

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**PIETRO CARDOSO DO NASCIMENTO**

**RAFAEL GHERARDI DE ALENCAR ROENICK**

**CÓDIGOS COMPUTACIONAIS PARA GERAÇÃO  
ESTOCÁSTICA DE DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

**OURO BRANCO - MG**

**DEZEMBRO - 2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAPEBA

PIETRO CARDOSO DO NASCIMENTO  
RAFAEL GHERARDI DE ALENCAR ROENICK

**CÓDIGOS COMPUTACIONAIS PARA GERAÇÃO  
ESTOCÁSTICA DE DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Me. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

OURO BRANCO - MG

DEZEMBRO - 2018

## FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

### DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**Título:** CÓDIGOS COMPUTACIONAIS PARA GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE DADOS  
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

**Autores:**

Pietro Cardoso do Nascimento;

Rafael Gherardi de Alencar Roenick.

Aprovada como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em  
Engenharia Civil.

---

Prof. Me. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira – UFSJ  
(Orientador)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Eliane Prado Cunha Costa dos Santos – UFSJ  
(Avaliador Interno)

---

Prof. Dr. David Rafael Quintão Rosa  
(Avaliador Externo)

Ouro Branco-MG, 13 de dezembro de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos aos nossos pais pelos ensinamentos transmitidos, pela compreensão nas situações difíceis, e por terem batalhado para nos proporcionar a oportunidade de estudar em uma boa universidade, nos apoiando até conseguirmos alcançar esse grande momento de conclusão do curso, sem vocês isso não seria possível. Aos nossos amigos e familiares por estarem sempre por perto, entendendo todas as vezes que não pudemos estar com eles devido a compromissos relacionados à universidade, nos dando forças para continuar sempre que precisamos, através de longas conversas e conselhos. Aos colegas de faculdade pela ajuda em todos os trabalhos e momentos de estudo, e também pelos momentos de distração e alegrias que nos ajudaram a passar por todo o estresse, principalmente nos finais de períodos. Aos professores por todo conhecimento compartilhado conosco, mostrando o quão bela a engenharia é, e nos inspirando a ser sempre melhores pessoas e futuros engenheiros. Agradecemos em especial ao nosso orientador, professor Emmanuel, por todo apoio, companheirismo, atenção e dedicação, além dos ensinamentos e conselhos, desde que o conhecemos como professor e principalmente durante os dois últimos anos, nos quais trabalhamos juntos. Por último, nós, os autores, agradecemos um ao outro pela união e parceria que, depois de vários trabalhos juntos durante três anos, permanece até a conclusão do curso com esse trabalho.

## RESUMO

Reservatórios são construídos para diversas finalidades, como geração de energia, abastecimento de água, etc. Essas estruturas estão sujeitas a algum grau de assoreamento, visto que ao alterar o equilíbrio do rio, a capacidade dele em transportar sedimentos é alterada. Esse assoreamento, dentre outros problemas, pode interferir no uso para o qual o reservatório foi construído. Assim, deve-se estimar o volume de material depositado e quando os sedimentos acumulados começarão a interferir nas funções do reservatório. Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é difícil porque os processos envolvidos são complexos, sujeitos a variabilidade temporal e a incertezas, o que torna o estudo não apenas determinístico, mas também estocástico. Assim, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver códigos computacionais que auxiliassem na geração de dados hidrossedimentológicos, os quais serão utilizados futuramente na simulação estocástica do assoreamento no reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba. Para a realização desse projeto foram utilizados os dados hidrossedimentológicos da PCH Salto do Paraopeba, que foi construída em 1956, sendo que o reservatório se encontra intensamente assoreado, o que a tornou inoperante. Esse projeto complementa outros dois projetos: um já finalizado e outro em execução. Todas as funções foram desenvolvidas do ambiente do *software* estatístico R, sendo que, a partir delas, foi possível se gerar estocasticamente milhares de séries contendo dados de vazões médias do período de máximas, vazões anuais e descargas sólidas totais.

**Palavras-chave:** simulação estocástica, modelo estocástico AR1, assoreamento de reservatórios, R.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba .....	9
<b>Figura 4.1</b> - Curva-chave de sedimentos utilizada para obtenção da descarga sólida na simulação estocástica .....	22
<b>Figura 4.2</b> – Relação entre as vazões anuais e as razões entre elas e as médias das ondas de máximas .....	23
<b>Figura 4.3</b> - Fluxograma apresentando as etapas que são desenvolvidas a partir das funções computacionais .....	24
<b>Figura 5.1</b> – Séries com os dados hidrossedimentológicos gerados estocasticamente.....	26

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Utilização de abordagem estocástica na simulação de transporte de sedimentos 19

Tabela 4.1 – Vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba ..... 21

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	11
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>12</b>
3.1 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS E SUAS INCERTEZAS.....	12
3.2 MODELOS ESTOCÁSTICOS .....	17
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
4.1 Geração estocástica das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos .....	21
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>26</b>
5.1 Geração estocástica das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos .....	26
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>29</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>33</b>



## 1 INTRODUÇÃO

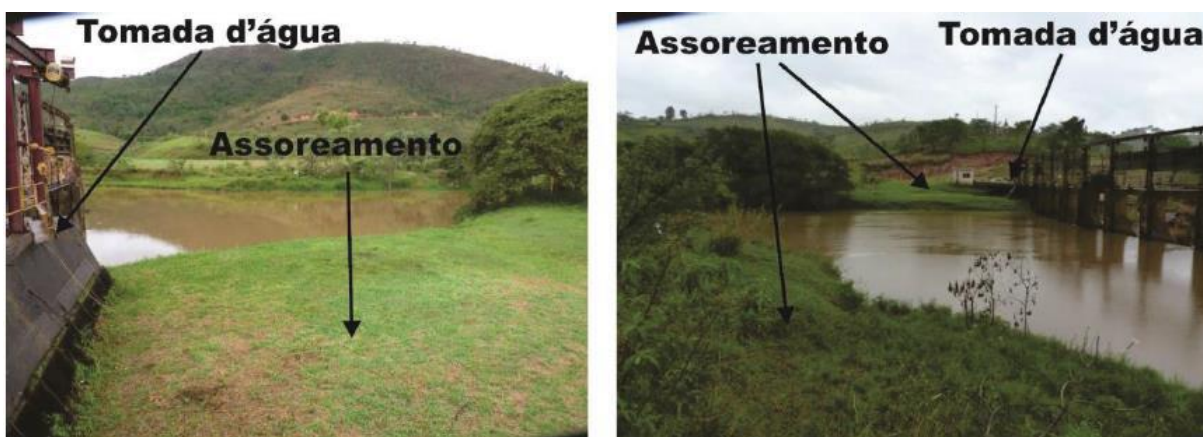
Reservatórios podem ser construídos para diversas finalidades, como abastecimento público de água, geração de energia, irrigação, controle de enchentes (ESTIGONI; MATOS; MAUD, 2014) e, ainda, acúmulo de rejeitos de mineração. Essas estruturas formadas em cursos d'água naturais estão sujeitas a algum grau de assoreamento, visto que a construção de uma barragem num rio afeta as suas características físicas e hidráulicas.

