

PRISCILA RAMOS VIEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS EM REGIÃO SEMIÁRIDA
UTILIZANDO SÉRIES SINTÉTICAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

V658d
2018

Vieira, Priscila Ramos, 1992-
Dimensionamento de reservatórios em região semiárida
utilizando séries sintéticas / Priscila Ramos Vieira. – Viçosa,
MG, 2018.
xi, 53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 35-37.

1. Bacias hidrográficas - Manejo - Jequitinhonha, Rio (MG e BA). 2. Desenvolvimento de recursos hídricos. 3. Medidores de fluxo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 333.916

PRISCILA RAMOS VIEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS EM REGIÃO SEMIÁRIDA
UTILIZANDO SÉRIES SINTÉTICAS**

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


APROVADA: 18 de outubro de 2018.




José Rui Castro de Sousa



Fernando França da Cunha



Roberto Avelino Cecílio



Fernando Falco Pruski
(Orientador)

*À Clara, minha fonte de força e
inspiração, dedico.*

*“No confronto entre a água e a rocha, a água sempre ganha, não pela força, mas pela perseverança.”
- H. Jackson Brown*

AGRADECIMENTOS

Ao Deus onipresente, agradeço por ter me capacitado e fortalecido para seguir firme até o fim dessa jornada.

À Nossa Senhora Aparecida sempre fonte de paz no exercício de minha espiritualidade e pela proteção que me confere.

À Clara, minha pequena, meu maior motivo para vencer e sorrir. Te amo.

Aos meus pais Cleide e Vagney, meu refúgio, que sempre acreditaram em mim e me deram todo apoio que podiam (até mais). Não sei viver sem vocês!

Ao meu irmão e amigo Vinícius, pelo companheirismo e cuidado comigo. É o amigo que Deus escolheu para mim por todo sempre.

A Pedro, meu companheiro, o mais compreensivo e generoso. Obrigada pelo carinho, zelo e por estar comigo em todos os momentos.

Agradecimento especial ao meu orientador Professor Fernando Pruski, por quem guardo um enorme respeito e admiração. Obrigada pela dedicação, disposição e ensinamentos durante todo esse tempo.

Aos membros da banca, pela participação e valiosa contribuição a este trabalho.

A Zé Rui e Nívia, pela riqueza de suas contribuições e pela disposição em auxiliar na condução desta pesquisa

Aos meus queridos roommates Gustavo, Lucas e Josiane, agradeço pelos conselhos, confidências, cuidado e companhia diária. Foram minha família Viçosense. Família essa, que tive muita sorte em ter. Vou sentir saudades!

As minhas companheiras e mais amáveis tias da Clarinha: Camila, Cristiane, Fernanda, Laura, Ligia, Luane, Rayssa e Tarcila, obrigada pela generosidade, apoio, conversas e boas risadas. Foram essenciais para que minha passagem por Viçosa fosse feliz. Obrigada lindas, espero que nos encontremos sempre.

Aos amigos do CRRH, pela parceria, amizade, e ótimos momentos de convívio. Tornaram a rotina mais leve e divertida, sei que aqui encontrei amigos para toda a vida.

A minha irmãzinha de coração Amanda, que Deus trouxe para estar comigo em Viçosa quando mais precisei e por sempre se fazer presente na minha vida.

A todos os amigos e familiares, que sempre me apoiaram, torceram pelo meu sucesso, deram palavras de conforto e sempre se mostraram presentes. Amo vocês.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização desse curso.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro.

BIOGRAFIA

PRISCILA RAMOS VIEIRA, filha de Luis Vagney Gomes Vieira e Rosecleide Ramos Vieira, nasceu em Montes Claros, MG, no dia 22 de março de 1992. Em março de 2011 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Minas Gerais, concluindo em janeiro de 2016.

Em agosto de 2016 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em 18 de outubro de 2018.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 METODOLOGIA	3
2.1 Área de estudo	3
2.2 Geração de séries sintéticas de vazões diárias	4
2.3 Avaliação do desempenho das séries sintéticas geradas.....	5
2.4 Estimativa da capacidade do reservatório.....	6
2.4.1 Demanda fixa.....	6
2.4.2 Demanda variável	7
2.4.2.1 Evapotranspiração potencial da cultura.....	7
2.4.2.2 Precipitação Efetiva.....	9
2.4.2.3 Eficiência de aplicação	9
2.4.2.4 Fator relativo às horas de bombeamento por dia.....	9
2.4.2.5 Vazão a ser regularizada.....	10
2.4.3 Capacidade do reservatório com o uso de séries sintéticas sem associação com o período de retorno	11
2.4.4 Capacidade do reservatório com o uso de séries sintéticas associadas ao período de retorno	12
2.4.5 Capacidade do reservatório pelo método da regionalização da curva de regularização	13
2.4.6 Capacidade do reservatório pelo método da regionalização da capacidade do reservatório.....	14
2.4.7 Avaliação das metodologias de estimativa da CR.....	14
2.4.7.1 Coeficiente de eficiência de Nash- Sutcliffe ajustado (E_1).....	15
2.4.7.2 Índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD)	16
2.4.8 Dados fluviométricos.....	16
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
3.1 Avaliação das séries sintéticas.....	17
3.2 Estimativa da capacidade do reservatório considerando demanda fixa.....	20
3.2.1 Estimativa da capacidade do reservatório.....	21
3.2.2 Avaliação da estimativa da capacidade do reservatório	23
3.2.3 Avaliação baseada das metodologias de estimativa da CR	26
3.3 Estimativa da capacidade do reservatório considerando demanda variável.....	28
3.3.1 Estimativa da capacidade do reservatório.....	28
3.3.2 Avaliação da estimativa da capacidade do reservatório	30

3.4 Avaliação baseada no índice de Nash-sutcliffe	32
4 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
APÊNDICES	38

RESUMO

VIEIRA, Priscila Ramos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2018.
Dimensionamento de reservatórios em região semiárida utilizando séries sintéticas
Orientador: Fernando Falco Pruski

O atual cenário de escassez hídrica torna necessária a implementação de práticas de planejamento e gestão que aumentem a disponibilidade de água e diminua os conflitos pelo seu uso. Desse modo, a implantação de reservatórios de regularização representa uma alternativa eficaz que possibilita a redistribuição das vazões, aumentando a disponibilidade hídrica no período de estiagem, atendendo as demandas sazonais durante o ano além de possibilitar o uso da disponibilidade potencial, representada pela vazão média de longo termo. É importante que o dimensionamento dessas estruturas seja apropriado ao atendimento das necessidades da região e, ao mesmo tempo viável economicamente. Um fator que interfere diretamente nas estimativas de capacidade do reservatório é a decorrente falta de dados fluviométricos nas bacias hidrográficas devido a falhas na coleta e armazenamento de dados. Diante desse fato, estudos com o uso de séries sintéticas de vazões vem sendo desenvolvidos como uma alternativa para estimar a capacidade dos reservatórios em locais não monitorados. O objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência de metodologias que utilizam séries sintéticas no dimensionamento de reservatórios de regularização de vazão considerando demandas fixas e variáveis no tempo em uma região semiárida. Em um primeiro momento, foram analisadas as estimativas da capacidade do reservatório para uma demanda fixa no tempo com e sem a associação ao período de retorno, para as metodologias que fazem uso das séries sintéticas a partir de dados observados (MSSo) e regionalizados (MSSr), e dois métodos usados como base comparativa: método de regionalização da capacidade do reservatório (RCRes) o método da regionalização da curva de regularização (RCReg). Todas as metodologias foram testadas com diferentes valores de percentagem da vazão média de longo termo (Q_{mlt}). Em um segundo momento considerou-se uma demanda variável no tempo nas estimativas da capacidade dos reservatórios pelos métodos MSSo, MSSr e RCRes associados ou não a um período de retorno em três diferentes cenários de utilização da vazão passível de regularização. As metodologias analisadas foram avaliadas pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ajustado (E_1) e pelo Índice de qualidade de dimensionamento de reservatório (IQD). Os métodos que utilizam as séries sintéticas quando associadas ao período de retorno (MSSo_T e MSSr_T) se destacaram com os melhores desempenhos, estimando valores mais próximos da série original o que mostra

a adequação no uso dessas metodologias para estimar a capacidade de reservatórios em locais sem monitoramento em condições semiáridas.

ABSTRACT

VIEIRA, Priscila Ramos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2018. **Design of reservoir for a semiarid region by the use of synthetic series.** Advisor: Fernando Falco Pruski.

The current scenario of water scarcity makes it necessary to implement planning and management practices that increase the water availability and reduce conflicts related to its use. Thus, the implementation of regularization reservoirs represents an effective alternative that allows the redistribution of flows along the time, increasing the water availability during the dry season, which is essential to fulfill seasonal demands throughout the year. Regularization reservoirs also enable the use of potential availability, represented by the long-term average flow. The design of these structures must be appropriate to attend the water demand of the region while being economically viable. One factor that directly interferes in the estimates of reservoir capacity is the lack of fluviometric data due to poor limited collection and storage. Therefore, in order to address these needs, studies with the use of synthetic flows series have been developed as an alternative to estimate the reservoir capacity in ungauged stream sections. The objective of this study was to evaluate the efficiency of methodologies that use synthetic series to design streamflow regulation reservoirs for semi-arid region considering fixed and variable demands. First, we analyzed the reservoir capacity estimates considering a fixed time demand with and without associate a return period, for the methodologies that use the synthetic series from observed (MSSo) and regionalized data (MSSr), and two methods used as comparative basis: reservoir capacity regionalization method (RCRes) and the regionalization method of the regularization curve (RCReg). All methodologies were tested with different percentage values of the streamflow to be regularized. In a second moment, we considered a time-varying demand to estimate the reservoir capacity using the MSSo, MSSr and RCRes methods associated with a frequency factor for three different scenarios of streamflow regularization. The analyzed methodologies were evaluated by the adjusted Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E1) and by the reservoir design quality index (IQD). The methods that use the synthetic series when associated to a return period (MSSo_T and MSSr_T) stood out as the best performances, they estimated values closer to the observed data series showing adequacy in the use of these methodologies to estimate the reservoir capacity for ungauged stream section in semi-arid conditions.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida no planeta, sendo sua qualidade e quantidade essenciais para o bem-estar da população. Entretanto, atividades insustentáveis hidricamente, a má distribuição espaço-temporal e as gestões inadequadas dos recursos hídricos têm afetado negativamente a qualidade e disponibilidade de água, o que leva algumas regiões a cenários de escassez hídrica. Estima-se que o crescimento populacional e econômico resultará em um aumento da demanda por água em quase 33% até 2050 (WWAP, 2018). Nesse cenário, as regiões áridas e semiáridas, poderão ser gravemente afetadas, uma vez que são caracterizadas por apresentarem uma baixa disponibilidade hídrica com ocorrência de precipitações intensas e concentradas em um curto período seguido por um longo período de estiagem (MARTINS et al., 2018). Logo, o aumento da demanda pelo uso da água poderá causar conflito entre os diversos usuários de recursos hídricos nessas regiões.

Para que se possa atender às demandas crescentes dos usuários de água é essencial que a gestão de recursos hídricos procure o equilíbrio temporal e espacial entre a oferta e a demanda de água. Nesse sentido, o uso de reservatórios de regularização configura-se como uma alternativa na busca desse cenário, pois servem para a acumulação de água durante o período chuvoso e redistribuição ao longo do período de estiagem; assim diminuem-se os prejuízos causados pela escassez e potencializa-se a eficiência do uso dos recursos hídricos (WANG et al., 2013).

Na medida em que se altera a distribuição espaço-temporal do escoamento, os reservatórios de regularização de vazões podem gerar inúmeros benefícios, como auxílio no atendimento às necessidades do abastecimento urbano ou rural, aproveitamento hidroelétrico, atenuação de cheias, controle de estiagens, controle de sedimentos, recreação, produção de peixes, e, navegação fluvial (BARBOSA, 2011). Dentre os benefícios, destaca-se a contribuição dos reservatórios para o atendimento da demanda de água para fins de irrigação, técnica imprescindível para assegurar a produção de alimentos em regiões áridas e semiáridas onde a produção agrícola é altamente vulnerável às condições climáticas.

Apesar das inúmeras vantagens, os reservatórios podem gerar impactos negativos tanto no meio ambiente, quanto no âmbito social e econômico (BIEMANS et al., 2006). Por essa razão, essas estruturas devem ser criteriosamente planejadas de acordo alguns critérios, dentre eles o seu posicionamento, seção de construção, área alagada, desocupação e dimensionamento adequado do seu volume, promovendo o atendimento às necessidades para as quais foram construídos.

O volume do reservatório é dimensionado com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais, que permitem o uso de métodos normatizados ou não, desde que devidamente justificado (ABNT, 2007). Porém, a natureza estocástica das vazões de entrada no reservatório e a ocorrência de eventos de inundação elevam a complexidade para estimar o volume a ser armazenado (TAGHI; HALIT; FAZLI, 2009; XU et al., 2017).

Para minimizar a margem de erro nas estimativas de capacidade dos reservatórios, são necessários registros de vazão relativamente longos (KURIA; VOGEL, 2015), baseados em dados completos de vazão. No entanto, em muitos locais há insuficiência de dados fluviométricos.

Dentre as metodologias que estimam a capacidade do reservatório em locais não monitorados, a regionalização da curva de regularização é comumente empregada (TUCCI, 2012). Porém, este método não permite associar a capacidade do reservatório estimada a um fator de frequência além de possibilitar o dimensionamento apenas para demanda de regularização constante. Regularizar uma demanda variável no tempo é necessário para a prática de irrigação, já que os valores a serem regularizados estão relacionados ao requerimento de irrigação da cultura.

Nesse contexto, a consideração de séries sintéticas contínuas de vazões representa um caminho alternativo para a estimativa da capacidade do reservatório em locais não monitorados.

Nunes e Pruski (2015) propuseram a criação de séries sintéticas visando associar a capacidade do reservatório a um período de retorno e que permitam superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica. Rodrigues (2017), também utilizando séries sintéticas, propôs a criação de metodologias que possibilitaram a estimativa da capacidade do reservatório para seções de rios onde não há disponibilidade de dados de vazão. Embora esses estudos tenham representado um avanço na estimativa da capacidade de reservatório, os mesmos foram realizados para uma bacia hidrográfica específica, sendo necessário avaliar a aplicação dessas metodologias para outras bacias.

Nesse contexto, o estudo teve por objetivo avaliar o desempenho das metodologias baseadas em séries sintéticas de vazões no dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização com base em demandas fixas e variáveis ao longo do tempo em uma região semiárida.

2.2 Geração de séries sintéticas de vazões diárias

A geração de séries sintéticas para uma seção de interesse (não monitorada) foi baseada na metodologia proposta por Rodrigues (2017). Essa metodologia parte do princípio que as estações fluviométricas que possuem os dados de vazões observadas ou regionalizadas a serem utilizados para geração das séries sintéticas devem estar localizadas na mesma região hidrologicamente homogênea (RHH) da seção de interesse possibilitando a geração de séries sintéticas representativas dessa seção.

Esse método sugere que a estimativa da vazão no dia “d” para a seção de interesse pode ser obtida por meio do produto da vazão específica no dia “d” de cada estação fluviométrica pela relação entre a vazão específica média de longa duração da seção de interesse e a vazão específica média de longa duração na seção correspondente a cada estação fluviométrica, conforme a equação:

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

em que: $Q_{SI,d}$ = vazão da seção de interesse no dia d, $m^3 s^{-1}$; $q_{EF_{i,d}}$ = vazão específica da estação fluviométrica i no dia d, $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{SI}}$ = vazão específica média de longo termo da seção de interesse (dado regionalizado), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{EF_i}}$ = vazão específica média de longo termo na estação fluviométrica i (dado observado ou regionalizado), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; n = número de estações fluviométricas consideradas; e A_{SI} = área de drenagem da seção de interesse, km^2 .

Assim, ao repetir o procedimento para cada dia, estima-se a série sintética de vazões em base diária para o mesmo período base das estações fluviométricas da RHH (Figura 2).

A aplicação do método requer a definição prévia das RHH, para seleção das estações fluviométricas utilizadas na geração da série sintética. Além disso, é necessário um estudo prévio de regionalização de vazões, para a obtenção da equação para a estimativa da vazão média de longo termo (Q_{mlt}) nas estações fluviométricas e nas seções de interesse.

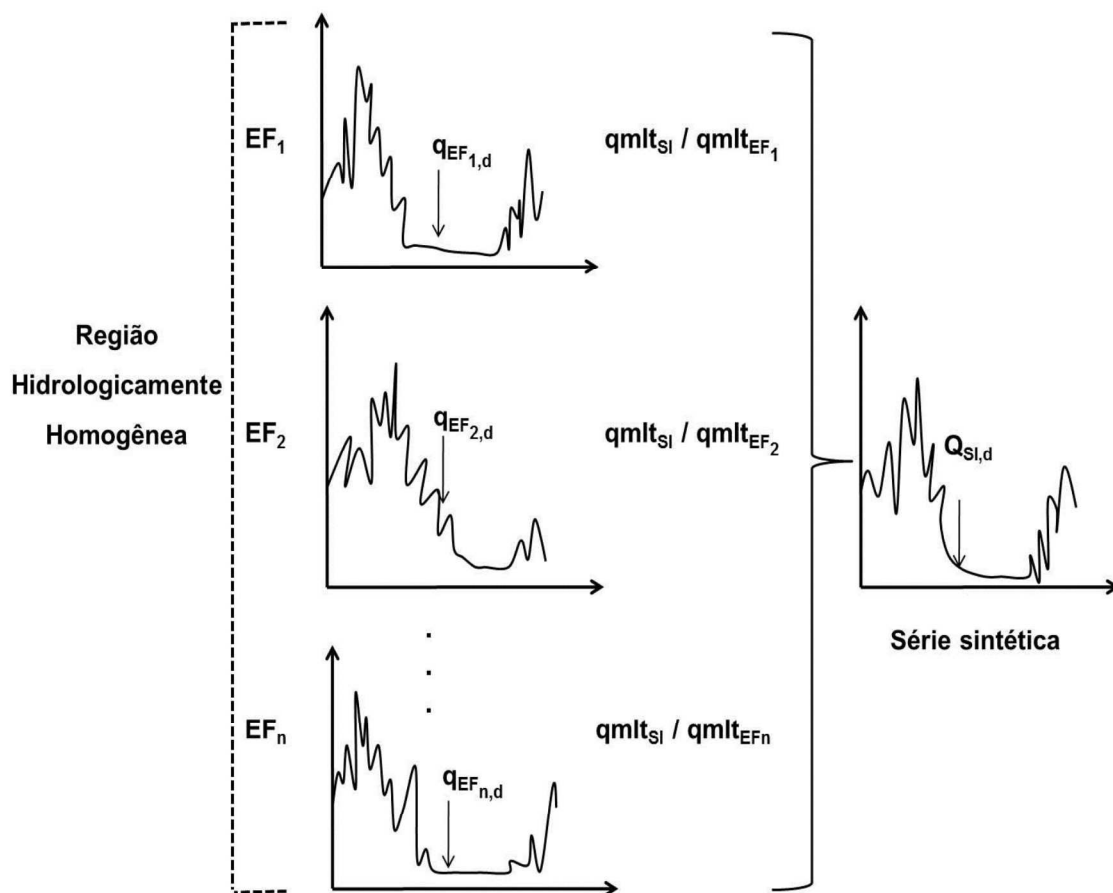


Figura 2. Representação esquemática da obtenção de séries sintéticas de vazões.

