

Classificação morfométrica de reservatórios: a proposta do volume de geratriz raio equivalente

Morphometric classification of reservoirs: the proposal of the radius equivalent geratrix volume

• **Data de entrada:**
21/12/2022


• **Data de aprovação:**
02/01/2023

Jefferson Sousa Rocha^{1*} | José Nilson Bezerra Campos² | Renata Mendes Luna² |
Ticiane Marinho de Carvalho Studart² | Iran Eduardo Lima Neto²


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.067>


ORCID ID

Rocha JS  <https://orcid.org/0000-0002-4079-033X>

Campos JNB  <https://orcid.org/0000-0001-5924-4753>

Luna RM  <https://orcid.org/0000-0002-5346-5069>

Studart TMC  <https://orcid.org/0000-0001-9317-3645>

Lima Neto IE  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>

Resumo

Baseado na metodologia de Håkanson, neste artigo trabalhou-se a representação de reservatório por meio de figura geométrica, na qual as áreas dos lagos são transformadas em círculos, criados com uma geratriz curva irregular. A curva é ajustada pelo método dos mínimos quadrados a uma equação do tipo $R = a.H^b$, sendo “R” o raio da geratriz na altura de água “H”, enquanto “a” e “b” são os parâmetros ajustados. A equação foi utilizada para a classificação de 148 reservatórios no estado do Ceará. A classificação de Håkanson com o parâmetro de forma do volume raio equivalente mostrou-se altamente eficiente e tem a objetividade como vantagem. Tais atributos possuem grande relevância em regiões com alta densidade de reservatórios, tornando o método simples e prático. A classificação da geratriz raio equivalente mostra-se como alternativa para futuras aplicações em estudos hidrológicos e limnológicos, em regiões tropicais ou em áreas mais abrangentes que as estudadas por Håkanson.

Palavras-chave: Classificação. Hidrologia. Morfometria. Reservatório.

Abstract

In this article, the reservoir is represented by a geometric figure in which the areas of the lakes are transformed into circles, created with an irregular curved generatrix. The curve is fitted by the least squares method to an equation of the type $R = a.H^b$, where “R” is the radius of the generatrix at the water height “H”, while “a” and “b” are the adjusted parameters. The equation is used for the hypsometric classification of 148 reservoirs in the state of Ceará. The Håkanson classification with the equivalent radius volume shape parameter proved to be highly efficient and has objectivity as an advantage. Such attributes have great relevance in regions with high density of reservoirs, making the method simple and practical. The classification of the equivalent radius generatrix is shown as an alternative for future applications in hydrological and limnological studies.

Keywords: Classification. Dam. Hydrology. Morphometry.

¹ Faculdade Luciano Feijão - Sobral - Ceará - Brasil.

² Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autor correspondente:** jeffersonsrocha@outlook.com.

1 INTRODUÇÃO

A forma de um reservatório, ou lago, desempenha um papel de grande importância em muitos processos hidrológicos e limnológicos, como regularização de vazões, amortecimento de cheias, distribuição de sedimentos no leito e dinâmica da qualidade da água (HÅKANSON, 2005; SOBEK et al., 2011; GONÇALVES et al., 2016; ROCHA e LIMA NETO, 2021). Souza et al. (2017) propuseram um índice que incluía os parâmetros morfológicos da bacia para o dimensionamento e verificação de vertedouros de reservatório e concluíram que o amortecimento da inundação aumenta com o fator de forma do reservatório. Campos et al. (2018) presumiram um formato padrão dos reservatórios como cônico invertido para constatarem a grande influência da sedimentação no balanço entre vazão regularizada, sangria e perdas por evaporação em reservatórios do Ceará. Além disso, observa-se uma escassez de dados sobre as informações das geometrias dos reservatórios localizados no semiárido brasileiro, os quais são os principais meios de obtenção de água no período seco nessas regiões (NASCIMENTO et al., 2003). Kim et al. (2022) analisaram, por meio de características morfológicas e curvas hipsométricas, 10 reservatórios localizados na Coreia do Sul, investigando as possíveis causas de 2 desses reservatórios terem colapsado. Após estudos, concluíram que ambos os reservatórios colapsados possuíam lâmina d'água elevada e uma grande área em comparação com os demais reservatórios. Usando os conceitos da curva hipsométrica, também concluíram que os reservatórios colapsados estavam sujeitos a intensa erosão devido ao seu envelhecimento, o que demonstra a importância das características morfológicas e da curva hipsométrica como ferramentas auxiliares na identificação de potenciais colapsos de reservatórios. Nesse contexto, a sistematização de formas de reservatórios torna-se uma ferramenta importante para muitos estudos hidrológicos, principalmente quando se trata de regiões com alta densidade de reservatórios, as

quais necessitam de métodos práticos para classificar morfometricamente seus reservatórios.

