicionar em relação aos diferentes valores contidos no

intervalo. A consideração do valor correspondente ao limite superior do IC obtido para o TE, por exemplo, evita a geração de falsas expectativas para os usuários de água que pretendem se beneficiar com a regularização de vazões. Por outro lado, a consideração do limite inferior do IC calculado para G leva a estimativas mais seguras quanto ao suprimento de água durante o período de enchimento.

A análise do IC mostra mais uma vez que a metodologia proposta foi capaz de detectar as variações envolvidas entre as diferentes situações avaliadas através dos estudos de casos. O intervalo de confiança configura-se como uma ferramenta de síntese dos resultados permitindo que estes sejam acessados de maneira mais conclusiva para dar suporte as decisões no âmbito das ações a serem realizadas na área de gestão de recursos hídricos.

Essas decisões envolvem escolhas entre priorizar o rápido enchimento do reservatório associando a um cenário de menor disponibilidade hídrica, uma vez que será necessário optar por uma condição de operação com menor potencial de regularização de vazão, porém com maior nível de garantia, ou começar o enchimento do reservatório com a capacidade máxima prevista para a regularização no projeto de dimensionamento, ao mesmo tempo que se expõe a menor garantia de atendimento às demandas.

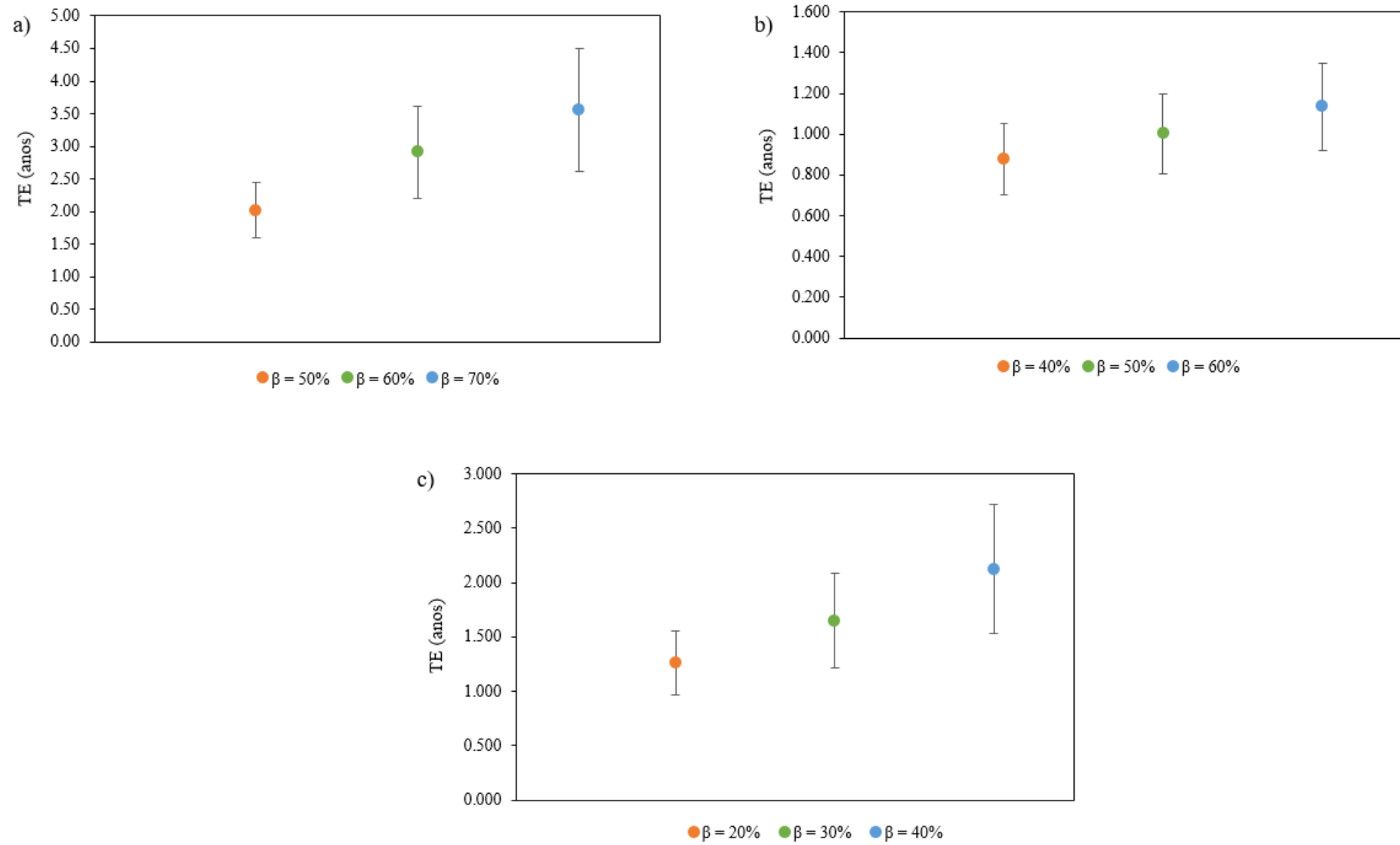


Figura 2.13 – Intervalos de confiança referentes ao tempo de enchimento (TE) dos reservatórios RPC a), RJE b) e RPG c)