Fonte: RODRIGUES (2017)

Os dados de Q_{mlt} , nas estações fluviométricas selecionadas, a serem utilizados para geração das séries sintéticas podem ser os observados ou os regionalizados. As séries sintéticas em que os dados de Q_{mlt} das estações fluviométricas são regionalizados são denominadas Séries Sintéticas regionalizadas (SSr). Já as séries sintéticas em que esses dados se referem aos dados observados nas estações são denominadas Séries Sintéticas observadas (SSo). Segundo Tucci, (2002) devido a maior exploração das informações, o uso de dados regionalizados pode aperfeiçoar a representatividade dos dados hidrológicos.

2.3 Avaliação do desempenho das séries sintéticas geradas

A validação cruzada “leave-one-out” foi utilizada para avaliar o desempenho das séries sintéticas. Esta metodologia consiste em excluir uma amostra do conjunto de dados e em seguida prever determinada variável usando as amostras restantes. O valor previsto é então comparado ao valor da amostra retirada (MULLER; THOMPSON, 2016). Assim, cada estação

fluviométrica foi considerada não-monitorada e deixada de fora para obtenção da série sintética (SSr ou SSo) na seção.

Com o intuito de avaliar a qualidade das duas séries sintéticas (SSr e SSo), os valores de q_{mlt} dessas séries foram comparados aos valores de q_{mlt} das séries históricas de dados observados (SO) usando o erro relativo (ER), que é dado pela equação:

$$ER = \left[\frac{(q_{mltSS} - q_{mltSO})}{(q_{mltSO})} \right] 100 \quad (2)$$

em que: ER = erro relativo; q_{mltSS} = vazão específica média de longo termo da série sintética (SSo ou SSr), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; q_{mltSO} = vazão específica média de longo termo da série observada, $m^3 s^{-1} km^{-2}$.

2.4 Estimativa da capacidade do reservatório

A capacidade do reservatório (CR) foi estimada com base em demandas fixas e variáveis no tempo por diferentes métodos: RCReg (Regionalização da curva de regularização), MSSo (Estimativa da CR baseada na metodologia de geração da SSo), MSSr (Estimativa da CR baseada na metodologia de geração da SSr) e RCRes (Regionalização da capacidade do reservatório) sendo que as três últimas podem se associar a um período de retorno (MSSo_T, MSSr_T, RCRes_T). O método MSO_T, que estima a CR com base nos dados observados das séries históricas associado a um T, é considerado como método de referência por ser a condição menos propensa a erros relacionados a base de dados.

A RCReg, comumente empregada no dimensionamento de reservatórios em locais sem dados fluviométricos, assim como a RCRes foram usadas como base comparativa para avaliação dos métodos baseados na geração de séries sintéticas.

2.4.1 Demanda fixa

Para possibilitar o dimensionamento de reservatórios de regularização com demanda fixa, foram utilizadas diferentes proporções (0,25; 0,50; 0,75 e 1) da vazão média de longo termo, que indica a disponibilidade hídrica potencial da bacia hidrográfica, representando assim, a vazão máxima passível de ser regularizada a partir da construção de um reservatório. A vazão a ser regularizada, foi obtida com base na equação de regularização, expressa por:

$$\beta = \frac{Q_r}{Q_{mlt}} \quad (3)$$

em que: β = fração da vazão média a ser regularizada, adimensional; Q_r = vazão regularizada, m^3s^{-1} ; e Q_{mlt} = vazão média de longo termo $m^3 s^{-1}$.

2.4.2 Demanda variável

Para estimar a CR em uma demanda variável no tempo, representada principalmente pela irrigação, foi considerada a demanda de água pelas culturas do milho e feijão, culturas com as maiores áreas irrigadas na bacia do Jequitinhonha (IBGE, 2006). Este padrão de consumo associado à diferentes cenários relacionados a áreas irrigadas permitiu obter a vazão a ser regularizada e a sua variação ao longo do ano.

Para estimativa da demanda de água para irrigação de um sistema de rotação entre o milho e o feijão, foram consideradas como data de semeadura 1 de fevereiro para o milho e 1 de outubro para o feijão.

O cálculo da vazão unitária consumida mensalmente pela irrigação dessas culturas e considerando as condições de bombeamento a fio d'água foi realizado utilizando-se a equação:

$$q_{u,i} = \left(\frac{(\sum_{j=1}^{D_f} ET_{pc}) - P_{ef}}{E_a} \right) \frac{NHD}{NTFP} \frac{1}{259,2} \quad (4)$$

em que: $q_{u,i}$ = vazão unitária necessária para a cultura de interesse no mês i , $L s^{-1} ha^{-1}$; D_f = dia final do último mês; $ET_{pc,j}$ = evapotranspiração potencial da cultura para o dia j , $mm d^{-1}$; P_{ef} = precipitação efetiva, $mm mes^{-1}$; E_a = eficiência de aplicação, adimensional; $NHD/NTFP$ = número de horas no dia/número de horas fora do horário de ponta para a tarifação da energia elétrica; e $1/259,2$ = fator de conversão de unidades.

2.4.2.1 Evapotranspiração potencial da cultura

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) que corresponde à evapotranspiração máxima da cultura durante suas diversas fases de desenvolvimento foi calculada utilizando-se a equação:

$$ET_{pc} = ET_0 Kc \quad (5)$$

em que: ET_{pc} = evapotranspiração potencial da cultura, $mm\ d^{-1}$; ET_0 = evapotranspiração de referência, e Kc = coeficiente da cultura para determinada fase de desenvolvimento, adimensional.

A evapotranspiração de referência representa a evapotranspiração de uma cultura hipotética (similar a um gramado), em condições ideais de crescimento. Para sua estimativa considerou-se o método combinado de Penman-Monteith-FAO, dado pela seguinte equação (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (6)$$

em que: ET_0 = evapotranspiração de referência, $mm\ d^{-1}$; Δ = declividade da curva de pressão de vapor, $kPa\ ^\circ C^{-1}$; R_n = radiação líquida à superfície de cultura, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$; G = densidade do fluxo de calor do solo, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$; γ = constante psicrométrica, $kPa\ ^\circ C^{-1}$; T = temperatura média do ar diária a 2 m de altura, $^\circ C$; U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$; e_s = pressão de vapor de saturação, kPa ; e_a = pressão atual de vapor, kPa ; e $e_s - e_a$ = déficit de pressão de vapor de saturação, kPa .

A aplicação da equação 4 foi feita utilizando-se o software Reference Evapotranspiration Calculator – RefEt 3.1.15 (ALLEN, 2013), a partir da inserção de dados e temperatura máxima e mínima, insolação, velocidade do vento e umidade relativa.

A estação meteorológica 84488 localizada na latitude $17^\circ 85'$ e longitude $42^\circ 85'$, próxima a locais onde as culturas de milho e café tem considerável área irrigada na bacia do rio Jequitinhonha, foi considerada para obtenção das séries históricas dos dados climáticos observados necessários ao estudo.

Para obtenção dos coeficientes das culturas e sua respectiva fase de duração, foi utilizado o boletim 33 FAO (DOORENBONS; KASSAM, 1994)

2.4.2.2 Precipitação Efetiva

Para aplicação da equação 4, foram utilizados os valores médios mensais de Precipitação efetiva. As precipitações efetivas (Pef) mensais foram estimadas a partir dos dados de precipitação total mensal na estação 84488, utilizando o método proposto pelo USDA Soil Conservation Service (USDA-SCS), apresentado nas equações 7 e 8 (Clarke, 1998).

$$P_{ef} = \frac{Pt (125 - 0,2 Pt)}{125} \quad (Pt < 250 \text{ mm}) \quad (7)$$

$$P_{ef} = 125 + 0,1 Pt \quad (Pt > 250 \text{ mm}) \quad (8)$$

em que: Pef = Precipitação efetiva, mm mês⁻¹; e Pt = Precipitação total, mm mês⁻¹.

2.4.2.3 Eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação (Ea) é um fator de correção da quantidade total de água utilizada na irrigação, já que ocorre perdas no sistema. Nesse estudo foi adotado o valor de eficiência de aplicação igual a 0,85, correspondente ao sistema de irrigação por aspersão por pivô central, de acordo com a Resolução da ANA nº 707/204, sendo esse o sistema comumente utilizado para as culturas do milho e do feijão.

2.4.2.4 Fator relativo às horas de bombeamento por dia

O fator relativo às horas de bombeamento por dia (NHD/NHFP) representa uma compensação de vazão para irrigação, uma vez que são estabelecidas tarifas diferenciadas ao longo do dia pelos portos tarifários. Exceto aos sábados, domingos e feriados nacionais, as tarifas são definidas como de ponta e intermediária. A tarifa de ponta equivale ao período de três horas consecutivas diárias, das 18h às 21h, e a intermediária ao período formado pela hora imediatamente anterior e posterior ao período de ponta, totalizando duas horas. Assim, a tarifa diferenciada recairia sobre o período de cinco horas de duração, das 17h às 22h. Portanto, o uso da relação NHD/NHFP correspondente às horas do dia fora do horário de tarifa diferenciada, estimado pela razão 24/19 (IBIO; FUNARBE, 2013).

2.4.2.5 Vazão a ser regularizada

A vazão máxima regularizável é representada, em teoria, pela Q_{mlt} , no entanto, para evitar altos custos de produção, na irrigação não é comum que se regularize uma vazão correspondente a mais de 60% da Q_{mlt} . Além disso, em cursos d'água regularizados deve-se manter um fluxo mínimo a jusante, que, no estado de Minas Gerais é de 50% da $Q_{7,10}$, segundo a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº1548, de 29 de março de 2012. Desta forma, o volume máximo de água disponível para irrigação considerando diferentes cenários de utilização da vazão passível de regularização é expresso por:

$$V_{\max \text{ disp}} = (X Q_{mlt} - 50\% Q_{7,10}) f \quad (9)$$

em que: $V_{\max \text{ disp}}$ = volume máximo disponível anualmente pela regularização (m^3); X = percentual da Q_{mlt} ; e f = fator de conversão ($31,536 \times 10^5$).

Foram adotados três cenários de utilização da vazão passível de regularização para estimativa da CR com demanda variável (Tabela 1), além dos valores de vazão unitária necessários para irrigação das culturas do milho e do feijão (Tabela 2).

Tabela 1. Cenários de utilização da vazão passível de regularização

Cenário	Vazão passível de regularização
Cenário 1 (C1)	(60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$)
Cenário 2 (C2)	(50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$)
Cenário 3 (C3)	(40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$)

Tabela 2. Vazão unitária necessária para irrigação do milho e feijão, na bacia do Jequitinhonha

Milho					Feijão		
Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Out	Nov	Dez
-	0,00891	0,02628	0,03433	0,02464	0,00014	0,03927	-

Considerando que a demanda anual de irrigação é dada pelo somatório das vazões unitárias necessárias para a irrigação por mês (equação 10), foi possível estimar a área potencialmente irrigável nas áreas de drenagens das estações (equação 11).

$$D_{\text{anual}} = \sum_{i=1}^{12} (q_{u,i} \cdot n \cdot 86400) \quad (10)$$

em que: D_{anual} = demanda de irrigação anual, $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$; $q_{u,i}$ = vazão unitária necessária para a cultura de interesse no mês i , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; e n = número de dias no mês.

$$A_{\text{PI}_{j,k}} = \frac{V_{\text{máx disp}_{j,k}}}{D_{\text{anual}}} \quad (11)$$

em que: $A_{\text{PI}_{j,k}}$ = área potencialmente irrigável para a estação j e cenário k , km^2 ; $V_{\text{anual máx}}$ = volume máximo disponível anualmente para a estação j e cenário k , m^3 ; e D_{anual} = demanda de irrigação anual, $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$.

Assim, em cada cenário de demanda analisado, as estações fluviométricas ou seções de interesse obtiveram uma área potencialmente irrigável. A vazão regularizada considerando cada cenário e seção de interesse é dada pela equação:

$$Q_{\text{reg}_{i,j,k}} = A_{\text{PI}_{j,k}} \times q_{u,i} \quad (12)$$

em que: $Q_{\text{reg}_{i,j,k}}$ = vazão regularizada para o mês i , estação j e cenário k , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $A_{\text{PI}_{j,k}}$ = área potencialmente irrigável para a estação j e cenário k , km^2 ; e $q_{u,i}$ = vazão unitária no mês i , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

2.4.3 Capacidade do reservatório com o uso de séries sintéticas sem associação com o período de retorno

Para o dimensionamento da capacidade dos reservatórios de regularização é necessário obter o valor do maior volume do déficit acumulado, o qual foi calculado pelo método das diferenças acumuladas ou máximo déficit acumulado (MDA). Nesse método, o volume de déficit acumulado é obtido pelo maior somatório dos déficits entre a vazão afluente e a vazão a ser regularizada. Considera-se como mais crítico o período de maior déficit acumulado e, conseqüentemente, maior CR.

Quando os déficits são compensados no mesmo ano (regra de operação anual), o maior volume de déficit acumulado em cada ano é utilizado para obtenção da CR. Em casos em que os déficits são transferidos para o ano seguinte (operação plurianual), todos os anos são analisados em conjunto como uma única série.

2.4.4 Capacidade do reservatório com o uso de séries sintéticas associadas ao período de retorno

Com o intuito de associar a CR a diferentes períodos de retorno (T), foram usadas funções de densidade de probabilidade (FDP) (KITE, 1988), por meio da equação:

$$CR_T = \bar{x} + k s \quad (13)$$

em que: CR_T = capacidade do reservatório associada a um determinado período de retorno T, hm^3 ; \bar{x} = média dos valores de volumes de déficits acumulados, hm^3 ; k = fator de frequência, adimensional; e, s = desvio padrão dos valores de volumes de déficits acumulados, adimensional.

Para cada uma das distribuições probabilísticas há uma forma adequada de determinar o fator de frequência (KITE, 1998).

Para regra de operação anual obtém-se o maior volume de déficit acumulado para cada ano, obtendo-se assim “n” déficits correspondentes ao número de anos da série sintética. Para a série relativa aos “n” déficits são aplicadas as FDP, obtendo-se assim a CR associada ao T.

Para a regra de operação plurianual, analisa-se os anos da série em conjunto, obtendo-se apenas um volume de déficit acumulado o que impossibilita o uso de uma FDP. Nesse contexto, com o intuito de obter várias CR associadas a diferentes períodos de retorno, foi utilizado o método das diferenças acumuladas modificado (MDAM), desenvolvido por Nunes e Pruski (2015). Este método baseia-se na criação de séries sintéticas temporais e é apresentado na Figura 3. O número de séries sintéticas será igual ao número de anos do período base da série histórica de vazões disponíveis menos um, sendo que, para cada uma das séries, incluindo a original será associada um volume de déficit acumulado. Para todos os déficits, aplica-se a distribuição de Gumbel para obtenção da CR associada ao T desejado.

Para aprimorar a metodologia desenvolvida por Nunes e Pruski (2015), também foram analisadas as funções de distribuição de densidade de probabilidade: Log-Normal tipo II, Log-

2.4.6 Capacidade do reservatório pelo método da regionalização da capacidade do reservatório

Na regionalização da capacidade do reservatório, proposta por Rodrigues (2017), altera-se a variável a ser regionalizada em relação a RCReg, com a vantagem de associar a CR à um T.

Calculou-se a CR para cada estação fluviométrica localizada na mesma RHH da seção de interesse a partir da demanda (D). Após a obtenção das CRs, essas foram regionalizadas gerando equações de regressão que associaram a CR à vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem da estação menos um fator de abstração, que na bacia do Jequitinhonha, equivale a 600 mm (Peq₆₀₀) (GPRH; IGAM, 2012).

$$Peq_{600} = \frac{(P - 600) A}{k} \quad (15)$$

em que: Peq₆₀₀ = vazão equivalente ao volume precipitado menos 600 mm (m³ s⁻¹); P = precipitação total anual média na área (mm); A = área de drenagem (km²); e k = fator de conversão (31536).

O fator de abstração é utilizado com intuito de contemplar a parte da precipitação que não é convertida em escoamento ao longo da hidrografia em decorrência de outros processos, sobretudo a evapotranspiração (PRUSKI et al., 2013).

O modelo de regressão utilizado foi o potencial, representado pela equação:

$$CR_{T,D} = c Peq_{600}^d \quad (16)$$

em que: CR_{T,D} = capacidade do reservatório associada à T e D (hm³); e c e d = parâmetros obtidos na regressão potencial.

2.4.7 Avaliação das metodologias de estimativa da CR

As metodologias usadas nas estimativas da CR foram avaliadas por índices estatísticos de eficiência que representam medidas matemáticas utilizadas por hidrólogos para fornecer uma avaliação comparando o comportamento simulado com o observado. As metodologias propostas foram avaliadas por dois índices estatísticos: o índice de Nash-Sutcliffe modificado

(E₁) e o índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD). Os valores de CR obtidos a partir dos dados da série observada (SO) foram adotados como referência para avaliação das metodologias.

2.4.7.1 Coeficiente de eficiência de Nash- Sutcliffe ajustado (E₁)

O coeficiente de eficiência de Nash- Sutcliffe (E), amplamente utilizado na avaliação de desempenho de modelos hidrológicos, conhecido como índice de análise da eficiência de modelos, indica quanto os dados estimados pelo método proposto se distanciam em relação ao comportamento médio dos dados observados (ALE et al., 2012). O valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe indica o ajustamento dos dados simulados aos observados, podendo variar de $-\infty$ a 1 (ZHANG et al., 2007). Quando E é igual a 1 indica uma combinação perfeita entre os dados estimados e os observados e quando E é igual a 0 indica que a metodologia não acrescenta nenhum poder preditivo. Já um valor negativo demonstra que os valores estimados são inadequados em relação aos observados.

Devido à diferença entre os valores observados e os preditos estar elevada ao quadrado, os picos do hidrograma são superestimados, enquanto os baixos valores são negligenciados (LEGATES; McCABE, 1999). Para contornar esse efeito, Legates e McCabe (1999) propuseram o coeficiente de eficiência modificado (E₁) (Equação 17), o qual é mais adequado para a avaliação de metodologias, além de ser simples e de fácil interpretação. No entanto, como a obtenção deste índice considera o módulo das diferenças, não respeita a ocorrência de superestimativas ou subestimativas, importantes no dimensionamento da capacidade de reservatórios.

$$E_1 = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n |CR_{SO_i} - CR_{SS_i}| \right]}{\left[\sum_{i=1}^n |CR_{SO_i} - \overline{CR_{SO_i}}| \right]} \quad (17)$$

em que: CR_{SO_i} = Capacidade do reservatório estimada para a estação fluviométrica i, com base na série original de vazões, $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $CR_{(SS)}$ = Capacidade do reservatório estimada para a estação fluviométrica i, com base na série sintética, $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $\overline{CR_{SO_i}}$ = média dos valores observados de capacidade do reservatório nas estações fluviométricas, $m^3 s^{-1} km^{-2}$.