Além dos aspectos hidrológicos, a qualidade da água e o acúmulo de sedimentos são influenciados fortemente pelo formato do reservatório. Park et al. (2014) analisaram os aspectos morfológicos e de qualidade para 302 reservatórios distribuídos na Coreia do Sul e concluíram que a qualidade da água em ecossistemas aquáticos possui grande relação com o tipo de cobertura do solo da bacia hidrográfica e com a hidrogeomorfometria dos reservatórios. Taveira et al. (2020) revisaram trabalhos sobre a influência do assoreamento sobre regiões de densa rede de reservatórios com o intuito de analisar as mudanças decorrentes do processo de acúmulo de sedimentos na capacidade do reservatório e nas características físicas, químicas e biológicas. Os pesquisadores destacaram a importância dos estudos sedimentológicos, principalmente na análise do armazenamento em reservatórios e no gerenciamento dos recursos hídricos de modo sustentável. Além disso, esses pesquisadores apresentaram os altos valores de taxas de sedimentação e suas mudanças ao longo da vida operacional dos reservatórios, comprovando que há uma necessidade cada vez maior nos estudos de sedimentação e na morfologia dos reservatórios para futuros projetos hídricos.

Uma classificação pioneira das formas de reservatórios e lagos e suas interferências nos processos ecológicos é devida a Håkanson (1977). Essa pesquisa foi desenvolvida a partir de estudos estatísticos de dados de 48 lagos na Suécia. Håkanson utilizou a curva hipsográfica $P \times A$ (porcentagem da profundidade do lago \times porcentagem da área do lago) e definiu cinco regiões, nas quais se poderia categorizar os lagos: muito convexo (MCx), convexo (Cx), ligeiramente convexo (LCx), linear (L) e côncavo (C). Além das especificidades do semiárido, destaca-se também que o estudo feito por Håkanson utilizou lagos naturais; no

caso deste trabalho, os reservatórios são artificiais e a escolha do local para a construção envolve a participação dos projetistas, em função dos objetivos da obra (CAMPOS, 2015), não sendo “escolhas” da própria natureza.

O método de Håkanson consistiu em traçar a curva hipsográfica (Profundidade x Área) e ve-

rificar qual região do diagrama melhor acomodaria a curva traçada, referente ao reservatório analisado (Fig. 1). Algumas vezes, a curva pode passar por mais de uma região, como para o reservatório mostrado no diagrama (Arneiroz II); nesse caso, cabe ao analista decidir a classe do reservatório, o que insere alguma subjetividade (FOOTE e NIE, 2016).

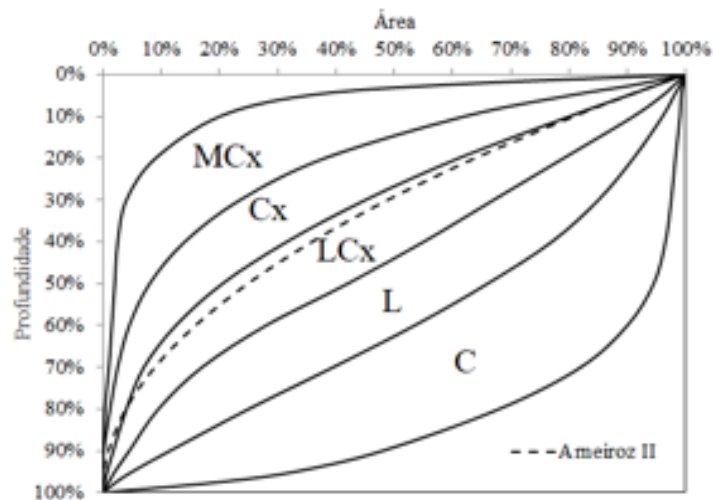


Figura 1 - Curvas hipsográficas relativas (profundidade x área) para as formas de lagos (adaptado de Håkanson, 1977).

Posteriormente, Håkanson (2004) desenvolveu outro método. Para esta mesma classificação, agora adimensional, utilizando o “volume desenvolvido” (V_d), definido pela seguinte Eq. 1, no qual D é o volume do lago e $D_{máx}$ é o volume do cone de área da base igual à área máxima e altura máxima do lago:

$$V_d = \frac{3D}{D_{máx}} \quad (1)$$

Os limites entre classes estão na Tabela 1. O valor $V_d = 1.0$, que corresponde ao cone reto, está no limite entre as classes ligeiramente convexo e linear. O estudo não apresenta como as classes do método gráfico foram reproduzidas nos limites de V_d . De fato, a Eq. 1 pode ser escrita em função

de dois pontos das tabelas cota x área x volume de um reservatório, onde $H_{máx}$ é a altura máxima e $A_{máx}$ é a área máxima:

$$V_d = \frac{3D}{(1/3)\pi H_{máx} A_{máx}} \quad (2)$$

Tabela 1 - Classificação de Håkanson com o volume desenvolvido (V_d) como parâmetro de referência.

Forma do lago	Nome da classe	V_d
Muito convexo	VCx	0,05-0,33
Convexo	Cx	0,33-0,67
Ligeiramente convexo	SCx	0,67-1,00
Linear	L	1,00 - 1,33
Côncavo	C	>1,33

A representação das curvas hipsográficas (cota x volume) por equações matemáticas é muito utili-

zada em estudos hidrológicos, especialmente em dimensionamento de reservatórios, devido ao formato das mesmas estar associado às perdas por evaporação, aos processos sedimentológicos e à dinâmica de qualidade da água (RAHMANIAN e BANIHASHEMI, 2011).