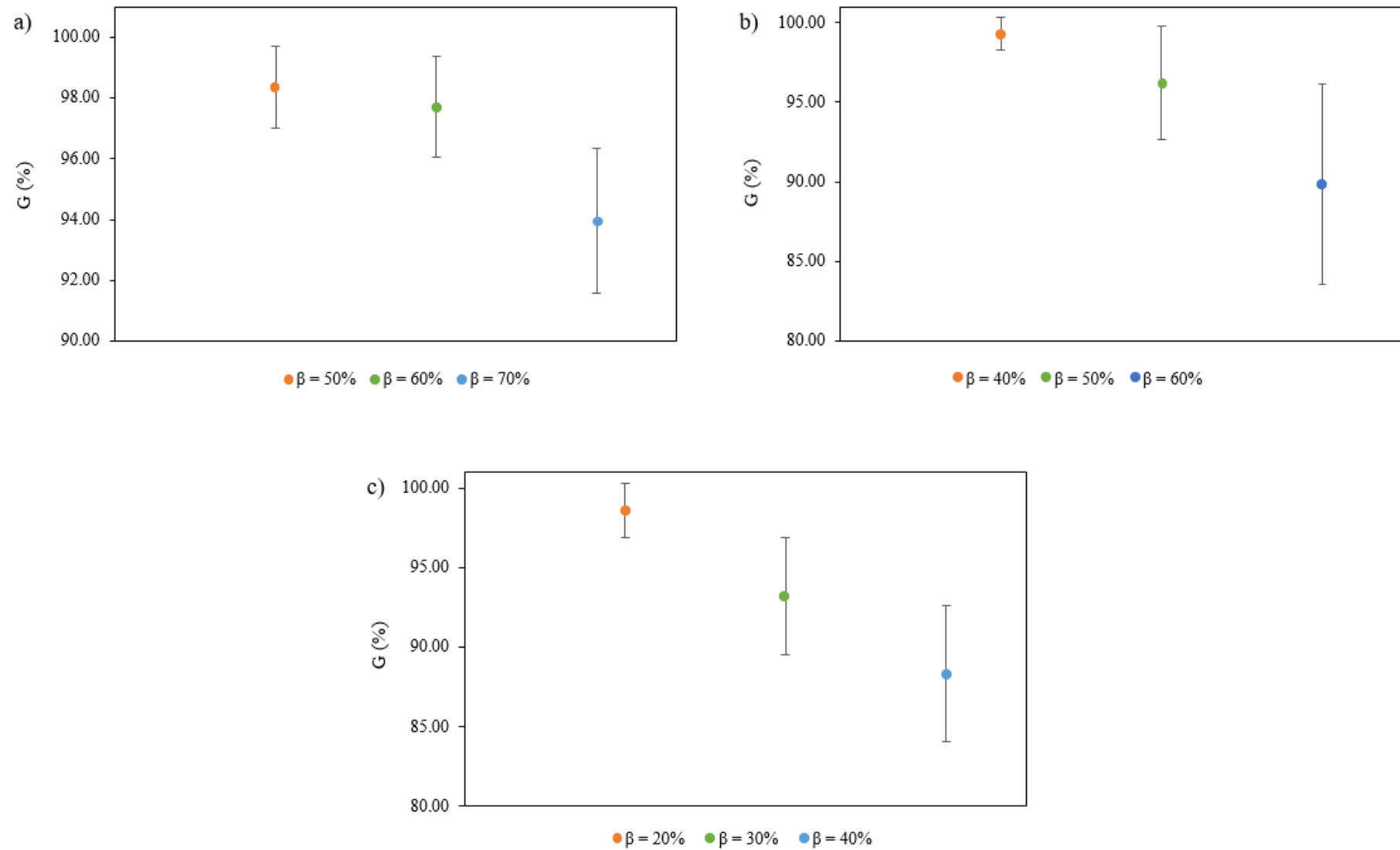


Figura 2.14 – Intervalos de confiança referentes a garantia de atendimento às demandas (G) dos reservatórios RPC a), RJE b) e RPG c)

2.5 CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida permitiu avaliar as opções de operação de reservatórios de regularização durante o período de enchimento. As análises do tempo de enchimento e da garantia de atendimento às demandas foram capazes de detectar as variações inerentes as condições climáticas refletindo a natureza estocástica das variáveis hidrológicas envolvidas no processo de enchimento como vazão e precipitação.

As variações interanuais nos regimes de vazões foram refletidas nos resultados de tempo de enchimento de forma que quanto maior for essa variação maior será a dependência do primeiro ano da série considerada para a análise de enchimento. Séries com maior variação interanual apresentaram maior amplitude dos valores de tempo de enchimento e maior sensibilidade dessa variável às alterações dos percentuais de regularização (β). Por outro lado, as variações intra-anuais observadas nos regimes de vazões mostraram-se mais influentes nos resultados de garantia de atendimento às demandas. Para os reservatórios estudados nas bacias hidrográficas dos rios Jequitinhonha e Paraguaçu, para os quais observou-se regimes de vazões com maior grau de variação intra-anual obteve-se, em média, menores níveis de garantia de atendimento às demandas.

Através das análises dos intervalos de confiança associados a um nível de confiança de 95% foi possível sintetizar os resultados de tempo de enchimento e garantia de atendimento às demandas permitindo que sejam acessados de maneira mais conclusiva servindo de suporte para que as decisões relativas ao planejamento do uso da água durante o período de enchimento possam ser tomadas de maneira mais assertiva.

