



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Laís Turato Ballerini Silva

Martiniano Alves da Silva Filho

MODELAGEM FÍSICA E ESTOCÁSTICA DA EFICIÊNCIA
DE RETENÇÃO EM RESERVATÓRIOS

OURO BRANCO - MG

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

Laís Turato Ballerini Silva

Martiniano Alves da Silva Filho

**MODELAGEM FÍSICA E ESTOCÁSTICA DA EFICIÊNCIA
DE RETENÇÃO EM RESERVATÓRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

OURO BRANCO - MG

2020

Silva, Laís Turato Ballerini; Filho, Martiniano Alves da Silva.
Modelagem física e estocástica da eficiência de retenção em reservatórios. Laís
Turato Ballerini Silva; Martiniano Alves da Silva Filho.

26 p.; 30cm.

Trabalho de Conclusão de Curso.
UFSJ Ouro Branco/MG, 1º ERE 2020.
Orientador: Prof. Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira.

Referências: p. 23.

Palavras-chave: eficiência de retenção, reservatórios, sedimentação, modelo físico.

Laís Turato Ballerini Silva

Martiniano Alves da Silva Filho

**MODELAGEM FÍSICA E ESTOCÁSTICA DA EFICIÊNCIA
DE RETENÇÃO EM RESERVATÓRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, avaliou este TCC:

Prof. Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira - Orientador

Me. Rafael Petruceli Coelho Lima (UFV) - Avaliador convidado

Prof^a. Dr^a Ana Letícia Pilz de Castro (UFOP) - Avaliadora convidada

Ouro Branco, 26/11/2020

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 METODOLOGIA.....	9
2.1 Métodos empíricos de estimativa da eficiência de retenção.....	9
2.2 Descrição do modelo reduzido.....	11
2.3 Geração estocástica das vazões utilizadas no modelo reduzido	12
2.4 Determinação da <i>ER</i> no modelo reduzido.....	13
2.5 Determinação do melhor método empírico do cálculo de <i>ER</i> para o modelo reduzido e variação da <i>ER</i> devido à incerteza nos valores de vazões	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
3.1 Determinação da <i>ER</i> no modelo reduzido.....	15
3.2 Determinação do melhor método empírico para o cálculo de <i>ER</i> para o modelo reduzido e variação da <i>ER</i> devido à incerteza nos valores de vazões	17
4 CONCLUSÃO.....	21
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios possuem grande importância econômica no país, em vista disso se fazem relevantes os estudos antes de sua construção. Santos & Cunha (2015) relataram que a análise de implantação de um reservatório deve considerar a viabilidade econômica, ambiental e os custos de sua conservação. Os reservatórios ao serem assoreados perdem sua funcionalidade, pois muitas vezes a retirada dos sedimentos é impossibilitada devido aos fatores econômicos. Desse modo, a função principal do reservatório só é garantida ao se estudar a sedimentação (Morris, 2020). Para isso é necessário criar cenários que estimem como irá se comportar o reservatório ao longo do tempo, de forma a avaliar o seu assoreamento e, conseqüentemente, a sua perda de volume de reservação e vida útil.

O assoreamento pode ser descrito como um processo natural onde sedimentos presentes no fluxo do rio são depositados em função de uma redução da velocidade afluente, assim como da capacidade de transporte (Valent et al., 2019). Alighalehbabakhani et al. (2017) apontaram que este fenômeno vem se intensificando com a intervenção humana. O uso e manejo inadequado da terra, atividades humanas intensivas, não sustentáveis e em desequilíbrio, expansão agrícola e urbana para regiões com alta propensão a erosão assim como outras atividades antropogênicas, aumenta a erosão, o que causa um aumento da sedimentação, tornando-se cada vez mais importante o estudo deste fenômeno.

A previsão do assoreamento é algo que vem sendo estudada há muito tempo e possui várias abordagens distintas (Hager, 2018). A escolha do melhor método a ser utilizado é fator de discussão de diversos autores. Dependendo da bacia hidrográfica se tem uma melhor adequação ou não das fórmulas e *softwares* propostos. Sultana & Naik (2015) em seu trabalho descreveram a vasta gama de métodos de cálculos da sedimentação, sendo que cada um deles possui sua própria complexidade e dados de entrada.

Uma das formas mais importantes de se estimar o assoreamento é através da Eficiência de Retenção (*ER*), a qual é um parâmetro que mensura a capacidade do reservatório de reter os sedimentos afluentes a ele. Para isso, têm-se dois métodos de cálculo: o teórico e o empírico. O segundo é o mais amplamente utilizado, visto que são metodologias rápidas, simples e com menos dados de entrada (Issa et al., 2015).

Revel et al. (2015) apresentam os amplamente utilizados modelos empíricos de Brune e Churchill, além do método de Heinemann. Além disso, os autores comentam acerca das suas limitações de uso visto que consideram poucos parâmetros hidrossedimentológicos em suas fórmulas, o que interfere no resultado final. Esses parâmetros faltantes impedem que a mesma formulação seja utilizada com sucesso em reservatórios cujas características físicas diferem das utilizadas na calibração dos seus modelos. Assim, tem-se que os modelos empíricos foram elaborados considerando alguns reservatórios em regiões específicas, podendo não ser adequados para outras regiões com características distintas (Tan et al., 2019).

Li et al. (2017) em seus estudos sobre assoreamento em reservatórios abordaram três diferentes releituras do modelo de Brune e Heinemann. Todos obtiveram resultados satisfatórios, sendo que cada curva se ajustou a um reservatório com características particulares e distintos entre si. Obreja (2012) estimou a *ER* para 14 reservatórios na bacia hidrográfica de Siret, na Romênia, com o uso do modelo de Brune. O autor obteve um intervalo de 42 a 98% de aproximação entre os resultados calculados e os observados nos reservatórios. Também foi observado que o modelo de Brune se correlacionou com a capacidade dos reservatórios, sendo que para reservatórios grandes, os valores aproximaram dos 100% e para reservatórios pequenos, a *ER* decresceu.

