



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

PEDRO GUSTAVO CÂMARA DA SILVA

**COMPORTAMENTO DA RELAÇÃO EVAPORAÇÃO-VERTIMENTO-
LIBERAÇÃO DE ÁGUA PELOS RESERVATÓRIOS SOB DIFERENTES
REGRAS DE OPERAÇÃO**

Natal/RN
2019

PEDRO GUSTAVO CÂMARA DA SILVA

**COMPORTAMENTO DA RELAÇÃO EVAPORAÇÃO-VERTIMENTO-
LIBERAÇÃO DE ÁGUA PELOS RESERVATÓRIOS SOB DIFERENTES
REGRAS DE OPERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Adelená Gonçalves Maia

Coorientador(a): Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva

Natal/RN
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Pedro Gustavo Camara.

Comportamento da relação evaporação-vertimento-liberação de água pelos reservatórios sob diferentes regras de operação / Pedro Gustavo Camara da Silva. - 2019.
44f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, 2019.

Orientador: Dr.^a Adelená Gonçalves Maia.

Coorientador: Dr. Jonathan Mota da Silva.

1. Reservatórios superficiais - Dissertação. 2. Diagrama Triangular - Dissertação. 3. Relação EVL - Dissertação. 4. Regras de operação - Dissertação. I. Maia, Dr.^a Adelená Gonçalves. II. Silva, Dr. Jonathan Mota da. III. Título.

RN/UF/BCZM

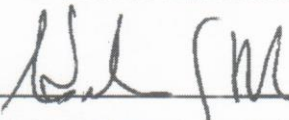
CDU 628

Pedro Gustavo Câmara da Silva

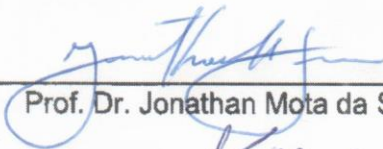
**COMPORTAMENTO DA RELAÇÃO EVAPORAÇÃO-VERTIMENTO-
LIBERAÇÃO DE ÁGUA PELOS RESERVATÓRIOS SOB DIFERENTES
REGRAS DE OPERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

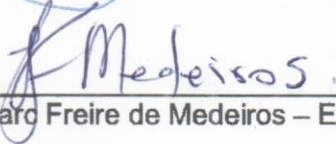
BANCA EXAMINADORA



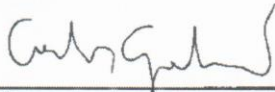
Prof.ª Dr.ª Adelena Gonçalves Maia – Orientador(a) (UFRN)



Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva – Coorientador(a) (UFRN)



Prof.ª Dr.ª Joana Darc Freire de Medeiros – Examinadora Interna (UFRN)



Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão – Examinador Externo (UFCG)

Natal, 26 de abril de 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter concedido a possibilidade de concluir a pesquisa aqui apresentada.

Agradeço à minha família por sempre dar suporte às minhas conquistas. Principalmente meus pais, que estiveram presentes em todos os momentos e contribuíram sem medir esforços para que eu pudesse alcançar meus sonhos.

À professora Dr.^a Adelena Gonçalves Maia, que me orientou desde o início do curso de mestrado e foi uma das principais responsáveis pela elaboração da minha dissertação e quem eu admiro e me inspiro pela cientista, professora e pessoa.

Ao professor Dr. Jonathan Mota da Silva, que me coorientou e apresentou contribuições significativas a elaboração do trabalho, sempre presente e disposto a ajudar.

Agradeço a Arthur de Souza Antunes Suassuna, que contribuiu, enquanto aluno de Iniciação Científica, para a elaboração do algoritmo computacional utilizado nesse trabalho.

À Agência Nacional de Águas (ANA) que forneceu dados técnicos que viabilizaram o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à minha chefe, Vanessa Becker, que me concedeu a oportunidade de cursar o mestrado e conciliar com as atividades no setor em que trabalho. Sou grato pelos incentivos e inspiração como cientista.

A toda à equipe do PPgESA, em especial Aline, Nilton, Sandro e Célia. Além de colegas de trabalho, vocês se tornaram amigos especiais para mim. Obrigado por me escutarem em momentos de desabafo e alegria durante esse período.

Aos meus amigos, em especial Amanda e Romerito que desde a graduação estiveram sempre ao meu lado em horas de descontração e dificuldades. Sou muito grato por ter encontrado vocês nessa caminhada acadêmica e tenho orgulho dos profissionais e pessoas que vocês são.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, no desenvolvimento dessa pesquisa. Meu muito obrigado!

COMPORTAMENTO DA RELAÇÃO EVAPORAÇÃO-VERTIMENTO-LIBERAÇÃO DE ÁGUA PELOS RESERVATÓRIOS SOB DIFERENTES REGRAS DE OPERAÇÃO

RESUMO

Regiões semiáridas mostram-se críticas para abastecimento de água em razão do déficit no balanço hídrico, acarretado por taxas de evaporação elevadas e precipitação irregular, que impactam negativamente a eficiência de reservatórios superficiais. No processo de regularização de um reservatório três fluxos hidrológicos são fundamentais para entendimento da dinâmica de entradas e saídas de água: vazão evaporada (E), vazão vertida (V) e vazão liberada (L) para atendimento das demandas. Nessas regiões, as perdas por E e V são, por vezes, de grande magnitude, impactando a terceira parcela (L). O estudo da relação EVL junto aos parâmetros físicos associados ao processo de regularização de reservatórios pode conduzir a minimização dessas perdas e potencializar o suprimento das demandas associadas, em períodos de maior afluência, por exemplo. Assim, o presente trabalho realizou o estudo da relação EVL e da eficiência de operação de 50 (cinquenta) reservatórios distribuídos nos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, a partir da simulação de 5 (cinco) diferentes rotinas operacionais, aliado à análise de variáveis características dos reservatórios. Como principal resultado, o estudo mostrou que restrições maiores do uso de água podem aumentar as perdas por evaporação e, eventualmente, por vertimento. Nesse sentido, o racionamento de água no reservatório diminui a eficiência final no atendimento da demanda, visto que foram observadas perdas de eficiência à medida que as restrições de uso foram incrementadas. Em média, os reservatórios ficaram abaixo da eficiência de 90% para atendimento das demandas, para todo o período de operação.

Palavras-chave: Reservatórios superficiais. Diagrama Triangular. Relação EVL. Regras de operação.

BEHAVIOR OF EVAPORATION-SPILL-YIELD RELATION IN RESERVOIRS UNDER DIFFERENT OPERATIONAL RULES

ABSTRACT

Semi-arid regions are critic for water supply due to the deficit in water balance, generated by high evaporation rates and insufficient precipitation, that damage superficial reservoirs efficiency. On the regularization process of a reservoir three hydrological fluxes are fundamental for understanding the inflows and exit flows of water: evaporated outflow (E), spill outflow (S) and yield outflow (Y). In this region, the E and S losses are, many times, of high magnitude, affecting the third tranche (Y). The study of the ESY relation with the physics parameters associated at the reservoir regularization process could lead a reduction of its losses and to increase the water supply associated, on periods of high inflow, for example. Then, this work made the study of the ESY relation influence on the 50 reservoirs operating efficiency distributed on Rio Grande do Norte (RN) and Paraíba (PB) states, combined with the reservoirs characteristics variable analysis. As main result, the study indicate that higher restrictions of water use could increase the evaporation losses and, possibly, by spill. For that matter, not always the water harvesting on flood periods for use on drought periods cause waited benefit for a reservoir efficiency, which was observed losses as the restriction was increased. On average, the reservoirs were below of the 90% efficiency for meeting demands, for the whole operation period.

Keywords: Superficial reservoirs. Triangle Diagram. ESY relation. Operational routines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos reservatórios na Bacia Hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu	10
Figura 2. Fluxograma síntese da pesquisa.....	11
Figura 3. Modelo de curvas-guia para operação dos reservatórios (4 zonas de liberação).....	15
Figura 4. Divisões do DT e exemplo de localização de reservatório.....	17
Figura 5. Porcentagens de regularização sem regras (controle).....	26
Figura 6. Porcentagens de regularização aplicando Regra 1.....	26
Figura 7. Porcentagens de regularização aplicando Regra 2.....	27
Figura 8. Porcentagens de regularização aplicando Regra 3.....	27
Figura 9. Porcentagens de regularização aplicando Regra 4.....	27
Figura 10. Relação entre adimensional π_1 e os grupos do DT	29
Figura 11. Relação entre adimensional π_3 e os grupos do DT	30
Figura 12. Relação entre adimensional π_5 e os grupos do DT	31
Figura 13. Média entre os cinquenta reservatórios dos seus respectivos percentuais liberado (pVL), vertido (pVV) e evaporado (pVE) para as simulações sem restrição ao uso da água (SR) e demais restrições (R1, R2, R3 e R4)	32
Figura 14. Variação da eficiência dos reservatórios (Ef , eq.6) para a simulação sem regra operativa (SR) e para diferença entre a simulação sem regra operativa (SR) menos a simulação com regra operativa 1 (SR_R1=SR-R1) a regra operativa 4 (SR_R4=SR-R4)	32
Figura 15. Eficiência dos grupos do DT sem regras e com Regra 4.....	34

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Variáveis características dos Reservatórios. ID corresponde aos reservatórios de 1 a 50, conforme Figura 1 **18**
- Tabela 2.** Resultados das simulações para o volume evaporado (pVE), volume liberado (pVL) e volume vertido (pVV) e Eficiência (Ef) dos reservatórios em %. O ID corresponde aos reservatórios de 1 a 50, conforme Figura 1 **23**
- Tabela 3.** Cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas para variáveis da Análise 1 **29**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
2.1. Caracterização da área de estudo	10
2.2. Delineamento da pesquisa	11
2.3. Conjunto de dados	12
2.4. Cálculo da evaporação potencial dos reservatórios	13
2.5. Regras de operação	14
2.6. Classificação a partir do Diagrama Triangular (DT)	17
2.7. Análises estatísticas	18
2.7.1. Análises de Correlações Canônicas (ACC).....	20
2.7.2. Obtenção de Adimensionais	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1. Representação das simulações em Diagrama Triangular	24
3.2. Análise 1: características que definem a localização no DT	28
3.3. Análise 2: Influência da localização no Diagrama Triangular na eficiência de operação dos reservatórios.....	31
4. CONCLUSÃO	35
5. REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro caracteriza-se pelo balanço hídrico deficitário, devido ao clima seco e às altas temperaturas. Nessa região, os rios são tipicamente intermitentes ou mesmo efêmeros, motivo pelo qual não se constituem – quando nessas condições – como fonte hídrica garantida (Araújo, 2012). De acordo com Silans (2003), estima-se que, dependendo das condições climáticas locais, a lâmina d'água potencial evaporada por ano situa-se entre 2.100 a 2.700 mm, enquanto as precipitações médias anuais estão em torno dos 750 mm, e em algumas áreas esse valor não ultrapassa os 400 mm (Montenegro; Montenegro, 2012). Essas peculiaridades hidrológicas comumente geram incompatibilidades entre disponibilidade e demanda de água (Nunes et al, 2016).

Como solução dessa problemática, a construção de reservatórios superficiais é uma das práticas mais tradicionais e bastante difundida. Eles garantem o armazenamento de água em períodos úmidos para uso em períodos de estiagem em um processo que capta as vazões afluentes pelo curso de água e pela precipitação direta no lago do reservatório, e envolve três fluxos hidrológicos: evaporação na superfície do lago, vazão vertida, em decorrência da água acumulada em excesso, e as vazões liberadas para atendimento das demandas (Campos, 2010; Campos, 2006). Esse processo de regularização, que depende do ciclo da água dentro da bacia hidrográfica na qual o reservatório está inserido, também é dependente das características construtivas do mesmo (como a capacidade máxima e as regras de operação sob as quais está submetido), influenciando na eficiência ou confiabilidade no atendimento dos usos (Campos, 2010).

O armazenamento de água em reservatórios é essencial para o desenvolvimento econômico e social de uma região. No Brasil, de acordo com a Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997), os Planos de Gestão de Recursos Hídricos devem contemplar o balanço entre demandas e disponibilidade de água. Nesse sentido, visando essa compatibilização, a adoção de formas mais eficientes de gestão da água tem se tornado cada vez mais necessária, frente a cenários críticos e de aumento gradativo das demandas.

Para entendimento da necessidade de mecanismos de aprimoramento da gestão de água em regiões com as características apresentadas, estudo realizado por Wurbs e Ayala (2014) mostrou que as perdas médias, em longo prazo, por evaporação chegam a 61% de uso agrícola ou 126% de água para abastecimento humano, fornecida por todas as fontes de água subterrânea

e superficial, no estado americano do Texas, durante o ano de 2010. Ainda segundo os autores citados, tais percentuais equivalem a um volume evaporado de 7,53 bilhões de m³/ano, considerando os 3.415 reservatórios estudados. Pesquisa realizada em reservatórios na bacia de Segura, localizada no sudeste da Espanha, mostrou que as perdas por evaporação podem gerar uma redução de 6,3% em termos econômicos e em torno de 7,5% em área não cultivada (Martínez-Granados *et al.*, 2011).