Além da redução do volume do reservatório, o assoreamento também pode provocar problemas operacionais, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN; MATOS; MAUAD, 2010).

Em se tratando de reservatórios de hidrelétricas, Maia (2006) apresenta que o assoreamento é um sério problema que leva à diminuição da capacidade de geração de energia das usinas, visto que ocorre alteração na vazão regularizada. Assim, o faturamento da concessionária com a venda de energia elétrica será reduzido, o que, conseqüentemente, acarretará na redução da compensação financeira que é paga aos Estados, Distrito Federal, Municípios e Órgãos da União, receita que é proporcional à geração de energia elétrica.

A Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba, localizada no rio Paraopeba, em Jeceaba – MG, segundo Vale (2014), iniciou sua operação em 1956, sendo que ela teve que passar por reformas em 2000, pois o assoreamento havia alcançado a tomada d'água – um dos problemas citados por Albertin, Matos e Mauad (2010), impedindo a sua operação. Atualmente a usina encontra-se inoperante devido ao assoreamento. Na Figura 1.1 é apresentado o assoreamento alcançando a tomada d'água da usina.

**Figura 1.1** - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba



Fonte: Vale, 2014.

Assim, diante do exposto acerca da PCH Salto do Paraopeba e apresentados os problemas causados pelo assoreamento, torna-se importante entender a maneira em que ele ocorreu ao longo de um determinado período, de forma que seja possível tomar medidas preventivas e corretivas quando da operação de reservatórios de hidrelétricas, bem como incentivar estudos que visem apresentar metodologias para prever taxas de sedimentação, a qual é essencial para a fase de projeto e operação de um reservatório.

Porém, para que os estudos conduzam a resultados confiáveis, são necessários dados locais representativos e consistentes, os quais raramente estão disponíveis no Brasil, uma vez que a densidade de estações sedimentométricas é reduzida e dificilmente se tem amostragens de longo tempo nos locais de interesse. Além da baixa quantidade de postos sedimentométricos, nos existentes são realizadas apenas medições da concentração sólida em suspensão, sem a determinação da descarga sólida total e dados de granulometria. Assim, muitos estudos sedimentológicos no país são prejudicados. Dessa forma, é necessário o surgimento de novas metodologias que auxiliem na obtenção de série de dados confiáveis.

A simulação estocástica surge como uma alternativa para esse cenário, pois a partir de alguns dados hidrossedimentológicos locais é possível gerar séries sintéticas com milhares de dados, os quais podem ser utilizados na modelagem numérica determinística do assoreamento.

Além do problema da falta e da qualidade dos dados hidrossedimentológicos, grande parte das séries históricas de vazões obtidas no Portal da Agência Nacional das Águas (ANA), HydroWeb, possui porcentagem significativa de dados faltosos, são curtas, contendo poucos anos de dados, ou contém dados suspeitos. Ademais, é sabido que os fatores que interferem

no processo de assoreamento estão sujeitos a grande variabilidade temporal e a várias incertezas, o que torna o seu estudo não apenas determinístico, mas também estocástico.

Assim, foram desenvolvidas função computacionais para se gerar milhares de séries com dados hidrossedimentológicos para que, futuramente, seja simulado estocasticamente o assoreamento na PCH Salto do Paraopeba.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver códigos computacionais para se gerar séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos, para a PCH Salto do Paraopeba, de maneira que se possa simular numericamente o seu assoreamento, em outro projeto de pesquisa.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS E SUAS INCERTEZAS**

Os recursos hídricos constituem um bem natural e renovável, de maneira que o volume total disponível no globo terrestre permanece relativamente constante ao longo do tempo. Contudo, a água se mantém em circulação dinâmica, sendo variável no tempo, secular e sazonal, nos diversos compartimentos ambientais. Dessa forma, a distribuição de água no planeta se altera ao longo dos anos, sendo influenciada diretamente pela forma como o ambiente vem sendo modificado, desde os impactos locais até os impactos globais, além de sofrer alterações no decorrer de um ano hidrológico, segundo as diversas estações climáticas (HELLER; PÁDUA, 2010).

A gestão de recursos hídricos é de fundamental importância para o planejamento, desenvolvimento, distribuição e administração dos recursos hídricos, uma vez que visa garantir sua utilização da maneira mais otimizada possível, em conformidade com a legislação e normas pertinentes. Tal gestão tem como objetivo manter a qualidade e a quantidade de água disponível, promover o desassoreamento e controle de erosão, executar o controle de cheias e recomposição de mata ciliar, além de recuperar e preservar nascentes, mananciais e cursos d'água.

Como a água está constantemente se repondo na natureza e, embora as reservas de água em reservatórios naturais e artificiais sejam úteis para aumentar os recursos hídricos disponíveis, o fluxo de água deve ser o foco principal nas avaliações de recursos hídricos. Ao considerar o fluxo de água como a medida mais relevante dos recursos hídricos, a velocidade de escoamento da água torna-se crucial (OKI; KANAI, 2006).

Segundo Garg e Jothiprakash (2008), a velocidade do escoamento e a sua turbulência são reduzidas com a construção de reservatórios em cursos d'água naturais, o que se deve ao aumento da área molhada da seção transversal do rio e à diminuição da declividade da linha d'água. Tal redução tem o efeito de desacelerar o movimento da partícula na direção da corrente e de restringir a resultante das forças de sustentação (LOPES, 1993). Desse modo, as partículas sólidas podem se depositar ao longo do reservatório, estando este sujeito a algum grau de assoreamento.

O assoreamento é um problema que afeta os cursos d'água ocasionando a diminuição do volume de água disponível para utilização e, conseqüentemente, a redução da quantidade de energia gerada. É causado principalmente pela água da chuva, que transporta os sedimentos suspensos que são originados do solo exposto devido ao seu esgotamento por uso inadequado e devido à retirada da vegetação. Qualquer reservatório, independente da sua finalidade, pode ter sua capacidade de armazenamento alterada por causa da presença de sedimentos. Dessa forma, de acordo com Cabral (2005), atualmente há um grande número de reservatórios no Brasil que se encontra totalmente ou parcialmente assoreados, sendo estes, em sua maioria, de pequeno e médio porte.