Por fim, destaca-se que os estudos de caso abrangeram regiões em que a utilização de reservatórios configura-se como uma ferramenta estratégica para a disponibilização de água para os diversos setores usuários de forma regularizada ao longo do ano. Dessa forma, o conhecimento referente à fase de enchimento do reservatório é de suma importância para suportar as ações relacionadas à gestão de recursos hídricos nessas regiões.

REFERÊNCIAS

Almeida LT (2017). Espacialização de chuvas intensas: uma nova proposta. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Meteorologia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa.

Araújo, D. R., Mendonça, AS F, Reis, JAT (2018) Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de Rio Bonito e Suíça. *Eng Sanit Ambient* | v.23 n.1 | jan/fev 2018 | 55-620.

Bates A, Tuncok K, Barbour T, Klimpt J-É (2013). First joint multipurpose program identification: Strategic perspectives and options assessment on the Blue Nile multipurpose development - Working Paper 2. Addis Ababa: Author Report to Nile Basin Initiative.

Chen FW, Liu CW (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environment*, 10:209–222. Doi: 10.1007/s10333-012-0319-1.

Fayaed SS, El-Shafie A (2013). Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stoch Environment Research Risk Assessment*, 27: 1751-1772.

INMET Instituto Nacional de Meteorologia. Normas climatológicas referentes aos anos 1981 a 2010. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.

King A, Block P. (2014). An assessment of reservoir filling policies for the Grand Ethiopian Renaissance Dam. *Journal of Water and Climate Change*, 5(2), 233–243. doi:10.2166/wcc.2014.043.

Kurtzman, D. Navon S, Morin E (2009) Improving interpolation of daily precipitation for hydrologic modelling: spatial patterns of preferred interpolators. *Hydrological Processes*, 23 3281-3291. Doi: 10.1002/hyp.7442.

Linacre ET (1993) Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. Agricultural and Forest Meteorology, 64:237-256.

LoucksDP, van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JP, Villars MT (2005). Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. UNESCO, Paris <http://ecommons.library.cornell.edu/handle/1813/2804>.

Maddala GS (2003). Introdução à Ecometria. 3ª Edição, Editora LTC: Rio de Janeiro, p. 318.

Monteiro LIB (2020). Aprimoramento dos processos de dimensionamento e operação de reservatórios de regularização. Capítulo 1. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Mekonnen MM, Hoekstra AY (2012) The blue water footprint of electricity from hydropower. Hydrology and Earth System Sciences, 16:179-187.

Nunes AA, Pruski FF (2015) Improving the determination of reservoir capacities for drought control. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 29:183–191.

Penman HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society 193:120-145.

Pereira AR, Sedyama GC, Nova NAV (2013). Evapotranspiração. Campinas, FUNDAG. 323p.

Ribeiro RR, Pruski FF, Ramos MCA (2018). Disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazões. Sustentare, Periódico da Universidade Vale do Rio Verde. 2(2): 210-217.

Ribeiro RB (2020). Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Rodrigues NC (2017). Dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização de vazões utilizando séries sintéticas. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Silva Filho AS (2014). Inferência em amostras pequenas: métodos Bootstrap. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia. 5(5): 115-126.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2016). Options for decoupling economic growth from water use and water pollution.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2015). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. Água para um mundo sustentável.

Wheeler KG, Basheer M, Mekonnen ZT, Eltoum SO, Mersha A, Abdo GM, Zagana EA, Hall JW, Dadson SJ (2016). Cooperative filling approaches for the Grand Ethiopian Renaissance Dam

Xu B, Boyce SE, Zhang Y, Liu Q, Guo L, Zhong P (2017). Stochastic Programming with a Joint Chance Constraint Model for Reservoir Refill Operation Considering Flood Risk. Journal of Water Resource planning and Management. 143(1): 1-11.

CONCLUSÃO GERAL

O presente trabalho apresenta ferramentas relevantes para o processo de dimensionamento de reservatórios que poderá auxiliar na compatibilização entre custos e benefícios correlatos à construção dessas estruturas, bem como para a tomada de decisões quanto a operação de reservatórios durante o período de enchimento, sendo possível concluir que:

- O modelo DRECASS-EV proporciona avanços significativos ao dimensionamento de reservatórios de regularização considerando a incorporação da perda de água por evaporação com base na variação diária da área inundada. A não consideração da lâmina evaporada resulta em valores de CR subdimensionados comprometendo a segurança hídrica em razão do não atendimento às demandas pelo uso da água consideradas na fase de projeto;
- As análises realizadas a partir da consideração da perda de água por evaporação no dimensionamento da CR mostrou-se útil para a determinação do potencial de regularização na seção de interesse para a construção do reservatório. Esse potencial variou de acordo com as características climáticas locais;
- O método utilizado para a estimativa da evaporação interfere consideravelmente no valor de CR obtido;
- A metodologia desenvolvida e apresentada no capítulo 2 permitiu avaliar as opções de operação de reservatórios de regularização durante o período de enchimento, servindo de subsídio para as atividades de planejamento e gestão de recursos hídricos;
- As análises TE e G foram capazes de detectar as variações inerentes as condições climáticas refletindo a natureza estocástica das variáveis hidrológicas envolvidas no processo de enchimento como vazão e precipitação.