2.4.7.2 Índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD)

O IQD, proposto no estudo de Rodrigues (2017), é dado por:

$$IQD = \frac{n}{\sum_{i=1}^n [ER_+ + (ER_- * FP)]} \quad (18)$$

em que: IQD = índice de qualidade do dimensionamento, adimensional; n = número de estações fluviométricas utilizadas; ER₊ = erro relativo positivo de cada estação fluviométrica; ER₋ = erro relativo negativo de cada estação fluviométrica; e FP = fator peso cujo valor adotado foi -1,5.

Essa metodologia permite a ocorrência de superestimativas ou subestimativas sendo que o valor de IQD varia de 0 a $+\infty$ aumentando seu valor à medida que diminui o ER.

Se a CR estimada para determinada estação fluviométrica for maior que a CR calculada pelos dados observados, o ER será positivo (ER₊), condição de superestimativa, se for menor o ER será negativo (ER₋), caracterizando uma subestimativa. No caso da ocorrência de subestimativas deve-se multiplicar o ER₋ pelo fator de peso (FP) equivalente a -1,5 que aumenta o erro em 50% e o torna positivo. Na sequência, realiza-se o somatório dos ERs, agora positivos, de todas estações consideradas, com o intuito de verificar a metodologia que apresenta menor somatório de ER e, conseqüentemente, maior IQD. Nesse estudo, as demandas variáveis foram estimadas para a irrigação e, como nesses casos não é necessário trabalhar com riscos tão baixos, o IQD não foi utilizado para avaliar a qualidade do dimensionamento de reservatórios.

2.4.8 Dados fluviométricos

Foram utilizadas as séries de dados históricos consistidos das estações fluviométricas pertencentes à Agência Nacional das Águas (ANA) localizadas na bacia em estudo. Os valores da Peq₆₀₀ e Q_{mlt} regionalizados foram obtidos em GPRH e IGAM (2012). De acordo com a análise da disponibilidade de dados, adotou-se o período base de 1970 a 2005. Os anos com falhas superiores a 5% foram descartados.

Na Tabela 3 encontram-se os códigos das estações utilizadas no estudo, assim como as coordenadas e respectivas áreas de contribuição.

Tabela 3. Estações fluviométricas da bacia do rio Jequitinhonha utilizadas no estudo

Código	Longitude	Latitude	Área (km ²)
54110002	42°35'89"	16°59'49"	4100
54195000	42°30'86"	16°61'78"	23815
54300000	42°59'79"	17°22'03"	1252
54390000	42°34'83"	16°86'01"	11000
54500000	42°06'19"	16°85'41"	16230
54530000	42°00'38"	16°75'88"	39394
54580000	41°50'23"	16°57'23"	45819
54590000	41°49'23"	16°68'96"	1283
54710000	41°01'30"	16°43'17"	53298
54780000	40°30'60"	16°13'45"	63300
54950000	39°52'34"	15°94'29"	67769

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação das séries sintéticas

Os resultados relativos aos valores de q_{mt} específica das séries sintéticas e seus respectivos erros relativos percentuais em relação aos dados originais, bem como a q_{mt} específica das séries originais encontram-se na Figura 4.

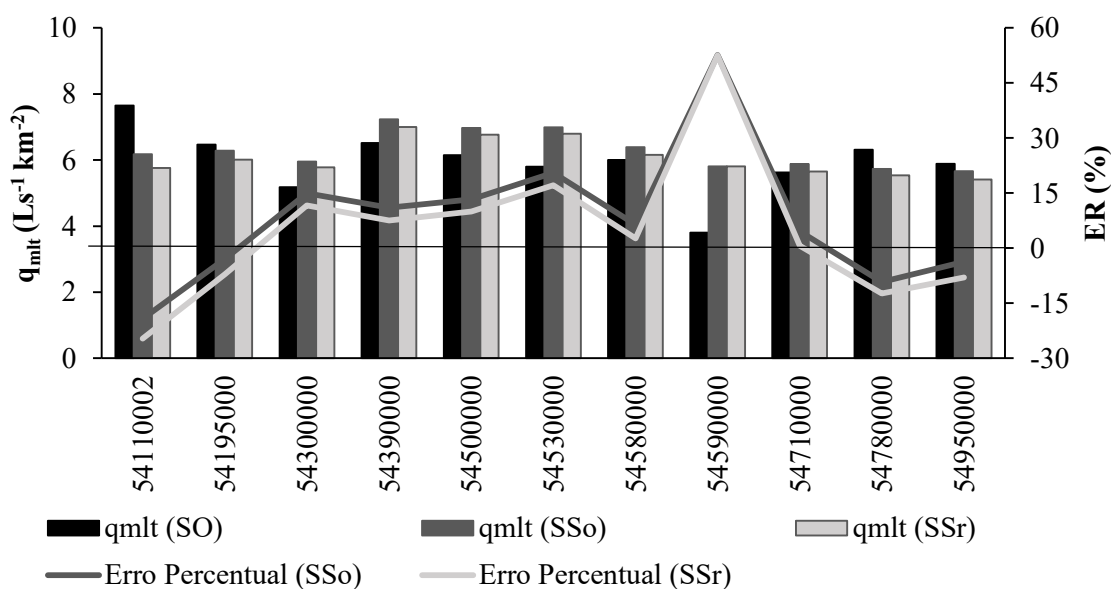


Figura 4. Vazão média de longo termo específica da SO, SSo, SSr e ER percentual das duas séries sintéticas em cada estação fluviométrica.

De maneira geral, os valores q_{mlt} da SSo e da SSr foram próximos aos valores observados, sem diferença expressiva entre elas, com erro percentual médio próximo a 10% para a SSo e 12% para a SSr. Analisando a Figura 4, verifica-se também que não há uma tendenciosidade dos valores de q_{mlt} das séries sintéticas, cujos erros oscilaram entre superestimativas e subestimativas. Contudo, em algumas estações o erro percentual relacionado à série original é aproximadamente -20% (estação 54110002) e ultrapassa 50% (estação 54590000) nas duas séries sintéticas.

Na Figura 5, têm-se os valores de q_{mlt} tanto dos dados observados nas séries históricas quanto dos regionalizados obtidos por GPRH e IGAM, 2012. As estações 54590000 e 54110002 em que os dados de q_{mlt} das séries sintéticas apresentam os maiores erros percentuais estando mais distantes dos valores observados, também apresentam os maiores resíduos percentuais nas estimativas da q_{mlt} regionalizada.

Desta forma, as variações percentuais dos erros apresentados na Figura 4 podem ser explicadas pelos desvios entre os valores estimados e os observados que ocorrem no processo de regionalização.

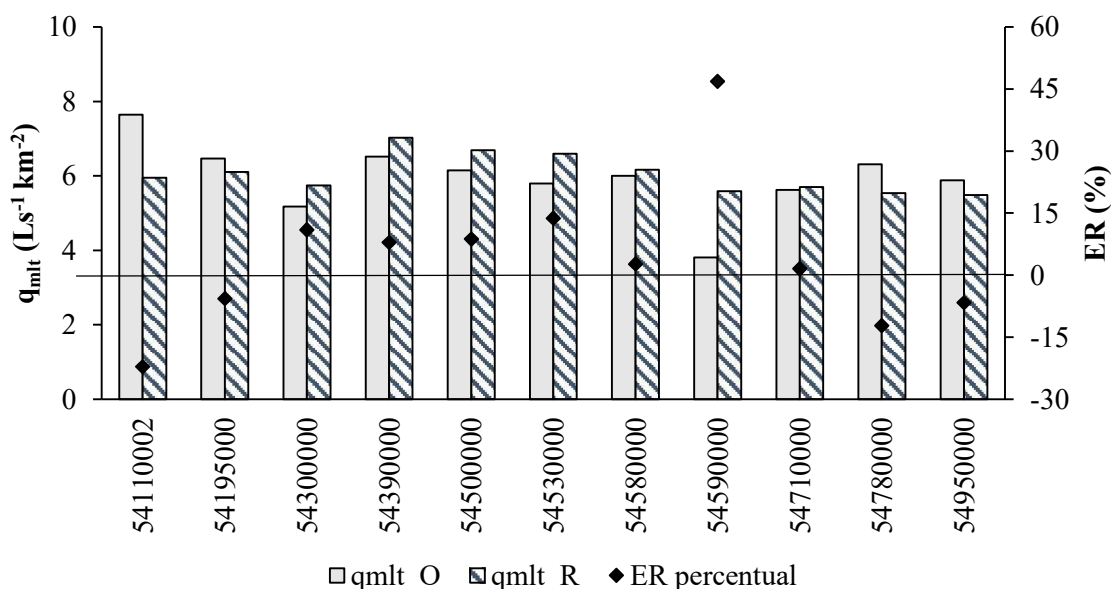
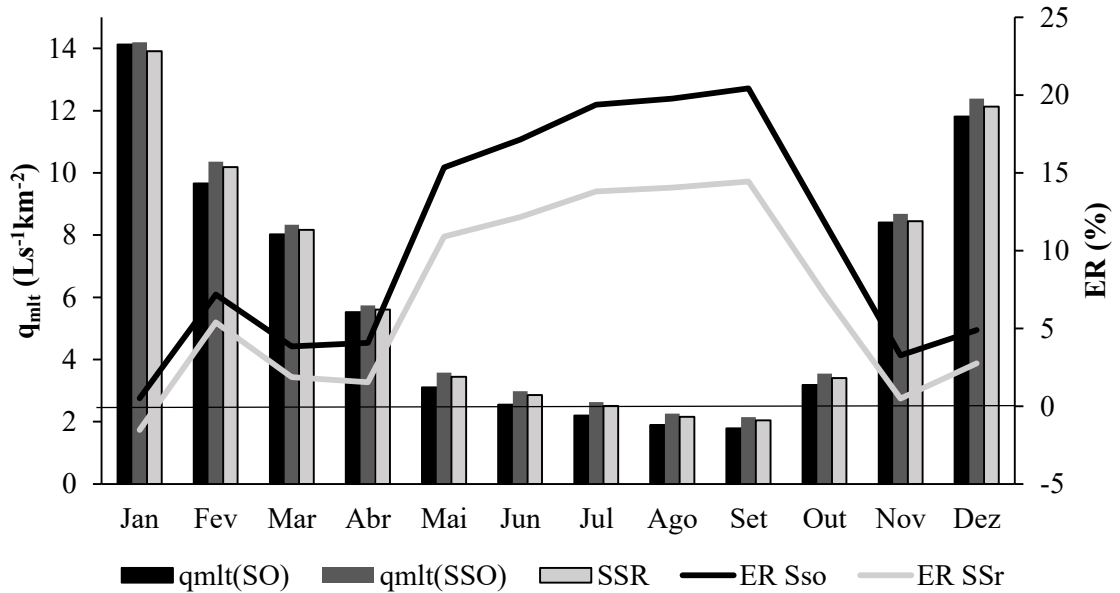


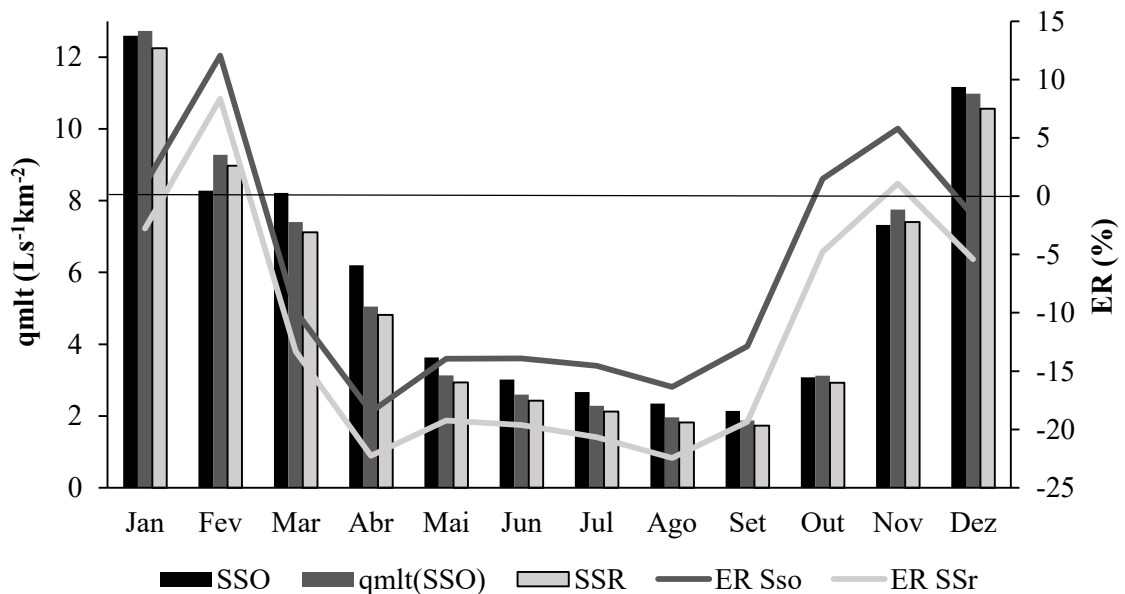
Figura 5. Vazão média de longo termo específica observada (q_{mlt_O}), regionalizada (q_{mlt_R}) e ER percentual nas estações fluviométricas.

Na Figura 6, são apresentados os valores de q_{mlt} mensais estimados com base nas séries sintéticas geradas e na série histórica, além dos erros relativos entre elas para as estações

54580000 (Figura 6a) e 54950000 (Figura 6b), que são representativas do comportamento das demais.



(a)



(b)

Figura 6. Vazão média de longo termo específica da SO, SSo e SSr e ER percentual das séries sintéticas nas estações fluviométricas 54580000 (a) e 54950000 (b).

Considerando que o conhecimento acerca do processo de mudanças temporais e espaciais dos regimes de vazões, possibilita o gerenciamento adequado dos recursos hídricos, é imprescindível que ao utilizar séries sintéticas para a estimativa de vazões, estas séries apresentem resultados satisfatórios quanto ao comportamento do regime de variação de vazões.

Observa-se na Figura 6 que o uso de dados de q_{mlt} regionalizados são representativos na geração de séries sintéticas de forma similar ao uso dos dados de q_{mlt} observados. As vazões específicas média de longo termo das séries sintéticas apresentaram erros percentuais abaixo de 10% em metade dos meses, e máximo valor de erro igual a 20% na SSo e 14% na SSr (Figura 6a), reproduzindo bons resultados, porém, com tendência de maiores erros relativos durante os meses de estiagem.

Na Figura 6b, a q_{mlt} das séries sintéticas manteve os erros percentuais abaixo de 15% considerando erros positivos e negativos em metade dos meses, atingindo valor mínimo igual a -19% na SSo e -22% na SSr. No entanto, os maiores erros relativos da estação 54950000 foram encontrados nos meses onde ocorreram as maiores vazões, ao contrário do que é apresentado na Figura 6a.

Diante do exposto, os valores de q_{mlt} estimados pelas séries sintéticas não apresentam tendência em seu comportamento já que variam entre superestimativas e subestimativas nas estações 54580000 e 54950000, assim como nas diversas estações em estudo.

Na Figura 6 também pode ser observado que a maior distribuição das vazões ocorre basicamente em cinco meses – novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril – dando uma característica bastante assimétrica ao regime de vazões e fazendo com que o abastecimento dos outros sete meses do ano seja dependente do que se consegue armazenar na época de cheia citada.

3.2 Estimativa da capacidade do reservatório considerando demanda fixa

Na estimativa da CR considerando demanda fixa, utilizou-se métodos que não se associaram ao T (MSSo, MSSr, RCRes e RCReg), assim como métodos que consideraram esse fator de frequência (MSSo_T, MSSr_T e RCRes_T).

Para as estimativas da CR com o uso da MSSo_T e da MSSr_T, as análises das diferentes FDPs (Gumbel, Pearson III, Log Normal II, Log Normal III e Log Pearson III) indicaram para as combinações de β e T, diferentes respostas ao ajuste de dados. Considerando as combinações dos $\beta = 0,25$ e $0,5$ e $T = 10, 40, 70$ e 100 , foram obtidas capacidades dos reservatórios com regra de operação anual e melhor desempenho, em função da menor

amplitude do intervalo de confiança, para a distribuição Log normal 3 em 48% das combinações entre β e T (Tabela 4). Já para os β s mais elevados (0,75 e 1), foram obtidas capacidades dos reservatórios com regra de operação plurianual, onde Pearson 3 se destacou com melhor desempenho em 52% das combinações (Tabela 4). Desta forma, por representarem as distribuições com maior aderência nas respectivas regras de operação, estas foram fixadas para estimativa da CR e novos valores foram obtidos.

Tabela 4. Frequência de ocorrência das FDPs com melhor desempenho para cada regra de operação considerando demanda fixa

Frequência de ocorrência (%)						
Regra de operação anual			Regra de operação plurianual			
Log Normal III	Gumbel	Pearson III	Pearson III	Log Normal III	Log Pearson III	Log Normal II
48	45	7	52	26	3	19

3.2.1 Estimativa da capacidade do reservatório

A CR foi calculada pelas metodologias propostas, para todas as estações, e está sendo exemplificada pela estação fluviométrica 54580000 (Figura 7), representativa do comportamento das demais estações.

Comparando-se os valores de CR obtidos para os diferentes β s e Ts nota-se que, as metodologias RCReg, MSSo, MSSr e RCRes, por não estarem associadas ao T, não acompanham o crescimento do método MSO_T à medida que se aumenta o T considerado. Assim, na análise dessas metodologias, verifica-se a ocorrência de subestimativas e superestimativas com destaque para a RCReg por obter os valores mais discrepantes em relação à série original a partir do $\beta = 0,5$. A metodologia RCRes, apesar de superior a RCReg, exibiu valores consideráveis de subestimativas nesta estação, sendo inferior às metodologias MSSo e MSSr, que se sobressaíram com menores discrepâncias em relação ao método de referência principalmente no $\beta = 0,75$.

Além disso, outro aspecto a ser considerado é que as metodologias MSSo e MSSr possuem melhor aplicabilidade que a RCRes, visto que, com o devido estudo prévio de regionalização e depois de geradas as séries sintéticas é necessário apenas aplicar o método MDA para obtenção da CR (RODRIGUES, 2017). Para emprego da RCRes, após a aplicação do MDA, é feita ainda a regionalização das CRs obtidas gerando a equação de estimativa da

CR para a seção. Assim, o uso de séries sintéticas na estimativa da CR mostra-se de boa aplicabilidade com estimativa de valores mais representativos.