Outro fator a ser levado em consideração é o processo de vertimento, uma vez que também pode afetar a disponibilidade hídrica, pois o volume vertido não será aproveitado para atendimento das demandas do reservatório. Tal fator está diretamente relacionado com a capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios e grande afluência, além do regime de vazão afluente, demanda e do próprio processo de evaporação, sendo o vertimento passível de controle através de uma gestão que favoreça a utilização de água em períodos de grande afluência, sem que haja grandes perdas por vertimento. A dificuldade da utilização desta água excedente é que nos períodos úmidos as demandas são naturalmente menores. Celeste e Billib (2010) apontam que a não implementação de rotinas operativas que integram o vertimento de reservatórios levam a resultados inapropriados, e uma vez que essas rotinas operativas são integradas à gestão, é possível impedir a ocorrência de grandes vertimentos. Em consonância, estudo realizado no estado de Sonora, de clima semiárido, no México, também aponta a necessidade de diminuição de perdas por extravasamento em períodos úmidos, evidenciando ganho para a agricultura irrigada, uma das maiores consumidoras de recursos hídricos, e para a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento (Schoups *et al.*, 2006). Da mesma maneira, Jha *et al.* (2010) apresenta estratégias de diminuição de extravasamento em hidrelétricas, pelas quais é possível otimizar tanto a geração de energia quanto os custos inerentes ao processo. Nunes *et al.* (2016) confirma a hipótese de utilização de vazão excedente em períodos de grande afluência, sem que o abastecimento em períodos secos seja prejudicado, permitindo uma maior garantia de água para regiões semiáridas.

Devido às perdas por evaporação e vertimento, e à sobreexploração dos reservatórios, o processo de alocação de água para o atendimento às demandas comumente fica comprometido, com a liberação de volumes insuficientes de água. Em estudo realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), foram analisados 204 reservatórios situados na região semiárida do Brasil, dos quais apenas 85 possuem capacidade para abastecer novas demandas. Os demais operam no limite de sua capacidade ou apresentam déficits frequentes no atendimento de suas demandas atuais.

De acordo com Bravo et al. (2008), uma das regras de operação mais usadas adota a divisão do reservatório em zonas que podem apresentar distribuição de volume constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Denominadas de curvas-guia, elas podem ser usadas para controle de cheias, limitação de nível de água armazenada e prevenir colapso de atendimento às demandas, além de subsidiar a ampliação do uso da água armazenada em reservatórios (Nunes et al., 2016). Estudo realizado por Tu et al. (2003) mostra que o uso de curvas-guia pode ajudar na minimização de impactos em casos de perdas de volume armazenado.

Nesse sentido, a análise dos parâmetros físicos e hidrológicos que essencialmente influenciam no processo de regularização de reservatórios possibilita uma gestão mais eficiente. É evidente que a gestão da demanda sugere que, durante os períodos de seca incipiente, sejam feitas reduções no atendimento das demandas, mesmo quando ela possa ser totalmente atendida; as reduções impedem maiores carências e danos muito maiores em períodos posteriores de operação (Shih e ReVelle, 1995). Porém, para tanto, cabe uma análise mais detalhada para que seja amparada a premissa de que essa redução no atendimento das demandas realmente trará o benefício esperado. Para isso, um melhor entendimento de como se processam as saídas por evaporação, vertimento e liberação (EVL) no regime de regularização dos reservatórios pode subsidiar a definição de regras que melhor atendam ao comportamento hidrológico da região na qual o reservatório está inserido.

Diante disso, o presente trabalho se propõe a analisar o efeito da aplicação de diferentes regras de operação de reservatórios na eficiência do atendimento das demandas, além de estudar a relação entre as características físicas e hidrológicas dos reservatórios na sua capacidade de liberar água, verter e evaporar as águas afluentes ao mesmo.

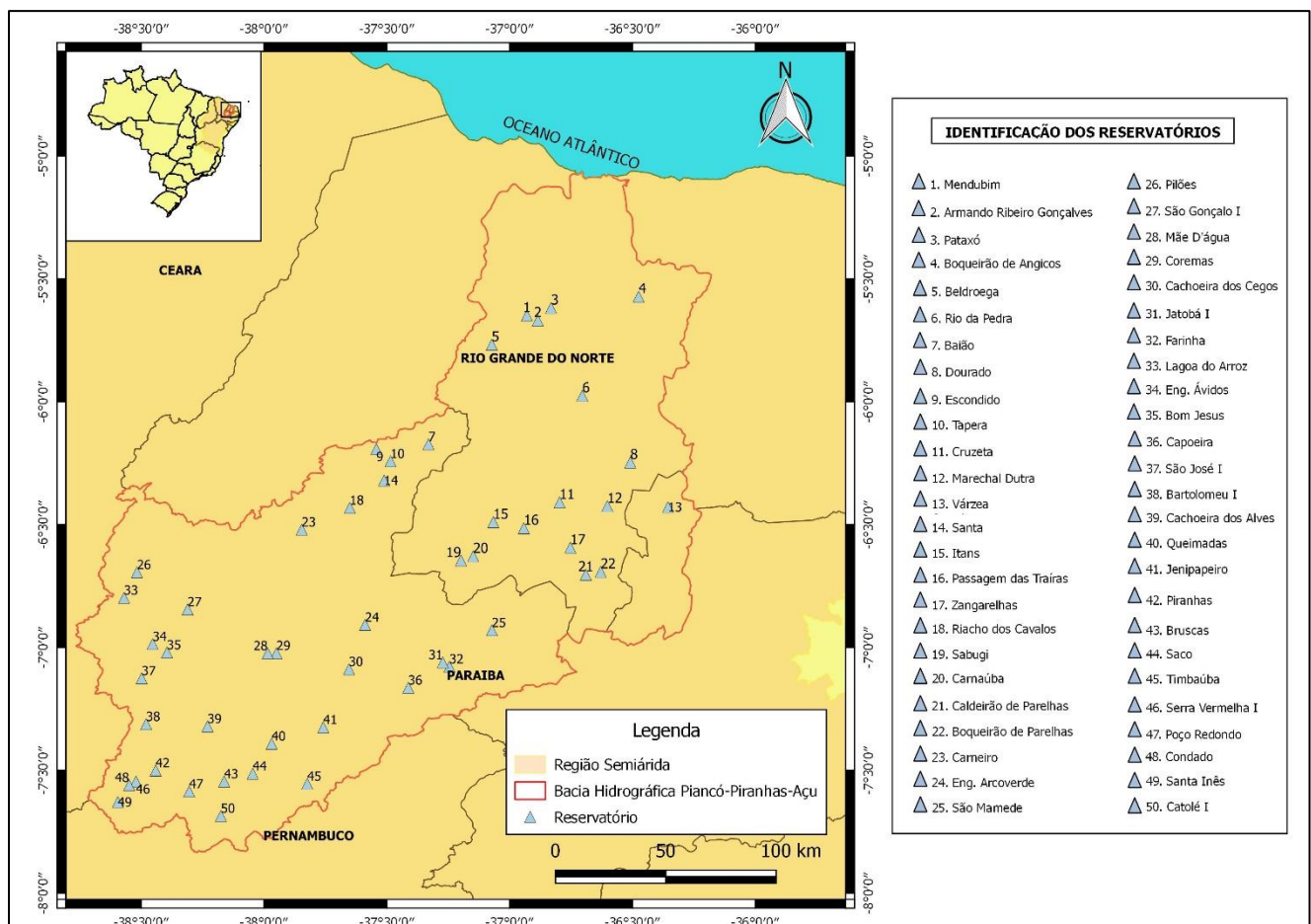
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado nos reservatórios situados na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, que abrange os estados do Rio Grande do Norte (RN) e Paraíba (PB), totalizando uma área de aproximadamente 43.600 km². É a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental e está totalmente inserida em território de clima semiárido, apresentando chuvas concentradas em poucos meses do ano e um padrão de forte variabilidade interanual, resultando em secas prolongadas e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2016).

Foram selecionados 50 reservatórios, os quais possuem uma capacidade de armazenamento total de 5.240,84 hm³ (ANA, 2017), sendo 16 situados no estado do RN e 34 no estado da PB (Figura 1).

Figura 1. Distribuição dos Reservatórios na Bacia Hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu.

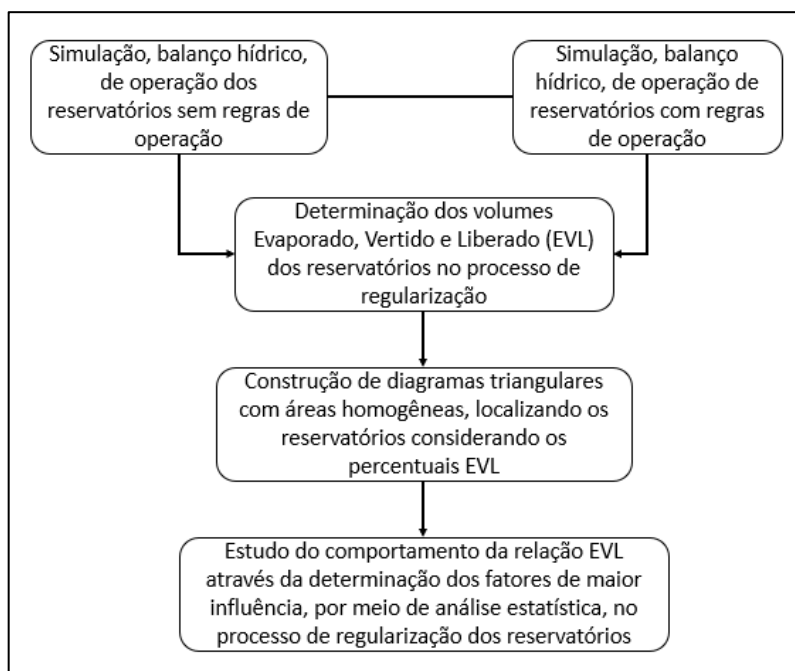


Fonte: Autor.

2.2. Delineamento da pesquisa

De maneira geral, a metodologia aplicada no desenvolvimento deste estudo consistiu em cinco etapas esquematizadas na Figura 2 (fluxograma) e descritas a seguir:

Figura 2. Fluxograma síntese da pesquisa



- Simulação de operação dos reservatórios sem regra de operação

Nesta etapa foi simulada a operação dos reservatórios, a partir do seu balanço hídrico no período de análise. A simulação foi realizada com o atendimento a livre demanda, ou seja, sempre que houvesse água no reservatório a demanda era atendida integralmente, sem a aplicação de regras de racionamento. A partir deste processo foram levantados os dados do percentual de água evaporado, vertido e liberado para o atendimento da demanda, em função do total de água afluente ao reservatório no período. Outra informação levantada foi a eficiência do reservatório no atendimento da sua demanda.

- Simulação de operação de reservatórios com regra de operação

O mesmo balanço hídrico foi aplicado ao reservatório também para o levantamento dos dados dos percentuais evaporado, vertido e liberado, além da eficiência do reservatório. No entanto neste caso, o atendimento da demanda estava vinculado ao volume de água no reservatório, para cada faixa de volume era aplicada um fator de racionamento à demanda.

- Determinação dos volumes Evaporado, Vertido e Liberado (EVL) dos reservatórios no processo de regularização e construção de diagramas triangulares com a localização dos reservatórios levando em consideração os percentuais regularizados, vertido e evaporado

Os valores dos percentuais de EVL consistem em três partes da saída de água do reservatório, sendo assim plotados em diagramas triangulares com eixos em percentuais de cada parcela mencionada, que permitiu localizar os reservatórios em zonas homogêneas (apresentadas em seções posteriores deste trabalho) que apresentam porções do diagrama com percentuais semelhantes.

- Determinação dos fatores hidrológicos e físicos de maior influência no relação EVL dos reservatórios

Nesta etapa buscou-se analisar quais as variáveis características dos reservatórios influenciavam na localização dos mesmos no diagrama triangular. Para tanto realizou-se uma correlação canônica entre o grupo dos adimensionais formados pelas variáveis que caracterizavam os reservatórios e o grupo composto pelos valores dos percentuais de EVL dos reservatórios.

- Determinação da relação entre os valores de EVL e o efeito na alteração de eficiência em função da regra de operação adotada

Para esta análise comparou-se a localização dos reservatórios no Diagrama Triangular (DT) com a redução da eficiência no atendimento da demanda, em função do aumento da restrição na liberação de água pela imposição de uma maior taxa de racionamento.

2.3. Conjunto de dados

Para a simulação da operação dos reservatórios foram utilizados dados de curva cota-área-volume (CAV), capacidade dos reservatórios, séries de vazão (Q), demanda de cada reservatórios (D), além de uma série de dados de vazões afluentes de 1980 a 2012, totalizando um período de 33 anos. Estes dados foram disponibilizados pelos órgãos gestores, Agência Nacional de Águas (ANA, 2017) e Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do estado do RN (SEMARH, 2015).

Os dados para o cálculo da evaporação foram obtidos da base de dados Xavier et al. (2016), que apresenta dados meteorológicos diários entre os anos de 1980 a 2013 (34 anos). São dados obtidos a partir de estações meteorológicas terrestres do Brasil operadas pelo

INMET, ANA e DAEE/SP, totalizando 3.625 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas. Os dados são dispostos de forma regular, em uma grade de 2,5° de espaçamento na latitude e longitude, que corresponde aproximadamente a uma resolução de 25 km. As variáveis retiradas da base mencionada foram temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiação solar (MJ/m²), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m/s), ambas para cada açude considerando as coordenadas geográficas de sua localização. Desta mesma base foram obtidos os dados de precipitação mensal. A utilização desses dados possibilitou calcular a evaporação potencial dos reservatórios considerando a variabilidade climática e espaço-temporal no cálculo do balanço hídrico.