Sultana & Naik (2015) testaram alguns métodos empíricos e obtiveram resultados satisfatórios com o de Brune. Issa et al.(2015), utilizando seis métodos diferentes para a estimativa da *ER* no reservatório Mosul Dam, Israel, observaram uma boa aproximação do valor real com os calculados utilizando todos os métodos, sendo que a maior variação desse parâmetro foi menor que 4%. Para o reservatório de Tehri, Índia, Garg et al. (2020) estudaram a sua *ER*. Para isso, os métodos empíricos utilizados foram os de Brune e Churchill, sendo que Brune superestimou o valor da *ER* do reservatório.

Uma forma de se avaliar os métodos empíricos de estimativa da *ER* é a partir da modelagem física. Este tipo de modelo facilita o controle das grandezas a serem consideradas (Teixeira et al., 2020) de forma que o resultado obtido tende a ser mais preciso, desde que respeitadas as escalas de semelhança hidráulica entre o modelo e o protótipo. Assim, com uma estrutura que simulava um reservatório, Revel et al. (2015) compararam os métodos de cálculo de Churchill e de Brune com os resultados experimentais observados. Eles concluíram

que nenhuma das equações se aproximou do observado, pois ambas superestimaram os valores obtidos, uma vez que mais de 50% dos valores observados ficavam abaixo de ambas as curvas.

Um dos principais parâmetros de entrada nos métodos que estimam a *ER* é a vazão. É válido ressaltar que o valor desse parâmetro comumente possui incertezas, principalmente nos países em desenvolvimento (Mulu & Dwarakishb, 2015). Maldonado et al. (2015) afirmaram que cada método de medição de vazão possui suas imprecisões. Por exemplo, uma das formas utilizadas em reservatórios é a obtenção da vazão por meio de curvas-chave. O método em questão permite a medição da vazão por uma equação que a relaciona com a altura linimétrica. As bases desta função são os dados de vazão e cota coletados em épocas de secas e cheias (Araújo et al., 2017). Essa metodologia, por ser majoritariamente manual, acarreta em diversos erros embutidos.

Coz et al. (2012) apontaram que sem a avaliação das incertezas o usuário pode ter erros potenciais ao se utilizar os dados de vazão, os quais podem comprometer na acurácia de modelos hidráulicos. Assim, sem uma avaliação das incertezas contidas nos parâmetros de entrada dos métodos, os valores estimados para a *ER* podem ter erros significativos. Dessa forma, uma avaliação do quanto uma alteração na vazão interfere na *ER* é de extrema importância.

Para avaliação da influência da variação da vazão nos valores de *ER*, podem ser utilizados métodos estocásticos, os quais permitem considerar as incertezas envolvidas nos valores dos parâmetros de entrada, como a vazão. Por isso, alguns autores propuseram métodos estocásticos para a simulação do assoreamento em reservatórios, como Guo et al. (2018), Schleiss et al. (2016) e Shrestha et al. (2016). Entretanto, não foi encontrado nenhum trabalho da literatura que utilizou um modelo estocástico para avaliar a sensibilidade dos métodos empíricos de estimativa da *ER* quanto à variação da vazão.

Diante do exposto, o objetivo e originalidade deste trabalho é (i) avaliar quanto a variação da vazão afluente ao reservatório interfere no valor de Eficiência de Retenção (*ER*). Além disso, tem-se como objetivo (ii) comparar os valores de Eficiência de Retenção dos modelos empíricos (Brune, Churchill e Heinemann) e os valores observados no modelo

reduzido de um reservatório e; (iii) definir qual desses modelos empíricos se ajustou ao modelo físico.

2 METODOLOGIA

2.1 Métodos empíricos de estimativa da eficiência de retenção

Como observado por Revel et al. (2015), poucos estudos acerca da sedimentação em reservatórios foram reportados na literatura, nos quais a maioria destes são baseados em métodos analíticos. De forma geral, a quantidade de sedimentos acumulados dentro de um reservatório está direta e intimamente relacionada a sua Eficiência de Retenção (*ER*). Essa é definida como a razão entre a parcela de sedimentos que fica retida dentro do reservatório e o volume afluyente a esse, conforme apresentado na Equação 01.

$$ER = \frac{V_{\text{afluyente}} - V_{\text{efluyente}}}{V_{\text{afluyente}}} \quad (01)$$

Onde,

$V_{\text{afluyente}}$ é o volume de sedimentos que chega ao reservatório (m³);

$V_{\text{efluyente}}$ é o volume de sedimentos que sai do reservatório (m³).

A partir desse pressuposto, vários autores criaram modelos empíricos para estimativa da *ER*. Van Rijn (2013) em seu trabalho abordou a curva desenvolvida por Brune, que utilizou dados de 40 reservatórios com grande capacidade de reservação localizados nos EUA normalmente cheios (reservatórios totalmente cheios de água e que possuíam a saída na borda superior). Essa curva (Figura 1) é dependente da capacidade de reservação total do reservatório e de seu volume afluyente anual, como mostrado na Equação 02.