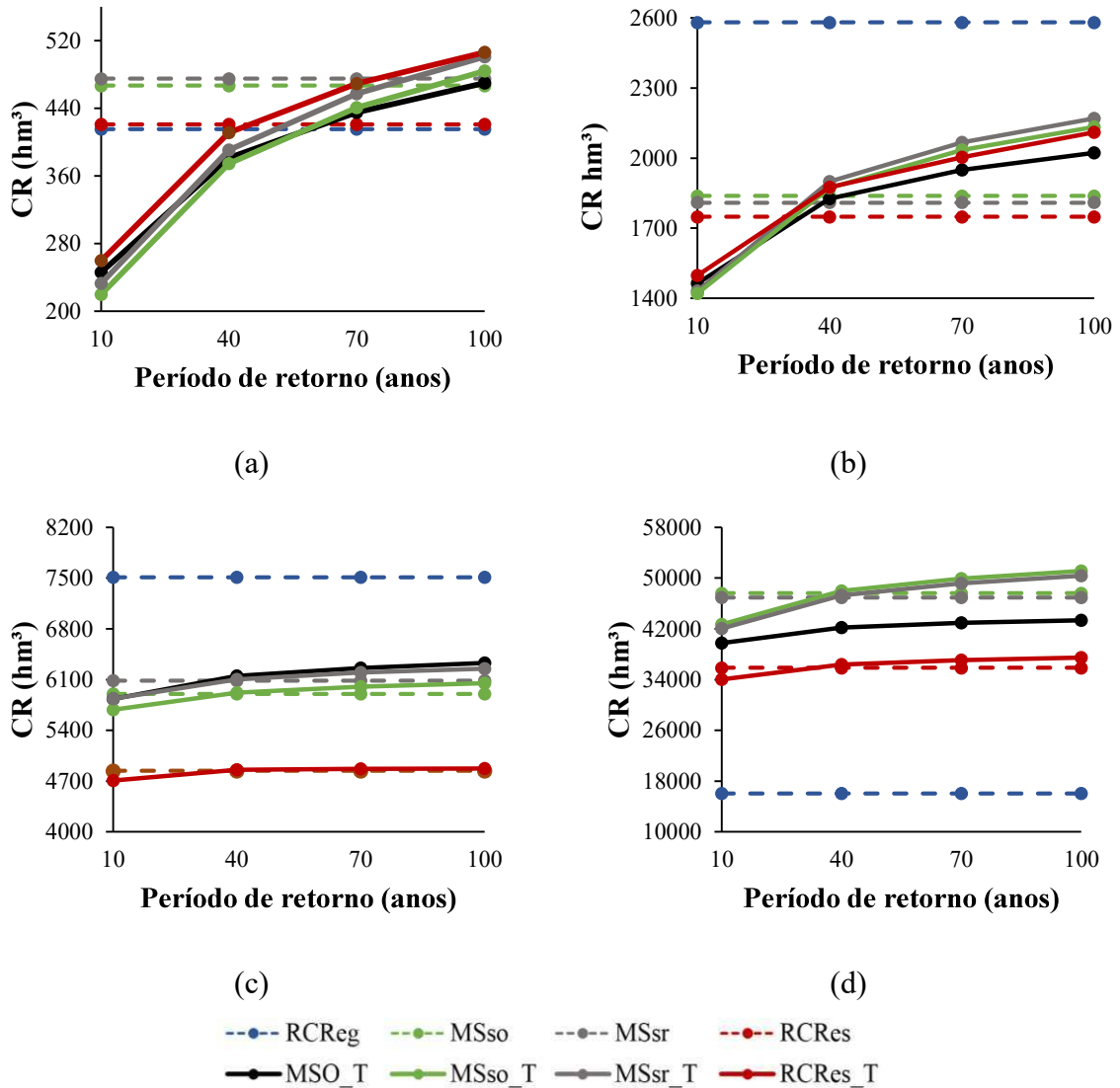


Figura 7. Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) para a estação 54580000 com demanda fixa.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos para MSSo e a MSSr, o uso de metodologias que consideram o T é mais representativo, uma vez que os dados variam conforme o T é modificado. Embora o uso das metodologias com o uso do T seja mais complexo uma vez que são necessários a aplicação do MDAM e das FDPs, o cálculo da CR associado a um fator de frequência é mais indicado por possibilitar a previsão de eventos hidrológicos de grande magnitude, importante na concepção de projetos hidráulicos.

Dentre as metodologias que fazem uso do T, a MSSo_T e MSSr_T tiveram melhores resultados, exceto nos β s = 0,5 e 1,0 para os Ts = 70 e 100 em que o método RCRes_T teve valores mais próximos do MSO_T. No entanto, o método RCRes_T apresentou as maiores subestimativas dos valores de CR nos β maiores, não fornecendo uma boa segurança para o reservatório a ser dimensionado.

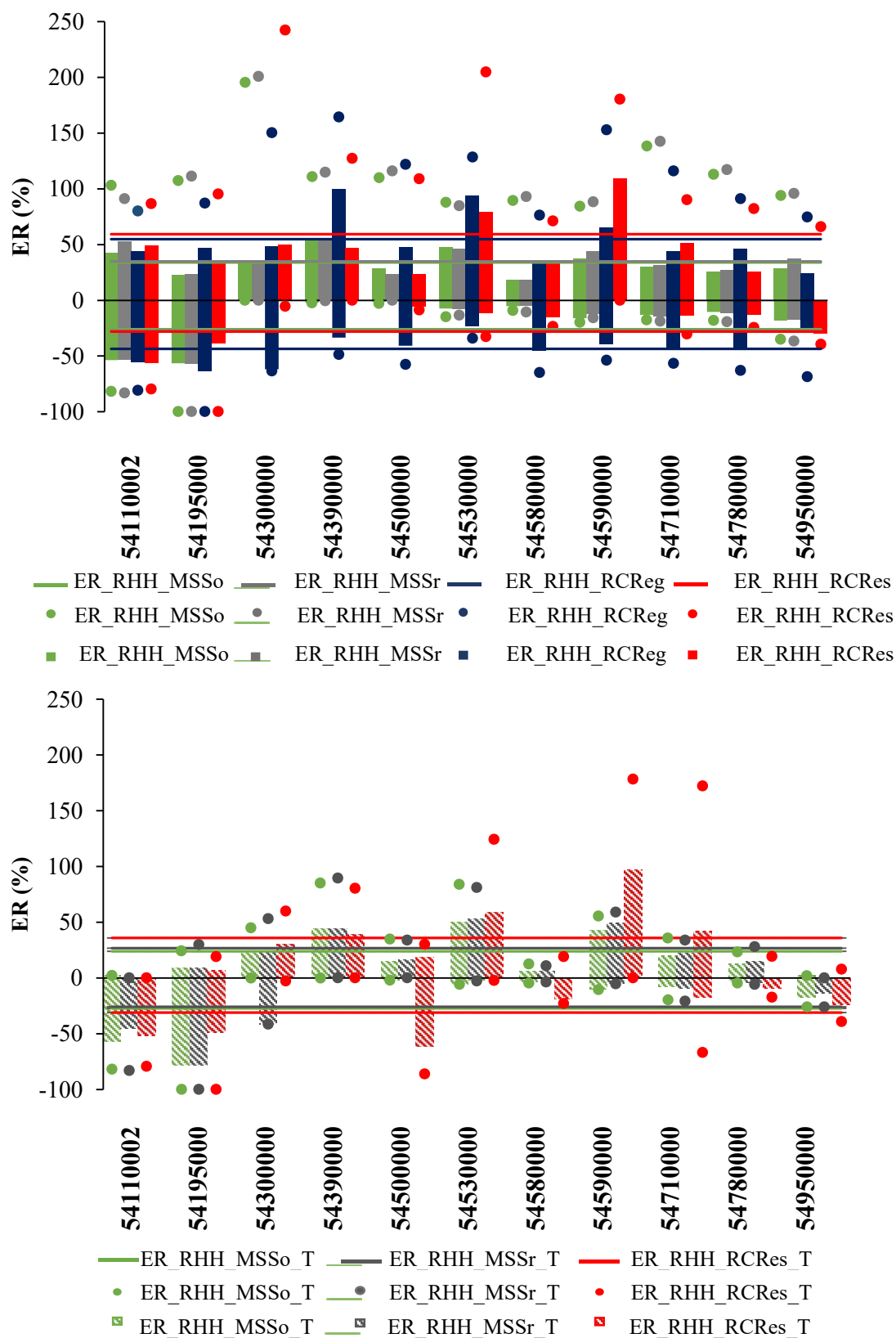
Ao contrário da RCRes_T, as metodologias MSSo_T e MSSr_T, possuem a tendência de superestimativa da CR na estação indicada, com exceção do $\beta = 0.75$. A tendência de superestimativas, apesar de não desejável, garante a maior segurança de suprimento hídrico pelo reservatório.

3.2.2 Avaliação da estimativa da capacidade do reservatório

Na Figura 8 são apresentados os ER médios (colunas) e ER máximos (pontos) resultantes das combinações de β (0,25; 0,5; 0,75 e 1,00) e de T (10, 40, 70 e 100 anos), por método, para cada estação fluviométrica, além do ER da RHH (linhas contínuas) que representa o erro relativo médio considerando as estimativas de todas as estações.

As metodologias que não utilizam o T são apresentadas na Figura 8a e as que o consideram na Figura 8b. Analisando estas figuras observa-se que os resultados estão em concordância com aqueles associados à CR da estação 54580000 (Figura 7). Os erros percentuais das metodologias que não consideram o T são maiores tanto em superestimativas quanto em subestimativas, tal como o que ocorre com os erros percentuais da RHH. Assim, reafirma-se que as metodologias que fazem uso do T possibilitam estimativas de valores de CR mais representativos.

Quanto à comparação dos erros percentuais médios das metodologias que não consideram o T para cada estação, o uso da RCReg tem os maiores erros relativos na maior parte das estações, sendo responsável pelas maiores subestimativas em nove estações e maiores superestimativas em seis. Além disso, este método possui o maior erro médio da RHH em subestimativas, o que o caracteriza como o mais inadequado dentre os métodos estudados para o dimensionamento de reservatório.



(b)

Figura 8. ER percentual médio e máximo em cada estação fluviométrica e ER médio da RHH para as metodologias que não utilizam o T (a) e que utilizam o T (b).

O uso da RCRes gerou os maiores erros em superestimativas e subestimativas em três e duas estações respectivamente. Esse método destacou-se nas superestimativas, que foram altas no geral, com maior erro percentual médio da RHH além de altos valores de erros máximos, assim como observado em Rodrigues (2017), chegando a atingir mais de 180% em três estações.

Desta forma, para os métodos sem uso do T, MSSo e MSSr mantiveram o melhor desempenho para as estimativas da CR. Esses métodos apresentaram diferenças de pequena relevância, com valores de erros percentuais próximos entre si, além de desvios a favor da segurança do sistema, com maiores discrepâncias nas superestimativas (Figura 8a).

Dentre os modelos que consideram o T, o modelo RCRes_T apresentou, em geral, as maiores amplitudes dos erros percentuais médios das estações e os maiores valores de erro médio da RHH (Figura 8b). Além disso, esse método apresentou valores máximos de superestimativas superiores a 170% em duas estações. Com isto, reforça-se a vantagem preditiva da CR com o uso das metodologias que utilizam as séries sintéticas.

Os métodos MSSr_T e MSSo_T apresentaram comportamento estatístico similar na maioria das estações com maiores tendências de superestimativas, o que apesar das desvantagens no cenário ambiental, social e econômico, garantem a maior segurança hídrica.

É evidente que o dimensionamento ótimo do reservatório é encontrado entre as situações críticas de superdimensionamento (maior custo do projeto), e subdimensionamento (necessidade de racionamento de água durante o período seco) (TUCCI, 2012). No entanto, visando o dimensionamento mais adequado, analisando os riscos e valorizando o conceito de segurança hídrica, atribui-se uma preferência para métodos em que a confiabilidade é privilegiada em relação a situações em que o risco de um abastecimento insuficiente é maior, mesmo que associado a um menor custo e proporção de áreas alagadas. Segundo Hauschild (2000), no semiárido brasileiro, região em que a implantação de reservatórios é de grande necessidade, os impactos causados pelo não atendimento da demanda são ainda mais relevantes.

Em resumo, pelas análises anteriores, os métodos de estimativa da CR que não consideram o T apresentam desempenho notoriamente inferior aos que o consideram, devendo ser evitados. Dentre os métodos que se associam a um fator de frequência, o RCRes_T apresenta menor eficiência, sendo os métodos que utilizam as séries sintéticas os mais indicados. Tais resultados estão em conformidade com os apresentados por Rodrigues (2017), que analisou estas metodologias para o dimensionamento de reservatórios para uma sub-bacia do Paracatu.

3.2.3 Avaliação baseada das metodologias de estimativa da CR

Na Figura 9 encontram-se os valores de E_1 para cada β considerando uma média de todos os T analisados. Foram incluídos apenas os resultados referentes às metodologias que fazem uso do T, devido à sua superioridade em relação às demais, e à RCReg, por ser a mais utilizada em trabalhos envolvendo dimensionamento de reservatórios.

Silva et al. (2008) afirmam que quando o valor de E_1 for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom, entre 0,36 e 0,75, desempenho aceitável e valores de E_1 inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja considerado como inaceitável.

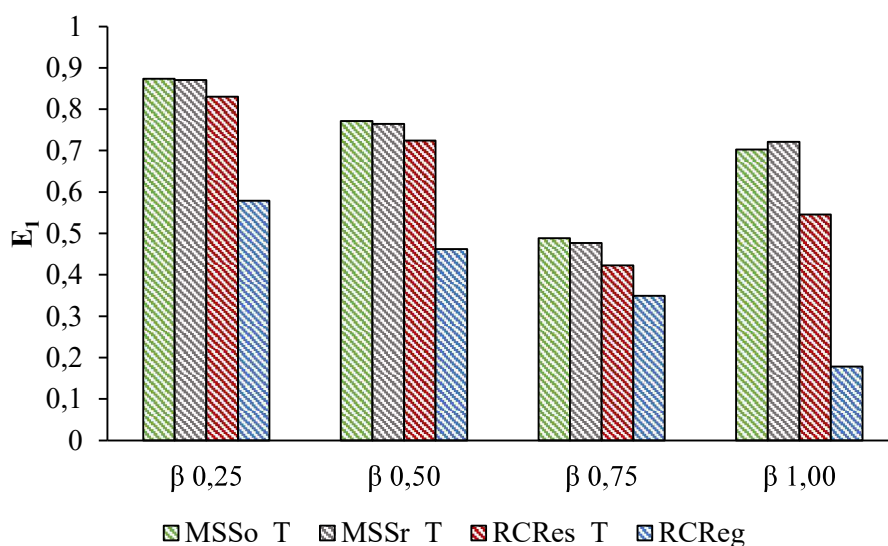


Figura 9. E_1 médio para cada valor de β .

O método RCReg, como esperado, apresentou os valores mais baixos de E_1 , sendo inaceitáveis para $\beta = 0,75$ e 1,00. Já para o método RCRes_T, os resultados foram aceitáveis para os β s iguais 0,5, 0,75 e 1,00 e bom apenas para $\beta = 0,25$. Além deste fato, neste método o coeficiente foi menor do que em MSSo_T e MSSr_T em todos os β . Nos métodos MSSo_T e MSSr_T, o E_1 foi maior que 0,75 para $\beta = 0,25$ e 0,5 e aceitável para maiores valores de β . Em $\beta = 0,75$ e 1, para os quais o regime é plurianual, notou-se uma tendência a piores ajustes das metodologias, com menores valores de E_1 , principalmente no $\beta = 0,75$.

Na Figura 10 são apresentados os valores do IQD para cada β a partir da média de todos os T analisados. Assim como para o E_1 , foram incluídos apenas os resultados referentes às metodologias que fazem uso do T e da RCReg.

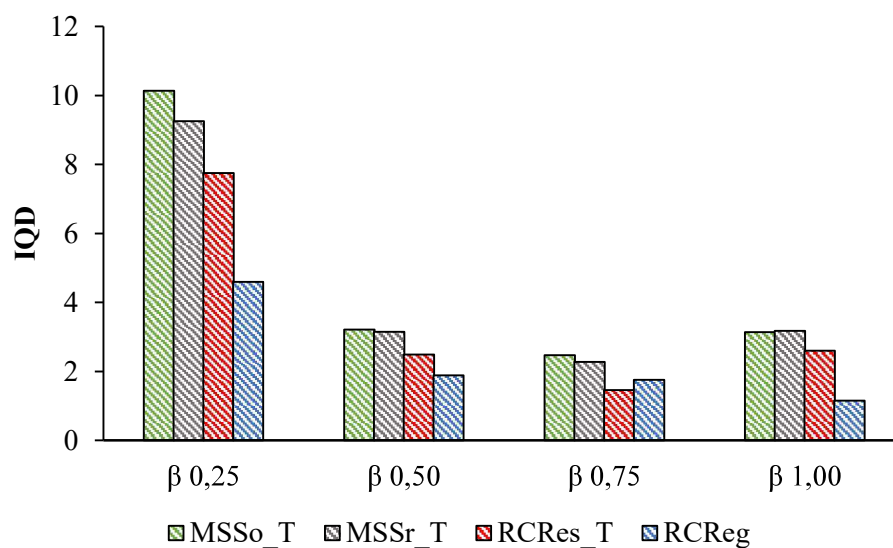


Figura 10. IQD médio para cada valor de β .

O IQD permite avaliar as metodologias de estimativa da CR, de modo que, quanto mais alto o valor de IQD, melhor o método. Esse índice preza mais pela segurança hídrica do que o E_1 , penalizando as subestimativas com um fator de ponderação que determina valores menores do índice (RODRIGUES, 2017).

Observa-se que a metodologia RCReg apresentou os menores valores de IQD em todos os β (Figura 10), exceto para 0,75, como também observado por Rodrigues (2017). A metodologia RCRes_T, assim como para o E_1 , manteve-se com valores menores que MSSo_T e MSSr_T, (Figura 10), as quais apresentaram valores próximos entre si, indicando inferioridade da RCRes_T em relação a essas na qualidade do dimensionamento dos reservatórios. No $\beta = 0,75$ esse método chega a exibir um valor ligeiramente inferior ao da RCReg.

Em geral, pelas análises dos índices estatísticos, destaca-se o desempenho das metodologias MSSo_T e MSSr_T, que apresentaram os maiores valores de IQD e E_1 , sendo desta forma justificáveis seus usos para qualquer valor de β . Tais resultados demonstram que os dados regionalizados são eficientes na geração de séries sintéticas e consequentemente no seu uso para dimensionar reservatórios de regularização de vazão, sem apresentar diferenças em relação ao uso dos valores da série original

O uso de métodos que agregam melhorias nas estimativas da CR é importante, visto que essas estruturas possibilitam o desenvolvimento social, econômico e ambiental das regiões. No entanto, apesar dos inúmeros benéficos, a construção de reservatórios gera impactos em uma

série de aspectos, que devem ser mensurados, analisados e discutidos, devendo-se verificar principalmente a finalidade para a qual será construído.

3.3 Estimativa da capacidade do reservatório considerando demanda variável

Na estimativa da CR considerando demanda variável, as metodologias utilizadas foram consideradas com e sem associação ao T. Para as estimativas da CR associada ao T, a análise das diferentes FDPs indicou para as combinações entre os cenários de utilização da vazão passível de regularização e o T, diferentes respostas ao ajuste de dados.

Todas as combinações estimaram a CR baseada em regra de operação anual sendo o melhor desempenho, devido ao menor intervalo de confiança, para a distribuição Pearson III, em 87% dos casos (Tabela 5). Desta forma, optou-se pelo uso da distribuição Pearson III.

Tabela 5. Frequência de ocorrência das FDPs considerando demanda variável.

Frequência de ocorrência das FDPs	
Pearson III	Log Normal III
116	16

3.3.1 Estimativa da capacidade do reservatório

Na Figura 11 são apresentadas as estimativas da CR com o uso dos métodos MSSo, MSSr, RCRes, MSSo_T, MSSr_T e RCRes_T para a estação 54710000, tida como representativa do comportamento das demais.