O depósito das partículas mais grossas da carga de sedimentos afluente ao reservatório, compostas principalmente por pedregulho e areia, tende a ocorrer na entrada do lago (final do remanso). As partículas de tamanho médio são as próximas a serem depositadas, seguidas pelas partículas finas, as quais tendem a se depositar no trecho final do reservatório ou permanecem em suspensão e alcançam os órgãos de descarga (TEIXEIRA, 2013).

Nesse contexto, diversos fatores afetam o volume de sedimentos que se acumulará num reservatório, sendo eles: a quantidade de sedimentos produzidos na bacia de contribuição; as condições geológicas, climáticas e vegetação da região; as características físicas e hidráulicas do reservatório; e as características dos sedimentos – sendo que, dentre esses, segundo Salas e Shin (1999), os principais fatores são: a vazão do rio; a quantidade de sedimentos que entra no reservatório; o tamanho e o peso específico dos sedimentos; e o tamanho e a operação do reservatório. Problemas decorrentes do assoreamento em reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume, o que pode interferir no uso para o qual ele foi construído.

Além da redução do volume do reservatório, o assoreamento também pode provocar problemas operacionais, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia, diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN; MATOS; MAUAD, 2010). Em reservatórios construídos para o controle de enchentes, o assoreamento reduz sua capacidade de retenção, podendo causar perdas econômicas e até de vidas humanas à jusante

deles. Além disso, os sedimentos interagem com a água retendo por adsorção ou liberando seus poluentes.

Assim, vistos os problemas causados pelo assoreamento, tornam-se importantes os estudos que visem apresentar metodologias para prever taxas de sedimentação, a qual é essencial para as fases de projeto e operação de um reservatório. Com auxílio de trabalhos nessa área, os quais promovam estimativas espaço-temporal do assoreamento, possibilita-se o estudo do volume do material a ser sedimentado ao passar dos anos e sua distribuição não uniforme no reservatório. Além disso, tanto medidas preventivas quanto corretivas podem ser tomadas de forma mais eficiente, pois, como discutido por Annandale (2011) citado por Adam *et al.* (2015), o controle da sedimentação em reservatórios deve ser uma prioridade pelas décadas que estão por vir.

Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é uma tarefa difícil porque os processos envolvidos - erosão, transporte, deposição e consolidação dos sedimentos - são complexos e podem ocorrer simultaneamente. Além disso, os fatores que interferem no processo estão sujeitos a grande variabilidade temporal e a várias incertezas, o que torna o estudo do assoreamento não apenas determinístico, mas também estocástico. Assim, desenvolver um modelo estocástico para avaliar o assoreamento de reservatórios de água é um dos focos desse projeto. Ressalta-se que, ao se utilizar um modelo estocástico, além de avaliar as incertezas, pode-se também determinar as estatísticas do sedimento depositado no reservatório ao longo do tempo, como a média, a variância e a distribuição de probabilidade.

Pode-se citar algumas das incertezas envolvidas no processo de assoreamento, as quais são devidas à variabilidade natural do sistema: vazão afluente; concentração de sedimentos; granulometria dos sedimentos; entre outros. Além disso, há imprecisões na medição desses parâmetros e possibilidade de serem imprecisos os levantamentos topobatimétricos da região do reservatório.

Em relação às incertezas associadas à vazão, Righetto (1998) discutiu o caráter estocástico das vazões de um curso d'água, sendo ela uma variável aleatória que apresenta três componentes principais: o componente de tendência, o qual descreve a variação da vazão (aumento ou diminuição) ao longo do tempo; o componente de periodicidade, o qual define as variações provocadas pela sazonalidade (período seco e chuvoso); e o componente aleatório, o

qual representa a variação e aleatoriedade da magnitude e frequência de ocorrência da variação da vazão.

Outra fonte de incerteza na estimativa do assoreamento de reservatórios é o fato do estudo ser feito para um cenário futuro, de forma que há também incertezas embutidas nas estimativas do aporte de sedimentos e vazões afluentes futuros. Tem-se que o aporte de sedimentos pode variar ao longo dos anos devido à mudança de uso e ocupação da bacia de drenagem, enquanto a vazão pode ser influenciada pela mudança climática.

Schleiss *et al.* (2016) apresentam que a incerteza quanto à mudança climática torna o processo de assoreamento em reservatórios um fenômeno estocástico, sendo que, segundo Juracek (2015), é esperado que as mudanças climáticas afetem os reservatórios aumentando as taxas de sedimentação. Assim, a estocasticidade relacionada ao aquecimento global deve ser considerada em modelos de transporte de sedimentos.

Além das fontes de incerteza na variabilidade natural do sistema, a qual Tung e Yen (2005) *apud* Kuria e Vogel (2015) ressaltam que são difíceis de controlar, tem-se incertezas relacionadas ao modelo, as quais são específicas ao modelo matemático usado para representar o sistema natural. Esse tipo de incerteza geralmente decorre de uma compreensão incompleta do sistema que está sendo modelado, da incerteza relacionada com os dados e da incerteza operacional (FRANCESCHINI; TSAI, 2010).

Assim, diante de tantas fontes de incertezas, métodos de análise dessas imprecisões estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos, porém, os estudos relacionados com as análises de incerteza da modelagem de transporte de sedimentos ainda são limitados (OH, TSAI; CHOI, 2015), mais especificamente, são poucos os estudos que propuseram algum modelo estocástico para estudar o assoreamento de reservatórios.

A fim de realizar este estudo, faz-se necessária a utilização de séries históricas de vazões provenientes de medições realizadas em uma estação fluviométrica, a qual, de acordo com Pinto e Holtz (1976), consiste em qualquer seção de um rio, convenientemente instalada e operada para a obtenção sistemática das vazões ao longo do tempo. A vazão é obtida a partir do nível das águas, observado com a ajuda da régua linimétrica ou registrado pelo linígrafo, aplicado em uma curva-chave.



De posse destas medições, cria-se uma série histórica, que é um conjunto de eventos e dados agrupados ao longo do tempo. Esses dados, obviamente, são os valores das vazões.

A Agência Nacional das Águas (ANA), por meio do portal HidroWeb, disponibiliza séries históricas de cotas, chuvas, evaporação, perfil do rio, qualidade da água, sedimentos e, sobretudo, vazões. É possível notar a presença de falhas diárias, mensais e anuais em tais séries, o que pode interferir na realização de estudos ou até mesmo inviabilizá-los. As falhas podem ser devido à ausência do observador, falhas nos mecanismos de registro, perda das anotações ou das transcrições dos registros pelos operadores e encerramento das observações (Streck *et al.*, 2009; Bertoni; Tucci, 2007).