As simplificações para essa representação são particularmente importantes para o semiárido brasileiro devido à existência de densas redes de reservatórios cuja ocorrência se deve principalmente às incertezas temporal e espacial das precipitações, gerando a densa rede de armazenamento de água, por meio dos reservatórios artificiais devido ao aumento da demanda hídrica nessas regiões. À medida que o número de reservatórios aumenta, a complexidade da modelagem hidrológica também cresce; dessa forma, há diversos trabalhos voltados a solucionar essa complexidade. Rabelo et al. (2021) aplicaram o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para uma rede de reservatórios densa e obtiveram resultados aceitáveis com relação aos processos hidrológicos na bacia analisada, embora existissem incertezas nos dados de entrada. Lima Neto et al. (2011) investigaram um período de 25 anos a distribuição de sedimentos numa bacia hidrográfica do Ceará com mais de 4000 (quatro mil) reservatórios e concluíram que a existência dos reservatórios não estratégicos ($< 50 \text{ hm}^3$) contribui para a retenção dos sedimentos na rede e impacta, assim, positivamente, a disponibilidade hídrica da região, já que a ausência desses reservatórios dobraria o assoreamento nos reservatórios estratégicos ($> 50 \text{ hm}^3$).

Observa-se, assim, a importância de conhecer o formato do reservatório, especialmente em áreas com certas especificidades, como é o semiárido, com uma realidade geomorfométrica diferente da aplicada na classificação de Håkanson.

Desta forma, este trabalho propõe uma nova classificação, baseada na metodologia de Håkanson,

adaptando-a para reservatórios de barragens do semiárido, região esta com grande densidade de reservatórios, onde há, além das condições geomorfológicas, a interferência humana na definição do local onde construir a barragem.

Para isto, foi analisada uma forma de reservatório que melhor se adequasse à região em estudo, o formato de geratriz raio-equivalente, para: 1) propor uma nova classificação de formas dos reservatórios, aplicando-se a curva do Volume de Geratriz Raio Equivalente (VGRE); 2) classificar os reservatórios, sem necessidade das curvas hipsográficas, por meio de uma equação para uma amostra de 148 reservatórios no estado do Ceará com uma faixa de variação de capacidade entre $0,73 \text{ hm}^3$ e $43769,95 \text{ hm}^3$.

O método proposto baseia-se em transformar a área do lago, em todas as suas cotas, para círculos de mesma superfície. No plano cartesiano $R \times H$ (Raio do círculo versus Cota da superfície de água), acha-se a equação de regressão $H = a.R^b$. A equação representa um prismoide, utilizando-se a curva geratriz do Volume de Geratriz Raio Equivalente (VGRE).

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Com a construção de aproximadamente 25000 a 30000 pequenos e médios reservatórios com capacidade de acumulação variando de 10 a 4500 hm^3 e devido à grande variabilidade, sazonal, interanual e espacial, das chuvas no estado do Ceará, foram construídos muitos açudes ao longo do tempo, com a finalidade de estocar e/ou transportar a água nos períodos e para os locais em situações de escassez, visto que o Estado possui uma área de $148886,3 \text{ km}^2$, sendo mais de 98% do seu território inserido na região semiárida (CAMPOS e STUDART, 2008; CAMPOS et al., 2016; BRASIL, 2017; IPECE, 2019). Essa estraté-

gia de ação, entretanto, não consegue assegurar a disponibilidade hídrica para os seus múltiplos fins, pois agregado às variações das chuvas ainda se tem altas taxas de evaporação na região (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2012). Com a alta densidade de reservatórios observa-se a necessidade de uma gestão eficiente nas bacias hidrográficas, não apenas para os aspectos operacionais dessas infraestruturas como também para o gerenciamento de conflitos existentes pelo uso dessa água.

As características morfológicas dos reservatórios são influenciadas pelas características físicas do território cearense em cuja geografia predominam as superfícies aplainadas da Depressão Sertaneja (FUNCEME, 2009), invariavelmente em

cotas baixas, cujo piso situa-se entre 40 e 350 metros com montes rochosos isolados (inselbergs) (BRANDÃO e FREITAS, 2014).

As maiores altitudes no Estado são da ordem de 1100 m. O estudo procurou retratar a morfologia dos reservatórios distribuídos em todo o território, com dados disponíveis para sua realização, conforme Fig. 2.

2.2 Coleta e análise dos dados

Foram coletados dados das tabelas Cota x Área x Volume de 148 reservatórios dos registros da Companhia de Gestão de Água do Estado do Ceará (COGERH). Os reservatórios estão localizados em todo o território do estado do Ceará (Fig. 2).



Figura 2 - Mapa de localização dos reservatórios no estado do Ceará / Brasil.

Na Tabela 2 são apresentadas as classes dos reservatórios estudados segundo a capacidade máxima de acumulação de acordo com as curvas de Cota, Área e Volume (CAV) disponibilizadas pela COGERH. A maior parte dos reservatórios estudados neste tra-

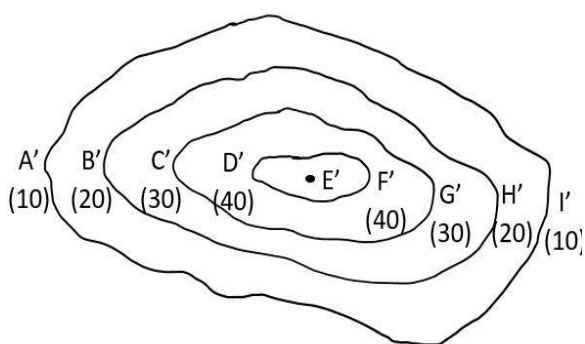
balho possui capacidade volumétrica média e grande, indicando o grande impacto que a nova classificação tem sobre os reservatórios, tendo em vista as implicações sedimentológicas no armazenamento, que garantem a segurança hídrica no Ceará.