Dados da CR obtidos a partir da consideração da demanda variável ao longo do ano são necessários, pois informam o crescimento mensal, importante em regiões com variabilidade sazonal, como ocorre no semiárido brasileiro.

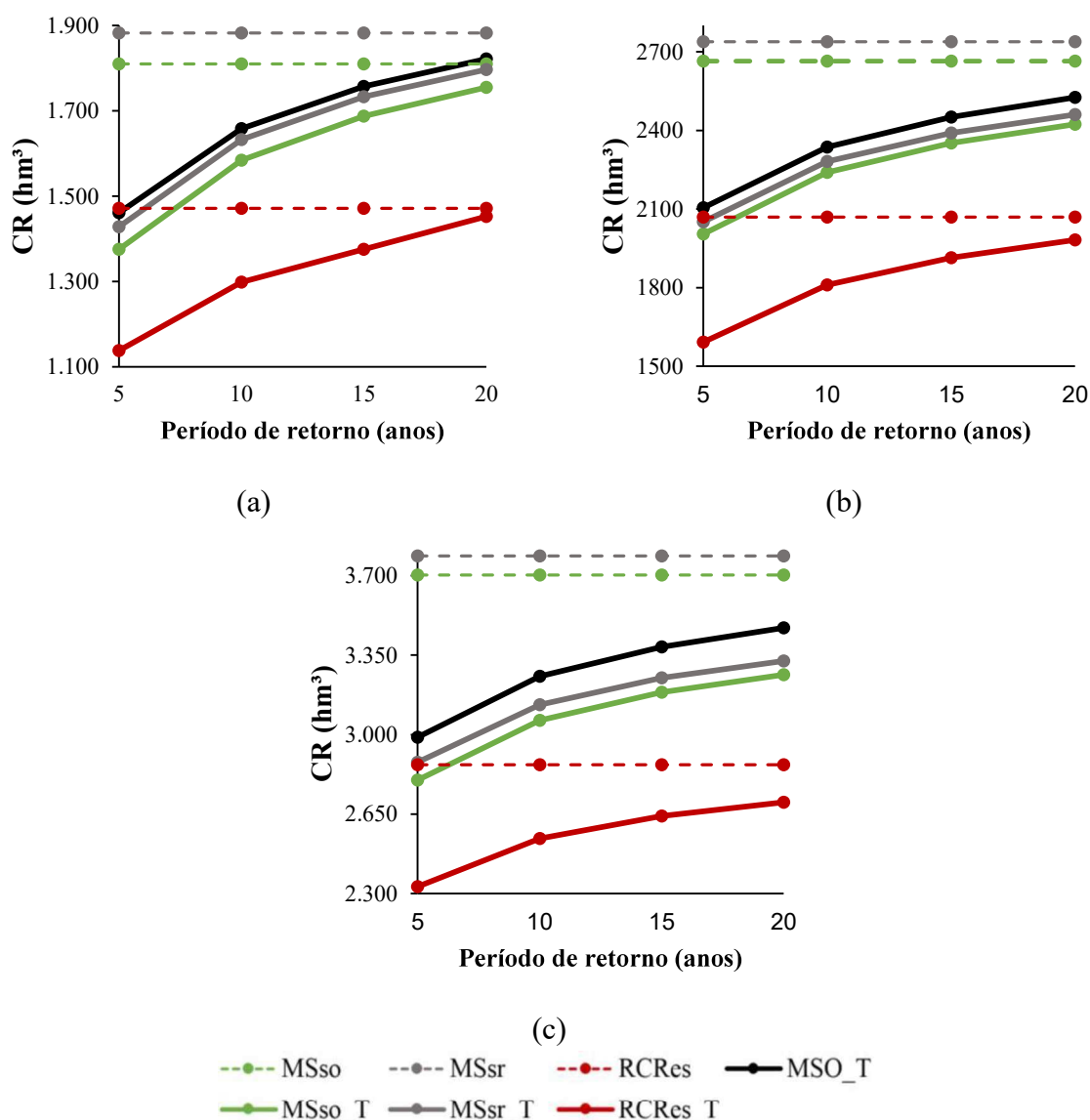


Figura 11. Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54710000 considerando demanda variável.

O comportamento exibido pelas CR estimadas foi semelhante nos três cenários avaliados. As metodologias RCRes e RCRes_T exibiram o pior desempenho em relação às estimativas da CR pelo MSO_T, com as maiores subestimativas (Figura 11) proporcionando menor segurança hídrica. Assim, a adoção de métodos que utilizam as séries sintéticas nas estimativas da CR já configura um ganho.

Analisando-se os métodos que utilizam as séries sintéticas, os valores estimados pelos métodos MSSo e MSSr, além de não acompanharem o crescimento da CR à medida que se

aumenta o T, tiveram as maiores superestimativas. Por conseguinte, os métodos MSSo_T e MSSr_T se sobressaem, devido a maior proximidade com a MSO_T para a estação 54710000, em todos os cenários. Com base nessas análises verificou-se que, o uso de metodologias que se associam a um T, apesar de apresentar um caráter de complexidade maior, é mais recomendado para demandas variáveis, em concordância com os resultados de Rodrigues (2017). De acordo com Naguettinni e Pinto (2007), o uso de um fator de frequência, possibilita relacionar a magnitude dos eventos com sua ocorrência, necessário em projetos de dimensionamento de reservatórios.

3.3.2 Avaliação da estimativa da capacidade do reservatório

Na Figura 12, são apresentados os ER médios (colunas) e ER máximos (pontos) resultantes das combinações dos diferentes cenários de utilização da vazão passível de regularização ((40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) e (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$)) e períodos de retorno (5,10,15 e 20 anos) pelas diferentes metodologias para cada estação fluviométrica, além do ER da RHH (linhas contínuas), que representa o erro relativo médio considerando as estimativas de todas as estações em estudo. Nas Figuras 12a e 12b, são apresentados os erros para as metodologias que não se associam a um T e para as que o consideram, respectivamente.

A metodologia RCRes apresentou as maiores discrepâncias em relação à MSO_T. O uso desse método proporcionou os mais acentuados erros percentuais médios de superestimativas e subestimativas da CR em seis e quatro estações, respectivamente, além dos maiores erros relativos para a RHH. As amplitudes máximas com o uso desse método chegaram a uma CR superestimada em 112% na estação 54390000.

Comparando-se os métodos MSSo e MSSr, superiores na representatividade da CR quando não há associação a um período de retorno, verifica-se um desempenho com diferenças mínimas entre eles. Além disso, o uso desses métodos proporciona em geral, maior ocorrência de CR superestimadas, associadas a uma maior segurança no dimensionamento

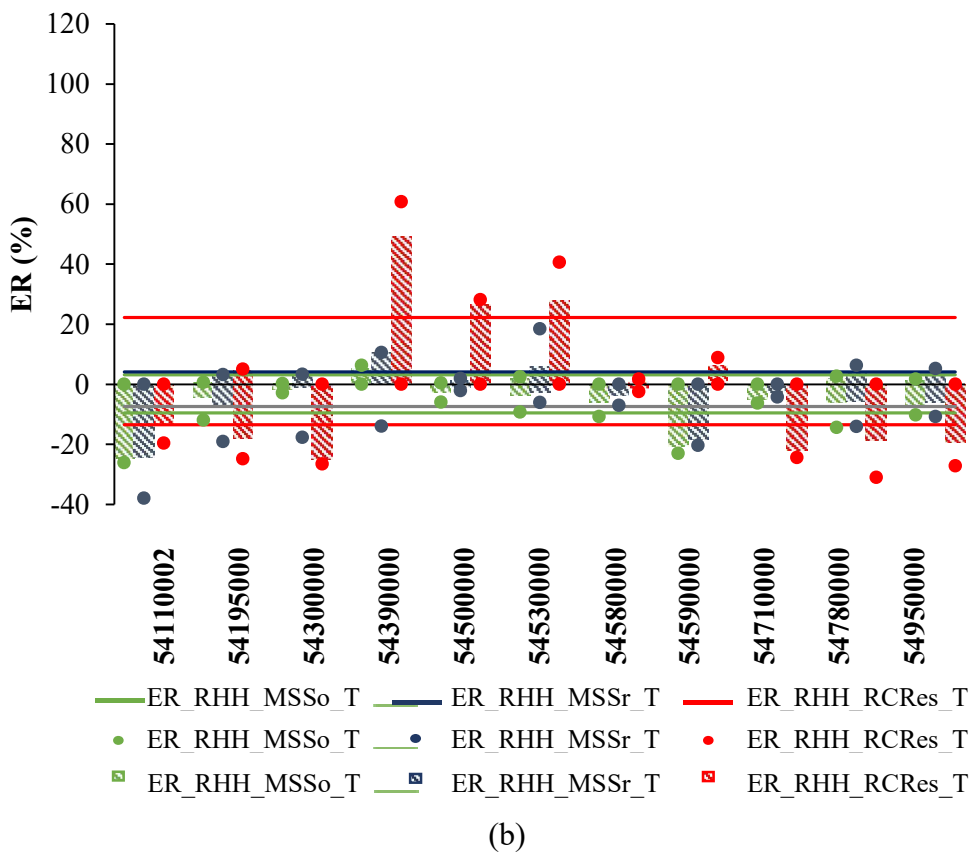
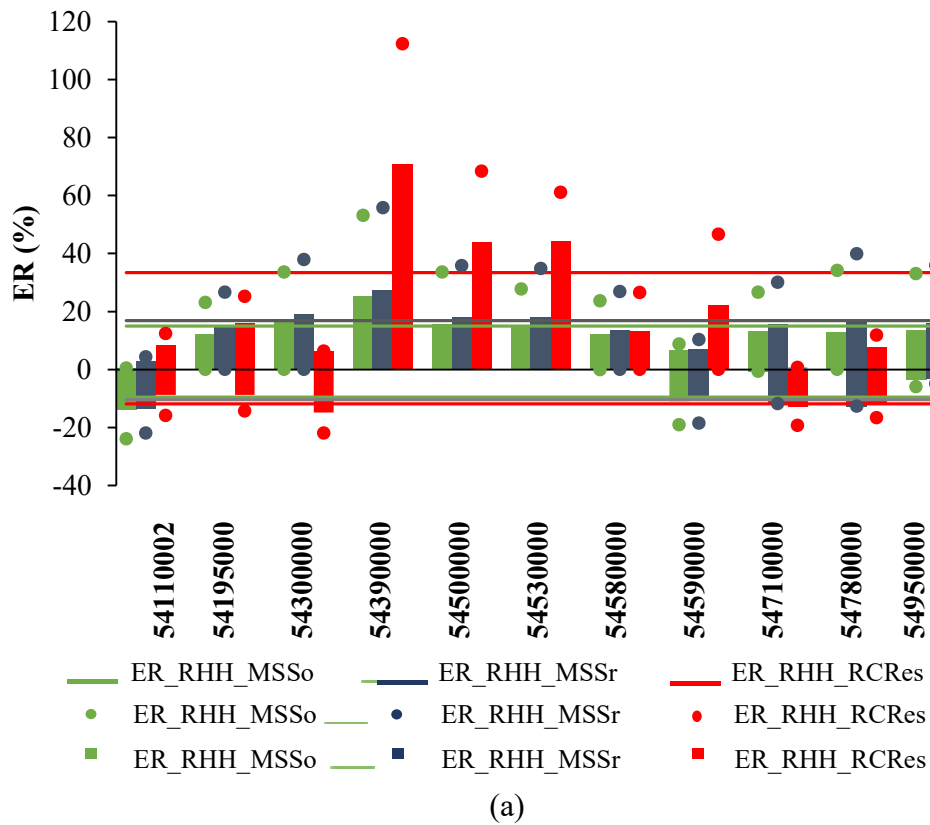


Figura 12. ER percentual médio e máximo e cada estação fluviométrica e ERmédio da RHH para as metodologias que (a) utilizam o T e (b) não utilizam o T considerando demanda variável.

Conforme os resultados exibidos para a estação 54710000 (Figura 11), a consideração do T, promoveu ganhos nas estimativas da CR. Dentre os métodos que se associaram a esse fator de frequência, o RCRes_T apresentou as maiores amplitudes nos erros médios em aproximadamente 70% das estações. Para esse método, em geral, os erros máximos foram mais acentuados tanto nas superestimativas quanto para as subestimativas, além disso, apresentou os maiores erros médios da RHH reforçando a sua inferioridade quando comparado à MSSo_T e MSSr_T.

As metodologias MSSo_T e MSSr_T apresentaram, em geral, valores de erros percentuais médios próximos, com amplitudes menores demonstrando menor risco de ineficiência do reservatório, indicadas assim como as mais adequadas.

Os resultados observados indicam que os métodos que não fazem associação ao fator de frequência apresentaram estimativas de CR mais distantes dos valores da série original, mostrando os piores desempenhos no dimensionamento dos reservatórios com demanda variável.

3.4 Avaliação baseada no índice de Nash-sutcliffe

Na Figura 13, são apresentados os valores de E_1 para cada cenário de demanda considerando uma média de todos os T analisados. Incluíram-se apenas os resultados referentes às metodologias que fazem uso do T, devido a sua superioridade em relação às demais.

A metodologia RCRes_T, foi inferior aos outros métodos nos três cenários. As metodologias MSSo_T e MSSr_T apresentaram os melhores desempenhos sem exibir uma tendência na capacidade preditiva de acordo com a diminuição ou aumento da disponibilidade hídrica.

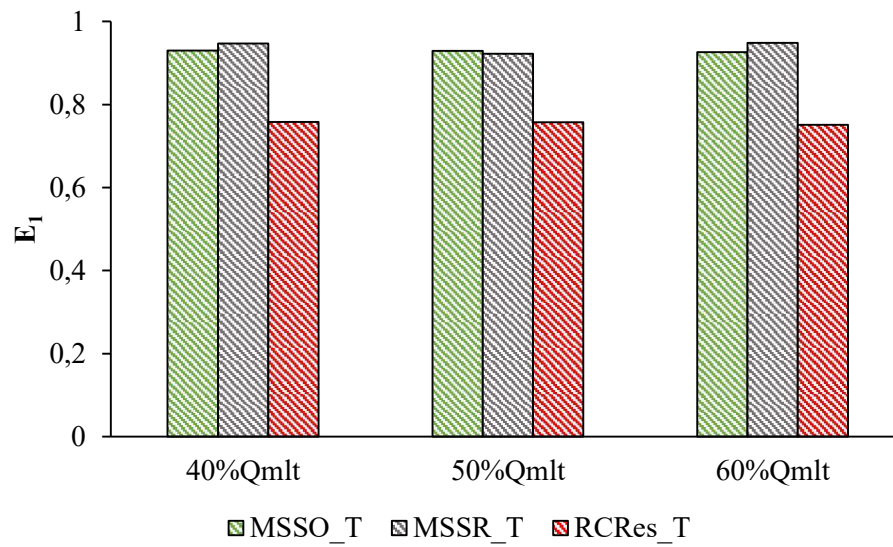


Figura 13. E_1 médio para cada cenário de demanda variável.

Em síntese, para os três cenários avaliados, em conformidade com as Figuras 11 e 12, as metodologias que fazem o uso das séries sintéticas e se associam a um T (MSSo_T e MSSr_T) obtiveram melhor desempenho nas estimativas da CR, com resultados semelhantes entre si. Desta forma, assim como em demandada fixas no tempo, o uso de dados regionalizados é representativo na geração de séries sintéticas e no seu uso no dimensionamento de reservatórios de modo equivalente ao uso dos dados originais da série histórica.

4 CONCLUSÃO

Um dos principais dilemas com vistas à construção de um reservatório trata-se do dimensionamento racional deste, assim, deve-se priorizar o uso de métodos que determinem o volume do reservatório e proporcione a melhor eficiência para satisfazer uma determinada demanda. Outro aspecto que gera dificuldades quanto a estimativa da capacidade dos reservatórios está associado à incerteza das estimativas de vazão, pela habitual insuficiência de dados e os métodos disponíveis para contornar o problema, que muitas vezes são inadequados. Nesse contexto, a utilização de séries sintéticas de vazão é uma ferramenta importante no dimensionamento de reservatórios. No presente estudo, os métodos que fazem uso das séries sintéticas quando associados a um período de retorno, apresentaram o melhor desempenho com menores impactos no dimensionamento de reservatórios para as demandas fixa e variável no tempo considerando uma região semiárida, representando uma ferramenta importante na estimativa da capacidade do reservatório em locais onde os dados fluviométricos são ausentes ou insuficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15527: **Água de chuva: Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis**. Rio de Janeiro, p.12, 2007.

ALE, S.; BOWLING, L.C.; OWENS, P.R.; BROUDER, S.M.; FRANKENBERGER, J.R. Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 23-33, 2012.

ALLEN, R. G. **Ref-ET- Reference evapotranspiration calculator, 3.1.15**. Idaho: University of Idaho Research and Extension Center Kimberly, 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO: Irrigation and Drainage - 56, 1998.

BARBOSA, A. R. Regularização de vazão. **Notas de aula da disciplina Hidrologia Aplicada**. Universidade Federal de Ouro Preto, 9p., 2011.

BIEMANS, H.; VAN S, H.; KABAT, P. Water and Climate Risks: A Plea for Climate Proofing of Water Development Strategies and Measures. **Co-operative Programme on Water and Climate Wageningen**, 38 p. Netherlands, 2006.

CLARKE, D. **CropWat for Windows: user guide**. Versão 4.3. FAO, NWRC, IIDS, University of Southampton, Southampton, UK. 1998

GONÇALVES, R. do N. **Diagnóstico ambiental da bacia do Rio Jequitinhonha – diretrizes gerais para a ordenação territorial**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Salvador, 1997. 64 p

GPRH – IGAM. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do Processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. (1ª ed). Belo Horizonte, 2012.

HAUSCHILD, M.; DÖLL, P. Water use in semi-arid Northeastern Brazil– Modeling and scenario analysis. **Kassel world water series**, 3, 2000.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1179>>. Acesso em: 20/09/2017.

IBIO - INSTITUTO BIOATLÂNTICA / FUNARBE – FUNDAÇÃO DE APOIO A UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Relatório técnico: Estudos de aprimoramento dos mecanismos de cobrança da bacia hidrográfica do Rio Doce**, Viçosa, 2013. Disponível em:<http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/RP1_-_V6-01-4-2013.pdf> Acesso em: 24 out 2017.

KITE, G. W. Frequency and Risk Analyses in Hydrology. **Water Resources Publications**, Littleton, Colorado, 257 p. 1988.