Sendo assim, conforme mencionado por Teixeira *et al.* (2016), ao se analisar as séries, é comum tomar-se a decisão de descartar todo o ano hidrológico com falhas ou utilizar alguma metodologia para preenchê-las.

O preenchimento de falhas e a extensão das séries são realizados por meio da análise de correlação dos dados observados no período comum entre a estação com dados a serem preenchidos e a estação de apoio (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006).

Desta forma, segundo Barnette e Kobiyama (2006) *apud* Oliveira *et al.* (2008), a aplicação da modelagem no preenchimento de falhas pode facilitar os estudos de gestão dos recursos hídricos, uma vez que possibilita o conhecimento do comportamento hidrológico, permitindo um aproveitamento consciente destes recursos.

Nesse cenário de falhas e incertezas associadas ao processo de assoreamento, alguns trabalhos encontrados na literatura nacional apresentaram modelos estocásticos para o estudo do transporte de sedimentos, podendo-se citar Farias (2003) e Estigoni (2016).

No trabalho desenvolvido por Farias (2003), gerou-se séries sintéticas de vazões por três metodologias diferentes – Thomas & Fiering com modificação de Clarke, Thomas & Fiering com modificação de Clarke e transformação de Matalas e Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos de Svanidze – com o objetivo de melhor representar o escoamento das águas para os reservatórios e auxiliar no seu dimensionamento, de modo que ele ocorra de acordo com as reais necessidades. O autor conclui que, dentre os métodos de geração de vazões estudados, aquele que melhor reproduziu a natureza do evento hidrológico em questão – o regime de escoamento das águas para os reservatórios – foi o Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos de Svanidze.

Estigoni (2016), por sua vez, identificou em seu trabalho os mecanismos de como a variabilidade hidrológica influencia a previsão do assoreamento de reservatórios por meio de casos idealizados e validação das hipóteses em estudo de caso, propondo ainda um fluxograma de atividades para a previsão de assoreamento capaz de reduzir incertezas inerentes a estes estudos, pautado na modelagem hidrodinâmica de transporte de sedimentos, ferramentas de hidrologia estatística e uso de múltiplos cenários. O autor comprova que modelos estocásticos para geração de séries sintéticas produzirão séries ligeiramente diferentes caso aplicados mais de uma vez, mesmo quando utilizando parâmetros de calibração iguais, causando significativa diferença na previsão do assoreamento.

### **3.2 MODELOS ESTOCÁSTICOS**

De acordo com Koenigsdorf (2009), um processo estocástico pode ser definido como uma sequência de variáveis aleatórias indexadas ao tempo e também a eventos. É uma variável que se desenvolve no tempo de maneira parcialmente aleatória e imprevisível. Por outra perspectiva, um processo estocástico é uma sequência de funções mensuráveis, ou seja, uma variável aleatória definida num espaço de probabilidade que toma valores num espaço de funções. O autor descreve ainda que tais processos podem ser classificados em estacionários e não estacionários.

Para Werner e Ribeiro (2003), modelos estacionários são aqueles que assumem que o processo está em “equilíbrio”. Assim, um processo é considerado fracamente estacionário se suas média e variância se mantêm constantes ao longo do tempo e a função de autocovariância depende apenas da defasagem entre os instantes de tempo. Um processo é fortemente estacionário se todos os momentos conjuntos são invariantes a translações no tempo.

Ainda segundo Koenigsdorf (2009), os processos estocásticos estacionários com média e a variância constantes no tempo são amplamente utilizados, em detrimento dos não estacionários, os quais possuem momentos que crescem sem limites à medida que o tempo passa.

Um processo estocástico pode ser classificado como um processo em tempo discreto ou em tempo contínuo. Um processo estocástico em tempo discreto é aquele em que o valor da variável só varia em um determinado instante de tempo. Esta variável é classificada como

variável discreta. Já um processo em tempo contínuo, a variável assume valores a qualquer instante de tempo, por isso é chamada de variável contínua.

Nesse contexto, Lúcio *et al.* (2010) descrevem que uma série temporal pode ser analisada como uma realização parcial de um processo estocástico, por meio de modelos estocásticos, cuja característica principal se fundamenta no fato das variáveis apresentarem uma estrutura de dependência. Para essa análise, são utilizados modelos estocásticos.

A escolha do modelo estocástico, segundo Morettin e Tolo (2006) *apud* Câmara *et al.* (2016), é baseada, principalmente, nas autocorrelações da variável aleatória em questão.

Ressalta-se também que ao se utilizar um modelo estocástico, além de avaliar as incertezas, pode-se também determinar as estatísticas da variável em análise ao longo do tempo, como a média, a variância e a distribuição de probabilidade.

Dentre tais modelos, destaca-se o modelo AR(1). Esse é um modelo autorregressivo, onde os dados de uma série são considerados como sendo um processo composto pela soma de duas componentes: uma determinística e outra aleatória (Farias, 2003). A Equação 1 representa o modelo completo para o cálculo da vazão, sendo ela:

$$Q_i = \mu + \rho * (Q_{i-1} - \mu) + t_i * \sigma * (1 - \rho^2)^{1/2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:  $Q_i$  é a vazão no intervalo de tempo definido;  $\mu$  é a média populacional dos dados;  $\rho$  é o coeficiente de autocorrelação da população;  $t_i$  é uma componente de aleatoriedade gerada a partir da distribuição normal  $\sim N(0,1)$ ; e  $\sigma$  é o desvio padrão populacional.

Anteriormente foram apresentadas as fontes de incertezas na análise de determinada variável, por isso, métodos de análises dessas imprecisões estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos, como nos trabalhos apresentados na Tabela 3.1.

Observando os trabalhos apresentados na Tabela 3.1 sobre modelos estocásticos, tem-se que em nenhum o processo do assoreamento de reservatórios foi abordado, pois ainda são raros esses estudos. Na literatura foram encontrados três trabalhos mais recentes sobre o tema, os quais estão resumidos abaixo.