APÊNDICE

Tabela A3 - Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu.

Região	Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt
1	42435000	Fazenda Barra da Égua	-16,87	-46,59	17,022
1	42440000	Fazenda Poções	-17,04	-46,82	8,278
1	42460000	Fazenda Limeira	-16,21	-47,23	57,607
1	42490000	Unaí	-16,35	-46,88	72,612
1	42540000	Santo Antônio do Boqueirão	-16,53	-46,72	83,321
1	42545002	Fazenda Roncador	-16,25	-46,80	5,265
1	42545500	Fazenda o Resfriado	-16,50	-46,66	7,757
1	42546000	Fazenda Santa Cruz	-16,13	-46,75	7,232
1	42600000	Porto dos Poções	-16,84	-46,36	115,315
2	42250000	Fazenda Limoeiro	-17,92	-47,01	7,672
2	42251000	Fazenda Córrego do Ouro	-17,61	-46,86	28,758
2	42255000	Fazenda Nolasco	-17,23	-47,02	3,364
2	42257000	Barra do Escurinho	-17,51	-46,65	26,455
2	42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	-17,50	-46,57	100,405
2	42365000	Ponte da BR-040 - PRATA	-17,66	-46,36	51,427
2	42395000	Santa Rosa	-17,26	-46,47	164,955
3	42690001	Porto da Extrema	-17,03	-46,01	334,024
3	42750000	Caatinga	-17,14	-45,88	358,47
3	42840000	Veredas	-18,14	-45,76	3,243
3	42850000	Cachoeira das Almas	-17,35	-45,53	50,862
3	42860000	Cachoeira do Paredão	-17,12	-45,44	68,111
3	42930000	Porto do Cavalo	-17,03	-45,54	463,673
3	42980000	Porto Alegre	-16,91	-45,38	453,435
3	42645000	Fazenda Rio Verde	-17,25	-46,20	7,318

Tabela A4 - Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu.

Código	Nome	Latitude	Longitude
1446004	Sítio Dabadia	-14,8000	-46,2500
1447001	Flores de Goiás	-14,4500	-47,0500
1447002	São João Daliança	-14,7100	-47,5200
1448004	Moquem - Fazenda Vau da Onça	-14,5500	-48,1700
1544012	Sao Francisco	-15,9500	-44,8700
1545002	Serra das Araras	-15,5000	-45,3900
1546000	Arinos - Montante	-15,9200	-46,1200
1546005	Cabeceiras	-15,8000	-46,9200
1546010	Fazenda Carvalho	-15,5200	-46,2800
1547001	Fazenda Santa Sé	-15,2200	-47,1600
1547002	Planaltina	-15,6400	-47,6500
1548000	Brazlandia (Quadra 18)	-15,6700	-48,2200
1548001	Mimoso	-15,0600	-48,1700
1645000	São Romão	-16,3700	-45,0800
1645002	Santo Inácio	-16,2800	-45,4100
1645003	Barra do Escuro	-16,2700	-45,2400

Tabela A4 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
1645005	Vila Urucua	-16,1300	-45,7400
1645009	Cachoeira da Manteiga	-16,6600	-45,0800
1645013	Fazenda Água Branca	-16,8100	-45,0300
1645019	Fazenda Conceição	-16,4300	-45,7400
1646000	Porto dos Poções	-16,8300	-46,3200
1646001	Unai	-16,3500	-46,8900
1646003	Santo Antônio do Boqueirão	-16,5300	-46,7200
1646004	Fazenda O Resfriado	-16,5000	-46,6600
1647002	Mingone	-16,1600	-47,9400
1647003	UHE Batalha Cristalina	-16,7900	-47,6000
1647008	Fazenda Limeira	-16,2100	-47,2300
1648001	Ponte Anápolis - Brasília	-16,1400	-48,6000
1648002	Vianópolis	-16,7500	-48,5300
1744009	Várzea da Palma	-17,6000	-44,7000
1744010	Lassance	-17,8900	-44,5800
1745000	Caatinga	-17,1500	-45,8800
1745001	Cachoeira do Paredão	-17,1100	-45,4400
1745007	Porto do Cavalo	-17,0300	-45,5400
1745014	Fazenda Santana	-17,8300	-45,4800
1746001	Porto da Extrema	-17,0300	-46,0100
1746002	Santa Rosa	-17,2600	-46,4700
1746006	Ponte da Br-040 - Prata	-17,6600	-46,3600
1746007	Ponte da Br-040 - Paracatu	-17,5000	-46,5800
1746018	Fazenda Limoeiro	-17,9200	-47,0100
1746019	Fazenda Córrego Do Ouro	-17,6100	-46,8600
1747000	Ponte São Marcos	-17,0300	-47,1600
1747001	Campo Alegre de Goiás	-17,5000	-47,5600
1747005	Guarda-Mor	-17,7700	-47,1000
1748001	Estação Verissimo	-17,9700	-48,1800
1748005	UHE Corumbá I Rio Piracanjuba	-17,1300	-48,1400
1748014	Pires do Rio I	-17,3000	-48,2700
1845002	Fazenda São Felix	-18,4600	-45,6500
1845004	Lagoa do Gouveia	-18,8400	-45,8500
1845013	São Gonçalo do Abaete	-18,3400	-45,8400
1845014	Tiros	-19,0000	-45,9700
1845021	Canoeiros	-18,0400	-45,5200
1845027	Barra do Rio de Janeiro	-17,9600	-45,1000
1846003	Major Porto	-18,7100	-46,0400
1846004	Guimaraná	-18,8500	-46,8000
1846005	Presidente Olegário	-18,4100	-46,4200
1846006	Pântano	-18,5600	-46,8000
1846007	Santana de Patos	-18,8400	-46,5500
1846015	Vazante	-18,0100	-46,9100
1846016	Ponte Firme	-18,0300	-46,4200
1846017	Leal de Patos	-18,6400	-46,3300
1846019	Rocinha	-18,3700	-46,9200
1846023	Lagamar	-18,1800	-46,8000