Tabela 2 - Análise da capacidade volumétrica, baseada na CAV, dos reservatórios analisados.

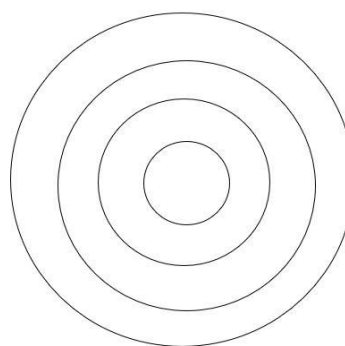
Classe	Quantidade	V_d
Micro (< 2 hm ³)	3	0.05-0.33
Pequeno (≥ 2 e < 10 hm ³)	34	0.33-0.67
Médio (≥ 10 e < 50 hm ³)	50	0.67-1.00
Grande (≥ 50 e < 200 hm ³)	40	1.00-1.33
Estratégico (≥ 200 hm ³)	21	>1.33

2.3 Volume com Geratriz Raio Equivalente (VGRE)

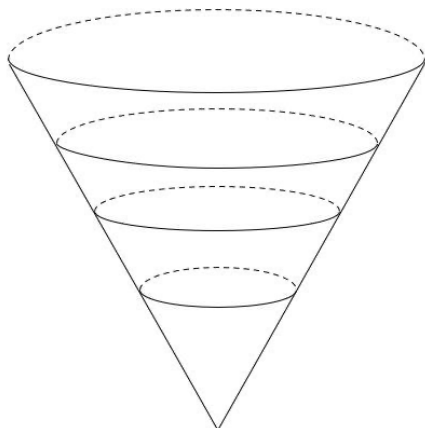
Para representar a forma de um reservatório por equações matemáticas e descrever as relações cota, área e volume (CAV), pode-se utilizar uma figura geométrica, um cone, com Volume com Geratriz Raio Equivalente (VGRE). O desenvolvimento do VGRE é feito em quatro etapas, como descritas na Fig. 3. Destaca-se que as cotas dos níveis da água (H) são medidas em referência ao ponto mais profundo do reservatório.



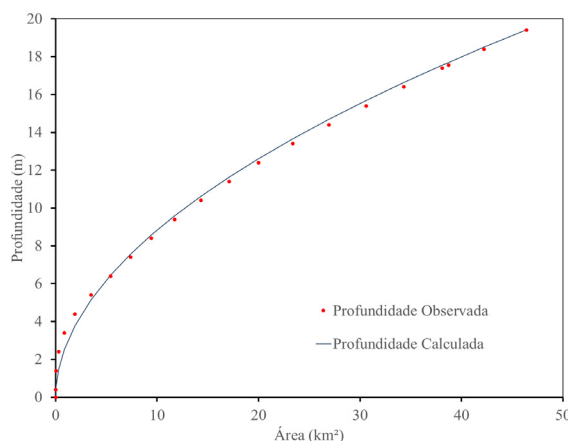
a) Curvas de nível de um reservatório fictício.



b) Círculos concêntricos para representar as curvas de nível do reservatório.



c) Formação do volume formado pelos círculos sobrepostos em suas cotas.



d) VGRE formado pela rotação da curva ajustada externa em torno do eixo central do volume.

Figura 3 - Resumo das etapas para a construção do Volume de Geratriz Raio Equivalente (VGRE).

Etapa 1: A primeira etapa consiste em transformar as áreas do lago, obtidas da tabela cota x área, em círculos na cota H. O raio do círculo é

obtido pela Eq. 3, onde A(H) é a área do reservatório e o R(H) é o raio de um círculo com a mesma área do reservatório:

$$R(H) = \sqrt{\frac{A(H)}{\pi}} \quad (3)$$

Etapa 2: O ajuste da equação da diretriz do VGRE - No plano cartesiano, tem-se H nas ordenadas e R nas abcissas. Utilizando-se o método dos mínimos quadrados, traça-se a equação de regressão não linear, de acordo com a Eq. 4, onde a é o parâmetro de escala VGRE, b é o coeficiente de forma, H é a altura da água em relação ao ponto mais profundo e R é o raio do VGRE obtido pelo ajuste:

$$H = a R^b \quad (4)$$

Etapa 3: Cria-se a H x R(H). Nesta etapa, a tabela cota x área passa a ser substituída pela tabela cota x R(H), a qual para avaliação de diversos fenômenos, como a capacidade de regularização de vazões, tem o mesmo comportamento que a curva cota x área original.

A relação área em função de H tem a seguinte forma:

$$A(H) = \frac{\pi H^{\frac{2}{b}}}{\frac{2}{a^{\frac{2}{b}}}} \quad (5)$$

A equação cota x volume é obtida pela integração da função A(H):

$$V(H) = \int_0^H \pi/a^{2/b} \cdot h^{2/b} dh$$

$$V(H) = \pi/a^{2/b} \int_0^H h^{2/b} dh$$

$$V(H) = \left(\frac{\pi}{a^{\frac{2}{b}}}\right) \frac{H^{\frac{2}{b}+1}}{\frac{2}{b} + 1} \quad (6)$$

2.4 Classificação de reservatórios segundo o método Ha Håkanson e VGRE

Segundo o método de Håkanson, a classe de um lago é definida traçando-se a curva hipsográfica H x A do reservatório e verificando-se onde se enquadraria, conforme o diagrama de Håkanson (Fig. 1). Por vezes, a curva hipsográfica passa por mais de uma classe, cabendo ao analista escolher qual a classe dominante, o que pode tornar a classificação bastante subjetiva.