2.4. Cálculo da evaporação potencial dos reservatórios

Diversos métodos para estimar a evaporação são de alguma forma derivados da equação de Penman-Monteith, e para a evaporação dos reservatórios (*open water evaporation*, do inglês) não é diferente (Bueno et al., 2016; Jensen et al., 2005). De maneira geral, são feitas três considerações na equação de Penman-Monteith (Shuttleworth, 2012) para estimativa da evaporação potencial dos reservatórios: (1) que a resistência de superfície é definida como zero, uma vez que o ar é considerado como saturado próximo da lamina d'água; (2) é considerado um albedo de 8%, correspondente a de uma superfície de água; e (3) que a variação na energia armazenada no corpo d'água (reservatório) se dá pela advecção de calor resultante da entrada e saída de água do reservatório com diferentes temperaturas. Estas considerações foram aplicadas no método de Penman-Monteith, segundo Shuttleworth, (2012), para estimativa da evaporação potencial diária para cada reservatório, descrito conforme e Eq. 1:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6,43 (1 + 0,536 u_2) D}{\lambda} \quad (mm \, d^{-1}) \quad (1)$$

Em que,

$\Delta = \frac{4098 \, e_{sat}}{(237,3 + T^C)}$ – Gradiente que expressa a relação entre a pressão saturada de vapor e a temperatura (kPa/°C);

$\gamma = \frac{c_p P}{0,622 \, \lambda}$ – Constante psicrométrica;

$c_p = 0,001013$ – Calor específico com pressão constante do ar (kJ kg⁻¹.K⁻¹);

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 E_l}{293} \right)^{5,256} - \text{Pressão absoluta (kPa);}$$

E_l – elevação do ponto estudado em relação ao nível do mar;

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 T^c - \text{Calor latente de vaporização da água (MJ/kg).}$$

u_2 – Média diária da velocidade do vento (m/s);

$$D = (e_{sat} - e) - \text{Déficit de pressão de vapor (kPa);}$$

$$e_{sat} = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T^c}{237,3 + T^c} \right) - \text{Pressão saturada de vapor (kPa);}$$

$$e = RH \cdot e_{sat} - \text{Pressão de vapor (kPa);}$$

RH – Umidade relativa em unidade fracionária;

$$Rn = S \cdot (1 - 0,08) + Ln - \text{Radiação na superfície do espelho d'água (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{);}$$

S – Radiação solar total (MJ m⁻² d⁻¹);

$$Ln = - \left(0,9 \cdot \left(\frac{S}{S_{max}} \right) + 0,1 \right) (0,34 - 0,139 \cdot \sqrt{e}) \cdot \sigma \cdot (T^4) - \text{Radiação de onda longa (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{);}$$

S_{max} – Irradiância solar máxima (MJ m⁻² d⁻¹);

$$\sigma = 4,903 \times 10^{-9} - \text{constante de Stefan-Boltzman (MJm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{d}^{-1}\text{);}$$

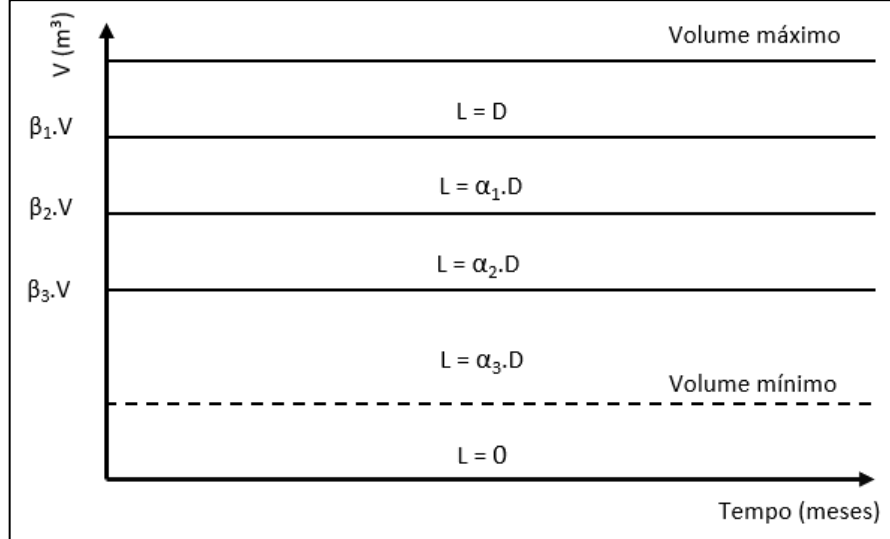
Para cada reservatório foram obtidos os dados mensais de evaporação de 1980 a 2012, no entanto, no balanço hídrico foram utilizadas apenas as médias dos dados mensais de evaporação, tendo cada mês do ano o seu valor médio de evaporação. Este procedimento foi feito como uma simplificação do processo de balanço hídrico. para a série de evaporação de 1980 a 2012, para posterior realização de balanço hídrico.

2.5. Regras de operação

Através da metodologia de curvas-guia (Bravo et al, 2008; Nunes et al, 2016; Tu et al, 2003), os reservatórios foram divididos em patamares de volume e a partir disso, delimitada a liberação de água para o atendimento da demanda. Na Figura 3 é apresentado o modelo de curvas-guia onde $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são fatores de redução na liberação para atendimento às demandas; β_1, β_2 e β_3 determinam as faixas de volume do reservatório onde serão realizados os diferentes racionamentos; L corresponde ao volume liberado e D à demanda requerida por reservatório, considerada aqui fixa para todo o período simulado.

Para comparação e estudo de como as regras afetam a regularização do reservatório, considerou-se a situação na qual o balanço hídrico é feito sem restrição do volume liberado, sendo esta a operação sem aplicação de regra (SR).

Figura 3. Modelo de curvas-guia para operação dos reservatórios (4 zonas de liberação)



As simulações seguiram as regras apresentadas a seguir, nas quais os valores de α_1 , α_2 , α_3 são 0,75; 0,50 e 0,25, respectivamente:

Sem Regra (SR): controle para as simulações.

Regra 1 (R₁): $\beta_1 = 0,50$; $\beta_2 = 0,35$ e $\beta_3 = 0,20$.

Regra 2 (R₂): $\beta_1 = 0,60$; $\beta_2 = 0,45$ e $\beta_3 = 0,30$.

Regra 3 (R₃): $\beta_1 = 0,70$; $\beta_2 = 0,55$ e $\beta_3 = 0,40$.

Regra 4 (R₄): $\beta_1 = 0,80$; $\beta_2 = 0,65$ e $\beta_3 = 0,50$.

As regras foram aplicadas através do balanço hídrico mensal (Eq. 2) para cada reservatório, no período de 1980 a 2012 (33 anos).

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - (E_t - P_t) - L_t - V_t \quad (2)$$

Em que,

S_t e S_{t+1} – Volume armazenado nos meses t e $t + 1$ (m^3);

Q_t – Volume afluente no mês t (m^3);

E_t – Volume evaporado no mês t (m^3);

P_t – Volume precipitado no mês t (m^3);

L_t – Volume liberado no mês t (m^3);

V_t – Volume vertido no mês t (m^3).

Para cada simulação foram obtidos percentuais (p) de volume evaporado (VE) (Eq. 3), volume vertido (VV) (Eq. 4), volume liberado (VL) para atendimento das demandas (Eq. 5). Estes volumes foram calculados considerando o volume total dos 33 anos simulados.

A avaliação da implementação da regra de operação foi realizada através do cálculo da eficiência (Ef) do sistema no atendimento às demandas (McMahon *et al.*, 2006), de acordo com a Eq. 6.

$$pVE = \frac{\sum_{i=1}^N VE}{\sum_{i=1}^N (VE + VV + VL)} \cdot 100 \quad (3)$$

$$pVV = \frac{\sum_{i=1}^N VV}{\sum_{i=1}^N (VE + VV + VL)} \cdot 100 \quad (4)$$

$$pVL = \frac{\sum_{i=1}^N VL}{\sum_{i=1}^N (VE + VV + VL)} \cdot 100 \quad (5)$$

$$Ef = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (VL_i)}{\sum_{i=1}^N D_i} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Em que,

pVE – Percentual de Volume Evaporado (VE);

pVV – Percentual de Volume Vertido (VV);

pVL – Percentual de Volume Liberado (VL);

N – Número de meses simulados;

D_i – Vazão demandada ($m^3/mês$).

Quando $Ef = 100\%$, o reservatório atende a totalidade das demandas de água; quando o índice está entre $0 < Ef < 100\%$, há um atendimento parcial das demandas de água para o reservatório; já quando $Ef = 0$, o reservatório não atende a demanda de água.

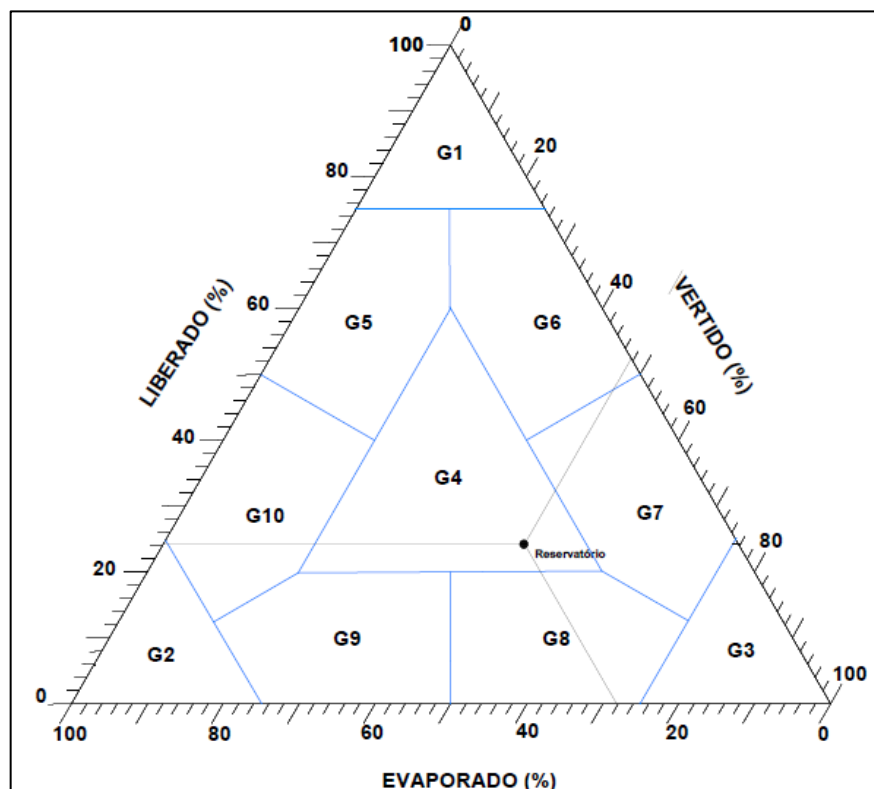
Todas as simulações foram realizadas através do software MS Excel.

2.6. Classificação a partir do Diagrama Triangular (DT)

Seguindo a divisão do volume afluente ao reservatório em três partes, que são volume vertido (VV), liberado para demandas (VL) e evaporado (VE), foram construídos diagramas triangulares (DTs) para estudo do comportamento dos reservatórios, segundo o proposto por Campos (2010).

Os DTs foram divididos em dez grupos (G1 a G10), como mostrado na Figura 4, seguindo a classificação de Shepard (1954), que embora seja uma categorização utilizada para caracterizar porções de solo, como temos uma divisão ternária para a regularização dos reservatórios (*VE, VV e VL*), é possível agregar o mesmo conceito de divisão, permitindo uma homogeneidade amostral para a distribuição dos reservatórios no diagrama.

Figura 4. Divisões do DT e exemplo de localização de reservatório



Fonte: Adaptado de Campos (2010)

Em termos de atendimento das demandas (percentual liberado), os grupos que possuem melhor relação EVL são G1, G5, G4 (considerando parte superior deste grupo) e G6, que apresentam valores para liberação em média iguais ou superiores que 50%, com a evaporação

e vertimento partilhando o restante. Já os grupos com piores relações são G3, G8, G9 e G2, com valores para liberação inferiores a 20%.