Tabela A4 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
1847003	Abadia dos Dourados	-18,4500	-47,6700
1847006	Três Ranchos	-18,5300	-47,8800
1847008	Coromandel	-18,0700	-47,6300
1847040	Fazenda São Domingos	-18,9500	-46,0000
1945035	Abaete	-19,1600	-45,4400
1945038	Porto das Andorinhas	-19,2800	-45,2900
1945039	Martinho Campos	-19,3300	-45,2300

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações meteorológicas selecionadas para o estudo de dimensionamento de reservatórios na bacia do Paracatu.

Código	Nome	Latitude	Longitude
83373	Roncador	-17,24	-46,88
83377	Brasília	-17,73	-46,17
83384	Arinos	-16,36	-46,88
83428	Unai	-15,93	-47,88
83479	Paracatu	-15,78	-47,92
83481	João Pinheiro	-15,9	-46,05
83483	Pirapora	-17,35	-44,91
83531	Patos de Minas	-18,51	-46,43

Tabela A5– ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt (m ³ s ⁻¹)
54001000	Povoado de Vau	-18,42	-43,53	6,632
54010005	Vila Terra Branca Jusante	-17,31	-43,21	81,163
54110002	Fazenda Jambeiro - Grão Mogol	-16,59	-42,92	20,651
54150000	Porto Mandacaru	-16,68	-42,49	123,656
54165000	Ponte Vacaria	-16,19	-42,59	5,68
54193000	Rubelita	-16,41	-42,27	7,454
54195000	Barra do Salinas	-16,62	-42,31	130,789
54225000	Senador Modestino	-17,95	-43,25	5,852
54230000	Carbonita	-17,58	-43,00	25,609
54234000	Itamarandiba	-18,09	-42,84	1,853
54235000	Ponte Mg-214	-17,64	-42,68	12,832
54260000	Ponte Alta	-17,28	-42,81	58,577
54300000	Minas Novas	-17,22	-42,60	6,122
54390000	Pega	-16,86	-42,35	64,637
54485000	Fazenda Facão	-16,97	-42,12	3,069
54500000	Araçuaí	-16,85	-42,08	74,623
54530000	Itira	-16,76	-42,00	197,531
54580000	Itaobim	-16,57	-41,50	217,414
54590000	São João Grande	-16,69	-41,50	3,955
54710000	Jequitinhonha	-16,43	-41,01	319,369
54730005	Fazenda Boa Sorte Jusante	-16,62	-41,03	7,498
54770000	Fazenda Cajueiro	-16,12	-40,74	4,763

Tabela A5 – ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt (m ³ s ⁻¹)
54780000	Jacinto	-16,14	-40,31	362,251
54950000	Itapebi	-15,95	-39,52	278,014

Tabela A6– Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha

Código	Nome	Latitude	Longitude
1538001	Belmonte	-15,87	-38,89
1539006	Itapebi	-15,96	-39,53
1539010	Mascote	-15,56	-39,30
1539014	Fazenda Nancy	-15,60	-39,52
1539022	Camacan (Vargito)	-15,43	-39,49
1540003	Inhobim	-15,34	-40,93
1540019	Jordania	-15,89	-40,17
1540020	Bandeira	-15,88	-40,56
1541001	Cândido Sales	-15,51	-41,23
1541010	Itamarati	-15,58	-41,41
1541013	Vereda Do Paraíso	-15,49	-41,46
1542015	Rio Pardo De Minas	-15,60	-42,55
1542016	Serra Branca	-15,64	-42,94
1543013	Janaúba	-15,78	-43,28
1639000	Mundo Novo	-16,27	-39,58
1640000	Jacinto	-16,14	-40,29
1640001	Fazenda Cajueiro	-16,12	-40,74
1640009	Rubim	-16,38	-40,54
1640010	Felisburgo	-16,63	-40,76
1640012	Jucuruçu	-16,84	-40,16
1641001	Itaobim	-16,57	-41,50
1641002	Jequitinhonha	-16,43	-41,01
1641007	São João Grande	-16,69	-41,50
1641008	Pedra Azul (Fortaleza)	-16,00	-41,28
1641010	Itinga	-16,62	-41,77
1641011	Medina	-16,23	-41,48
1641012	Fazenda Boa Sorte Jusante	-16,60	-41,02
1641013	Comercinho	-16,30	-41,79
1642002	Coronel Murta	-16,61	-42,19
1642007	Porto Mandacaru	-16,68	-42,49
1642013	Pega	-16,86	-42,35
1642014	Fazenda Jambeiro - Grão Mogol	-16,59	-42,92
1642026	Ponte Vacaria	-16,19	-42,59
1642027	Barra do Salinas	-16,62	-42,31
1642028	Itira	-16,76	-42,01
1643020	Capitão Enéas	-16,32	-43,72
1740033	Águas Formosas	-17,08	-40,94
1741001	Mucuri	-17,60	-41,49
1741003	Fazenda Diacui	-17,49	-41,24