- KURIA, F.; VOGEL, R. Uncertainty analysis for water supply reservoir yields, **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 257-264, 2015.
- LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of " goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n.1, p. 233-241, 1999.
- MAHMOUD, W.H., ELAGIB, N.A., GAESE, H., HEINRICH, J. Rainfall conditions and rainwater harvesting potential in the urban area of Khartoum. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 91, p. 89-99, 2014.
- MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. I. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v.160, p. 21-130, 2018.
- MULLER, M. F; THOMPSON, S. E. Comparing statistical and process-based flow duration curve models in ungauged basins and changing rain regimes, **Hidrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 669-683, 2016.
- NAGHETTINI, M., PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM. 561 p, 2007.
- NUNES, A. DE A.; PRUSKI, F. F. Improving the determination of reservoir capacities for drought control. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 29, n. 1, p. 183-191, 2015.
- RODRIGUES, N. C. **Dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização de vazões utilizando séries sintéticas**. 2017. 73f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.
- TAGHI, S.M.; HALIT, A.; FAZLI, O. Operation analysis of Eleviyan irrigation reservoir dam by optimization and stochastic simulation. **Stoch Environ Res Risk Assess**, v.23, p.1187–1201, 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Editora da Universidade/UFRGS, 256p. 2002.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. 943 p.
- XU, B.; BOYCE, S. E.; ZHANG, Y.; LIU, Q. Stochastic programming with a joint chance constraint model for reservoir refill operation considering flood risk. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 1, p. 04016067, 2017.

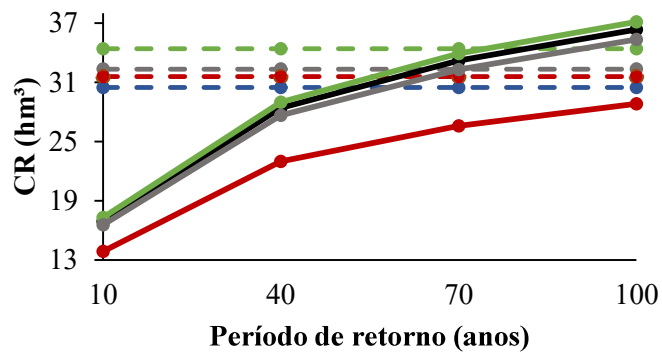
WANG, X.; HUANG, G.; LIN, Q.; NIE, X.; CHENG, G.; FAN, Y.; LI, Z.; YAO, Y.; SUO, M. A stepwise cluster analysis approach for downscaled climate projection – A Canadian case study. **Environmental Modelling & Software**. v. 49, p. 141–151, 2013.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2018: soluções baseadas na natureza para a gestão da água**. Paris, UNESCO, 2018.

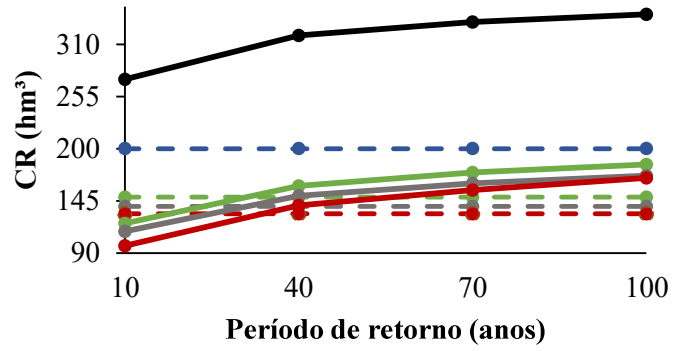
ZHANG, H. G. et al. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 911-918, 2007.

APÊNDICES

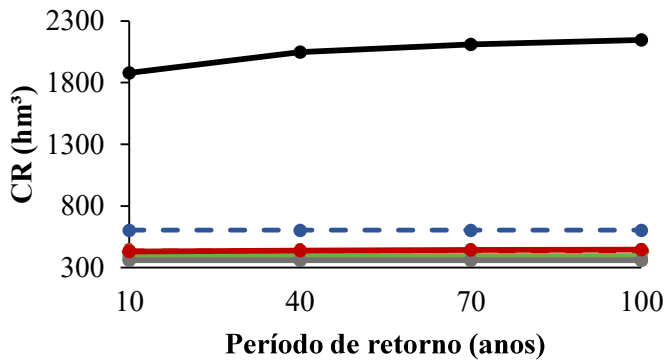
APÊNDICE A



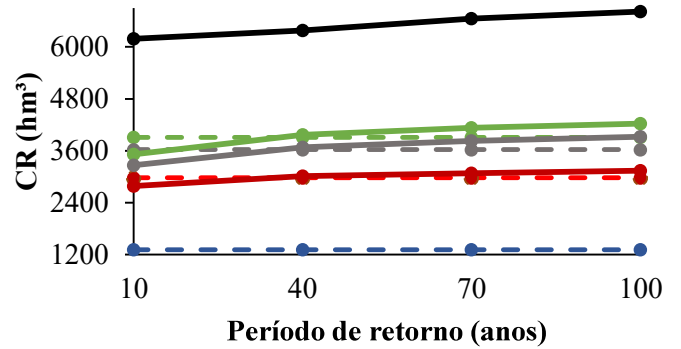
(a)



(b)



(c)



(d)

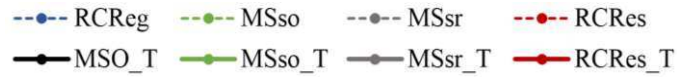


Figura 1A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 54110002 com demanda fixa.

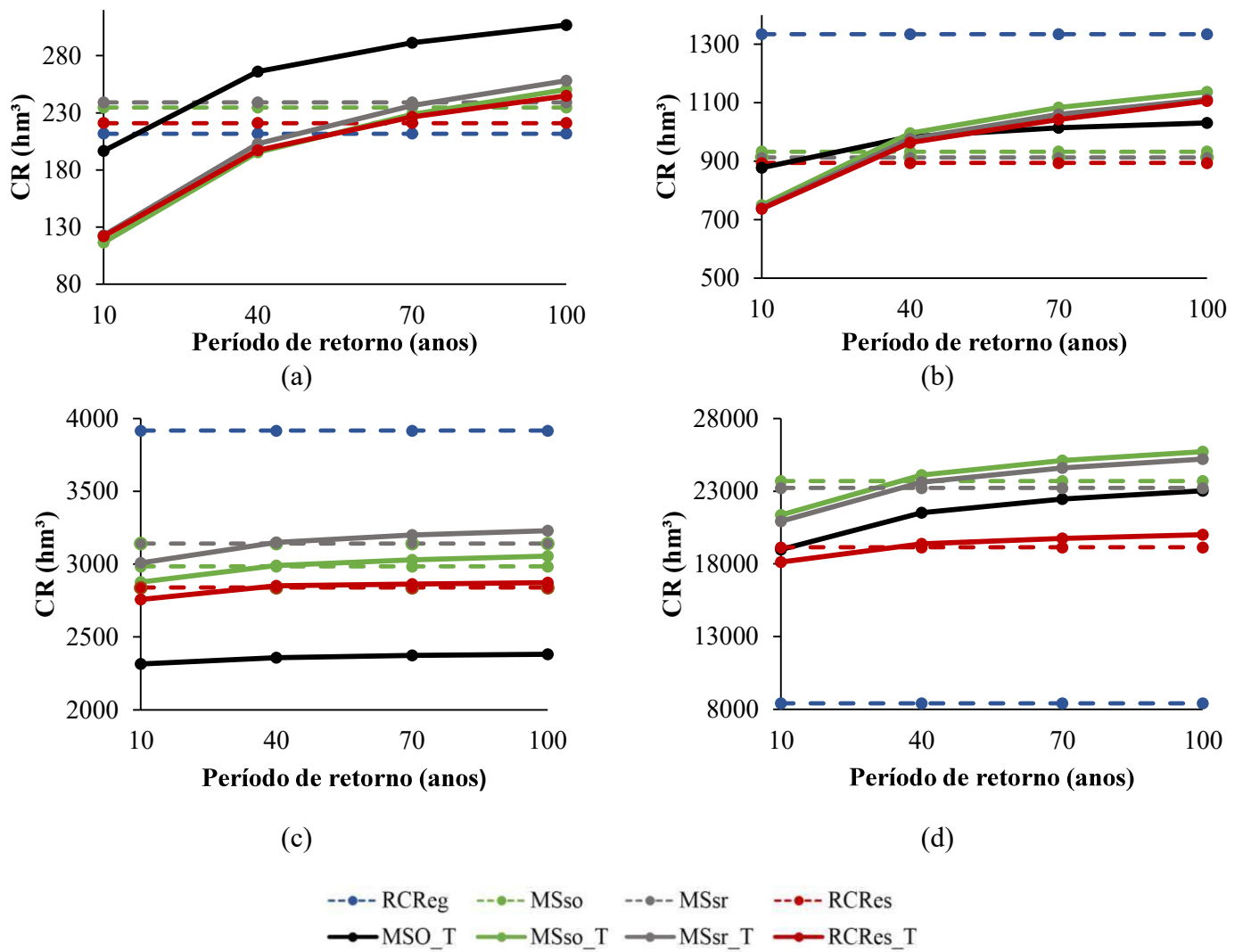


Figura 2A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 54195000 com demanda fixa.

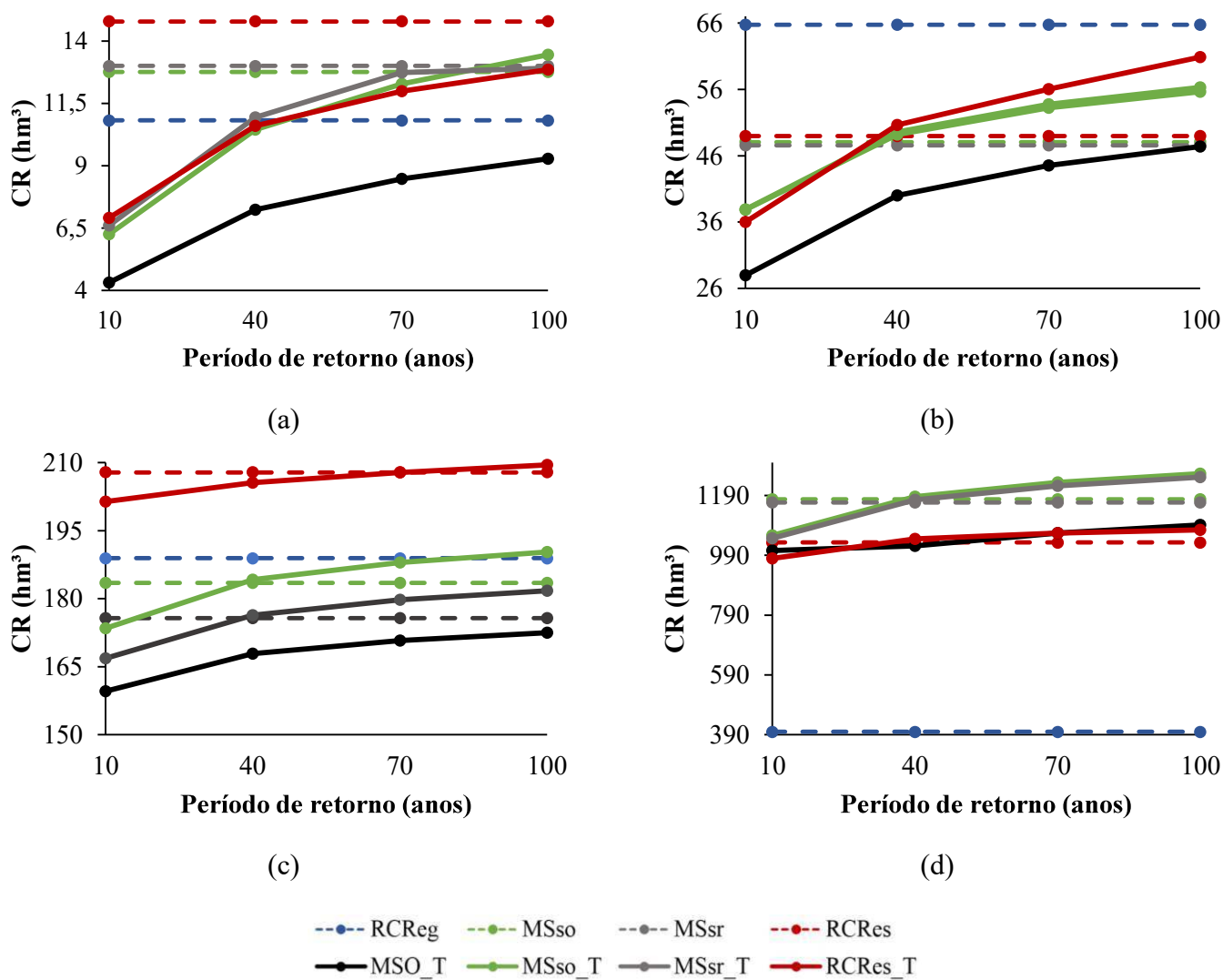
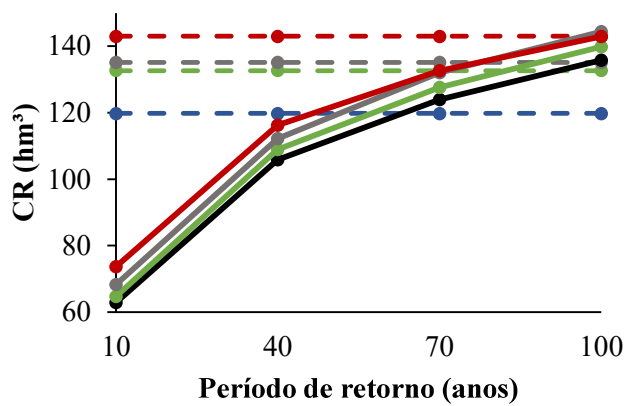
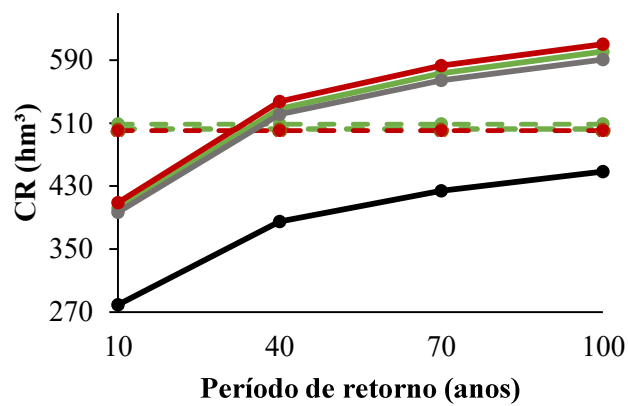


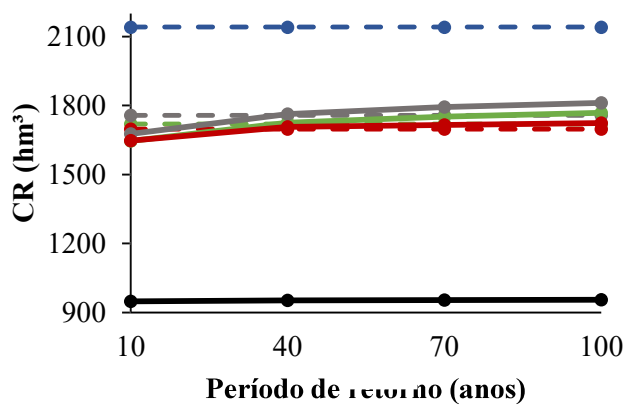
Figura 3A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5430000 com demanda fixa.



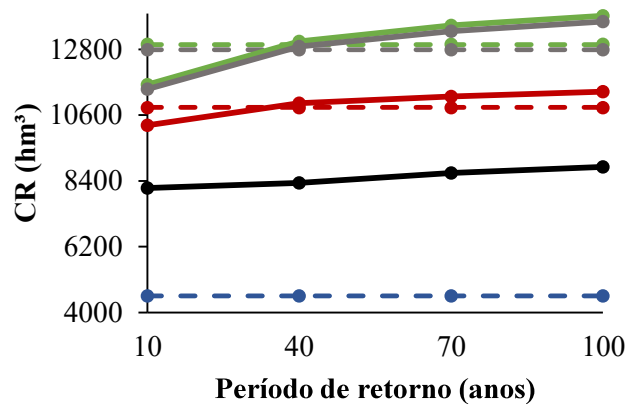
(a)



(b)



(c)



(d)

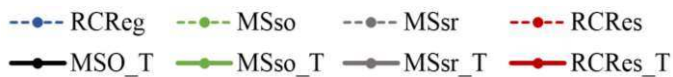
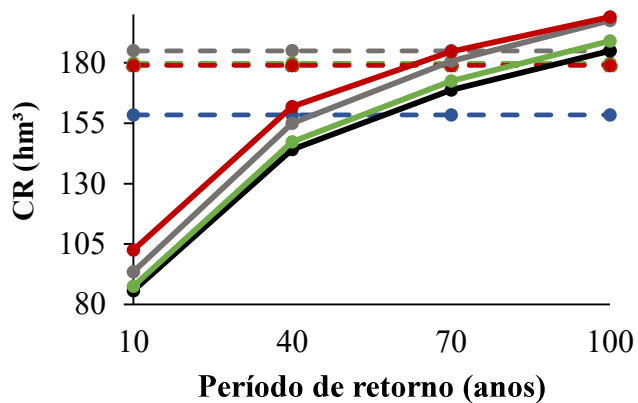
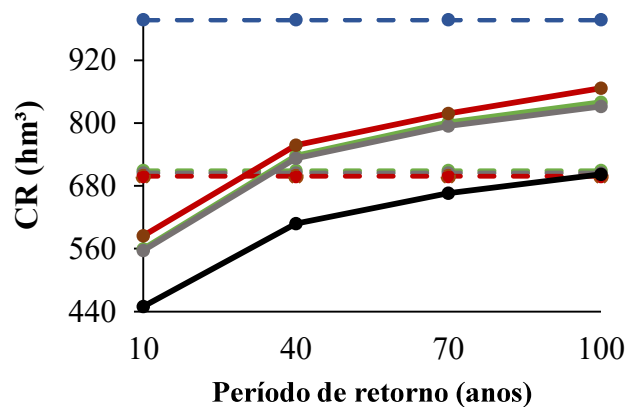


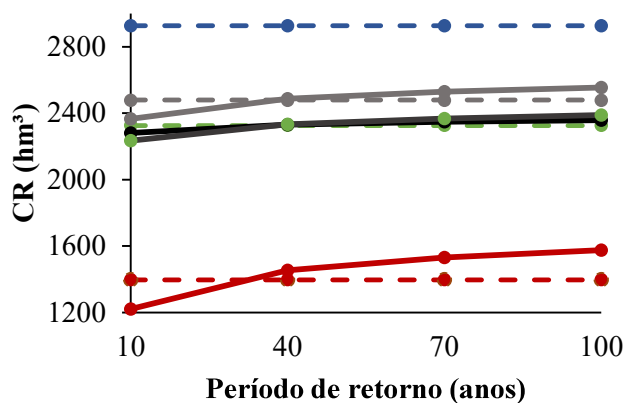
Figura 4A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5439000 com demanda fixa.