**Tabela 3.1** – Utilização de abordagem estocástica na simulação de transporte de sedimentos

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Modelo estocástico</b>
Moll, Schilperoort e De Leeuw (1987)	Avaliaram vários métodos estatísticos para analisar formas de leito de rios aluviais	AR (2)
Freitas (2001)	Comparação entre modelos estocásticos para geração sintética de vazões	AR(1), GAR(1), ARR, PAR(1), Two-tier, Método dos Fragmentos e Modelo de Desagregação
Wu e Chen (2009)	Atualização dos parâmetros de um modelo de arraste de sedimento	Cadeia de Markov - Monte Carlo
Bialik (2011)	Desenvolvimento de um modelo teórico de grãos não uniformes em um fluxo turbulento de canal aberto	simulação de Monte Carlo
Costa, Damázio e Raupp (2014)	Avaliar os volumes de espera calculados no estudo de prevenção de cheias e as regras de operação de reservatórios propostas a partir da análise estatística de variáveis associadas ao controle de cheias.	OPCHENS
Figueiredo e Blanco (2014)	Previsões de vazão e níveis de água médios mensais para a bacia do rio Tapajós	ARIMA
Oh, Tsai e Choi (2015)	Proposição de uma abordagem estocástica do transporte de sedimento para quantificar a incerteza associada à estimativa da concentração de sedimentos	Oh, Tsai e Choi
Câmara et al. (2016)	Desenvolvimento de um modelo hidrológico estocástico para a previsão diária de nível fluviométrico do rio Tocantins	ARIMA

No trabalho de Laquini (2009) é descrito um modelo matemático tridimensional baseado numa formulação unidimensional (modelo quase-tridimensional), o qual é usado para simular o processo de assoreamento no reservatório de água da Barragem John Martin, Colorado, EUA. O autor apresenta o método de simulação de Monte Carlo como uma ferramenta responsável por levar em consideração o caráter estocástico do problema, em conjunto com a

técnica de amostragem hipercubo latino. Os resultados mostraram que o método de Monte Carlo permitiu descrever as distribuições de probabilidade e os momentos estatísticos das respostas, como, por exemplo, a área de sedimentos depositados em cada seção transversal do reservatório, e forneceu informações importantes tanto para o projeto quanto para a operação do reservatório.

Adam et al. (2015) estimaram a sedimentação futura no reservatório Sidi Yacoub no norte da Argélia usando uma abordagem estocástica. Segundo os autores, a grande novidade do trabalho é a abordagem estocástica desenvolvida para caracterizar as vazões de montante e jusante ao reservatório, sendo essa uma abordagem nova, a qual permite um alto nível de detalhamento na reprodução da variabilidade das séries anuais. Assim, a estimativa para assoreamentos futuros pôde ser executada numa abordagem verdadeiramente estocástica, tendo como premissa a estacionariedade das distribuições estatísticas das vazões ao longo de todo o período analisado.

Estigoni (2016) discutiu a incerteza na estimativa do assoreamento devido ao aporte de sedimentos, o qual é geralmente realizado por meio da relação da descarga sólida com a vazão (curva-chave de sedimentos), sendo esta uma relação expressada por uma equação do tipo potência. Segundo o autor, muitas vezes a curva-chave de sedimentos calibrada pode não representar bem a realidade, visto que a maioria do transporte de sedimentos se dá em eventos de cheia, fazendo a ressalva que medições durante esses eventos são importantes, porém tendem a não acontecer. Foram montados quatro cenários de vazões variando em torno de uma mesma média, sendo a diferença entre os cenários a amplitude de variação das vazões. Os resultados apresentados demonstraram que quanto maior a amplitude de variabilidade da vazão, maior o aporte de sedimentos, mesmo se tendo uma vazão média constante. O autor também apresentou que quanto maior o expoente da curva-chave de sedimentos, maior é a influência da variabilidade da vazão no cálculo da descarga sólida.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Geração estocástica das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos

Os parâmetros considerados como estocásticos nessa pesquisa foram: vazão anual afluente e descarga sólida total média anual. Eles foram considerados assim, pois apresentam variabilidade espaço-temporal e incertezas nos seus valores das séries históricas da PCH Salto do Paraopeba. Tem-se que primeiramente foram geradas as vazões anuais e, a partir delas, gerou-se o outro parâmetro.

As milhares de séries com vazões anuais foram geradas utilizando-se o modelo estocástico AR(1), o qual foi apresentado na Equação 1. As premissas para utilização desse modelo é que os dados reais da série histórica de vazões anuais (**Tabela 4.1**) sejam estacionários e sigam distribuição Normal, sendo que isso foi verificado por Reis e Policarpo (2017), os quais concluíram que as vazões anuais da série histórica da PCH atendiam as duas premissas. Além disso, esses autores geraram 1000 séries sintéticas de vazões anuais da PCH e verificaram, a partir das estatísticas das séries (média, variância e autocorrelação *lag* 1), que o modelo AR(1) se ajustou bem aos dados originais.

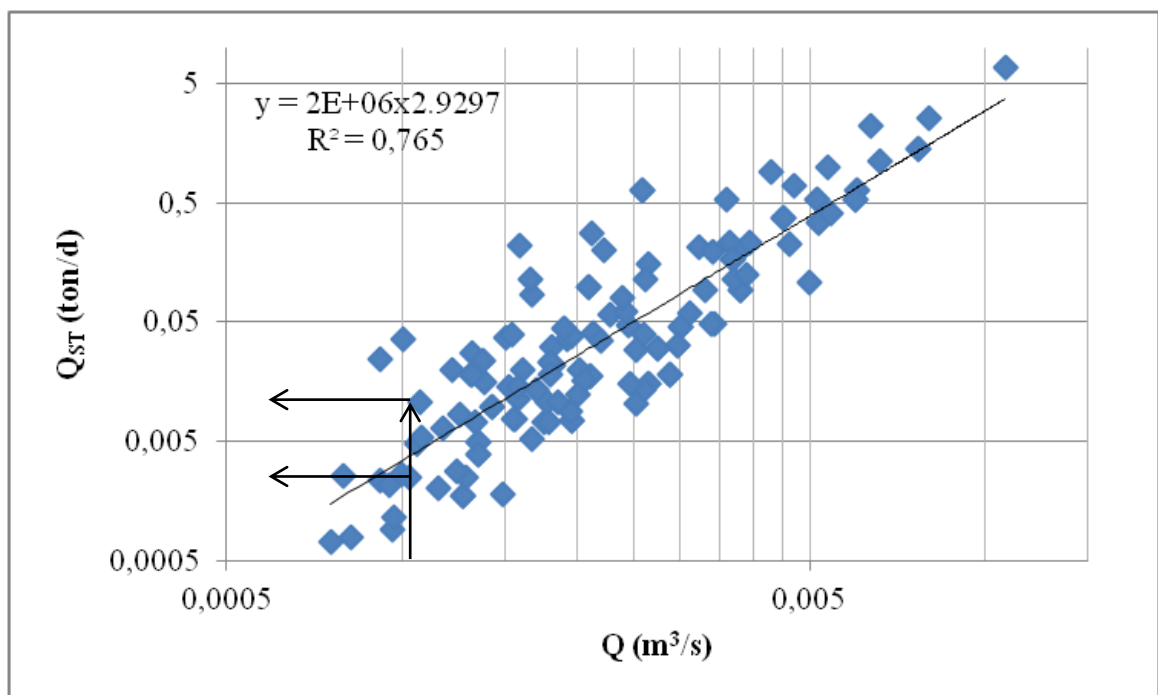
**Tabela 4.1** – Vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba

<b>Ano Hidrológico</b>	<b>Q<sub>anual</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ano Hidrológico</b>	<b>Q<sub>anual</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ano Hidrológico</b>	<b>Q<sub>anual</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>
1967 - 1968	37,29	1984 - 1985	61,11	2001 - 2002	33,68
1968 - 1969	29,08	1985 - 1986	41,27	2002 - 2003	35,42
1969 - 1970	33,26	1986 - 1987	42,07	2003 - 2004	43,75
1970 - 1971	19,77	1987 - 1988	37,7	2004 - 2005	48,21
1971 - 1972	44,29	1988 - 1989	33,15	2005 - 2006	33,27
1972 - 1973	47,27	1989 - 1990	30,66	2006 - 2007	32,25
1973 - 1974	40,37	1990 - 1991	55,75	2007 - 2008	35,19
1974 - 1975	33,15	1991 - 1992	58,45	2008 - 2009	58,05
1975 - 1976	29,22	1992 - 1993	57,93	2009 - 2010	26,75
1976 - 1977	45,67	1993 - 1994	41,75	2010 - 2011	21,4
1977 - 1978	40,31	1994 - 1995	39,41	2011 - 2012	44,7
1978 - 1979	65,51	1995 - 1996	43,81	2012 - 2013	23,5
1979 - 1980	53,53	1996 - 1997	56,82	2013 - 2014	9,66
1980 - 1981	46,16	1997 - 1998	27,21	2014 - 2015	17,24
1981 - 1982	58,8	1998 - 1999	31,66	2015 - 2016	24,72
1982 - 1983	76,04	1999 - 2000	35,5	2016 - 2017	18,32
1983 - 1984	45,47	2000 - 2001	26,52		

No programa estatístico R, para cada vazão anual gerada pelo modelo AR(1), gerou-se o seu respectivo valor de descarga sólida total, utilizando-se a curva-chave de sedimentos, a qual foi obtida por Reis e Policarmo (2017) e está apresentada na **Figura 4.1**. Entretanto, como os parâmetros estocásticos possuem grau de incerteza e aleatoriedade, não se admitiu que a relação entre eles fosse unívoca. Ou seja, para uma mesma vazão (Q) pode se ter mais de um valor observado da descarga sólida total ( $Q_{ST}$ ), como apresentado pelas setas na **Figura 4.1**.

Assim, cada valor da  $Q_{ST}$  foi gerado a partir de uma distribuição Normal, cuja média é igual ao valor da descarga sólida total encontrada pela equação da regressão, para um valor de Q, e o desvio padrão foi fixo e igual ao valor do desvio padrão dos resíduos da regressão, o qual é 0,006 ton/d. Por exemplo, utilizando-se o modelo estocástico AR(1), gerou-se um Q de 0,0064 m<sup>3</sup>/s. Entrando com esse valor na equação da curva-chave de sedimentos (**Figura 4.1**), encontra-se uma descarga sólida total de 0,74 ton/d, aproximadamente. No programa R, utilizando-se a função “*rnorm*”, gerou-se, aleatoriamente, uma  $Q_{ST}$  seguindo distribuição Normal, cuja média é 0,74 ton/d e o desvio padrão é 0,006 ton/d. Com isso, para cada vazão anual gerada estocasticamente, gerou-se sua respectiva  $Q_{ST}$ .

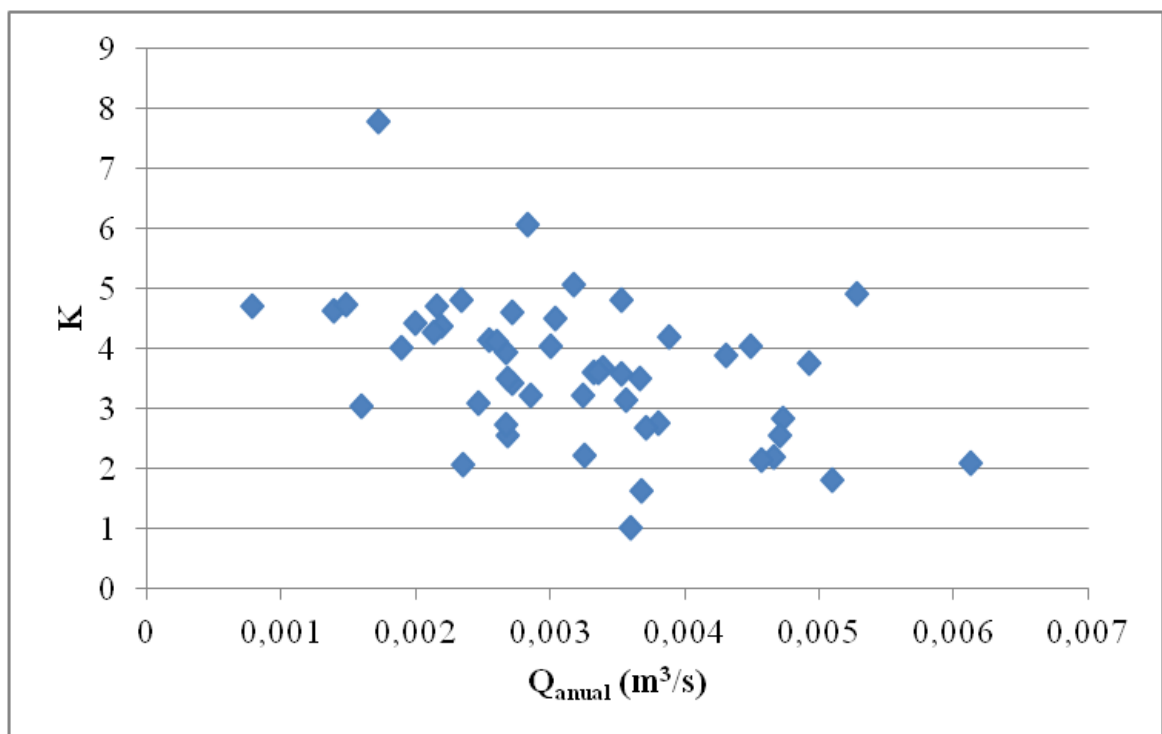
**Figura 4.1** - Curva-chave de sedimentos utilizada para obtenção da descarga sólida na simulação estocástica



Esse projeto de pesquisa complementa outros dois projetos: um propõe simular estocasticamente, num modelo numérico, o assoreamento na PCH e o outro está simulando o assoreamento da PCH num modelo reduzido. Este último projeto observou que as vazões anuais não movimentavam o sedimento, os quais sofriam transporte com vazões de magnitudes próximas as médias das ondas que continham as vazões máximas dos anos hidrológicos. Com isso, as funções computacionais aqui desenvolvidas tiveram que ser corrigidas, visto que o objetivo delas é auxiliar o projeto de pesquisa que visa estimar estocasticamente, num modelo numérico, o assoreamento da PCH.