Tabela A6 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
1741006	Ladainha (Efbm)	-17,63	-41,74
1741013	Padre Paraíso	-17,07	-41,48
1742008	Carbonita	-17,58	-43,00
1742014	Capelinha	-17,69	-42,53
1742017	Malacacheta	-17,85	-42,08
1742019	Água Boa	-17,99	-42,39
1742020	Fazenda Facão	-16,97	-42,12
1742022	Ponte Alta	-17,28	-42,81
1742023	Minas Novas	-17,22	-42,59
1742025	Setubinha	-17,57	-42,14
1743002	Vila Terra Branca - Jusante	-17,31	-43,21
1743016	Itacambira	-17,07	-43,31
1743018	Senador Modestino	-17,95	-43,25
1744030	Estação de Curimatai	-18,00	-44,18
1842004	São Pedro do Suaçuí	-18,36	-42,60
1842008	Santa Maria do Suaçuí	-18,20	-42,46
1842020	São João Evangelista	-18,55	-42,76
1843000	Usina Parauna	-18,64	-43,97
1843002	Gouveia	-18,47	-43,74
1843003	Mendanha - Montante	-18,11	-43,52
1843011	Serro	-18,59	-43,41
1843012	Rio Vermelho	-18,28	-43,00
1843015	Povoado de Vau	-18,42	-43,53
1844009	Presidente Juscelino - Jusante	-18,64	-44,05
1943002	Conceição do Mato Dentro	-19,02	-43,44

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações meteorológicas selecionadas para o estudo de dimensionamento de reservatórios na bacia do Jequitinhonha.

Código	Nome	Latitude	Longitude
83393	Pedra Azul	-16,01	-41,28
83437	Montes Claros	-16,69	-43,84
83441	Salinas	-16,15	-42,28
83442	Aracuai	-16,85	-42,06
83446	Guaratinga	-16,58	-39,78
83488	Itamarandiba	-17,86	-42,85
83492	Teófilo Otoni	-17,86	-41,51
83538	Diamantina	-18,24	-43,62

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paraguaçu.

Região	Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt (m ³ s ⁻¹)
1	51140000	Porto	-12,84	-41,32	17,955
1	51166000	Bonito	-12,49	-41,33	11,087
1	51170000	Utinga	-12,37	-41,17	1,492
1	51190000	Fertém	-12,50	-41,21	3,625

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paraguaçu. (Continuação)

Região	Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt (m ³ s ⁻¹)
1	51240000	Itaeté	-12,76	-41,33	27,639
1	51280000	Iaçu	-12,94	-41,06	15,023
1	51350000	Argoim	-12,99	-40,96	59,726
1	51410000	França	-12,76	-40,21	61,478
1	51430000	Gavião II	-12,59	-39,52	72,076
1	51440000	Riachão do Jacuípe	-11,55	-40,59	6,140
1	51460000	Ponte Rio Branco	-11,47	-39,79	1,727

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paraguaçu. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
1241008	Andaraí	-12,80	-41,33
1241009	Alagadiço	-12,48	-41,90
1241010	Afrânio Peixoto	-12,28	-41,40
1241018	Wagner (Itacira)	-12,29	-41,17
1241026	Utinga	-12,50	-41,21
1241027	Fazenda Ribeiro	-12,06	-41,35
1241028	Estação Experimental	-12,02	-41,05
1241032	Guiné	-12,77	-41,54
1241033	Usina Mucugê	-13,01	-41,37
1340010	Fazenda Brasileira	-13,22	-40,58
1340016	Machado Portela (Juraci)	-13,13	-40,77
1341015	Novo Acre	-13,43	-41,10

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações meteorológicas selecionadas para o estudo de dimensionamento de reservatórios na bacia do Paraguaçu.

Código	Nome	Latitude	Longitude
83182	Irecê	-11,30	-41,87
83184	Morro do Chapéu	-11,22	-41,22
83186	Jacobina	-11,18	-40,47
83190	Serrinha	-11,63	-38,97
83222	Cruz das almas	-12,67	-39,08
83242	Lençóis	-12,57	-41,38
83244	Itaberaba	-12,52	-40,28
83292	Ituaçu	-13,82	-41,30

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paraguaçu.