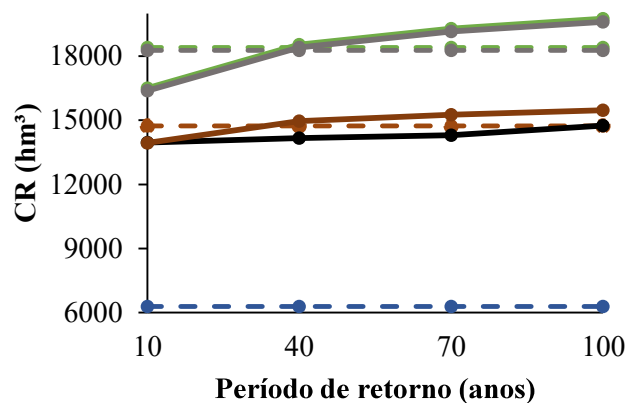
(a)



(b)



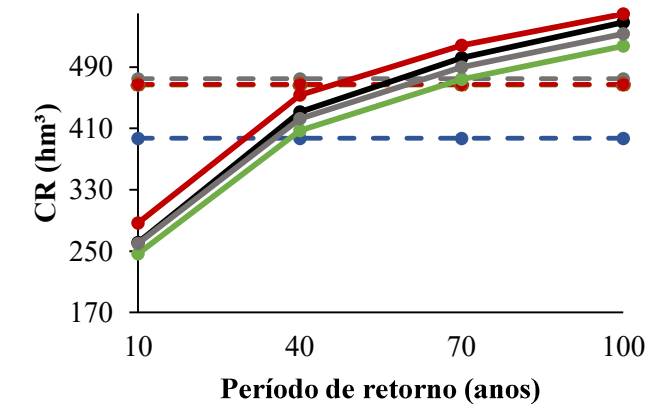
(c)



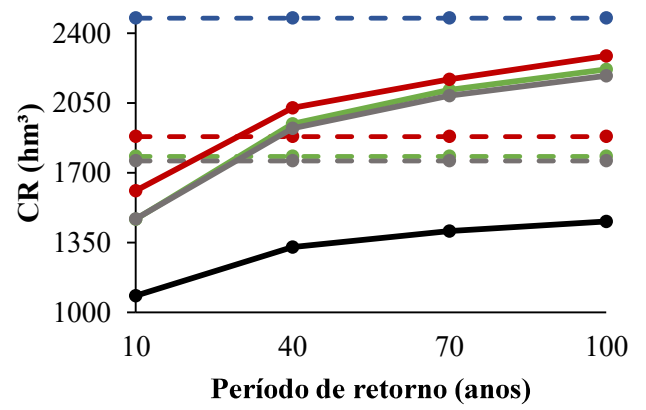
(d)

---●--- RCRReg -.-.- MSso -.-.- MSsr -.-.- RCRRes
 —●— MSO_T —●— MSso_T —●— MSsr_T —●— RCRRes_T

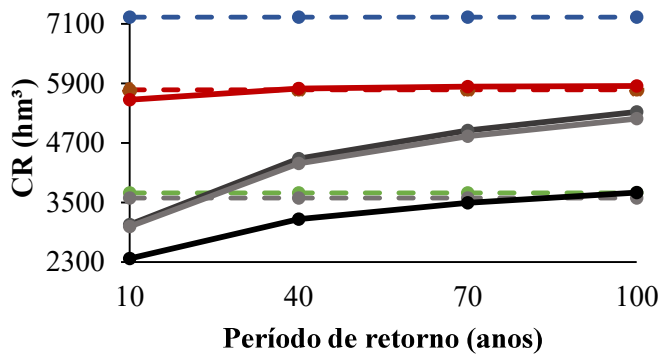
Figura 5A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5450000 com demanda fixa.



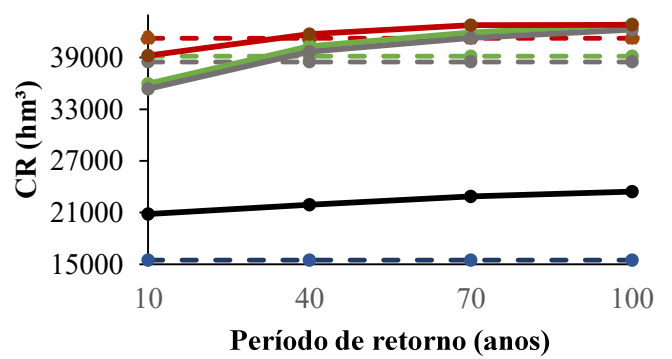
(a)



(b)



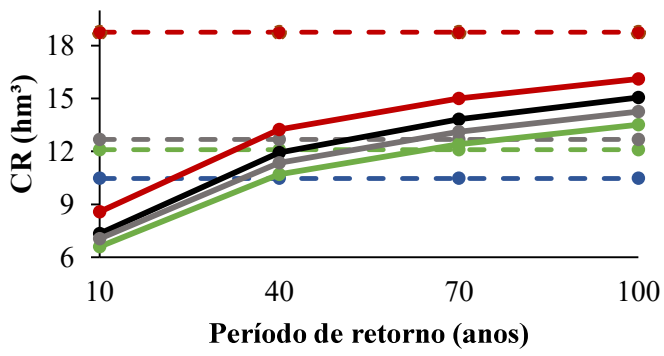
(c)



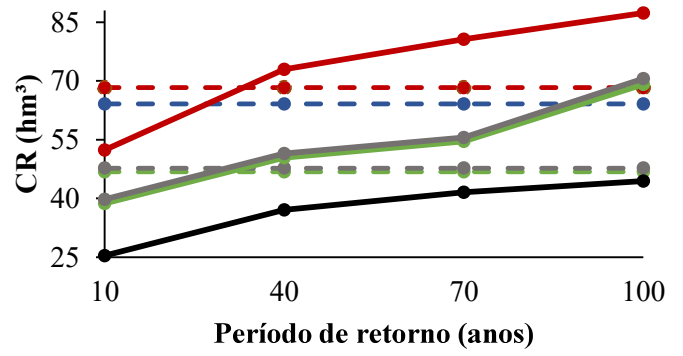
(d)

- - - RCRReg - - - MSso - - - MSsr - - - RCRRes
 - - - MSO_T - - - MSso_T - - - MSsr_T - - - RCRRes_T

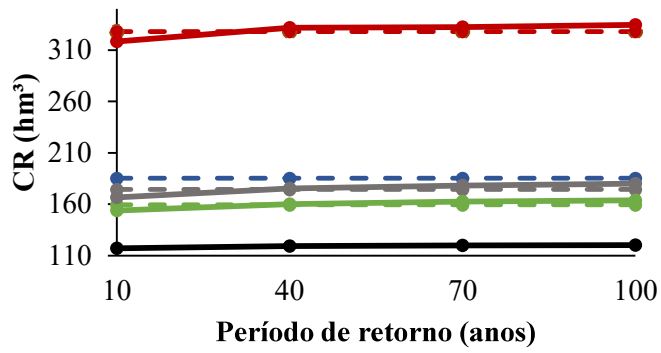
Figura 6A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5453000 com demanda fixa.



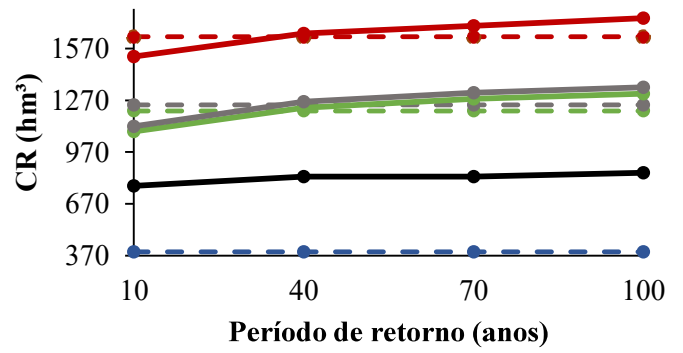
(a)



(b)



(c)



(d)

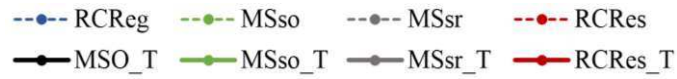
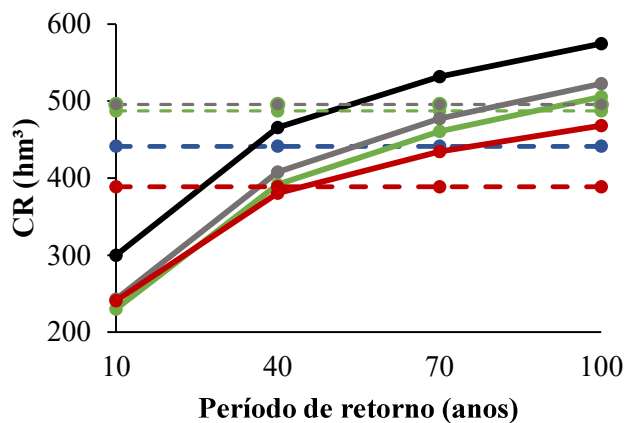
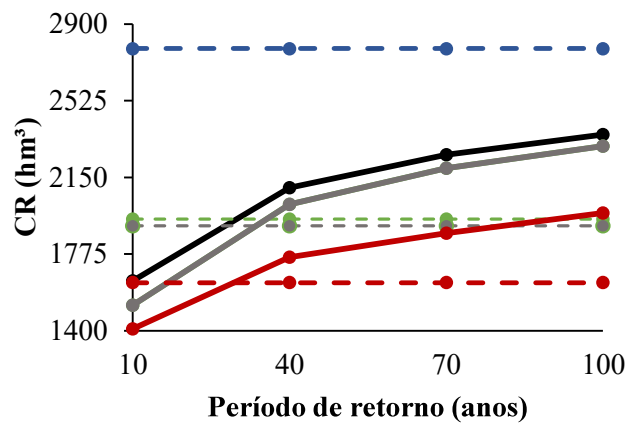


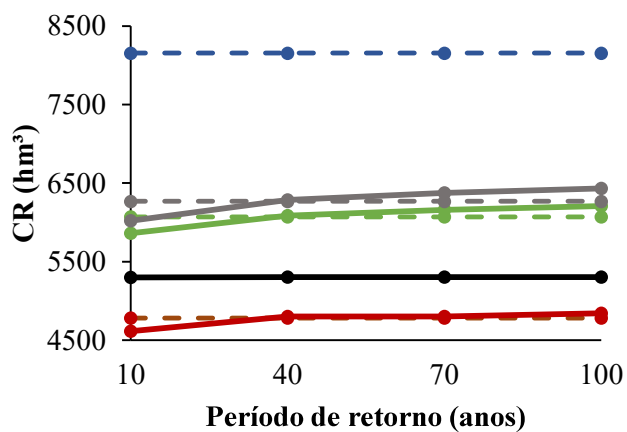
Figura 7A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5459000 com demanda fixa.



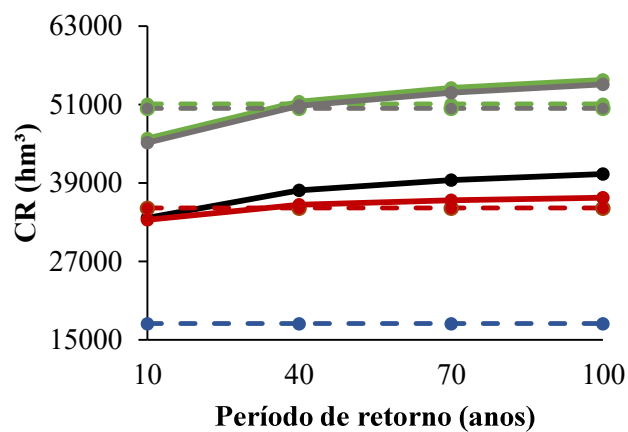
(a)



(b)



(c)



(d)

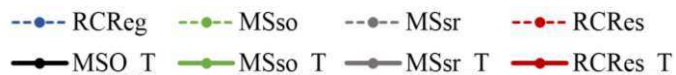
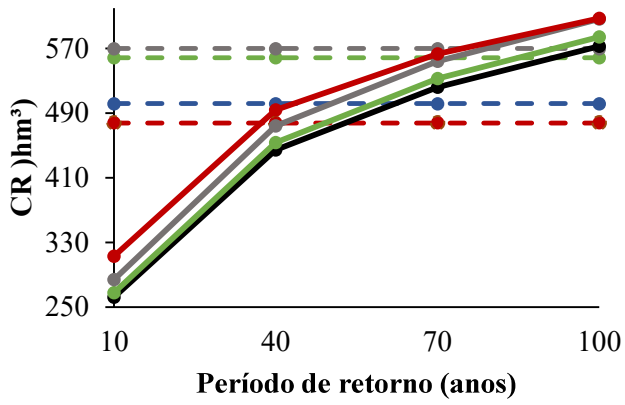
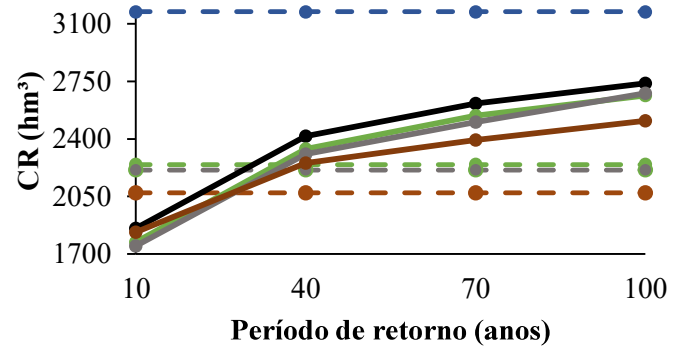


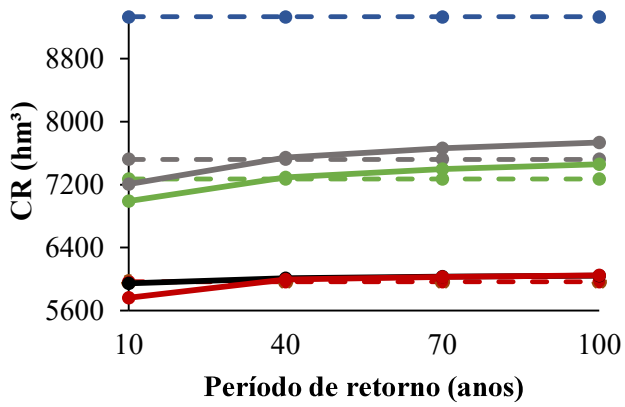
Figura 8A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5471000 com demanda fixa.



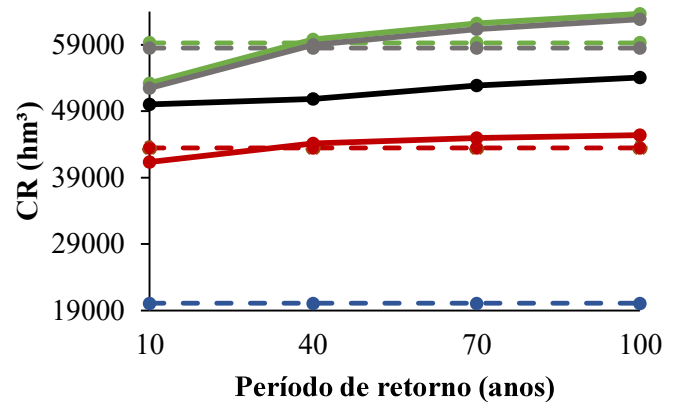
(a)



(b)



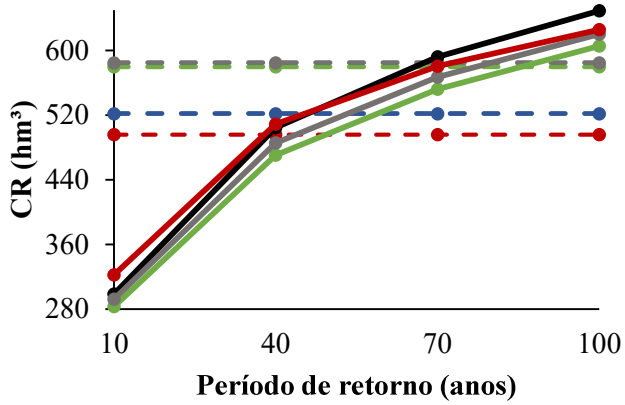
(c)



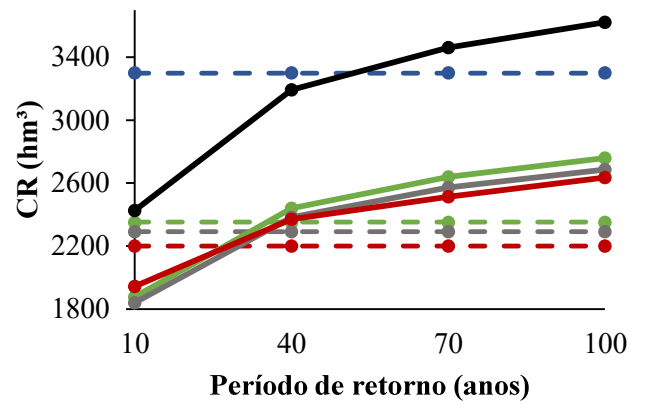
(d)

---●--- RCRReg - - - MSso - - - MSsr - - - RCRRes
 —●— MSO_T —●— MSso_T —●— MSsr_T —●— RCRRes_T

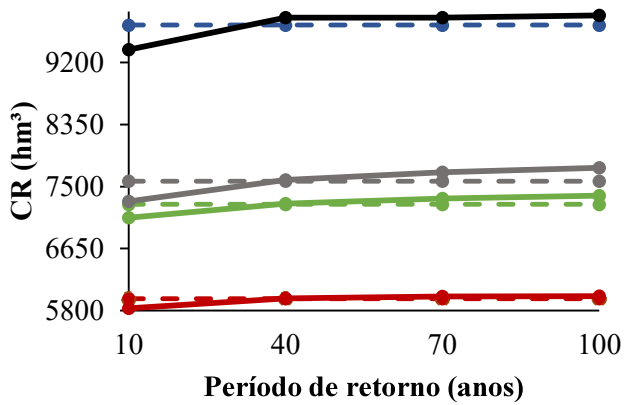
Figura 9A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5478000 com demanda fixa.



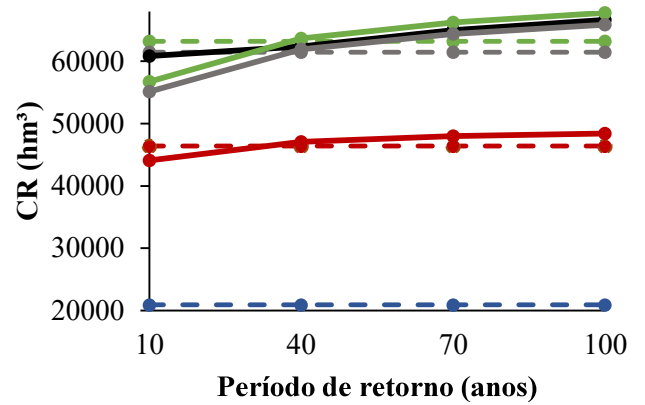
(a)



(b)



(c)



(d)

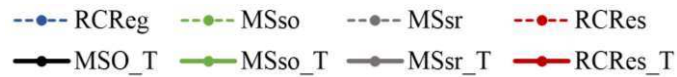


Figura 10A - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com β de 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) na estação 5495000 com demanda fixa.