Para se fazer essa correção nas vazões, para a série histórica de vazões diárias da PCH, a qual é de 1967 a 2017, estipulou-se todas as vazões médias das ondas de máximas. Os valores dessas médias foram divididos pelas vazões anuais da série, ou seja, observou-se quanto as médias eram maiores que as vazões anuais. Na **Figura 4.2** está apresentada a relação entre as vazões anuais, as quais foram convertidas para o modelo reduzido da PCH, e as razões entre essas vazões e as médias das ondas de máximas, sendo essa razão denominada de “K”.

**Figura 4.2** – Relação entre as vazões anuais e as razões entre elas e as médias das ondas de máximas



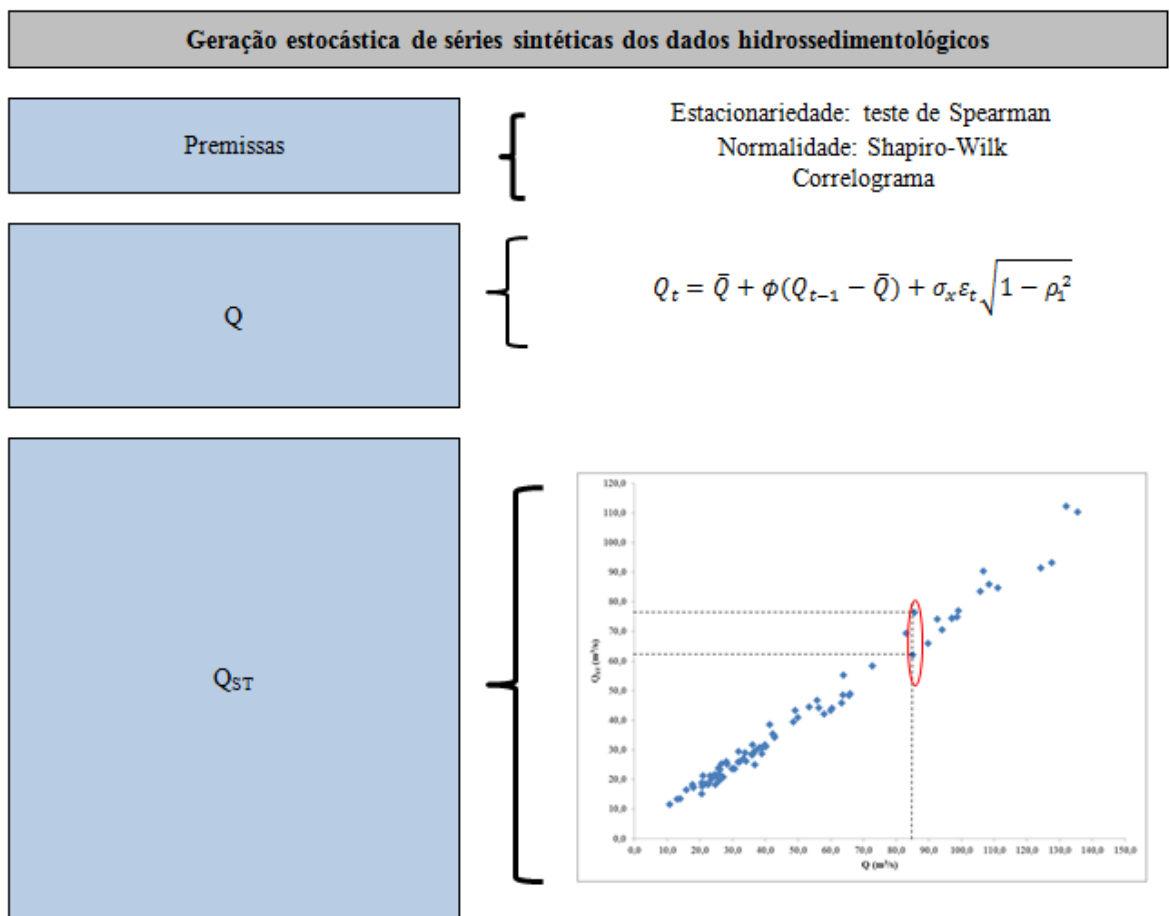
Pela **Figura 4.2**, percebe-se que a relação entre essas variáveis é aleatória. Então, para obtenção das vazões médias das ondas de máximas a partir das vazões anuais geradas



estocasticamente pelo modelo AR(1), desenvolveu-se o seguinte procedimento no programa R: geraram-se as vazões anuais, a partir do modelo AR(1), e as multiplicou por valores de K, sendo os K obtidos aleatoriamente a partir de uma distribuição Normal, cuja a média (3,71) e o desvio padrão (1,16) são referentes aos valores da **Figura 4.2**. Ressalta-se que, no programa R, aplicou-se nos valores de K da figura o teste de *Shapiro-Wilk*, ao nível de 5% de significância, para identificar se eles seguiam distribuição Normal de probabilidade, o que foi confirmado pelo teste.

Na **Figura 4.3** é apresentado um fluxograma resumindo as etapas para geração dos parâmetros estocástico que alimentarão um modelo numérico de simulação de assoreamento, sendo que todas as etapas foram implementadas a partir de funções desenvolvidas no programa R, as quais estão no Apêndice A e são o objetivo desse projeto de pesquisa.