2.7. Análises estatísticas

Foram levantadas inicialmente as seguintes variáveis características dos reservatórios (Tabela 1), que subsidiaram as análises: QMA – vazão afluente média anual (m³), VM – volume máximo dos reservatórios (m³), D – demanda anual (m³), ABH – área da bacia hidráulica (m²), H – profundidade máxima da lâmina de água (m) e α - fator de forma, apresentado em Campos, 2010; 2011; 2015, dos reservatórios (eq. 7).

$$\alpha = \left(\frac{\sum(V_i)}{\sum(H_i^3)} \right) \quad (7)$$

Em que,

V – volume acumulado na cota i (m³);

H – profundidade medida a partir do ponto mais profundo (m);

Tabela 1. Variáveis características dos Reservatórios. ID corresponde aos reservatórios de 1 a 50, conforme Figura 1. (continua na página 20)

ID	VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS					
	QMA (m³)	VM (m³)	D (m³)	ABH (m²)	H (m)	α (-)
1	67.763.658,07	76.349.500,00	2.869.776,00	9.707.100,00	21,2	8222,39
2	2.058.651.463,77	2.400.000.000,00	527.218.848,00	192.113.470,30	31,005	152453,4
3	29.085.082,64	15.017.379,00	1.892.160,00	3.000.000,00	9,04	19545,73
4	7.941.084,94	16.018.307,77	3.342.816,00	3.283.346,60	14,65	4942,02
5	39.899.392,96	8.057.520,15	2.775.168,00	3.102.327,22	7,1	22703,98
6	9.747.580,67	13.602.214,86	4.635.792,00	2.700.000,00	17,04	2453,39
7	54.765.106,84	39.230.000,00	3.721.248,00	7.225.000,00	13	18412,45
8	13.366.118,81	10.321.600,00	9.713.088,00	3.160.000,00	10,5	19721,09
9	15.933.082,20	16.325.813,50	441.504,00	5.116.168,80	7,94	49260,52
10	13.481.939,20	26.418.660,00	3.689.712,00	6.962.800,00	10	52943,15
11	59.871.715,97	23.545.745,33	29.580.768,00	6.161.061,37	9,3	32876,76
12	68.544.551,46	44.421.480,38	25.197.264,00	8.056.700,00	21,77	3408,83
13	958.577,29	21.532.659,00	8.136.288,00	3.424.479,00	24	2613,06
14	20.122.081,21	2.840.000,00	5.960.304,00	929.621,84	5,99	22078,69
15	38.557.885,19	81.750.000,00	25.071.120,00	13.400.000,00	18	43842,59
16	199.482.670,29	49.702.393,65	23.715.072,00	10.429.000,00	15,32	12606,9
17	3.168.023,30	7.920.000,00	599.184,00	2.026.300,00	14	2491,12
18	16.231.544,64	17.699.000,00	3.342.816,00	4.368.000,00	11	24524,68
19	33.502.654,71	65.334.880,00	8.735.472,00	12.603.800,00	17	11982,98

20	10.879.010,82	25.710.900,00	10.123.056,00	5.065.000,00	13,5	23011,16
21	6.499.179,40	9.320.657,03	3.122.064,00	1.837.800,00	13,1	4309,66
22	30.676.019,39	84.792.119,23	28.445.472,00	12.672.747,21	19,4	11530,93
23	33.641.255,13	31.285.875,00	9.460.800,00	6.917.250,00	16	14233,37
24	5.943.303,50	30.590.000,00	4.005.072,00	5.001.755,48	16,79	11239,97
25	8.262.715,01	15.791.280,00	1.387.584,00	4.222.800,00	11,7	9723,14
26	64.522.940,48	13.000.000,00	55.219.536,00	4.834.000,00	8	21012,5
27	118.170.345,19	44.600.000,00	75.150.288,00	7.000.000,00	21	8267,39
28	109.411.918,21	568.000.000,00	220.373.568,00	53.617.000,00	39	7964,02
29	467.334.380,74	591.650.000,00	220.373.568,00	54.533.127,00	39	9407,47
30	17.115.902,85	69.030.000,00	1.324.512,00	11.309.249,12	22,25	10349,22
31	2.848.799,10	17.516.000,00	4.730.400,00	4.123.500,00	12,3	9557,17
32	20.017.210,72	25.740.000,00	6.433.344,00	7.337.778,49	13	17004,6
33	30.098.360,13	80.220.750,00	25.922.592,00	12.284.000,00	25	6219,38
34	81.119.719,80	255.000.000,00	10.501.488,00	27.884.911,00	27	20619,38
35	3.494.009,44	2.000.000,00	693.792,00	365,18	41,34	40,83
36	12.348.809,25	53.450.000,00	5.518.800,00	6.368.320,00	28	2923,83
37	9.497.285,74	3.050.000,00	1.009.152,00	832.016,08	11,99	2811,13
38	6.122.641,96	17.570.556,00	7.347.888,00	2.922.456,00	28	1008,85
39	8.186.012,42	10.611.196,00	7.474.032,00	2.085.136,00	16	4041,3
40	4.187.584,02	15.625.338,00	630.720,00	2.409.504,00	19	5001,58
41	45.682.214,39	14.590.000,00	5.708.016,00	2.516.637,85	18,75	26438,01
42	12.621.725,72	25.696.200,00	6.748.704,00	2.342.000,00	33	878,01
43	15.839.201,77	38.206.463,00	6.244.128,00	3.062.615,00	28,5	2731,11
44	26.801.085,02	97.488.089,00	19.741.536,00	6.407.750,00	47	910,57
45	7.007.105,69	15.438.572,50	3.784.320,00	2.101.875,00	22	1742,24
46	4.157.470,34	11.801.173,00	1.324.512,00	1.552.145,00	22	3282,43
47	24.850.981,95	8.930.000,00	1.671.408,00	1.770.829,17	16,13	30070,81
48	8.138.042,40	35.020.000,00	36.392.544,00	3.102.600,00	31	1274,5
49	7.191.627,82	26.115.250,00	2.712.096,00	2.590.000,00	27	1430,33
50	7.900.405,04	10.500.000,00	851.472,00	1.360.746,00	22,5	1210,62

Fonte: ANA (2016, 2017).

De posse destes dados e com os percentuais de volume evaporado, vertido e liberado para atendimento das demandas, procedeu-se o estudo com a correlação desses parâmetros, visando a identificação daqueles que influenciam a operação do reservatório em maior ou menor amplitude. Desta forma, definiram-se duas análises principais:

Análise 1. Verificação de quais características do reservatório interferem na relação EVL, ou seja, na sua localização no DT. Para tanto, foram definidos adimensionais (apresentados posteriormente) a partir das variáveis características do reservatório (Tabela 1) e realizada a análise de correlações canônicas (ACC) entre estes adimensionais e o conjunto resposta dos percentuais evaporado, vertido e liberado (equações 3 a 5).

Análise 2. Análise da relação entre a localização dos reservatórios no DT e a eficiência no atendimento da demanda, em função do aumento da restrição na liberação de água, por meio de estatística descritiva.

2.7.1. Análise de Correlações Canônicas

Em situações nas quais é preciso lidar com conjuntos de múltiplas variáveis dependentes e independentes, é apropriada a aplicação de correlações canônicas, modelo estatístico multivariado (Hair et al., 2009). O princípio básico dessa técnica é desenvolver uma combinação linear em cada grupo de variáveis, na qual a escolha dos coeficientes dessa combinação é realizada de maneira a maximizar a correlação entre os conjuntos, o que conduz a uma significativa redução de complexidade e consequente facilidade na interpretação de dados-resposta (Mingoti, 2005; Loesch e Hoeltgebaum, 2012).

Para dois conjuntos de variáveis $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]'$ de ordem $p \times 1$ e $Y = [y_1, y_2, \dots, y_q]'$, com $q \times 1$, assumindo $p \leq q$, as matrizes de covariância para os conjuntos podem ser representadas como se segue no conjunto de Eq. 8.

$$\begin{aligned} \text{Cov}(X) &= \Sigma_{XX}; \text{Cov}(Y) = \Sigma_{YY} \\ \text{Cov}(X,Y) &= \Sigma_{XY}; \text{Cov}(Y,X) = \Sigma_{YX} = \Sigma_{XY}' \text{ (transposta de } \Sigma_{XY}) \end{aligned} \quad (8)$$

Como a finalidade da correlação canônica é resumir as associações entre X e Y em termos de poucas covariâncias, em vez de usar $p \times q$ covariâncias, normalmente na literatura se definem as variáveis canônicas U (Eq. 9) e V (Eq. 10), mediante combinações lineares que buscam a obtenção de coeficientes a_p e b_q , chamados de pesos canônicos, de forma que tenhamos a máxima associação possível entre U e V (Mangoti, 2005; Loesch e Hoeltgebaum, 2012)

$$U = a_p X \quad (9)$$

$$V = b_q Y \quad (10)$$

Os coeficientes, ou vetores, são soluções do sistema de Eq. 11.

$$\begin{cases} (\Sigma_{XY} \Sigma_{YY}^{-1} \Sigma_{YX} - \lambda_k \Sigma_{XX}) a_p = 0 \\ (\Sigma_{YX} \Sigma_{XX}^{-1} \Sigma_{XY} - \lambda_k \Sigma_{YY}) b_q = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Onde λ_k é o k -ésimo maior autovalor da matriz $(\Sigma_{XX}^{-1}\Sigma_{XY}\Sigma_{YY}^{-1}\Sigma_{YX})$, ou, do mesmo modo, da matriz $(\Sigma_{YY}^{-1}\Sigma_{YX}\Sigma_{XX}^{-1}\Sigma_{XY})$. A correlação canônica é a correlação em valor absoluto entre U e V e é igual a $\sqrt{\lambda_k}$.

Ainda de acordo com os autores supracitados, as variáveis canônicas são artificiais, não possuem significado em si. Apesar disso, elas podem ser identificadas em termos das variáveis originais. Para isso, são calculadas as correlações (R), chamadas de *canonical loadings* (cargas canônicas), das variáveis canônicas com as variáveis originais (Eq. 13), representadas como

$$\begin{aligned} R_{U_kX}^* &= R_{XX}a_k \\ R_{V_kY}^* &= R_{YY}b_k \\ R_{U_kY}^* &= R_{YX}a_k \\ R_{V_kX}^* &= R_{XY}b_k \end{aligned} \quad (13)$$

Essa é uma medida para auxiliar na interpretação e na análise da qualidade das variáveis canônicas. Dessas correlações, são obtidas as cargas canônicas diretas, ou seja, aquelas nas quais a variável é correlacionada no mesmo grupo (X em X ou Y em Y) e as cargas canônicas cruzadas, que representam as correlações existentes entre uma variável original de um grupo e uma variável canônica de outro grupo (X em Y ou Y em X). Quanto maior a carga canônica, maior a importância da variável no grupo estudado.

2.7.2. Obtenção de Adimensionais

Para realização da análise estatística utilizando correlações canônicas foi necessário um tratamento prévio nos dados de entrada. Somente as variáveis características não são capazes de caracterizar os açudes em termos de capacidade de regularização, uma vez que açudes diferentes podem apresentar volumes máximos e demandas diferentes, mas apresentarem a mesma capacidade de regularização, logo, a relação entre as variáveis características dos reservatórios (Tabela 1) é que serão analisadas. Assim, foram definidas para esta pesquisa variáveis adimensionais (Eq. 15), sendo elas π_1 , π_2 , π_3 , π_4 e π_5 , que relacionam as variáveis características apresentadas na seção 2.6 descritas a seguir:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= VM/QMA \\ \pi_2 &= D/VM \\ \pi_3 &= D/QMA \end{aligned} \quad (15)$$

$$\pi_4 = VM / (ABH \cdot H)$$

$$\pi_5 = \alpha$$

onde QMA é a vazão afluente média anual (m³), VM é o volume máximo dos reservatórios (m³), D é a demanda anual (m³), ABH é a área da bacia hidráulica (m²), H a profundidade máxima da lâmina de água (m) e α o fator de forma dos reservatórios.

Para a **Análise 1**, foram definidos o conjunto X, que abrange os adimensionais descritos anteriormente, e um conjunto Y, que abrange o conjunto resposta dos percentuais evaporado, vertido e liberado. Com isso, por meio de combinações lineares, obtive-se duas variáveis, U e V, de forma que elas tivessem a maior correlação, aplicando a ACC.

Todos os cálculos foram realizados com auxílio do software R (2018) através do pacote YACCA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações dos reservatórios, baseadas nas regras de operação definidas, puderam conduzir a um conjunto amostral de 250 resultados para os reservatórios, sendo 50 desses referentes à simulação sem regra imposta, que serviu como parâmetro comparativo (controle) para as demais. Essa grande quantidade de resultados subsidiou uma análise mais ampla, possibilitando o entendimento da influência dos parâmetros operacionais dos reservatórios no processo de regularização e mostrando a variabilidade de respostas dentro da bacia hidrográfica. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os volumes evaporado, liberado e vertido percentualmente (pVE , pVL e pVV , respectivamente), além da eficiência calculada para cada regra (Ef).