Código	Nome	Latitude	Longitude
1139022	Gavião Ii	-11,47	-39,78
1140001	Piritiba	-11,72	-40,57
1140004	Mairi (Monte Alegre)	-11,71	-40,15
1140008	Flores	-11,45	-40,98
1140010	França	-11,55	-40,60
1140017	Duas Barras Do Morro	-11,97	-40,97
1140018	Baixa Grande	-11,96	-40,18
1140019	Dias Coelho	-11,52	-40,78
1140026	Ventura	-11,64	-40,95
1140031	Barra Do Mundo Novo	-11,87	-40,52
1140035	Ventura	-11,67	-40,98
1238025	São Félix	-12,63	-38,98
1238028	Feira De Santana	-12,27	-38,97
1238033	São Gonçalo Dos Campos	-12,39	-38,96
1239000	Argoim	-12,58	-39,53
1239007	Argoim	-12,59	-39,52
1239012	Jaguara	-12,12	-39,12
1239013	Itatim	-12,72	-39,68
1239017	Lajedo Alto	-12,72	-39,87
1239018	Serra Preta	-12,15	-39,32
1239019	Santa Terezinha	-12,77	-39,53
1240000	Lagoa Do Lajedo	-12,92	-40,22
1240001	Ibiquera	-12,65	-40,93
1240004	Boa Vista Do Tupim	-12,66	-40,61
1240005	Ibiapora	-12,05	-40,80
1240006	Iaçu	-12,77	-40,20
1240010	Itaeté (Iguaçu)	-12,98	-40,97
1240012	Itaeté	-12,99	-40,96
1240016	Iaçu	-12,76	-40,21
1240018	Fazenda Santa Quiteria	-12,36	-40,04
1240020	Macajuba (Capivari)	-12,13	-40,35
1240023	Ruy Barbosa	-12,28	-40,45
1241001	Fazenda Iguaçu	-12,93	-41,07
1241003	Boninal (Guarani)	-12,71	-41,83
1241006	Mucugê	-12,98	-41,37

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jaguaribe.

Região	Código	Nome	Latitude	Longitude	Qmlt (m ³ s ⁻¹)
1	36020000	Arneiroz	-6,32	-40,16	7,216
1	36045000	Malhada	-6,65	-39,96	2,236
1	36070000	Sítio Patos	-6,52	-39,64	8,727
1	36125000	Sítio Poço Dantas	-6,56	-39,51	4,088
1	36130000	Cariús	-6,53	-39,50	9,342
1	36160000	Iguatu	-6,37	-39,29	26,195
1	36210000	Sítio Lapinha	-7,22	-39,14	5,112
1	36220000	Jati	-7,69	-39,01	0,318
1	36250000	Podimirim	-7,30	-38,98	3,464
1	36260000	Sítio Santa Cruz	-7,01	-38,96	7,856
1	36270000	Lavras da Mangabeira	-6,75	-38,97	25,867
1	36290000	Icó	-6,41	-38,87	27,345
1	36320000	Jaguaribe	-5,90	-38,63	55,084
1	36390000	Peixe Gordo	-5,23	-38,20	83,956
1	36470000	Senador Pompeu	-5,60	-39,38	8,196
1	36520000	Quixeramobim	-5,20	-39,29	7,216

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações meteorológicas selecionadas para o estudo de dimensionamento de reservatórios na bacia do Jaguaribe.

Código	Nome	Latitude	Longitude
82397	Fortaleza	-3,75	-38,55
82487	Guaramiranga	-4,28	-39,00
82493	Jaguaruana	-4,78	-37,77
82583	Crateus	-5,17	-40,67
82586	Quixeramobim	-5,17	-39,28
82588	Morada Nova	-5,12	-38,37
82590	Apodi	-5,62	-37,82
82683	Taua	-6,00	-40,42
82686	Iguatu	-6,37	-39,30
82689	São Gonçalo	-6,75	-38,22
82753	Ouricuri	-7,90	-40,05
82777	Campos Sales	-7,00	-40,38
82780	Picos	-7,03	-41,48
82784	Barbalha	-7,32	-39,30
82789	Triunfo	-7,82	-38,12

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jaguaribe.

Código	Nome	Latitude	Longitude
437000	Aracati	-4,57	-37,77
437009	Palhano	-4,75	-37,97
437010	Russas	-4,93	-37,97
437019	Fortim	-4,45	-37,78
437022	Icapui	-4,70	-37,37
437024	Itaiçaba	-4,68	-37,82
438012	Cristais	-4,48	-38,35
438015	Boqueirão Do Cesário	-4,58	-38,22
438019	Cristais	-4,48	-38,35
438021	Chorozinho	-4,30	-38,50
438022	Cristais	-4,50	-38,36
438032	Itapiuna	-4,58	-38,95
438033	Itapeim	-4,35	-38,12
438053	Capistrano	-4,47	-38,90
438061	Caio Prado	-4,66	-38,94
438067	Beberibe	-4,22	-38,12
438071	Ibaretama	-4,82	-38,82
438072	Ibicuitinga	-4,97	-38,63
438073	Caio Prado	-4,65	-38,93
438084	Ocara	-4,48	-38,60
438103	Chorozinho	-4,30	-38,50
439001	Quixadá	-4,97	-39,03
439006	Caridade	-4,23	-39,18
439018	Aratuba	-4,42	-39,05
439030	Itatira	-4,53	-39,62
439031	General Sampaio	-4,05	-39,45
439054	Choro	-4,85	-39,27
439061	Lagoa Do Mato	-4,65	-39,67
439063	Madalena	-4,85	-39,57
439072	Canindé	-4,35	-39,30
440009	Catunda	-4,67	-40,20
440029	Monsenhor Tabosa	-4,80	-40,07
440077	Santa Quitéria	-4,33	-40,15
537008	Pedra De Abelhas	-5,59	-37,68
537037	Mossoró	-5,22	-37,36
537041	Quixeré	-5,07	-37,98
538003	Alto Santo	-5,52	-38,25
538007	Jaguaretama	-5,52	-38,75
538008	Castanhão	-5,47	-38,41
538025	Banabuiu	-5,32	-38,92
538029	Jaguaribe	-5,90	-38,62
538030	Iracema	-5,82	-38,30
538032	Morada Nova	-5,19	-38,35
538043	Jaguaribe	-5,90	-38,63
538044	Peixe Gordo	-5,22	-38,20
538054	Jaguaribara	-5,46	-38,46
538059	Sítio Malhada	-5,18	-38,08