APÊNDICE B

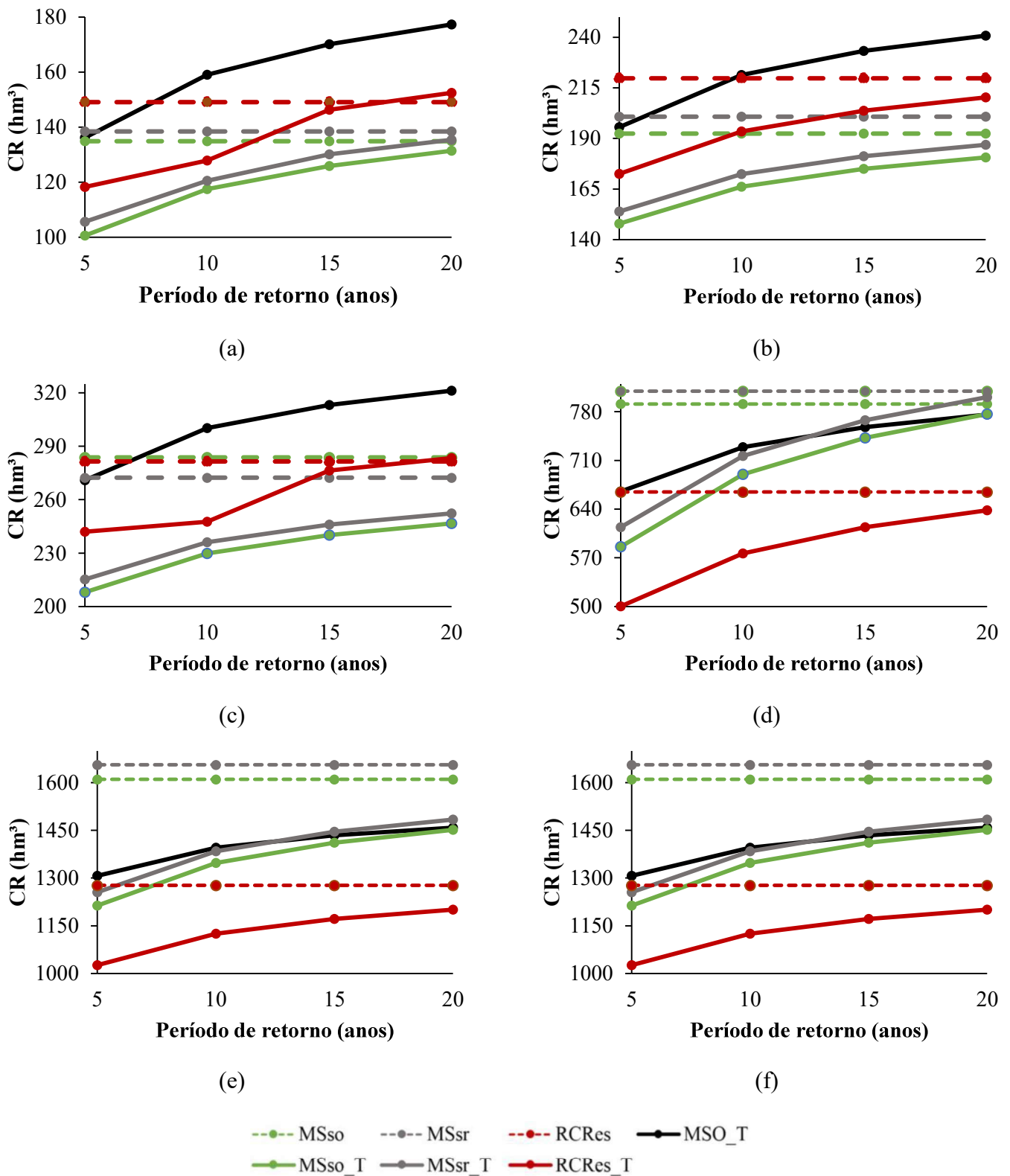


Figura 1B - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54110002 e 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (d), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (e), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (f) para a estação 54195000 considerando demanda variável.

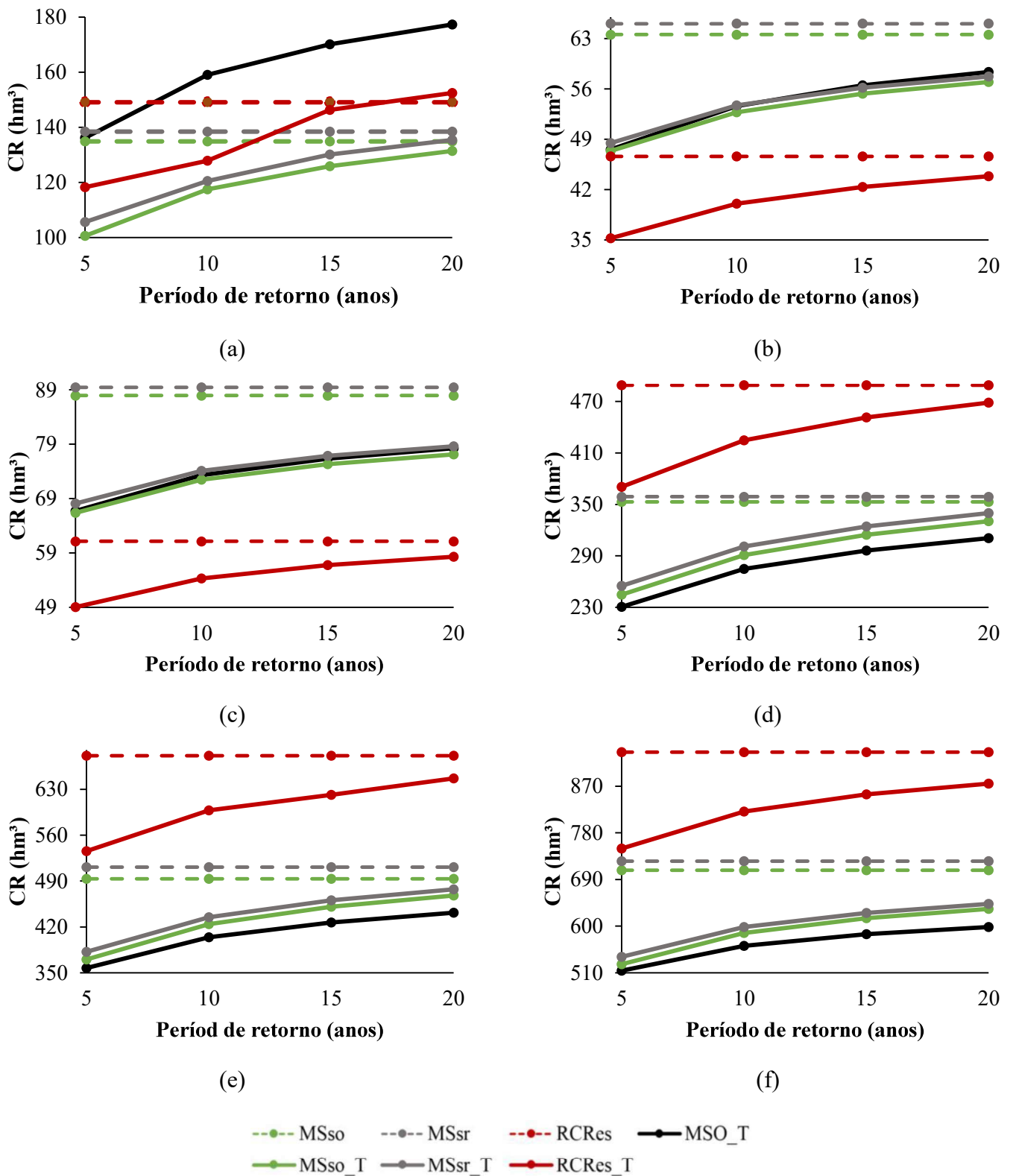


Figura 2B - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54300000 e 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (d), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (e), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (f) para a estação 54390000 considerando demanda variável.

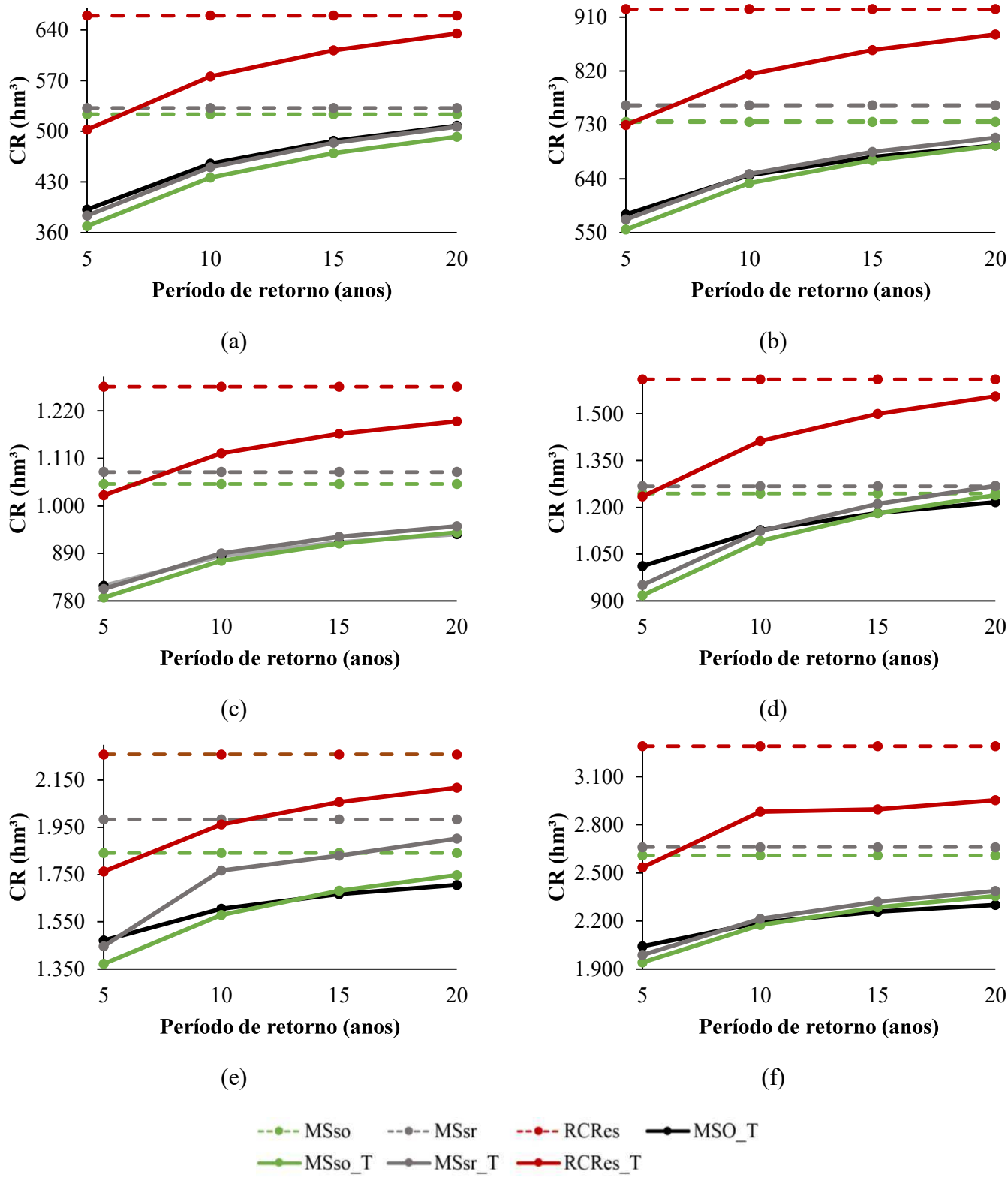


Figura 3B - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54500000 e 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (d), (50% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (e), (60% Q_{mlt} – 50% $Q_{7,10}$) (f) para a estação 54530000 considerando demanda variável.

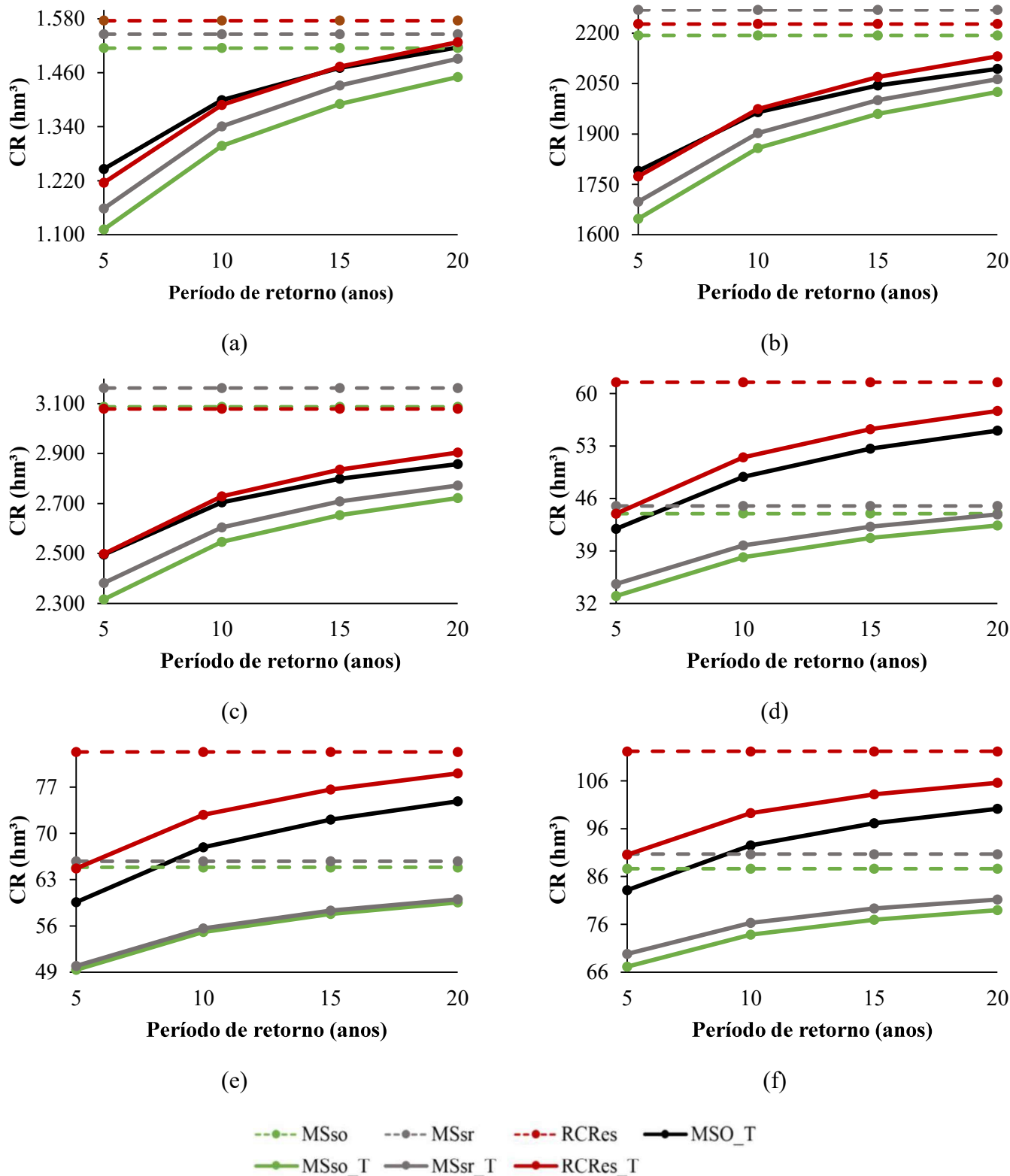


Figura 4B - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54580000 e 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (d), (50% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (e), (60% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (f) para a estação 54590000 considerando demanda variável.

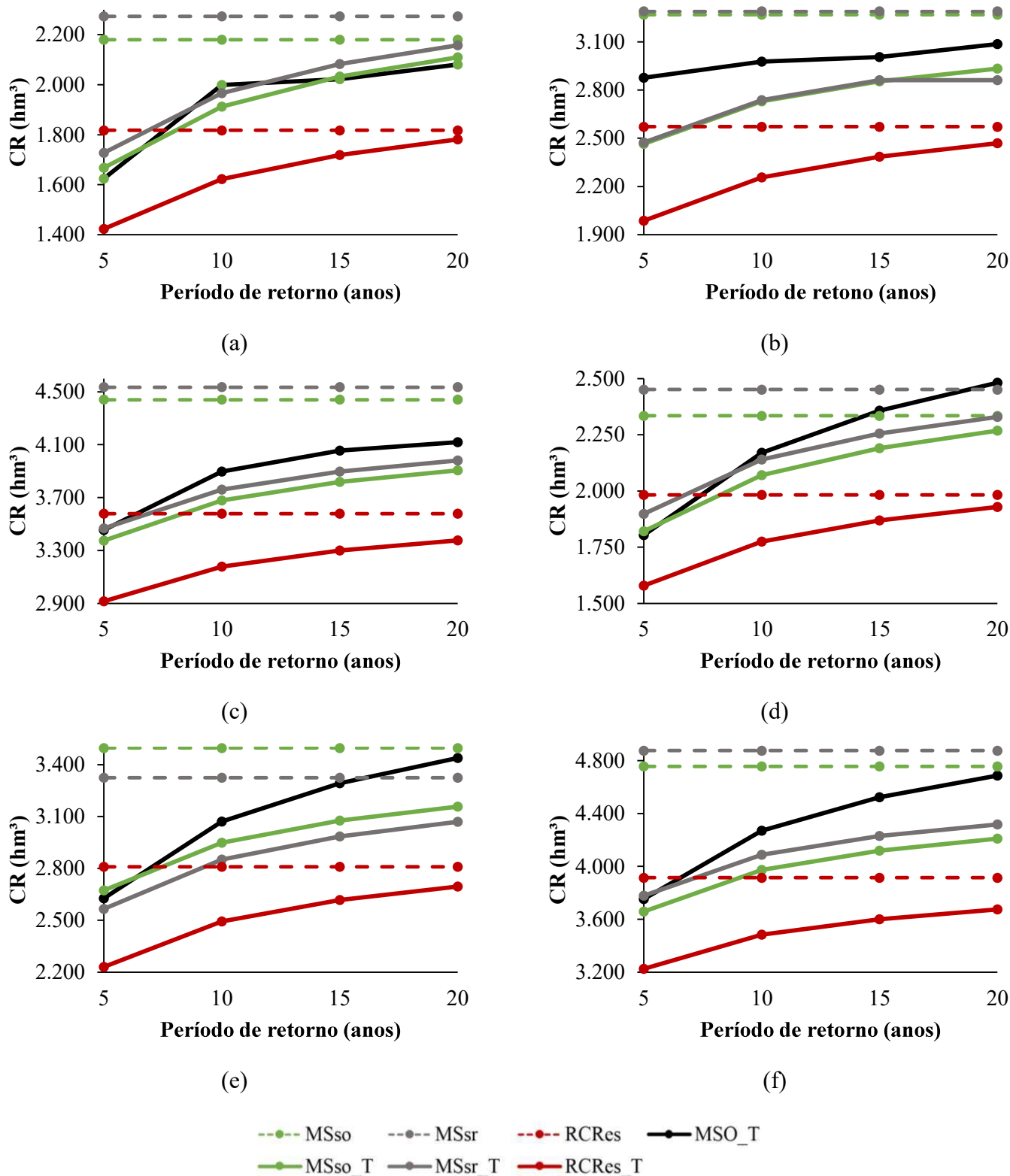


Figura 5B - Capacidades do reservatório em diferentes períodos de retorno com 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (a), (50% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (b), (60% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (c) para a estação 54710000 e 3 cenários de utilização da vazão passível de regularização (40% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (d), (50% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (e), (60% Q_{mlt} - 50% $Q_{7,10}$) (f) para a estação 54950000 considerando demanda variável.