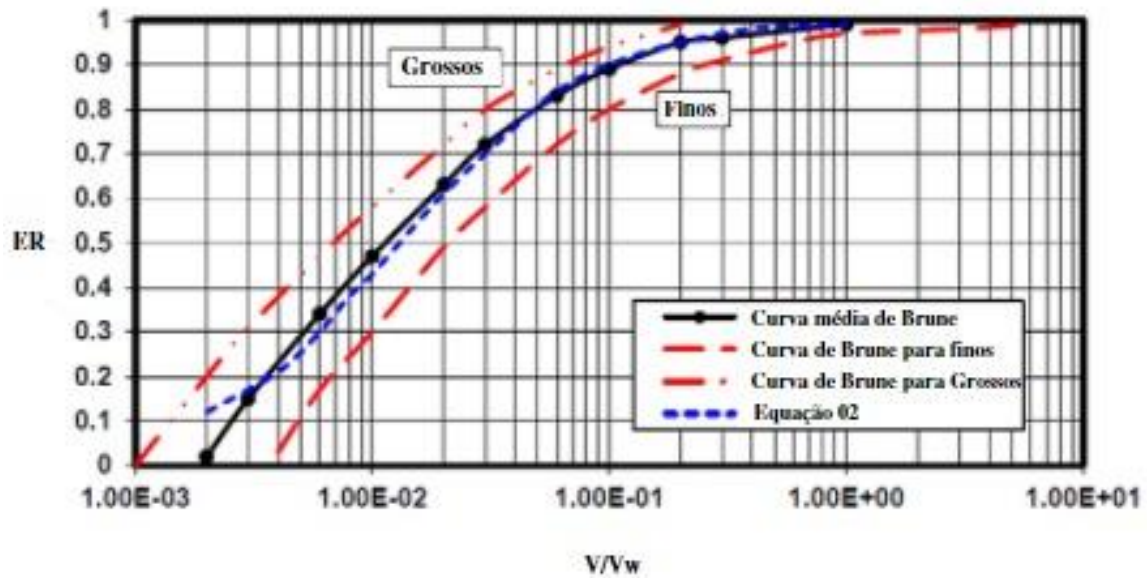
$$ER = \frac{0,000085 + \left(\frac{V}{\nabla w}\right)^{1.1}}{0,0085 + \left(\frac{V}{\nabla w}\right)^{1.1}} \quad (02)$$

Onde,

V é a capacidade de reservação do reservatório (m³);

V_w é o volume afluente anual no reservatório (m^3).

Figura 1 - Curva de Eficiência de Retenção desenvolvida por Brune (1953) que relaciona a razão de capacidade do reservatório sobre o volume afluente anual com a ER



Fonte: Adaptado de Van Rijn, 2013.

Heinemann, para pequenos reservatórios agrícolas com áreas de influência que variavam entre 0,8 a 36,3 km^2 , fez modificações na relação entre a ER e o parâmetro V/V_w de Brune, utilizando dados de 20 reservatórios normalmente cheios (Verstraeten & Poesen, 2000). O modelo proposto por Heinemann está apresentado na Equação 03.

$$ER = -22 + \frac{119,6 \frac{C}{I}}{0,012 + (1,02 \frac{C}{I})} \quad (03)$$

Onde,

C é a capacidade do reservatório (m^3);

I é o volume que aflui em um ano no reservatório (m^3).

Carvalho (2008) apresentou outra forma a ser utilizada no cálculo da *ER*. Essa foi proposta por Churchill que utilizou dados de pequenos reservatórios localizados na região do Vale do Tennessee, EUA, sendo um dos parâmetros a vazão média diária. O primeiro ponto para a utilização desse método é o cálculo do Índice de Sedimentação (*IS*), dado pela Equação 04.

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q^2 L} \quad (04)$$

Sendo,

IS é o índice de sedimentação do reservatório (s^2/m);

Vres é o volume do reservatório no nível médio de operação (m^3);

Q é a vazão média afluyente diária durante o período de estudo (m^3/s);

L é o comprimento do reservatório (m).

Com o *IS* é possível calcular a porcentagem de sedimentos que eflui do reservatório (*SE*), sendo este um parâmetro antagônico a *ER*, porém necessário para o cálculo. O *SE* é dado pela Equação 05.

$$SE = 100 - (112 - 1.013,4 \times IS^{-0,2}) \quad (05)$$

Sendo,

SE é a porcentagem de sedimentos efluentes do reservatório (%);

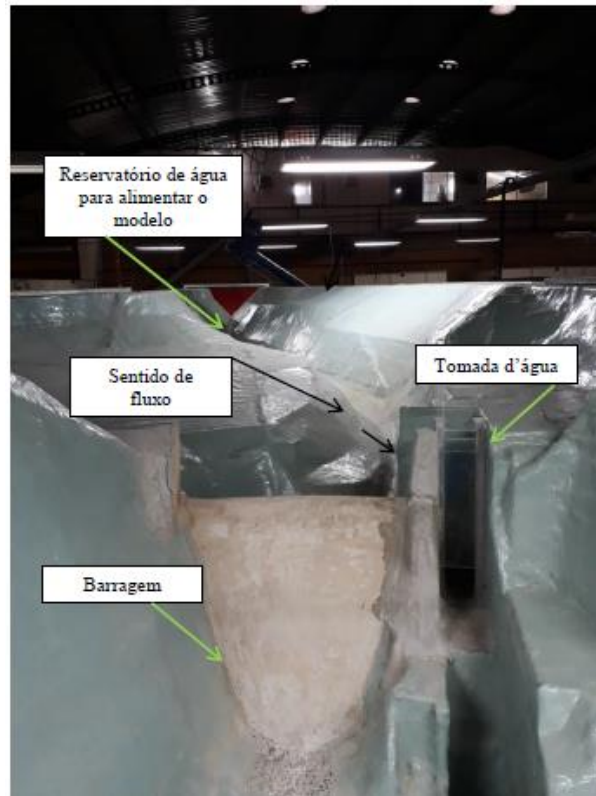
Assim a eficiência de retenção é obtida ao subtrair o *SE* de 100%.

2.2 Descrição do modelo reduzido

O modelo reduzido (Figura 2) utilizado neste estudo está localizado no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e é uma representação da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto Paraopeba (Jeceaba-MG). O seu comprimento é de 10 m a montante do vertedor, o que é correspondente a 1000 m no

protótipo. A sua capacidade volumétrica de reservação, considerando o nível normal de operação do reservatório, é de 2,88 m³, o qual, de acordo com a escala de volume entre modelo e protótipo, corresponde a 0,711 hm³ no real. Todos os detalhes construtivos, premissas de projeto e cálculos de dimensionamento do modelo reduzido pode ser verificado no trabalho de Carvalho et al. (2014).