Tabela 2. Resultados das simulações para o volume evaporado (pVE), volume liberado (pVL) e volume vertido (pVV) e Eficiência (Ef) dos reservatórios em %. O ID corresponde aos reservatórios de 1 a 50, conforme Figura 1. (continua na página 25)

ID	SEM REGRAS (CONTROLE)				REGRA 1				REGRA 2				REGRA 3				REGRA 4			
	pVE	pVV	pVL	Ef	pVE_1	pVV_1	pVL_1	Ef_1	pVE_2	pVV_2	pVL_2	Ef_2	pVE_3	pVV_3	pVL_3	Ef_3	pVE_4	pVV_4	pVL_4	Ef_4
1	41,00	55,00	4,00	99,49	41,00	55,00	4,00	90,03	41,00	56,00	3,00	85,48	41,00	56,00	3,00	79,99	41,00	56,00	3,00	72,6
2	28,00	47,00	25,00	99,49	28,00	48,00	24,00	96,97	29,00	48,00	23,00	94,00	29,00	49,00	22,00	90,34	29,00	50,00	21,00	84,15
3	45,00	49,00	6,00	99,49	46,00	49,00	5,00	90,59	46,00	49,00	5,00	83,84	46,00	49,00	5,00	76,89	46,00	50,00	4,00	67,49
4	64,00	4,00	32,00	83,00	73,00	4,00	23,00	60,54	76,00	5,00	20,00	52,53	78,00	5,00	17,00	45,45	80,00	5,00	15,00	39,96
5	21,00	73,00	6,00	95,04	21,00	73,00	6,00	84,03	22,00	73,00	5,00	77,9	22,00	73,00	5,00	71,02	22,00	74,00	4,00	64,77
6	46,00	26,00	28,00	87,25	48,00	27,00	25,00	79,99	49,00	27,00	23,00	73,67	51,00	28,00	21,00	66,98	52,00	29,00	19,00	59,28
7	40,00	54,00	6,00	99,75	40,00	54,00	6,00	94,51	40,00	54,00	6,00	89,96	41,00	54,00	5,00	84,09	41,00	54,00	5,00	75,44
8	30,00	20,00	50,00	73,18	38,00	21,00	40,00	59,6	42,00	22,00	35,00	52,53	45,00	23,00	32,00	48,11	46,00	24,00	30,00	44,57
9	66,00	32,00	2,00	84,04	66,00	32,00	2,00	66,67	66,00	32,00	1,00	58,21	66,00	33,00	1,00	50,44	66,00	33,00	1,00	43,24
10	69,00	11,00	20,00	82,95	77,00	11,00	12,00	50,13	79,00	11,00	10,00	43,5	80,00	11,00	9,00	38,89	81,00	11,00	8,00	34,34
11	16,00	53,00	31,00	64,68	19,00	54,00	27,00	57,13	20,00	55,00	25,00	53,22	21,00	55,00	24,00	49,87	22,00	56,00	22,00	46,72
12	27,00	40,00	32,00	92,64	29,00	42,00	29,00	83,27	30,00	43,00	27,00	77,84	31,00	44,00	25,00	72,47	32,00	45,00	23,00	65,66
13	38,00	0,00	62,00	77,28	56,00	0,00	44,00	55,81	60,00	0,00	40,00	50,95	64,00	0,00	36,00	46,72	67,00	0,00	33,00	42,42
14	10,00	68,00	22,00	76,8	10,00	73,00	17,00	66,63	12,00	69,00	19,00	66,22	12,00	70,00	18,00	63,32	13,00	70,00	17,00	60,54
15	34,00	17,00	49,00	80,87	49,00	17,00	34,00	57,58	54,00	17,00	29,00	49,31	58,00	17,00	25,00	42,23	61,00	18,00	22,00	36,68
16	17,00	72,00	11,00	99,75	17,00	72,00	11,00	96,4	17,00	72,00	11,00	93,69	17,00	73,00	10,00	88,7	17,00	73,00	10,00	82,83
17	87,00	0,00	13,00	77,71	92,00	0,00	8,00	51,33	93,00	0,00	7,00	41,48	94,00	0,00	6,00	34,85	95,00	0,00	5,00	29,1
18	54,00	29,00	17,00	92,65	57,00	30,00	13,00	71,21	58,00	30,00	12,00	63,26	59,00	31,00	10,00	56,12	60,00	31,00	9,00	48,8
19	56,00	22,00	23,00	95,73	64,00	22,00	13,00	57,58	66,00	23,00	11,00	48,99	67,00	23,00	10,00	41,98	68,00	23,00	9,00	36,87
20	43,14	10,57	46,28	53,74	57,00	11,45	31,54	37,37	60,29	11,89	27,82	33,14	63,10	12,20	24,70	29,55	64,43	12,51	23,06	27,65
21	50,00	16,00	34,00	77,44	55,00	17,00	28,00	63,26	57,00	18,00	25,00	56,69	59,00	19,00	22,00	50,44	60,00	20,00	20,00	45,33
22	35,00	0,00	65,00	74,25	58,00	0,00	42,00	49,24	58,00	0,00	42,00	49,24	68,00	0,00	32,00	38,26	72,00	0,00	28,00	33,78
23	42,00	34,00	24,00	95,83	46,00	35,00	20,00	76,89	47,00	35,00	18,00	69,95	48,00	36,00	16,00	63,19	49,00	37,00	14,00	56,5
24	74,00	3,00	23,00	40,54	80,00	4,00	16,00	27,97	82,00	4,00	14,00	25,38	83,00	4,00	13,00	23,55	84,00	4,00	12,00	21,59

25	69,00	19,00	12,00	77,55	74,00	19,00	7,00	49,05	75,00	19,00	6,00	39,65	76,00	19,00	5,00	33,09	76,00	19,00	4,00	30,24
26	10,00	60,00	31,00	37,13	9,00	60,00	32,00	38,57	10,00	60,00	31,00	37,12	10,00	60,00	30,00	36,49	11,00	60,00	29,00	35,61
27	9,00	50,00	42,00	67,31	10,00	51,00	39,00	62,94	11,00	52,00	37,00	59,91	12,00	53,00	35,00	56,76	13,00	54,00	33,00	53,6
28	25,00	1,00	74,00	38,84	40,00	3,00	57,00	31,19	44,00	3,00	53,00	28,91	47,00	4,00	50,00	27,21	49,00	4,00	47,00	25,88
29	22,00	39,00	40,00	86,98	25,00	40,00	35,00	75,82	27,00	41,00	32,00	70,77	28,00	42,00	30,00	65,47	30,00	43,00	27,00	59,47
30	72,00	25,00	3,00	50,13	73,00	25,00	2,00	34,34	73,00	25,00	2,00	31,63	73,00	25,00	2,00	27,84	74,00	25,00	2,00	24,68
31	61,00	0,00	39,00	26,08	77,00	0,00	23,00	15,85	79,00	0,00	21,00	14,46	81,00	0,00	19,00	13,32	81,00	0,00	19,00	13,01
32	55,00	18,00	27,00	92,68	64,00	18,00	19,00	64,52	66,00	18,00	16,00	57,07	68,00	18,00	14,00	50,44	69,00	18,00	13,00	44,38
33	34,00	15,00	51,00	64,71	48,00	16,00	36,00	46,97	52,00	16,00	32,00	41,79	56,00	16,00	28,00	37,06	58,00	16,00	26,00	33,84
34	67,00	21,00	11,00	97,73	69,00	22,00	9,00	77,9	70,00	22,00	8,00	68,82	71,00	23,00	7,00	59,72	71,00	23,00	6,00	53,03
35	29,00	52,00	19,00	99,75	30,00	53,00	17,00	92,61	30,00	56,00	16,00	87,56	31,00	54,00	15,00	81,25	31,00	55,00	14,00	73,23
36	49,00	22,00	29,00	71,83	57,00	22,00	21,00	50,63	59,00	23,00	18,00	45,52	60,00	23,00	17,00	42,3	61,00	24,00	15,00	38,13
37	25,00	65,00	10,00	98,84	25,00	65,00	10,00	94	25,00	66,00	9,00	88,57	26,00	66,00	8,00	82,45	26,00	67,00	7,00	74,18
38	6,00	66,00	28,00	66,98	6,00	65,00	29,00	69,26	6,00	66,00	28,00	65,72	6,00	67,00	27,00	64,74	7,00	67,00	26,00	63,64
39	33,00	23,00	44,00	51,42	37,00	24,00	39,00	44,28	39,00	25,00	36,00	42,74	41,00	26,00	33,00	39,39	43,00	27,00	30,00	36,11
40	80,00	7,00	13,00	99,02	85,00	8,00	7,00	58,71	86,00	8,00	6,00	49,94	87,00	8,00	6,00	43,62	88,00	8,00	5,00	37,06
41	18,00	70,00	12,00	99,68	18,00	70,00	12,00	98,04	18,00	70,00	12,00	96,91	18,00	70,00	11,00	94,26	19,00	71,00	10,00	89,52
42	34,00	23,00	43,00	87,04	40,00	25,00	35,00	70,08	42,00	26,00	32,00	64,14	44,00	27,00	29,00	58,65	45,00	28,00	26,00	53,16
43	40,00	25,00	35,00	94,4	45,00	27,00	28,00	77,65	46,00	28,00	27,00	73,11	47,00	28,00	25,00	67,42	48,00	29,00	23,00	62,37
44	30,00	18,00	52,00	76,41	42,00	19,00	39,00	58,21	45,00	19,00	36,00	53,03	47,00	19,00	34,00	49,31	50,00	20,00	30,00	44,82
45	40,00	19,00	41,00	83,53	52,00	19,00	29,00	59,6	55,00	19,00	26,00	53,09	58,00	19,00	23,00	48,11	59,00	20,00	21,00	43,56
46	60,00	13,00	27,00	95,88	67,00	14,00	18,00	65,15	69,00	15,00	16,00	57,32	71,00	15,00	14,00	50,32	72,00	15,00	12,00	43,43
47	24,00	69,00	6,00	100	24,00	69,00	6,00	98,74	24,00	69,00	6,00	97,79	24,00	70,00	6,00	94,44	24,00	70,00	6,00	89,2
48	11,00	3,00	86,00	19,92	16,00	3,00	82,00	20,45	18,00	3,00	79,00	19,63	20,00	3,00	76,00	19,13	22,00	4,00	74,00	18,5
49	59,00	10,00	32,00	94,56	68,00	11,00	21,00	64,58	71,00	11,00	18,00	55,24	73,00	11,00	16,00	48,61	75,00	11,00	14,00	41,73
50	49,00	41,00	10,00	99,49	50,00	41,00	9,00	93,12	50,00	41,00	9,00	89,39	50,00	42,00	8,00	84,6	50,00	42,00	8,00	77,4

Destaca-se que o panorama de eficiência no abastecimento mostrou que para as Regras 1, 2, 3 e 4 o percentual de reservatórios com eficiência menor que 90% foi de 80%, 92%, 94% e 100%, respectivamente. Valores expressivamente altos, ao passo que para o caso sem regras esse valor é de 58%, ainda alto, porém melhor que os demais casos. Percebe-se aumento de evaporação e vertimento em vários reservatórios, com percentuais bastante elevados, à medida que as regras se tornam mais restritivas. Outros trabalhos também apresentam altos percentuais de evaporação, mesmo quando não aplicadas regras de operação (Craig et al, 2005; Helfer, Lemkert e Zhang, 2012; Medeiros, 2016).

3.1. Representação das simulações em Diagrama Triangular

As Figuras de 5 a 9 apresentam os DTs com os resultados obtidos para as simulações sem regras operacionais e com as regras de 1 a 4, respectivamente. Inicialmente (Figura 5), nota-se que os reservatórios, devido às suas características físicas e hidrológicas, apresentam distribuição bastante heterogênea no diagrama. Desta forma, as respostas operativas tendem a

ser diversas em cada açude, mostrando como cada reservatório se comporta frente a uma determinada regra imposta.

Nas Figuras 5 a 9, à medida que as regras são mais restritivas para liberação de água e atendimento das demandas, há uma maior propensão à evaporação e vertimento. Isso pode ser verificado com os reservatórios presentes no grupo G4, por exemplo. Notamos que há uma mudança significativa no comportamento dos reservatórios com o aumento da restrição ao uso. Na situação sem restrição, os cinquenta reservatórios em média, liberavam (pVL) 27,5% do seu volume e evaporavam (pVE) 40%. Com o aumento da restrição, o volume liberado (pVL) foi reduzindo, ao passo que a perda de água para atmosfera, pelo volume evaporado, foi aumentando. Na situação mais restritiva (regra 4), o volume liberado médio dos cinquenta reservatórios correspondeu a 17,7%, enquanto a perda média por evaporação (pVE) dos reservatórios foi 50,4%.

Evidentemente que entre os 50 reservatórios, o aumento da restrição proporcionou diferentes impactos ao atendimento, com reservatórios com maior/menor perda por evaporação e/ou extravasamento. Contudo, isto não foi o aspecto dominante nos reservatórios da bacia dos rios Piancó-Piranhas-Açu, que teve como resultado médio ao aumento da restrição, um aumento de 10% das perdas por evaporação e 8% em extravasamento. Esses resultados evidenciam que para a área de estudo, restringir o uso da água faz com que grande parte da água economizada no atendimento da demanda se perca nos processos de evaporação e extravasamento. Nunes et al. (2016) em estudo realizado no Reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), na Paraíba, região semiárida, chegou a resultados de que reservatórios com baixa outorga, considerando sua capacidade de regularização, poderia fazer uso, em períodos de alta afluência, de parte da água que seria perdida por evaporação e/ou extravasamento, aumentando a garantia de abastecimento. Esta poderia ser uma indicação para o aumento das eficiências dos reservatórios em estudo, sendo necessário analisar o impacto gerado nesse caso.