No método VGRE, inicialmente busca-se qual o valor do coeficiente de forma que mais aproxima a curva de Håkanson à curva do VGRE. Constrói-se, assim, um diagrama alternativo (Fig. 4b). Para analisar e testar o método, traçam-se as curvas Profundidade x Área dos reservatórios em ambos os diagramas e comparam-se os resultados para as duas classificações, Håkanson e VGRE. O número de acertos define a eficiência do método alternativo. Destacam-se na Fig. 4 duas observações: 1) a curva tracejada representa a curva para o reservatório Arneiroz II, o qual foi um dos açudes monitorados, 2) as curvas totalmente preenchidas delimitam os limites das classificações hipsométricas propostas.

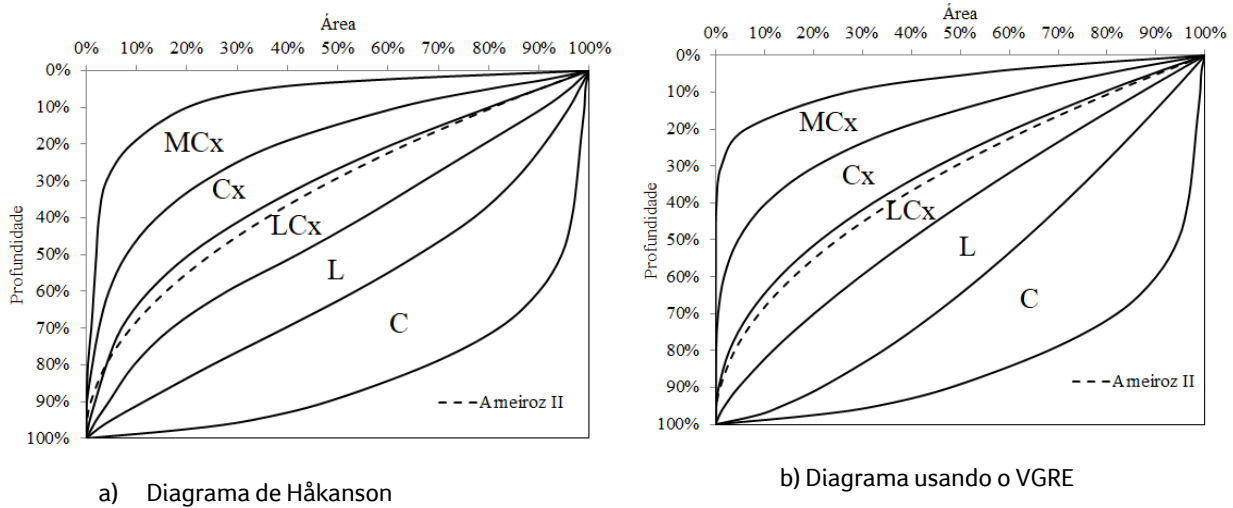


Figura 4 - Diagrama de Håkanson e Diagrama Alternativo, a partir do VGRE.

2.5 Classificação de um reservatório pelo VGRE

O VGRE proposto como uma alternativa para classificar as formas de reservatórios foi utilizado para uma amostra de 148 reservatórios, cuja finalidade são os estudos hidrológicos. Observa-se que as formas desses reservatórios decorrem não somente das condições geomorfológicas do terreno mas também da escolha do projetista da barragem. Ao eleger um local para o barramento, há dois pontos importantes a serem considerados: a capacidade de acumulação de águas e a eficiência hidrológica, a qual é relacionada às perdas por evaporação (CAMPOS et al., 2003).

A forma do reservatório apresenta grande influência nas perdas por evaporação e, em consequência, na eficiência hidrológica dos mesmos (ZHAO e GAO, 2019). Considerando reservatório de iguais volumes, os côncavos são os mais eficientes, pois possuem as menores perdas por evaporação, enquanto os convexos são os menos eficientes. O linear possui uma posição intermediária entre os dois extremos.

A forma cônica apresenta coeficiente b igual 1, isto é, o raio equivalente é relacionado linearmente à cota da água do lago. Os valores de $b > 1$ apresentam diretrizes de forma convexa (simi-

lar à forma da letra “V”), enquanto reservatórios com $b < 1$ apresentam diretrizes côncavas (similar à forma da letra “U”).

Por outro lado, considerando reservatórios de mesma profundidade, os convexos apresentam maior capacidade de acumulação relativamente aos côncavos. O reservatório cônico fica em um ponto intermediário. Dessa forma, os reservatórios cônicos apresentam um equilíbrio entre a eficiência de acumulação e a eficiência hidrológica (menores perdas por evaporação).

A forma cônica do reservatório foi utilizada no método do Diagrama Triangular de Regularização para dimensionamento de reservatórios no semiárido brasileiro (CAMPOS, 2010). O método foi desenvolvido para reservatórios em rios intermitentes sujeitos a alta evaporação, como os utilizados no presente estudo.