Figura 2 - Vista frontal do modelo reduzido da PCH



2.3 Geração estocástica das vazões utilizadas no modelo reduzido

Para avaliar a influência das incertezas dos valores de vazão no resultado de *ER* foram geradas séries estocásticas de vazões utilizando o método estocástico AR(1), o qual é dado pela Equação 06.

$$Q_t = \bar{Q} + \phi(Q_{t-1} - \bar{Q}) + \sigma_x \varepsilon_t \sqrt{1 - \phi^2} \quad (06)$$

Em que,

Q_t é a vazão anual para o tempo t de interesse (m³/s);

\bar{Q} é a média dos dados observados da série temporal de vazões(m³/s);

ϕ é o coeficiente de autocorrelação lag 1 da série temporal de vazões;

σ_x é o desvio padrão da série temporal de vazões;

ε_i é a componente de aleatoriedade gerada a partir da distribuição Normal $\sim N(0,1)$.

Esse método foi utilizado, pois, conforme concluiu Teixeira (2019), ele se ajustou bem aos dados de vazões da PCH, a qual é o protótipo do modelo reduzido. Assim, utilizando-se o modelo AR(1) foram geradas séries sintéticas, sendo que cada uma possuía cinco valores de vazões, no intervalo entre os anos 2013 a 2017. Adotou-se esse período de análise por se conhecer a *ER* do protótipo. Teixeira et al. (2020) apresentaram que as vazões a serem utilizadas para simular o assoreamento no modelo reduzido dessa PCH são as médias dos períodos das ondas que abrangiam as máximas anuais. Dessa forma, as séries sintéticas geradas continham as vazões médias dos períodos de máximas (Q_{MM}).

2.4 Determinação da *ER* no modelo reduzido

Para determinação da *ER* no modelo reduzido, para o período 2013-2017, foram simuladas cinco séries de vazões médias (Q_{MM}) das ondas que abrangiam as máximas anuais. Dessas séries, uma foi a histórica e quatro foram sintéticas, geradas pelo modelo AR(1). Ressalta-se que a curva-chave de sedimentos da PCH, a qual foi convertida para o modelo reduzido, foi mantida constante nas cinco simulações. Todo procedimento de simulação do assoreamento, como tempo de escoamento de cada vazão (30 min), foi realizado conforme recomendado por Teixeira et al. (2020).

Na Tabela 1 estão apresentadas as cinco séries de Q_{MM} e as descargas sólidas totais (Q_{ST}) utilizadas nas simulações do assoreamento. As quatro primeiras séries são sintéticas e a quinta é a histórica da PCH, a qual foi convertida para o modelo reduzido.

Tabela 1 - Valores de vazões médias dos períodos de máximas (Q_{MM}) e descargas sólidas totais (Q_{ST}) utilizadas nas cinco simulações para determinação da *ER* no modelo reduzido

Ano Hidrológico	Q_{MM} (m ³ /h)					Q_{ST} (ton/d)
	1ª Série	2ª Série	3ª Série	4ª Série	5ª Série	

2013	31,3	32,3	31,3	34,5	27,2	0,021
2014	15,7	19,1	20,9	38,1	13,1	0,002
2015	20,8	26,0	33,9	33,1	23,0	0,008
2016	29,0	26,3	30,2	32,9	31,5	0,024
2017	26,4	33,5	28,4	33,5	25,3	0,010

Eram passadas no modelo reduzido as vazões de cada um dos anos hidrológicos que compunham a série. A quantidade de sedimento inserido foi conforme a Tabela 1, de forma dispersada na superfície da lâmina d'água à montante do reservatório. Após o vertedor havia um cesto que recolhia o sedimento vertido durante os experimentos. Ao final do procedimento, esse material era pesado e assim era possível o cálculo da *ER*. O material utilizado para a simulação do sedimento constituía-se de um granulado de borracha com densidade de 1,13 e diâmetro mediano (d_{50}) de 1,7mm.

Após 2,5h (tempo necessário para a simulação do assoreamento no período 2013-2017) foi medida a quantidade de sedimento que ficou retida no reservatório, em cada simulação. Assim, obteve-se a *ER* para cada série de vazões simulada. As *ER* experimentais foram comparadas com as calculadas pelos métodos empíricos de Brune, Heinemann e Churchill. Para esse cálculo foram utilizadas as cinco séries de vazões da Tabela 1 e dados geométricos do modelo reduzido, como capacidade e comprimento do reservatório.

2.5 Determinação do melhor método empírico do cálculo de *ER* para o modelo reduzido e variação da *ER* devido à incerteza nos valores de vazões

Para se determinar o melhor método de cálculo de *ER* para o reservatório do modelo reduzido da PCH e para se avaliar o quanto a imprecisão nos valores das vazões pode afetar o resultado da *ER* no protótipo, foram geradas estocasticamente 1000 séries sintéticas de Q_{MM} . Essas séries são do período 2013-2017 e foram geradas utilizando-se o modelo AR(1), conforme o procedimento descrito anteriormente. A partir dessas séries, calcularam-se milhares de valores de *ER* para o protótipo e outros milhares para o modelo reduzido. Para o cálculo foram utilizados os três métodos consolidados na literatura - Brune, Heinemann e Churchill, sendo que foram calculadas 1000 *ER* para cada método.

De posse dos milhares de valores de *ER* foi possível comparar os calculados obtidos pelos métodos empíricos com a *ER* observada no modelo reduzido. Ressalta-se que a *ER* no modelo físico foi encontrada utilizando-se a série histórica de Q_{MM} para o período de 2013-2017, a qual é a quinta série apresentada na Tabela 1. A partir dessa comparação foi possível observar qual o melhor método de cálculo de *ER* para o modelo reduzido.