Figura 5. Percentuais de regularização sem Regras (controle)

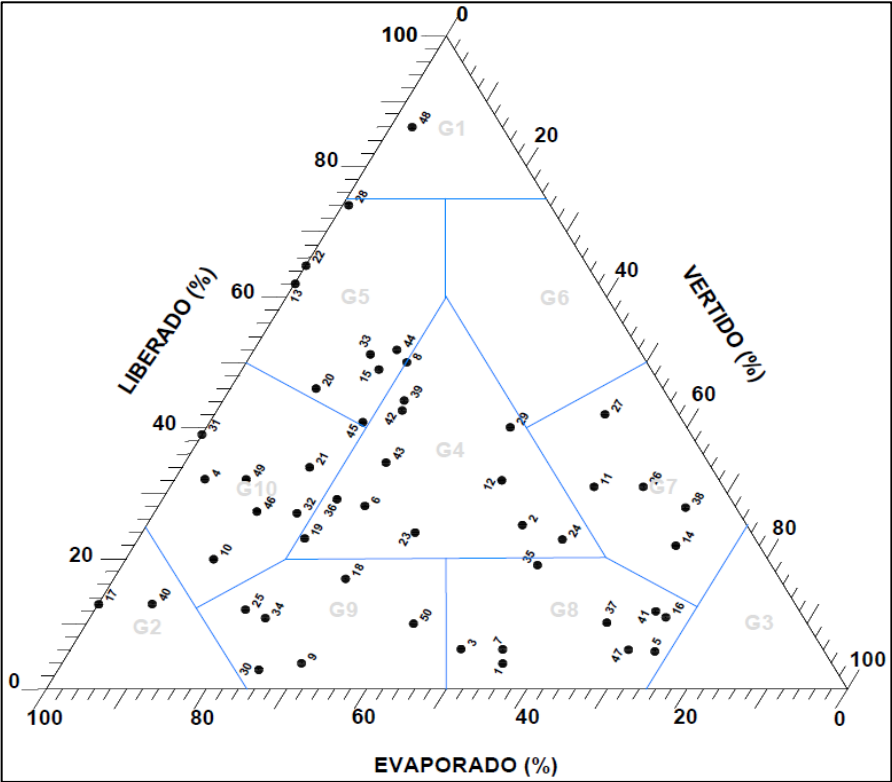


Figura 6. Percentuais de regularização aplicando Regra 1

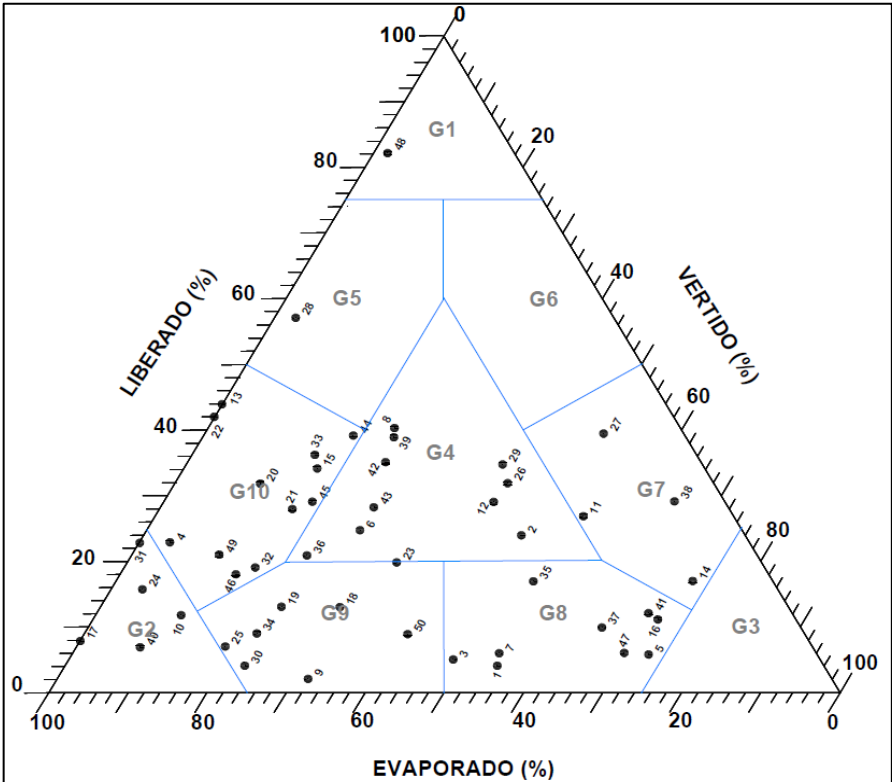


Figura 7. Percentuais de regularização aplicando Regra 2

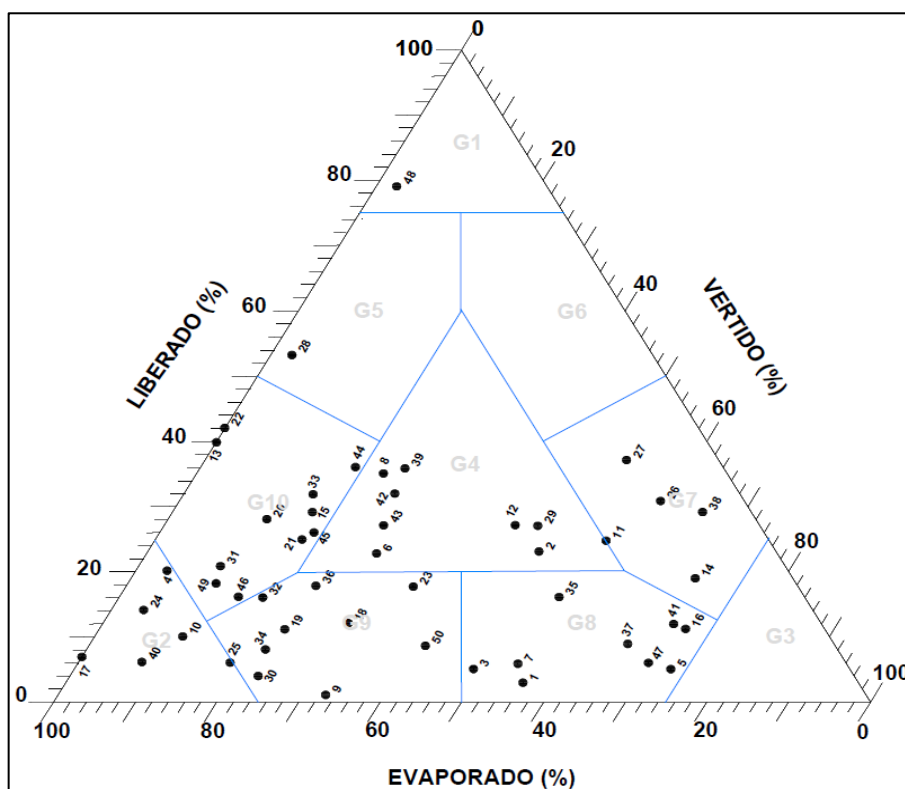


Figura 8. Percentuais de regularização aplicando Regra 3

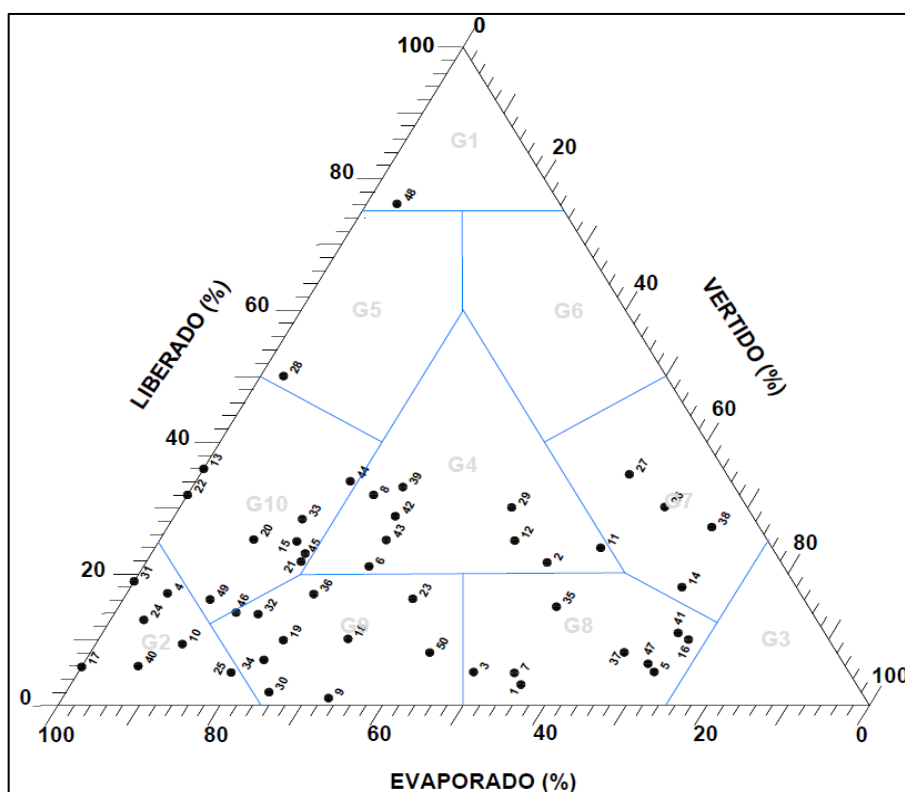
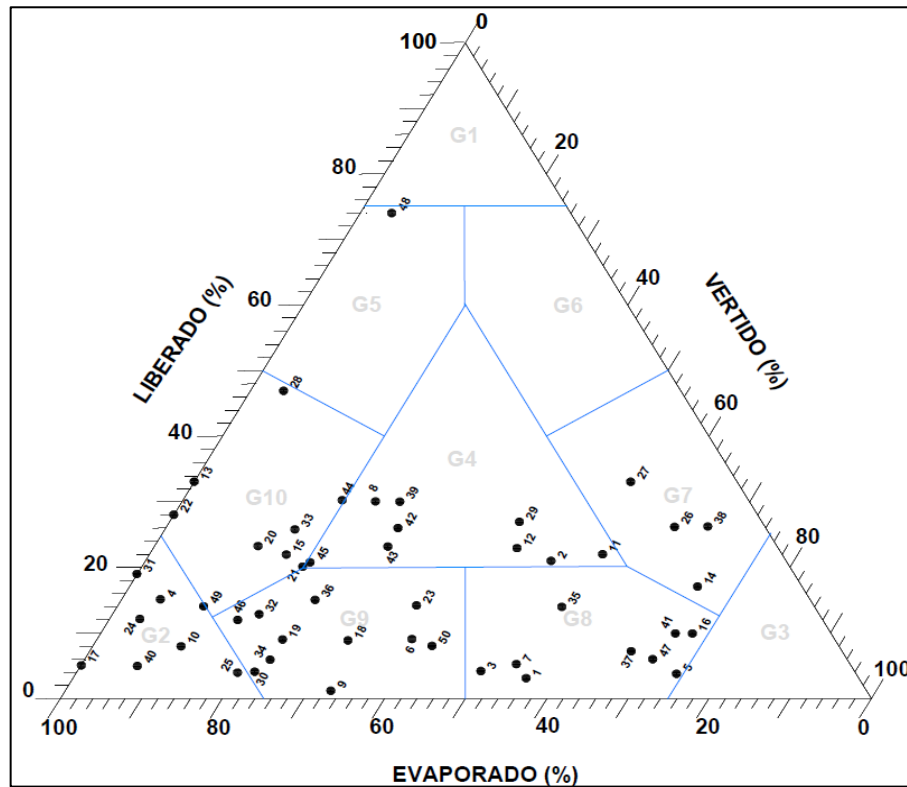


Figura 9. Percentuais de regularização aplicando Regra 4



3.2. Análise 1: características que definem a localização no DT

Como descrito anteriormente, foram definidos dois conjuntos de variáveis para obtenção das combinações lineares U e V:

Variável X: dados adimensionais π_1 , π_2 , π_3 , π_4 e π_5 ;

Variável Y: percentuais de volume evaporado, vertido e liberado.

Dada a dimensionalidade de resultados, recorreu-se à utilização de estatística multivariada, fazendo uso de análise de correlações canônicas (ACC). Verifica-se que o primeiro par de variáveis canônicas (U_1 e V_1) é o de maior representação em termos de variâncias totais. Para este par, obtivemos uma correlação de 82,87% com nível de significância $p < 0,001$. Os demais pares apresentaram, como esperado (Mingotti, 2005), correlações mais fracas, 42,18% (U_2 e V_2) e 32,86% (U_3 e V_3). Portanto, foi utilizado o primeiro par para proceder as análises.

Pode-se verificar que três adimensionais apresentaram maior correlação com as variáveis originais referentes à regularização dos reservatórios, tais adimensionais foram o da razão entre o volume máximo e vazão afluente (π_1), demanda e volume máximo (π_3) e fator de forma do reservatório (π_5), conforme valores mostrados na Tabela 3 (valores em negrito). Assim, as variáveis características mais relevantes, dentro das relações estabelecidas com os

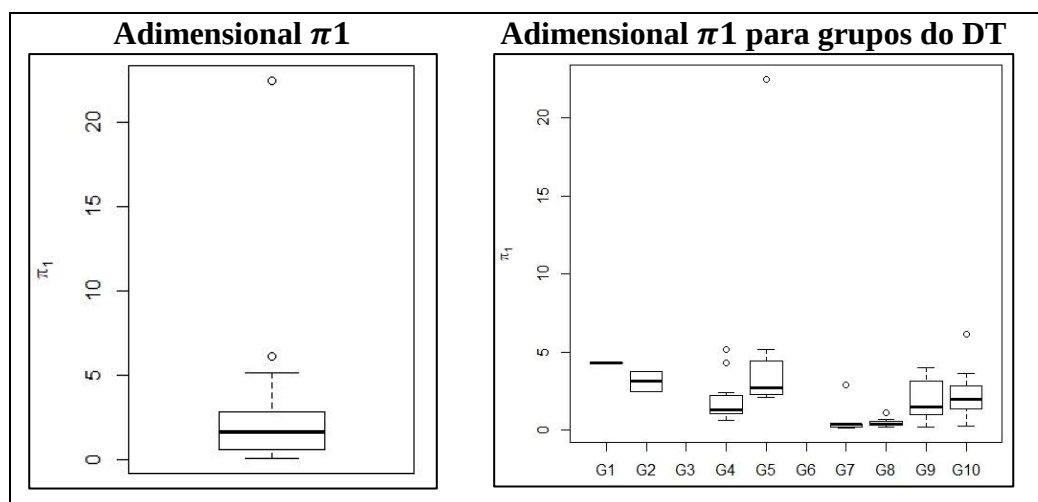
adimensionais, são VM, QMA, D e α , ou seja, variáveis de caráter hidrológico e morfométrico (Majidi, 2015; Costa, 2018).