Dessa forma, no método do VGRE, consideram-se três grandes classes: côncavo, linear e convexo. A classe linear, referente à forma do cone reto, representa o equilíbrio entre eficiência de acumulação (volume por unidade de altura da água) e eficiência hidrológica (menores perdas por evaporação por volume acumulado). A Tabela 3 apresenta a classificação completa, a qual foi

acrescentada, além das três grandes classes, as classes “Muito convexo”, “Ligeiramente convexo” e “Ligeiramente côncavo”.

Tabela 3 - Formas dos reservatórios propostas para os reservatórios.

Forma do lago	Nome da classe
Muito convexo	MCx
Convexo	Cx
Ligeiramente convexo	LCx
Linear	L
Côncavo	C
Ligeiramente côncavo	LC

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O artigo desenvolve o prismoide equivalente, o qual é utilizado para a formulação de duas metodologias aplicadas à classificação de formas de reservatórios: 1) a classificação de Håkanson utilizando-se as equações dos prismoides, 2) uma nova proposta de classificação, voltada, principalmente, para estudos hidrológicos e sedimentológicos em regiões com alta densidade de reservatórios e clima semiárido com base unicamente na equação do prismoide de raio equivalente.

3.1 Os parâmetros de forma nas equações do VGRE

As equações do VGRE foram desenvolvidas em planilhas eletrônicas. Foram calculados os parâmetros “a” (parâmetro de escala) e “b” (parâmetro de forma), o qual representa a abertura da bacia hidráulica do reservatório. O parâmetro de escala não interfere na curva hipsográfica (profundidade x área), logo não interfere na classificação.

A Fig. 5 mostra o histograma do parâmetro “b”. A maioria dos valores de “b”, para os reservatórios analisados, concentra-se no entorno do valor 1.0, o que representa a forma do cone reto invertido, muito aplicada em estudos hidrológicos de reservatórios. Observa-se assimetria com uma acentuada cauda à direita. Os valores de $b > 2$ referem-se a reservatórios altamente convexas.

Os reservatórios com acentuada assimetria estão associados àqueles com áreas de superfícies mais extensas, e, em consequência, com elevadas perdas por evaporação. De acordo com Mekonnen et al. (2012), a importância da variação da área superficial de um reservatório no volume evaporado pode ser maior do que a própria mudança de características climáticas.

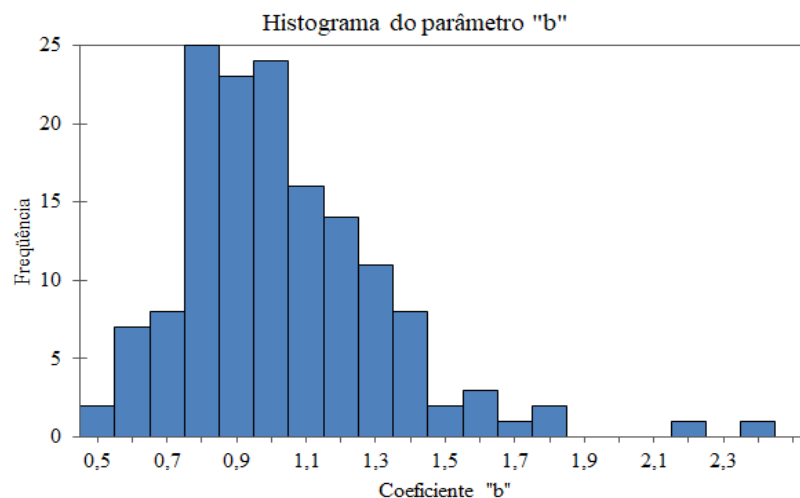


Figura 5 - Histograma do parâmetro de forma (b) em 148 reservatórios do estado do Ceará.

Por outro lado, observa-se uma concentração de reservatórios com valores de b próximos a 1, acima de 0,8 e menores que 1,2. São reservatórios cuja forma se aproxima do cone reto. Esse tipo de reservatório apresenta o ponto de equilíbrio entre a eficiência hidrológica e a eficiência de acumulação por unidade de altura de água. Essa concentração de valores reflete as preferências dos projetistas de barragens da região por reservatórios de formato próximo ao cone reto e que esse tipo de morfologia está disponível em boa quantidade na região.

Os reservatórios côncavos são relativamente poucos, embora tenham alguma atratividade para os projetistas de barragens. Na verdade, estão associados a formas de cânions que não são muito presentes na região, os quais consistem em formações geomorfológicas de depósitos sedimentares associadas a vales profundos (SOARES e PAIVA, 2022).

3.2 Ajustamento da classificação de VGRE

Para obter a classificação de Håkanson, em função do parâmetro de forma b foram construídas curvas hipsográficas (profundidade x área) para diversos valores de b . Para cada curva de classe, encontrou-se um valor de b que mais se aproximava das curvas de Håkanson, a partir da Tabela 4. Com esses valores foi construída uma nova relação hipsográfica para as relações profundidade x área.

A classificação dos reservatórios foi feita segundo três alternativas:

- Classificação com as curvas hipsográficas, utilizando-se as linhas de classes da proposta de Håkanson.

- Classificação com as curvas hipsográficas, utilizando as linhas de classes definidas pelo VGRE.
- Classificação com a equação do prismoide, utilizando-se os limites de classe definidos pelos valores de b , conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de b para classificação usando a equação do prismoide.