O mesmo procedimento foi feito para a PCH, ou seja, os 1000 valores de *ER* calculados para o protótipo foram comparados com a *ER* real. Também foram comparados os valores de vazões gerados estocasticamente com os da série histórica da PCH. Dessa forma, obteve-se a relação entre a variação da *ER* devido à variação da vazão, ou seja, obtiveram-se como as incertezas nos valores das vazões podem influenciar no cálculo da *ER*, quando se utiliza os métodos empíricos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação da *ER* no modelo reduzido

Na Tabela 2 estão apresentadas as *ER* experimentais observadas no modelo reduzido e as calculadas pelos três métodos empíricos: Brune, Heinemann e Churchill. Tanto as *ER* experimentais quanto as calculadas são referentes às cinco séries de vazões apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 - Eficiências de retenção experimentais e calculadas pelos métodos empíricos, para as cinco séries de vazões do período 2013-2017

Série Q_{MM}	<i>ER</i> (%)			
	Experimental	Brune	Heinemann	Churchill
1 ^a	99,38	96,01	89,66	47,79
2 ^a	93,66	95,53	89,05	44,80
3 ^a	87,84	95,27	88,73	43,26
4 ^a	88,40	94,34	87,56	38,12
5 ^a	91,30	96,11	89,79	48,59

Observa-se na Tabela 2 que para as duas primeiras séries de Q_{MM} o método empírico que resultou em um valor de *ER* mais próximo do valor do modelo reduzido foi o de Brune. Esse método também foi reconhecido com resultados satisfatoriamente próximos do ocorrido

no trabalho realizado por Sultana & Naik (2015), o qual avaliou a aplicabilidade de alguns métodos empíricos para o reservatório de Sriramsagar, localizado no Sul da Índia.

Nas demais séries, as *ER* experimentais estão mais próximas das calculadas utilizando o método de Heinemann. Issa et al. (2015) também obtiveram resultado de *ER* calculada com esse método próximo ao observado no reservatório Mosul Dam. Nesse trabalho, o valor calculado diferiu do real em menos de 2%. Li et al. (2017) também obtiveram resultados satisfatórios com o método de Heinemann para a previsão da *ER*.

Com base na Tabela 2, tem-se que não houve apenas um método empírico que propiciou melhores valores de *ER* para o modelo reduzido. Para o estudo em pauta destacaram-se os métodos de Brune e de Heinemann. Observa-se, então, que o resultado do método empírico pode variar de acordo com as séries de vazões utilizadas, mesmo elas sendo para um mesmo período (2013-2017) e sendo geradas estocasticamente seguindo uma mesma média e desvio padrão. Nota-se que o erro está sempre menor que 5%, independentemente do método avaliado com o experimental. Isso mostra que os resultados calculados estão próximos dos observados, indicando um ajuste satisfatório destes modelos com o reservatório deste estudo.

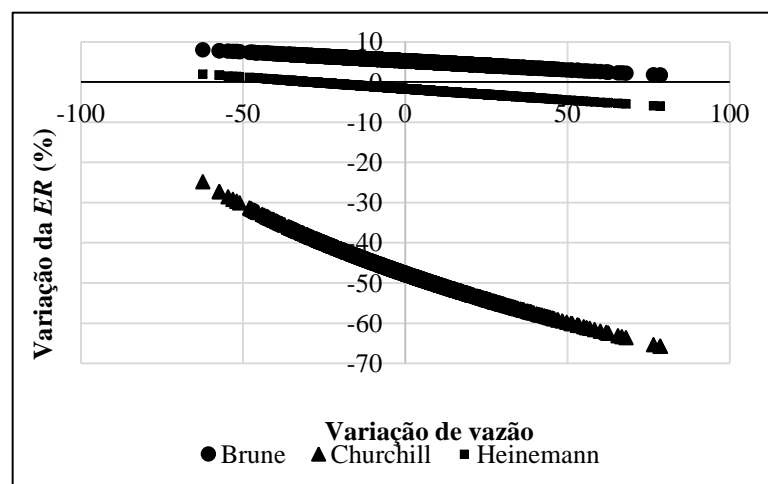
Dos três métodos empíricos avaliados, o de pior resultado foi o de Churchill. Lewis et al. (2013) analisaram a diferença existente nas *ER* em países temperados e tropicais, dando enfoque na irregularidade de fluxo de sedimentos que ocorre nos países tropicais, enquanto que nos países de clima temperado há uma disposição mais constante de sedimentos. A exemplo, as vazões necessárias para o modelo de Churchill utilizam o fluxo médio anual, o que no reservatório em questão simplifica demasiadamente o que ocorre, visto que as vazões utilizadas nos experimentos foram as médias dos períodos das ondas que abrangiam as máximas anuais, sendo que, na PCH, essas ondas tiveram duração de, aproximadamente, 50 dias no ano. Dessa forma, isso explica o pior resultado obtido para *ER* calculada pelo método proposto por Churchill.

3.2 Determinação do melhor método empírico para o cálculo de *ER* para o modelo reduzido e variação da *ER* devido à incerteza nos valores de vazões

Os valores de vazões possuem imprecisões, visto que os métodos utilizados nas suas medições possuem incertezas. Ocorre que a vazão é um dos parâmetros de entrada dos métodos empíricos de cálculo da *ER*. Ressalta-se que em alguns métodos o parâmetro de entrada é o volume afluente ao reservatório, o qual está relacionado com a vazão. Assim, utilizando-se a modelagem estocástica para a geração de séries sintéticas de vazões, determinou-se o melhor método de cálculo da *ER* para o modelo reduzido da *PCH* e verificou-se a influência que a incerteza no valor da vazão pode provocar nos valores de *ER* calculados pelos métodos de Brune, Heinemann e Churchill.

Para determinação do melhor método empírico de *ER* para o modelo reduzido, foram calculadas as *ER* por cada um dos três métodos, utilizando-se as 1000 séries sintéticas de Q_{MM} geradas estocasticamente, para o período 2013-2017. As milhares de *ER* calculadas foram comparadas com a *ER* observada no modelo reduzido, a qual foi de 91,3%. Lembra-se que a *ER* experimental base é referente a série histórica de Q_{MM} no período 2013-2017. Na Figura 3 é possível observar a variação da diferença entre as *ER* calculadas e a *ER* experimental *versus* a variação da diferença entre as vazões sintéticas geradas estocasticamente e as da série histórica, no período 2013-2017.