Tabela 3. Cargas Canônicas e Cargas Canônicas Cruzadas para as variáveis da Análise 1.

Adimensional	VETOR X					
	CARGAS CANÔNICAS			CARGAS CANÔNICAS CRUZADAS		
	U_1	U_2	U_3	V_1	V_2	V_3
π_1	-0.8620837	0.48501730	-0.007894464	-0.7144103	0.31500312	-0.002594756
π_2	-0.2189898	0.89352266	0.381136530	-0.1814772	0.58031420	0.125272108
π_3	0.5635469	0.53425644	-0.626974742	0.4670123	0.34698236	-0.016668520
π_4	-0.1632206	0.04564207	-0.050713459	-0.1352613	0.02964396	-0.016668520
π_5	-0.2564069	-0.05457904	-0.118385145	-0.2124849	-0.0354473	-0.038910877

A fim de estudar o comportamento dos adimensionais com maior relevância dada a ACC, as Figuras de 10 a 12 mostram como ocorreu a variação de cada adimensional com os grupos dos DTs em relação ao balanço hídrico sem regras operativas.

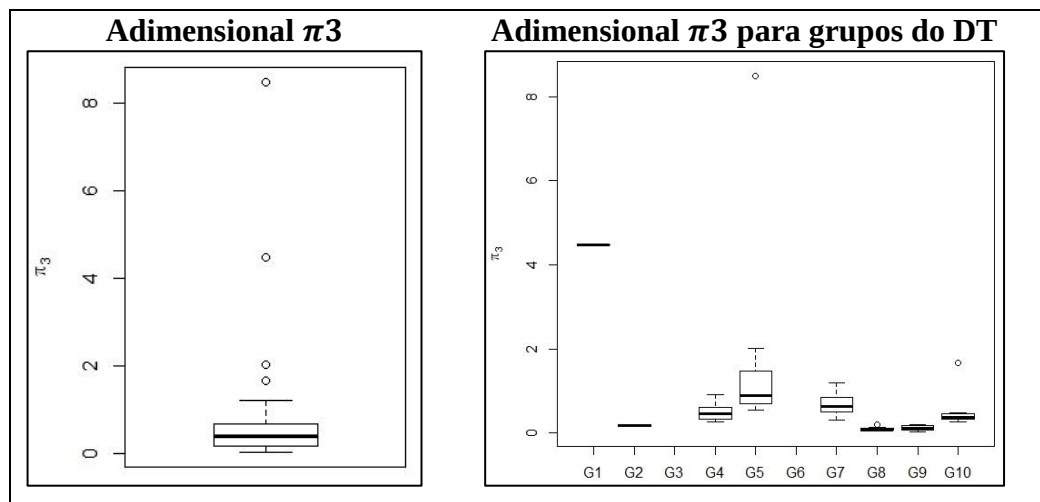
Figura 10. Relação entre o adimensional π_1 e os grupos do DT



De acordo com a Figura 10 pode-se observar que alguns grupos se destacam com maiores valores de π_1 , mas sem grandes diferenças entre eles. No entanto os grupos G7 e G8 representam valores inferiores aos demais, com π_1 entre 0,141 e 0,716 (valor mínimo e máximo, sem outliers). Nestes grupos, os volumes máximos dos reservatórios são de até 71,6% da vazão afluente média anual, logo estes reservatórios com baixo π_1 são propensos ao vertimento. Nestes reservatórios o menor percentual de vertimento é de 49% (reservatório 3)

Os grupos G3 e G6 não apresentaram reservatórios para classificação.

Figura 11. Relação entre o adimensional π_3 e os grupos do DT

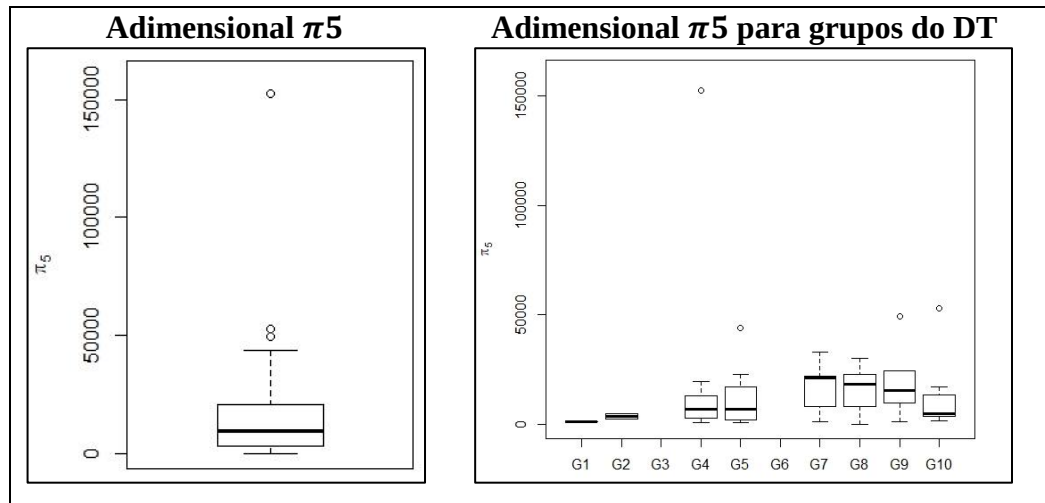


Comparando os resultados de π_3 (Figura 11) com a localização dos reservatórios (Figura 6) pode-se observar que os reservatórios localizados na base do diagrama, ou seja nos grupos G2, G8 e G9, apresentam baixa liberação para o atendimento da demanda (baixo % liberado) com maior valor de 19% de volume liberado (reservatório 30). Estes grupos são os que apresentam menores valores de π_3 , relação entre demanda e vazão média afluyente anual, variando de 0,042 a 0,206. Os reservatórios localizados nos grupos G4, G7 e G10, apresentam um aumento no percentual liberado por apresentarem maiores valores de π_3 . Já reservatórios localizados nos grupos G1 e G5, apresentam maiores valores de π_3 e do percentual de volume liberado para a demanda.

Vale aqui salientar que o fato dos reservatórios apresentarem menores valores de percentual liberado não quer dizer que a eficiência do atendimento da demanda seja baixa, apenas que em função do volume afluyente ao reservatório o uso é baixo, ou seja, poderia ser analisada, considerando a capacidade de regularização, a possibilidade de aumento da demanda nestes reservatórios, pois parte da água que não é utilizada para o atendimento da demanda se perde por vertimento ou evaporação.

Para o adimensional π_5 (Figura 12), que representa o fator de forma dos reservatórios, houve variação de 40,83 a 52.943,15. Não foi encontrado nenhum padrão na localização dos reservatórios no DT com os valores de fator de forma (π_5). Contudo, cabe ressaltar que para este adimensional, obtivemos uma carga canônica baixa, de -0,21, em comparação a π_1 e π_3 .

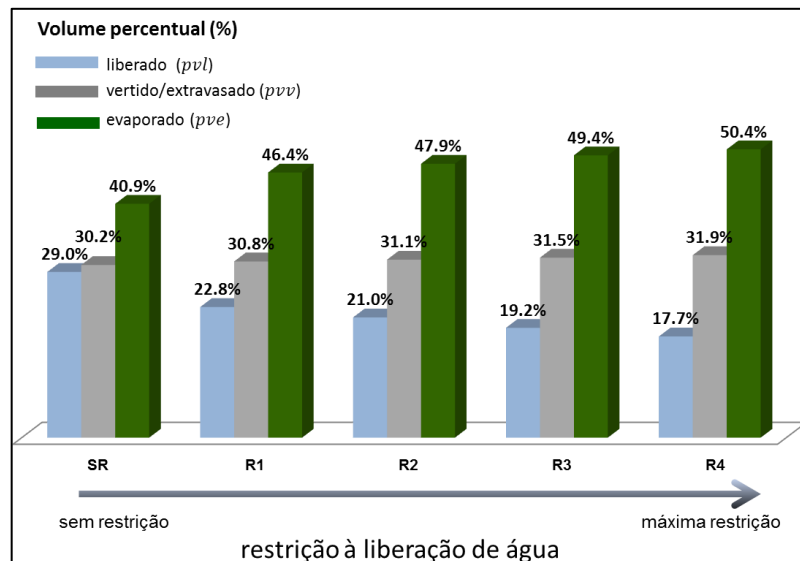
Figura 12. Relação entre o adimensional π_5 e os grupos do DT



3.3. Análise 2: Influência da localização no Diagrama Triangular na eficiência de operação dos reservatórios

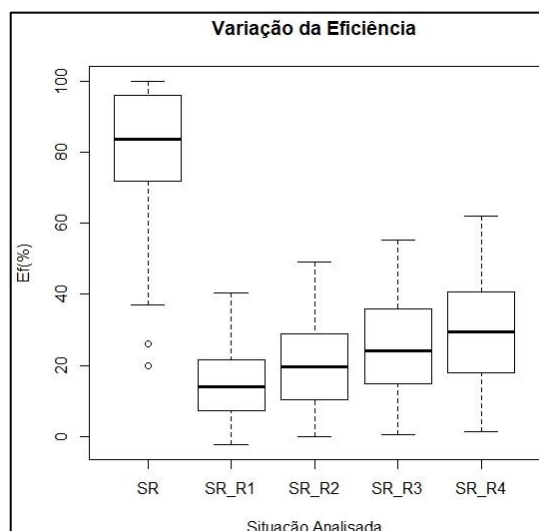
A Figura 13 apresenta os resultados dos percentuais médios de EVL considerando as diferentes regras de operação: sem restrição (SR) e com as restrições (R1 a R4) para os cinquenta reservatórios reportados na Tabela 2. De modo geral, observa-se que o aumento na restrição ao uso nem sempre significa uma garantia de maior eficiência no volume liberado. Em média, os reservatórios com o aumento da restrição apresentaram um aumento sistemático nas perdas, ora seja do volume evaporado, ora seja do volume vertido, que passaram de 40,9% e 30,2% na simulação sem restrição (SR) para 50,4% e 31,9% na simulação de maior restrição (R4), respectivamente. A soma do aumento destas perdas (evaporada e vertida) totalizam 11,2 % do volume dos reservatórios, que correspondeu aproximadamente à queda percentual do volume liberado, que passou de 29 para 17,7% na simulação sem restrição (SR) para simulação de maior restrição (R4), respectivamente.

Figura 13. Média entre os cinquenta reservatórios dos seus respectivos percentuais liberado (pVL), vertido (pVV) e evaporado (pVE) para as simulações sem restrição ao uso da água (SR) e demais restrições (R1, R2, R3 e R4).



Para analisar a influência dos volumes evaporados, vertidos e liberados (EVL) dos reservatórios nas suas eficiências (Ef , Eq. 6) foi construído o gráfico da Figura 14, no qual são apresentados os gráficos *boxplots* da eficiência (Ef), tendo como base a simulação sem regras (SR), e as diferenças entre a eficiência de SR e as demais simulações: R1, R2, R3 e R4. Sendo assim, a situação SR_R1 é a diferença entre a eficiência do reservatório sem a regra de operação e a eficiência com a aplicação da Regra 1, e assim por diante.

Figura 14. Variação da eficiência dos reservatórios (Ef , eq.6) para a simulação sem regra operativa (SR) e para diferença entre a simulação sem regra operativa (SR) menos a simulação com regra operativa 1 (SR_R1=SR-R1) a regra operativa 4 (SR_R4=SR-R4).



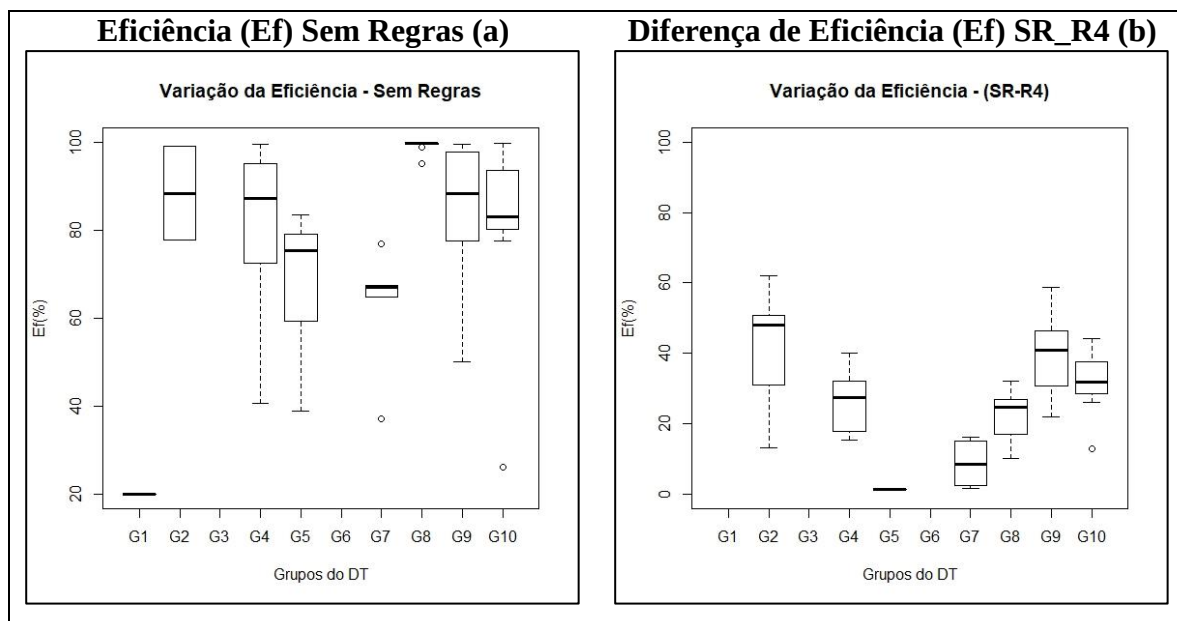
Notamos uma tendência de crescimento dessa diferença ao utilizar uma maior restrição ao uso da água dos açudes. Como visto através dos diagramas triangulares, essa mudança pode ser atribuída às perdas de água pelos processos de evaporação e extravasamento. Uma vez que o reservatório se mantém com níveis mais elevados, em função da economia de água que é feita pela restrição do atendimento das demandas, pela aplicação das regras de operação. Com níveis de água armazenada mais elevados, são mais propensos aos processos de vertimento e evaporação e a eficiência é afetada negativamente (perda de eficiência), pois o volume que seria liberado para atendimento global das demandas acaba sendo fornecido parcialmente, impactando o abastecimento.