Classe	Nome da classe
Muito convexo	$b \geq 1,5$
Convexo	$1,3 \leq b < 1,5$
Ligeiramente convexo	$1,1 \leq b < 1,3$
Linear	$0,9 \leq b < 1,1$
Ligeiramente côncavo	$0,7 \leq b < 0,9$
Côncavo	$b < 0,7$

As formas dos reservatórios foram classificadas pelas curvas hipsográficas de Håkanson e pelas curvas de VGRE. Dos 148 reservatórios, 141 reservatórios classificados segundo as curvas VGRE se enquadram na mesma classe do método gráfico original. Isso significa que o método paramétrico indica que o método VGRE não alterou significativamente a classificação pelo método original, mas tornou tal classificação mais objetiva e simples. Os resumos de todas as classificações analisadas seguem a seguir.

Tabela 5 - Classificação dos reservatórios com as curvas hipsográficas pelo método de Håkanson e pelo método VGRE.

Classificação	Quantidade (Håkanson)	Quantidade (VGRE)
Côncavo	1	1
Linear	11	11
Ligeiramente convexo	94	101
Convexo	39	32
Muito convexo	3	3
Côncavo	$b < 0,7$	

Tabela 6 - Quantidade de reservatórios do estado do Ceará segundo a classificação do prismoide.

Classificação Prismoide	Quantidade
C (Côncavo)	12
LC (Lig. côncavo)	40
L (Linear)	43
LCx (Lig. convexo)	33
Cx (Convexo)	11
MCx (Muito convexo)	9

3.3 Proposta para as classes de reservatórios VGRE

O cone invertido é uma representação de forma de reservatório muito aplicada em estudos hidrológicos. Essa forma de reservatório apresenta a vantagem de proporcionar uma equação dimensionalmente consistente. Campos (1987, 2010) desenvolveu um método de estudo hidrológico (Diagrama Triangular de Regularização) de reservatórios em rios intermitentes sujeitos a elevada taxa de evaporação que utiliza, dentre outras características, a morfologia do reservatório, além de usar um equacionamento similar ao utilizado neste trabalho. Levando em consideração a dificuldade em adquirir informações da geometria e do volume de reservatórios, Pereira et al. (2019) desenvolveram uma metodologia utilizando sensoriamento remoto para estimar tais variáveis em região semiárida de grande densidade de reservatórios; tal ferramenta pode ser útil para pequenos reservatórios. Já Johansson et al. (2007) propuseram duas metodologias para descrever a forma de uma bacia utilizando apenas profundidade máxima, área da superfície e volume. Esses pesquisadores, porém, utilizaram dados de 105 lagos localizados na Suécia, os quais possuem características distintas dos reservatórios localizados em regiões semiáridas e com grande densidade de reservatórios.

Para definir as classes, adotamos a forma do cone inverso ($b = 1$) como ponto de partida para fazer a delimitação das classes. Foram calculados valores de b para os 148 reservatórios da amostra. Este trabalho procurou definir classes de mesma

amplitude, com exceção das duas dos extremos que englobam as caudas de máximos e de mínimos. Adotamos seis classes, uma a mais que Håkanson, em consequência da quantidade de reservatórios côncavos detectados na amostra.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método do VGRE se mostrou apropriado para classificação morfométrica de reservatórios. A diretriz externa do VGRE está associada a uma relação matemática $H=aRb$. O método VGRE, com base no parâmetro b , mostrou-se uma excelente alternativa para classificar a forma de um reservatório nas classes de Håkanson. O método apresenta a vantagem da objetividade numérica do parâmetro b , sem a subjetividade às vezes presentes no método gráfico. De 148 calculados pelo método gráfico de Håkanson e pelos parâmetros do VGRE 141 chegaram à mesma classe; tal diferença destaca a proximidade das classificações dos dois métodos gráficos, indicando, assim, a similaridade entre os dois, porém com o método VGRE classificando os açudes de modo mais objetivo, facilitando a determinação do formato dos reservatórios.

O método de classificação VGRE foi desenvolvido com vistas a representar a morfometria de reservatórios/barragens do Nordeste do Brasil, os quais possuem características diferentes daqueles utilizados na classificação de Hakanson. Além disso, as barragens utilizadas neste trabalho estão localizadas em uma região com densa rede de reservatórios, os quais estão sujeitos às implicações da microaçudagem (Campos et al.; 2016). O nome da classe do reservatório está associado à forma da função geratriz do VGRE no plano cartesiano Raio (R) x Altura das águas (H). Com a classificação prismoide observa-se que a grande maioria dos reservatórios se classifica nas três classes centrais (Ligeiramente convexo, Linear e Ligeiramente côncavo). Essa propriedade implica

que a forma de cone reto pode reproduzir bem a forma da maioria dos reservatórios da região para fins de estudos hidrológicos. Portanto, o modelo de classificação proposto pode ser utilizado como uma ferramenta para caracterizar a susceptibilidade dos reservatórios com relação à evaporação e, assim, selecionar os locais mais eficientes para a implantação de reservatórios.

Estudos futuros podem avaliar erros introduzidos na vazão regularizada por um reservatório ao se substituir as formas mais côncavas e mais convexas pela forma do cone reto.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceituação: Rocha JS, Campos JNB e Luna RM;
Metodologia: Rocha JS, Campos JNB e Luna RM;
Redação – Primeira versão: Rocha JS e Campos JNB;
Redação – Revisão & Edição: Rocha JS, Luna RM, Studart TMC e Neto IEL;
Recursos: Rocha JS e Campos JNB;
Supervisão: Campos JNB e Luna RM.