Figura 3 - Variação de *ER* em função da variação de vazão, para o modelo reduzido



A variação da vazão na Figura 3 representa o erro que a vazão medida pode ter. Assim, a faixa de erro está entre -60% e +80%, ou seja, considerando a série histórica de

vazões como correta, as vazões geradas estocasticamente, as quais representam as incertezas dos métodos de medição, diferiram entre -60% e +80% das reais. Nessa mesma figura, a variação da *ER* representa como o erro de medição na vazão pode influenciar nos valores de *ER* calculados pelos três métodos empíricos. Além disso, a variação da vazão *versus* a variação das *ER* permite observar qual método empírico foi o mais adequado para o modelo reduzido da PCH.

Pela Figura 3, percebe-se que quando as séries sintéticas de vazões possuíam valores próximos ao da série histórica, ou seja, a variação das vazões foi próxima de 0%, o método de Heinemann apresentou variação da *ER* próxima de 0%. Assim, tem-se que o melhor método para calcular a *ER* do modelo reduzido da PCH foi o de Heinemann. Issa et al. (2015) também concluiu que Heinemann apresentou bons resultados para a estimativa da *ER* do reservatório Mosul Dam, situado na região do Iraque, sendo esta de clima tropical. Da mesma forma como concluído por Revel et al. (2015), ao se observar a Figura 3, percebe-se que o modelo de Brune tem uma tendência embutida de superestimar os valores da *ER*, haja vista que, mesmo quando não há variação na vazão, ou seja, o valor de vazão se aproxima da série histórica, os resultados de *ER* por Brune já são superestimados em 10%. Garg et al. (2020) também constataram que o método empírico de Brune superestimou o valor da *ER* e não foi apropriado para o reservatório Tehri na Índia.

Como discutido anteriormente, a partir da Tabela 2, para as cinco simulações realizadas no modelo reduzido, em duas delas os valores de *ER* calculados pelo método de Brune foram mais próximos ao observado experimentalmente, enquanto nos demais casos o método de Heinemann apresentou resultados melhores. Ou seja, com base apenas nos resultados experimentais não foi possível afirmar qual o melhor método empírico para cálculo da *ER*. Porém, ao se analisar a variação da *ER* com a variação da vazão, algo possível devido à geração estocástica de vazão, pôde-se concluir que o melhor método para cálculo da *ER* no modelo reduzido da PCH foi o de Heinemann. Assim, sugere-se que nos futuros projetos de reservatórios, antes de se adotar um método empírico para o cálculo da *ER*, deve ser feita uma modelagem estocástica de vazões e selecionar o melhor método com base nessa simulação, como feita neste trabalho.

Pode-se observar pela Figura 3, que se a vazão possuir um erro de aproximadamente 80%, nos métodos de Brune e Heinemann esse erro ocasiona uma variação no valor da *ER* menor que 10%. Os valores de *ER* calculados pelo método de Brune tende a ser 6% maiores que os de Heinemann, independentemente do valor da variação da vazão. Este resultado observado condiz com o esperado, pois, conforme afirmado por Costa (2012), os valores de *ER* calculados usando o método de Brune tende a ser de 4 a 10% maiores que os calculados com Heinemann.

Enquanto os métodos de Brune e Heinemann apresentam pequena variação de *ER*, mesmo para grandes as variações de vazões, o método de Churchill apresenta grande variação de *ER*, a qual é de quase 70%, quando a vazão varia, aproximadamente, 80%. Assim, tem-se que o método de Churchill não se ajustou bem ao modelo reduzido. Observa-se que o erro já é implícito à sua utilização, pois mesmo quando não há variação na vazão, este método apresentou uma divergência de 50% na *ER*. Anteriormente, ao se comparar os resultados das *ER* experimentais do modelo reduzido com os calculados pelo método de Churchill (Tabela 2), as diferenças entre eles haviam sido maiores que as dos demais métodos.

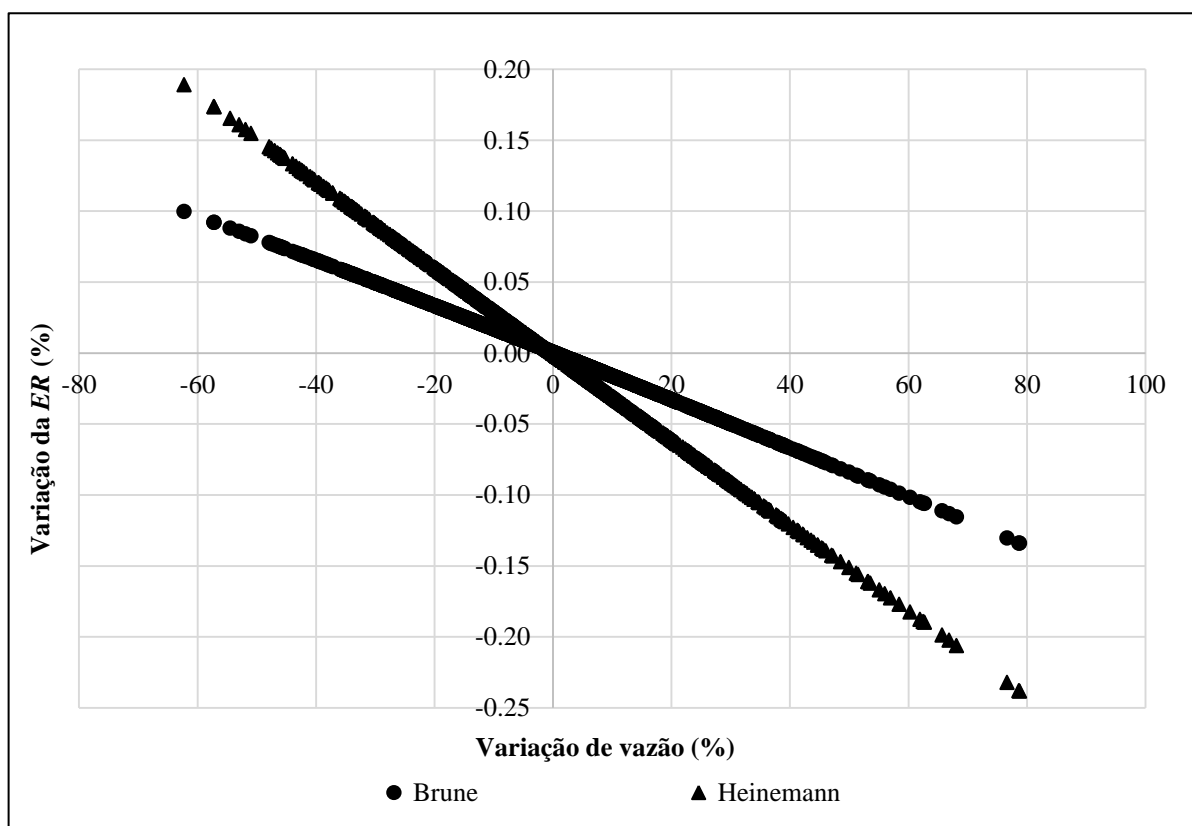
Segundo Carvalho et al. (2000) o método de Churchill é indicado para reservatórios pequenos, os quais possuem volume de reservação menores que 10hm³, o que é o caso do reservatório deste estudo. Entretanto, Borland (1971) *apud* Verstraeten & Poesen (2000) ao comparar os métodos de Brune e Churchill utilizando o reservatório John Martin, localizado no Colorado (EUA), com 744,405 hm³ de capacidade (Carleton et al., 2020), obteve um bom resultado com o método de Churchill. Isso mostra que os resultados da *ER* calculados com este método são influenciados não somente pelo tamanho do reservatório, mas também por características inerentes ao sedimento, haja vista que a curva de Churchill faz distinção entre sedimentos produzidos localmente e aqueles que vêm de reservatórios à montante, sendo este último, de granulometria mais fina.