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jaguaribe. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
538066	Jaguaretama	-5,62	-38,77
538069	Tabuleiro Do Norte	-5,25	-38,13
538079	Potiretama	-5,70	-38,17
539005	Piquet Carneiro	-5,82	-39,42
539011	Milha	-5,68	-39,20
539012	Quixeramobim	-5,20	-39,28
539033	Pedra Branca	-5,45	-39,72
539037	Senador Pompeu	-5,58	-39,37
539051	Mombaça	-5,75	-39,62
539053	Quixeramobim	-5,20	-39,29
539058	Deputado Irapuan Pinheiro	-5,92	-39,27
539060	Boa Vista	-5,65	-39,84
539073	Senador Pompeu	-5,58	-39,37
540003	Novo Oriente	-5,54	-40,77
540015	Açude Várzea Do Boi	-5,91	-40,25
540019	Independência	-5,39	-40,31
540049	Carrapateiras	-5,85	-40,22
540052	Quiterianópolis	-5,90	-40,70
638032	Antenor Navarro	-6,74	-38,45
638044	Açude Bonito	-6,21	-38,43
638056	Lavras Da Mangabeira	-6,75	-38,97
638058	Aquinópolis	-6,05	-38,47
638085	Orós	-6,25	-38,92
638091	Baixio	-6,73	-38,72
638092	Ererê	-6,05	-38,35
638093	Icó	-6,40	-38,85
638104	Triunfo	-6,58	-38,60
638105	Santa Helena	-6,73	-38,64
638106	Cajazeiras/Aç. Lagoa Do Arroz	-6,80	-38,57
638107	Bom Jesus	-6,82	-38,65
638108	Cachoeira Dos Índios	-6,93	-38,68
638113	São Gonçalo	-6,84	-38,31
639001	Aeroporto(Iguatu)	-6,38	-39,30
639002	Jucás	-6,52	-39,52
639003	Barro Alto	-6,45	-39,40
639006	Caipú	-6,63	-39,32
639009	Granjeiro	-6,88	-39,22
639013	Catarina	-6,13	-39,87
639014	Assaré	-6,87	-39,87
639015	Altaneira	-7,00	-39,73
639018	Várzea Da Conceição	-6,47	-39,12
639021	Acopiara	-6,12	-39,45
639023	Tarrafas	-6,68	-39,75
639024	Arrojado	-6,67	-39,02
639026	Cedro	-6,60	-39,07
639027	Antonina Do Norte	-6,78	-39,98
639030	Cariús	-6,53	-39,50

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jaguaribe. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude
639035	Iguatu	-6,37	-39,30
639038	Barreiras Dos Paraibanos	-6,32	-39,35
639044	Iguatu	-6,37	-39,29
639045	Malhada	-6,65	-39,96
639051	Arneiroz	-6,32	-39,05
639058	Baú	-6,40	-39,40
639063	Baixio De Donana	-6,35	-39,67
639072	Quixelô	-6,23	-39,18
639078	Tarrafas	-6,68	-39,75
639084	Iguatu	-6,37	-39,30
640000	Pio IX	-6,83	-40,62
640003	Arneiroz	-6,33	-40,16
640012	Fazenda Nova	-6,50	-40,37
640014	Barra	-6,60	-40,32
640015	Parambu	-6,22	-40,70
640019	Aiuaba	-6,57	-40,12
640042	Arneiroz	-6,32	-40,15
738000	Quixabinha	-7,50	-38,75
738001	Mauriti	-7,38	-38,77
738007	Cuncas	-7,08	-38,72
738049	Podimirim	-7,30	-38,98
738060	Barro	-7,17	-38,77
738062	Milha	-5,68	-39,20
738068	Monte Horebe	-7,20	-38,57
738070	Igaracy	-7,18	-38,15
738077	Curral Velho	-7,54	-38,20
738079	Santana De Mangueira	-7,55	-38,34
738081	Mauriti_Centro	-7,39	-38,77
738082	Água Vermelha	-7,41	-38,93
738083	Jequi	-7,49	-38,80
738084	Deserto Dos Pebas	-7,29	-38,72
739000	Aeroporto(Juaz. Do Norte)	-7,22	-39,30
739003	Jamacaru	-7,40	-39,13
739011	Caririaçu	-7,03	-39,28
739016	Barbalha	-7,33	-39,30
739035	Nova Olinda	-7,10	-39,68
739046	Abaiara	-7,37	-39,05
739052	Lameiro	-7,23	-39,42
739054	Jati	-7,68	-39,00
739060	Penaforte	-7,82	-39,07
739065	Juazeiro Do Norte	-7,22	-39,32
740001	Fazenda Bravo	-7,13	-40,90
740002	Fronteiras	-7,08	-40,62
740008	Araripe	-7,20	-40,13
740009	Potengi	-7,10	-40,02
740011	Campos Sales	-7,07	-40,37
740043	Salitre	-7,28	-40,47