6 REFERÊNCIAS

BRANDÃO, R. L. e FREITAS, L. C. B. (org.). Geodiversidade do estado do Ceará: Programa Geologia do Brasil. **Levantamento da Biodiversidade**, CPRM, Fortaleza, 2014.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional. Resolução nº 115. Dispõe sobre a aprovação da nova delimitação do semiárido brasileiro. **Diário Oficial da União**, 23 de novembro de 2017.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C.; MARTINZ, D. D. G.; NASCIMENTO, L. S. V. Contribuições ao debate sobre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, 2003.

CAMPOS, J. N. B. **A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate**, Tese (Doutorado em Gerenciamento de Recursos Hídricos), Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, 1987.

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

CAMPOS, J. N. B. Modeling the Yield–Evaporation–Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram, **Water Resources Management**, v. 24, n. 13, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9616-x>

CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil, **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 88, n. 2, 2016. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Drought and water policies in Northeast Brazil: backgrounds and rationale, **Water Policy**, v. 10, n. 5, 2008. <https://doi.org/10.2166/wp.2008.058>

FOOTE, R. L. e NIE, H. How to Approximate the Volume of a Lake, **The College Mathematics Journal**, v. 47, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.4169/college.math.j.47.3.162>

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **A zona costeira do Estado do Ceará**: compartimentação geoambiental e antropismo, FUNCEME, 2009.

GONÇALVES, M. A.; GARCIA, F. C.; BARROSO, G. F. Morphometry and mixing regime of a tropical lake: Lake Nova (Southeastern Brazil), **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 3, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150788>

HÅKANSON, L. **Lakes: Form and Function**, The Blackburn Press, New Jersey, 2004.

HÅKANSON, L. On lake form, lake volume and lake hypsographic survey. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, v. 59, n. 1, 1977. <https://doi.org/10.2307/520579>

HÅKANSON, L. The Importance of Lake Morphometry for the Structure and Function of Lakes, **International Review of Hydrobiology**, v. 90, n. 4, 2005. <https://doi.org/10.1002/iroh.200410775>

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Panorama Socioeconômico das Regiões de Planejamento do Estado do Ceará: 2018**, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, Fortaleza, 2019.

JODY, C.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. Influence of sediment distribution on the relationships among reservoir yield, spill, and evaporation losses, **Engenharia Sanitária e Ambiental (ONLINE)**, v. 23, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018177058>

JOHANSSON, H.; BROLIN, A. A.; HÅKANSON, L. New Approaches to the Modelling of Lake Basin Morphometry, **Environmental Modeling e Assessment**, v. 12, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10666-006-9069-z>

KIM, D.; KIM, J.; WANG, W.; LEE, H.; KIM, H.S. On Hypsometric Curve and Morphological Analysis of the Collapsed Irrigation Reservoirs, **Water**, v. 14, n. 6, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060907>

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin, **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 2, 2011. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.553616>

- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of electricity from hydropower, **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 1, 2012. <https://doi.org/10.5194/hess-16-179-2012>
- 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. (Eds.), **Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas**, Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, Bahia, 2012.
- NASCIMENTO, L. S. V.; CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Morfologia de reservatórios e o viés na estimativa da vazão regularizada, **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, Brasil, 2003.
- PARK, Y. S.; KWON, Y. S.; HWANG, S. J.; PARK, S. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map, **Environmental Modelling e Software**, v. 55, n. 1, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.031>
- PEREIRA, B.; MEDEIROS, P.; FRANCKE, T.; RAMALHO, G.; FOERSTER, S.; ARAÚJO, J. C. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density, **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1566727>
- RABELO, U. P.; DIETRICH, J.; COSTA, A. C.; SIMSHAUSER, M. N.; SCHOLZ, F. E.; NGUYEN, T. V.; LIMA NETO, I. E. Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model, **Journal of Hydrology**, v. 603, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>
- RAHMANIA, N, M. R.; BANIHASHEMI, M. A. Sediment distribution pattern in some Iranian dams based on a new empirical reservoir shape function, **Lake and Reservoir Management**, v. 27, n. 3, 2011. <https://doi.org/10.1080/07438141.2011.602510>
- ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs, **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16251-w>
- SOARES, F. L. C.; PAIVA, F. I. B. G. Geoconservação nos cânions do rio Poti: uma discussão epistemogeomorfológica no curso superior, o caso cearense, **William Morris Davis: Revista de Geomorfologia**, v. 3, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v3n1.2022.148>
- SOBEK, S.; NISELL, J.; FÖLSTER, J. Predicting the depth and volume of lakes from map-derived parameters, **Inland Waters**, v. 1, n. 3, 2011. <https://doi.org/10.5268/iw-1.3.426>
- SOUZA, D. N.; STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E. Flood damping by reservoirs: proposition of a graphical parametric method. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 39, 017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170002>
- TAVEIRA, I. M. L. M.; LIMA NETO, I. E.; COSTA, A. C. Assoreamento em reservatórios: uma revisão sobre a influência da morfologia do lago, **XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Campinas, Brasil, 2020.
- ZHAO, G. e GAO, H. Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches, **Remote Sensing of Environment**, v. 226, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.015>