Churchill é o único dentre os três métodos abordados que considera o Índice de Sedimentação (*IS*) do reservatório, que por sua vez será influenciado pelo tempo de retenção da água dentro do reservatório e a velocidade média do escoamento. Garg et al. (2020) citaram a complexidade intrínseca ao *IS*, utilizado no método de Churchill. Em países tropicais não é factível a aproximação de uma vazão média, o que pode ocorrer em outras

localidades. Dessa forma, o valor da *ER* calculada com o método de Churchill resulta em valores diferentes dependendo das particularidades do reservatório ao qual é aplicado, podendo retornar valores bem diferentes do esperado, como acontece para o reservatório deste estudo.

Como o método de Churchill não apresentou bons resultados, foi analisada a influência das incertezas dos valores de vazões no cálculo da *ER* utilizando-se apenas os métodos de Brune e Heinemann, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Variação de *ER* em função da variação de vazão, para o protótipo



Ao se analisar o reservatório na escala real, a do protótipo, na Figura 4 se observa pequenas variações dos valores de *ER* em decorrência das variações das vazões, as quais estão abaixo de 1%. Ou seja, por mais que haja incertezas nos valores das vazões, as quais, por exemplo, podem ser provocadas pelos métodos de medições, essas incertezas pouco afetaram os métodos empíricos de Brune e Heinemann no cálculo da *ER*. Assim, nos projetos de reservatórios tem que se avaliar qual o melhor método empírico, pois será ele que mais influenciará no resultado da *ER*, sendo que seus parâmetros de entrada, como a vazão, tendem

a ter pouca influência. Entretanto, um dos motivos que pode ter resultado em pequena interferência das vazões nos valores de *ER* é o fato do reservatório utilizado neste trabalho ser pequeno, de forma que para reservatórios maiores a influência da vazão no cálculo de *ER* poderá ser maior. Além disso, o período estudado (2013-2017) foi de pequenas vazões, devido ao longo período de seca na região da PCH. Dessa forma, mesmo em reservatórios pequenos, como o da PCH, mas em períodos de maiores vazões, talvez elas possam interferir mais na estimativa da *ER* utilizando os métodos empíricos.

4 CONCLUSÃO

A partir da comparação dos métodos empíricos, da geração estocástica de vazões e da influência da imprecisão no valor desse parâmetro, conclui-se:

- Os métodos de Brune e Heinemann foram os que apresentaram resultados de *ER* mais próximos aos observados no modelo reduzido. Entretanto, apenas com base nos dados experimentais não foi possível estabelecer qual método foi o melhor, pois enquanto Brune foi o melhor para duas séries de vazões simuladas, Heinemann apresentou melhor resultado para três séries. Assim, tem-se que o resultado do método empírico pode variar de acordo com as séries de vazões utilizadas, mesmo elas sendo para um mesmo período;

- Ao se gerar estocasticamente 1000 séries sintéticas de vazões para o modelo reduzido e, por meio delas, se calcular as *ER*, utilizando-se os três métodos empíricos, observou-se que o método de Heinemann apresentou melhores resultados. Ou seja, foi o método que apresentou *ER* mais próximas às observadas no modelo reduzido. Diante disso, como na literatura há vários métodos para se calcular a *ER* em reservatórios, e encontrar o que melhor se adequa não é algo trivial, sugere-se que nos futuros projetos de reservatórios se faça uma modelagem estocástica de vazões para auxiliar na escolha do melhor método para o cálculo da *ER*;

- O método de Churchill foi o que apresentou os piores resultados, tanto na análise experimental, quanto na análise estocástica;

- Para o protótipo, ao se avaliar a influência da variação das vazões nos valores das *ER*, tem-se que, por mais que existam incertezas nos valores das vazões, as quais podem ser

provocadas, por exemplo, pelos métodos de medição, as vazões pouco afetaram no valor das *ER*. Porém, ressalta-se que o reservatório da PCH é pequeno e as vazões simuladas foram pequenas, de forma que maiores reservatórios e maiores vazões podem fazer com que a *ER* seja mais afetada pelas incertezas nos valores de vazões.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alighalehbabakhani, F., Miller C.J., Selegan, J.P., Barkach, J., Mohsen, S., Abkenar, S., Dahl, T., & Baskaran, M. (2017). Estimates of sediment trapping rates for two reservoirs in the Lake Erie watershed: Past and present scenarios. *Journal of Hydrology*, 544, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.032>

Araújo, P., Rodrigues, S. O. A., Costa, V. S. C. & Avelar A. S. (2017). Análise do comportamento hidrológico da bacia Córrego Sujo, Teresópolis (RJ). *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento: XVII SBGFA e I CNGF*, 1, 739- 752. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1844>

Borland, W.M. (1971): Reservoir sedimentation. In Shen, H.W., editor, River mechanics. Vol. II, Fort Collins, CO: Colorado State University, 29.1–29.38.