As variações da eficiência para a simulação sem regra de operação (SR, figura 14) são de 19,92% a 100%; as reduções de eficiência entre a simulação sem restrição e a simulação com a 1ª restrição (SR_R1) apresentam valores entre -2,28% a 40,31%, neste caso, o valor da $Ef < 0$ indica que para a simulação com a Regra 1, houve reservatórios (26 – Pilões/PB, 48 – Bartolomeu I/PB e 38 – Condado/PB) com ganho de eficiência, em comparação com o controle (sem regras), no entanto esse ganho foi muito pequeno e não reflete a realidade do conjunto de resultados; já para o gráfico com SR_R2 a variação foi de 0,01% e 49,08%; em SR_R3 observamos uma variação de 0,64% a 55,40% e, por fim, no quarto gráfico (SR_R4) os reservatórios variaram a eficiência entre 1,42% a 61,96%.

Analisando os dados de eficiência com foco nos grupos estabelecidos nos diagramas triangulares (Figura 15) é possível notar através do gráfico 15a que o único reservatório que está presente no grupo G1 apresenta uma baixa eficiência, no entanto, o percentual liberado é alto. Isso pode ser explicado pelos valores elevados de π_2 e π_3 , sugerindo uma sobre exploração com valor de demanda muito alto para o volume do reservatório e vazão média afluente. Assim, apesar de estar localizado nesse grupo o reservatório apresenta baixa eficiência, pois boa parte da água afluente é utilizada no atendimento da demanda, mas não é suficiente para atendê-la de forma satisfatória. Deste modo, a relação EVL não é capaz de indicar a eficiência no atendimento à demanda, uma vez que um reservatório pode estar localizado na área 1 do DT (elevada liberação) e utilizar boa parte da água no atendimento da demanda de forma satisfatória, com elevada eficiência, o que não ocorreu no caso do reservatório 48, Condado/PB. Da mesma forma, um reservatório pode estar localizado nas áreas 2 e 3 (alta evaporação e alto vertimento, respectivamente), no entanto pode apresentar uma boa eficiência, podendo indicar uma superestimativa no dimensionamento do reservatório ou uma escolha inadequada de uma

área com alta relação área de espelho de água e volume de água acumulado. Demais combinações de EVL, outras localizações no DT, seguem o mesmo raciocínio.

Figura 15. Eficiência dos grupos do DT sem regras e com Regra 4



Na figura 15b observa-se que os grupos que apresentaram maiores reduções de eficiência entre as simulações Sem Regras e com a Regra 4 foram G2, G9 e G10. Estes grupos estão localizados em uma área do DT caracterizada como de elevada evaporação. O grupo G9, que apresenta a maior quantidade de reservatórios no diagrama, apresentou patamares de evaporação consideráveis, entre 49% (Carneiro/PB) e 74% (Cachoeira dos Cegos/PB) e vertimento entre 15% (Serra Vermelha I/PB) e 42% (Catolé I/PB). Portanto, pode-se afirmar que quanto maiores as perdas por evaporação maior é a perda de eficiência pela aplicação de regras mais restritivas em termos de economia de água, uma vez que houve aumento da evaporação e queda de eficiência.

O grupo G2 apresenta as maiores perdas por evaporação. Tal grupo também é o que evidenciou a maior variação na eficiência de operação, com valores que vão de 13,07% (Jatobá I/PB) a 61,96% (Queimadas/PB). Os percentuais de evaporação aplicando restrições maiores (R4) variaram de 76% (São Mamede/PB, ponto 25) a 95% (Zangarelhas/RN, ponto 17).

4. CONCLUSÃO

Com a localização dos reservatórios nos Diagramas Triangulares foi possível observar a heterogeneidade das respostas de comportamento dos fluxos hidrológicos principais presentes no processo de regularização dos reservatórios estudados. Dentro da bacia hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu, considerando os cenários de restrição impostos pelas regras estabelecidas para realização das simulações, utilizando-se o balanço hídrico, o panorama de eficiência no abastecimento mostrou que para as Regras 1, 2, 3 e 4 o percentual de reservatórios com eficiência menor que 90% foi de 80%, 92%, 94% e 100%, respectivamente. Valores expressivamente altos, ao passo que para o caso sem regras esse valor é de 58%, ainda alto, porém melhor que os resultados obtidos com as regras de operação propostas. No entanto, a adoção da operação sem regras pode levar a problemas de abastecimento, uma vez que em períodos de menor afluência o reservatório, devido às altas demandas, pode entrar em colapso mais rapidamente. O elevado número de reservatórios com eficiências de atendimento das suas demandas inadequadas está diretamente ligado às características físicas, de cada reservatório, à exploração dos mesmos, em função das suas demandas e às características hidrológicas inerentes às particularidades da região semiárida.

A aplicação de uma regra de operação única durante todo o período de simulação fez com que a economia de água, mesmo em períodos úmidos, quando os reservatórios estavam cheios, acarretasse em elevada evaporação e propensão ao vertimento, diminuindo a eficiência do reservatório no atendimento das demandas, uma vez que o volume excedente, ao invés de ser perdido, poderia ser utilizado para incremento no abastecimento. Sendo assim, a aplicação de uma regra única, sem distinção entre período úmido e seco, além do não uso de previsão de vazões afluentes, é considerada inadequada para a área de estudo.

Como observado, quanto maiores as perdas por evaporação maior é a perda de eficiência pela aplicação de regras mais restritivas em termos de economia de água, pois com a redução do volume armazenado em razão das perdas para a atmosfera, o reservatório pode entrar em uma regra mais restritiva para o uso da água e consequentemente aumentar o déficit do atendimento da demanda.

Reservatórios com menores valores nas relações entre volume máximo e vazão afluente tendem a apresentar um elevado percentual de vertimento e reservatórios com menores relações entre demanda e vazão afluente tendem a apresentar um baixo percentual de volume liberado para o atendimento da demanda.

Para trabalhos futuros, recomenda-se os estudos do efeito da aplicação de regras de operação de reservatórios nas suas eficiências através de uma abordagem que considere diferentes regras em função da sazonalidade das vazões afluentes (destacando períodos úmidos e secos) e o uso de previsão de dados hidrológicos.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu -Resumo Executivo. Brasília, 2016.

_____. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Anexo B. Brasília: ANA, 2017.

_____. *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios*. Brasília: ANA, 2017. Disponível em < <http://sar.ana.gov.br/>>. Acesso em junho de 2018.

ARAUJO, J. C. de. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. *RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: ESTUDOS E APLICAÇÕES*. Bahia: INSA; UFRB, 2012. p. 30-39.

ASSOULINE, S., K. NARKIS, D. Or (2011), *Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers*, Water Resour. Res., 47, W07506, doi:10.1029/2010WR009889.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em 20 outubro 2017.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. TUCCI, C. E. M. *Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão*. RBRH, Porto Alegre, vol. 13, n. 1, p. 181-196, 2008.

BUENO, E. de O., Mello, C.R. de, Alves, G.J., 2016. Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. Rbrh 21, 570–575. doi:10.1590/2318-0331.011616021

CAMPOS, J. N. B. Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005. 112p. Ceará, 2015.

CAMPOS, J. N. B. *Modeling the Yield-Evaporation-Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram*. Water Resour Manage (2010) 24: 3487.

- CELESTE, A. B.; BILLIB, M. The role of spill and evaporation in reservoir optimization models. *Water Resour Manage*, vol. 24, 0. 617-628, 2010. <https://10.1007/s11269-009-9468-4>.
- CHOONG, S.-M.; EL-SHAFIE, A. State-of-the-Art for Modelling Reservoir Inflows and Management Optimization. *Water Resour Manage*, vol. 29, p. 1267-1282, 2015. <https://10.1007/s11269-014-0872-z>.
- COSTA, E. M. B. de. A influência da morfometria dos reservatórios superficiais nas perdas por evaporação no semiárido potiguar. 2018. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- CRAIG, I.; GREEN, A.; SCOBIE, M.; SCHMIDT, E. *Controlling Evaporation Loss from Water Storages*. National Centre for Engineering in Agriculture University of Southern Queensland (NCEA), USQ, Toowoomba, 2005.
- FONTES, A. S.; OLIVEIRA, J. I. R.; MEDEIROS, Y. D. P. *A evaporação em açudes no semi-árido nordestino do Brasil e a gestão das águas*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003. Curitiba/PR. *Anais...* Curitiba/PR: 2003.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. *Análise de Correlação Canônica (Capítulo Adicional)*. *Análise Multivariada de Dados*. 6ª ed. Dados Eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HELPER, F.; LEMCKERT, C. ZHANG, H. *Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia*. *Journal of Hydrology*, vol. 475, p. 365-378, 2012.
- JENSEN, M.E., Dotan, A., Sanford, R., 2005. Penman-Monteith Estimates of Reservoir Evaporation. *ASCE* 1–24. doi:10.1061/40792(173)548
- JHA, D. K.; YORINO, N.; ZOKA, Y.; SASAKI, Y.; HAYASHI, Y.; IWATA, K.; OE, R. Incorporation penalty function to reduce spill in stochastic dynamic programming based reservoir operation of hydropower plants. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, p. 531-538, 2010. <https://10.1002/tee.20569>.
- LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M. *Métodos estatísticos multivariados*. São Paulo: Editora Saraiva. 288p, 2012.

- MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; FARID, A.; VAZIFEDOUST, M. *Estimating Evaporation from Lakes and Reservoirs under Limited Data Condition in Semi-Arid Region*. Water Resour Manage (2015) 29: 3711. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1025-8>.
- MARTÍNEZ-GRANADOS, D.; MAESTRE-VALERO, J.F.; CALATRAVA, J. et al. Water Resour Manage (2011) 25: 3153. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9850-x>.
- MCMAHON, T.A., ADELOYE, A.J., ZHOU, S. Understanding performance measures of reservoirs. Journal of Hydrology, v. 324, p. 359-382, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.030>.
- MEDEIROS, G. C. S. de. Metodologia de Avaliação da Seca Hidrológica Sob a Perspectiva da Demanda Hídrica. 2016. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte, Editora UFMG, 297p., 2005.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. *RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: ESTUDOS E APLICAÇÕES*. Bahia: INSA; UFRB, 2012. p. 2-24.
- MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. de.; SILVA, B. B. da.; OLIVEIRA, L. M. M. de. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.2, 181-191, 2013.
- NUNES, T. H. C.; GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C. *Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges*. RBRH, Porto Alegre, vol. 21, n. 3, p. 493-501, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011615146>.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SCHOUPS, G.; ADDAMSN, C. L.; MINJARES, J. L.; GORELICK, S.M. Reliable conjunctive use rules for sustainable irrigated agriculture and reservoir spill control. Water Resources Research, vol. 42, 2006. <https://10.1029/2006WR005007>.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH). Situação Volumétrica de Reservatórios do RN. 2015. Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/Monitoramento>>. Acesso em abril de 2018.

SHEPARD, F.P. *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*. Journal of Sedimentary Petrology, v. 24, p. 151-158. 1954.

SHIH, J-S.; REVELLE, C. Water supply operations during drought: a discrete hedging rule. European Journal of Operational Research, vol. 82, p. 163-175, 1995.

SHUTTLEWORTH, W.J. *Terrestrial Hydrometeorology*. 2012. DOI:10.1002/9781119951933.

SILANS, A. M. B. P. *Redução da Evaporação de Açudes – O Estado da Arte*. RBRH, Porto Alegre, vol. 8, n. 2, p. 101-109, 2003. <https://10.21168/rbrh.v8n2.p101-109>.

TU, M-Y.; HSU, N-S.; YEH, W. W.-G. *Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules*. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 129, p. 86-97, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:2\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(86)).

WURBS, R. A.; AYALA, R. A. *Reservoir Evaporation in Texas USA*. Journal of Hydrology, vol. 510, p. 1-9, 2014.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. *Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013)*. Int. J. Climatol, 2016. Doi: 10.1002/joc.4518.

ZHANG, W.; LIU, P.; WANG, H.; CHEN, J.; LEI, X.; FENG, M. *Reservoir adaptive operating rules based on both of historical streamflow and future projections*. Journal of Hydrology, vol. 553, p. 691-707, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.031>.