Carleton R. Bern, Michael J. Holmberg, Zachary D. Kisfalusi. (2020). Effects of John Martin Reservoir, Colorado on water quality and quantity: Assessment by chemical, isotopic, and mass-balance methods. *Journal of Hydrology X*. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100051>

Carvalho, L. S.; Saliba, A. P. M.; Santos, R. S. F.; Haselbauer, M.; Velasco, D.; Viana, E. M. F.; Martinez, C. B.; Costa, M. E. F.; Freitas, F. L. (2014). Desenvolvimento do projeto do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba. XXVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.

Carvalho, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.

Carvalho, N. O.; Filizola Júnior, N. P.; Santos, P. M. C.; Lima, J. E. F. W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento em reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília.

Costa L. F. (2012). *Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na determinação de taxas de assoreamento de reservatórios* (Tese de Pós-Graduação). Instituto Alberto Luiz

Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Coz J.Le, Camenen B., Peyrard, X & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 46, 193-194. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.05.001>

Garg, A. A., Alemayehu A. S.& Sumedha C. (2020). Assessment of sedimentation and useful life of Tehri reservoir using integrated approaches of hydrodynamic modelling, satellite remote sensing and empirical curves. *Current Science*. <https://doi.org/10.18520/cs/v118/i3/411-420>

Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q. & Zhou, S. (2018). Flood risk analysis for flood control and sediment transportation in sandy regions: A case study in the Loess Plateau, China. *Journal Hydrologic*, 560, 39-55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.076>

Hager, W. H. (2018). Bed-load transport: advances up to 1945 and outlook into the future. *Journal of Hydraulic Research*, 56(5), 596-607. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1405370>

Issa, E., Al-Ansari, N., Knutsson, S. & Sherwani, G. (2015). Monitoring and Evaluating the Sedimentation Process in Mosul Dam Reservoir Using Trap Efficiency Approaches. *Engeneering*, 7, 190-202. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.74015>

Lewis, S. E., Bainbridge, Z. T., Kuhnert, P. M., Sherman, B. S., Henderson, B., Dougall, C., Cooper, M. & Brodie, J. E. (2013). Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical settings: A case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia, *Water Resour. Res.*, 49. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20117>.

Li, J., Li, W, Yang. W., Mu, L., Jin, Z. & Zhang, D. (2017). Estimating the sediment trap efficiency and lifespan of cascaded reservoirs in the Upper Yangtze River Basin, China. *Wiley*, 23(3), 204-216. <https://doi.org/10.1111/lre.12232>

Maldonado, L. H., Wendland, E. C. & Porto, R. M. (2015). Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos. *IPABH*, 10(2), 402-412. <https://doi.org/10.4126/ambi-agua.1293>

Morris G. L. (2020). Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation. *Water*, 12(3), 861. <https://doi.org/10.3390/w12030861>

Mulu, A. & Dwarakishb, G. S. (2015). Different Approach for Using Trap Efficiency for Estimation of Reservoir Sedimentation. An Overview. *Aquatic Procedia*, 4, 847 – 852. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.106>

Obreja, F.(2012). Assessment of trap efficiency of the reservoirs in the Siret Basin (Romania). *Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava*, vol. 21, nº1. <https://doi.org/10.4316/GEOREVIEW.2012.21.1.60>

Revel, N.M.T.K., Ranasiri, L.P.G.R., Rathnayare, R.M.C.R.K. & Pathirana, K.P.P. (2015). Estimation of Sediment Trap Efficiency in Reservoirs -An Experimental Study. *ENGINEER*, 48 (2), 43-49. <https://doi.org/10.4038/engineer.v48i2.6833>

Santos, E. S. & Cunha, A. C. (2015). Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP-Brasil. *BIOTA*, 5(3), 88-97. <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v5n3p88-97>

Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C. & Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54 (6), 595-614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

Shrestha, B., Cochrane, T.A., Caruso, B.S. & Arias, M.E.; Piman, T. (2016). Uncertainty in flow and sediment projections due to future climate scenarios for the 3S Rivers in the Mekong Basin. *Journal Hydroinform*, 540, 1088-1104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.019>

Sultana, Q. & Naik, M. G. (2015). Estimation of trap efficiency of Sriramsagar reservoir. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4, 116-122. <https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0423020>

Tan, G., Chen, P., Deng, J., Xu, Q., Tang, R., Feng, Z. & Yi, R. (2019). Review and improvement of conventional models for reservoir sediment trapping efficiency. *Heliyon*, 5(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02458>

Teixeira, E. K. C. (2019). Simulação estocástica do assoreamento em reservatórios (Tese de doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Teixeira, E. K. C., Rinco, A. V., Coelho M. M. L. P., Saliba A. P. M., Pinto, E. J. A. & Furtado L. M. (2020). Methodology for physical modeling of reservoir sedimentation. *Brazilian Journal of Water Resources*. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190093>

Valent, P., Výleta, R. & Danáčová, M. (2019). A Joint Sedimentation-Flood Retention Assessment of a Small Water Reservoir in Slovakia: A New Hope for Old Reservoirs? *Geosciences*, 9, 158. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040158>

Van Rijn, L. C. (2013). Sedimentation of sand and mud in reservoirs in rivers. Recuperado em 04 de novembro de 2020, de <https://www.leovanrijn-sediment.com>

Verstraeten G. & Poesen, J. (2000). Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography*, 24(2), 219–25. <https://doi.org/10.1191/030913300676742153>