**Figura 4.3** - Fluxograma apresentando as etapas que são desenvolvidas a partir das funções computacionais



O fluxograma apresenta que as funções computacionais criadas permitem o seguinte:

- Depois de verificadas as premissas do modelo AR(1), as vazões anuais foram geradas e multiplicadas por valores de K, gerados aleatoriamente, para que fossem encontradas as vazões médias das ondas de máximas.
- A partir das vazões anuais, de posse da curva-chave de sedimentos, foram gerados os valores da descarga sólida total ( $Q_{ST}$ ), a partir da distribuição Normal de probabilidade.
- Após serem executadas todas as funções desenvolvidas, o resultado foi 1000 séries de vazões (Q) médias dos períodos de máximas; 1000 séries de vazões anuais; e igual número de séries de descargas sólidas totais ( $Q_{ST}$ ), sendo que a quantidade de valores de cada série dependia do número de anos que se queria simular o assoreamento. No outro projeto de pesquisa, complementar a esse, foram simulados cinco anos, por ser o período entre as duas batimetrias consecutivas a que se teve acesso. Assim, cada série de dados tinha cinco valores de Q e  $Q_{ST}$ , visto que se está trabalhando com valores anuais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Geração estocástica das séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos

Conforme descrito no item anterior, foi desenvolvido um código computacional na plataforma do *software* R, o qual recebe a série histórica de vazões anuais da PCH e gera, em arquivos externos ao programa, 1000 séries com vazões médias dos períodos de máximas, 1000 com vazões anuais e outras 1000 com descargas sólidas totais. Esse código é o principal resultado dessa pesquisa e encontra-se no Apêndice A. As séries com dados hidrossedimentológicos gerados serão utilizadas para simulação numérica estocástica do assoreamento no reservatório da PCH, sendo esse um projeto de pesquisa complementar.

Para ilustrar o resultado das funções computacionais, na

**Figura 5.1** estão apresentadas algumas séries geradas.

**Figura 5.1** – Séries com os dados hidrossedimentológicos gerados estocasticamente



Foram apresentadas a primeira e a milésima série gerada para cada parâmetro estocástico, de forma a se evidenciar que as 1000 séries são diferentes umas das outras. Na

**Figura 5.1 (a)** estão as vazões médias dos períodos de máximas. A

**Figura 5.1 (b)** apresenta as vazões anuais utilizadas para gerar as descargas sólidas totais  
(

**Figura 5.1 (c)**. Nos arquivos estão apresentados cinco valores para cada parâmetro, já que foram simulados cinco anos de assoreamento no modelo reduzido da PCH (2013 a 2017), sendo esse outro projeto de pesquisa. Ressalta-se que os valores apresentados estão na escala do modelo reduzido.

## **6 CONCLUSÕES**

Os códigos desenvolvidos no programa R estão funcionando adequadamente e permitiram gerar séries com dados de vazões médias dos períodos de máximas, vazões anuais e descargas sólidas totais. Assim, verifica-se que a plataforma do R é um ambiente que propicia ótimo resultado para geração estocástica de dados, podendo ser utilizada em outras pesquisas na área de recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, N.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTTON, M.; DEWALS, B. *Stochastic Modelling of Reservoir Sedimentation in a Semi-Arid Watershed*, Springer Science+Business Media B. V., 2015.
- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos do reservatório de três irmãos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n.4, p. 57-67, 2010.
- ANNANDALE, G. Going full circle. *Internacional Water Power Dam Construction*, v. 63, n.4, p. 30–34, 2011.
- BARNETCHE, S.J.; KOBIYAMA, W. Modeling fluvial response to in-stream woody vegetation: implications for stream corridor restoration. *Earth Surf Process Land*, v. 33, p. 890-909, 2006.
- BIALIK, R. J. *Numerical study of saltation of non-uniform grains*. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49:5, 697-701, DOI: 10.1080/00221686.2011.598025
- CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. *Caminhos da Geografia*, v. 14. p. 62-69, 2005.
- CÂMARA, R. K. C.; ROCHA, E. J. P.; PROTÁZIO, J. M. B.; QUEIROZ, J. C.; RIBEIRO, W. M. N.; SIQUEIRA, I. S.; LIMA, A. M. M. *Modelagem hidrológica estocástica aplicada ao rio Tocantins para a cidade de Marabá-PA*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2016.
- COSTA, F.S.; DAMÁZIO, J. M.; RAUPP, I. P. *Modelo de simulação estocástica para operação de controle de cheias em sistemas hidroelétricos*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Assessment of the accuracy of different standard methods for determining reservoir capacity and sedimentation. *Journal Soils Sediments*, v. 14, n. 7, p. 1224-1234, 2014.
- ESTIGONI, M. V. *Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu – SP*. 2016. 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.
- FARIAS, J. A. M. *Métodos de geração de vazões mensais e suas influências sobre a curva de garantia versus vazão regularizada em reservatórios do estado do Ceará*. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

FIGUEIREDO, N.M.; BLANCO C. J. C. *Simulação de Vazões e Níveis de Água Médios Mensais para o Rio Tapajós Usando Modelos ARIMA*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 19 n.3 - Jul/Set 2014,111-126.

FRANCESCHINI, S.; TSAI, C.W. *Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River*. Advances in Water Resources, v. 33, p.493-503, 2010.

FREITAS, M. A. S. *Geração de vazão em rios de regiões semi-áridas*, 2001.

GARG, V.; JOTHIPRAKASH, V. Estimation of useful life of a reservoir using sediment trap efficiency. *Journal of Spatial Hydrology*, v.8, n.2, p. 1-14, 2008.

HELLER, K. W., PÁDUA, A. D. *Times series modelling of water resources and environmental systems*, Developments in water Science, v. 45, ed, Elsevier, 2010, 1010p.

JURACEK, M. G. *Rank correlation methods*, 2ª ed, New York: Hafner, 2015.

KOENIGSDORF, M. A. L. *Avaliação de Projetos de Exploração e Produção de Petróleo via Opções Reais: Abordagem por Mínimos Quadrados de Monte Carlo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

LAQUINI, J. P. *Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração*. 2009. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2009.

LOPES, A. V. *Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios*. 1993. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

LÚCIO, P. S.; SILVA, F. D. S.; GUIMARÃES, L. T. F.; SANTOS, L. A. R.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; BALBINO, H. T.; SARMANHO, G. F.; SANTOS, L. S. F. C.; LUCAS, E. M. W.; BARBOSA, T. F.; DIAS, P. L. S. Um Modelo Estocástico Combinado de Previsão Sazonal para a Precipitação no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1, p.70-87, 2010.

MOLL, J. R.; SCHIELPEROOT, T.; LEEUW, A. J. *Stochastic analysis of bedform dimensions*. Journal of Hydraulic Research, 1987, 25:4, 465-479, DOI:10.1080/00221688709499263.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. *Análise de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006, 564 p.

OH, J.; TSAI, C. W. *A stochastic jump diffusion particle-tracking model (SJD-PTM) for sediment transport in open channel flows*. Water Resources Research, 2010, Vol. 46, W10508, DOI:10.1029/2009WR008443.

OH, J.; TSAI, C. W.; CHOI, S. *Quantifying the Uncertainty Associated with Estimating Sediment Concentrations in Open Channel Flows Using the Stochastic Particle Tracking Method*. Journal Hydraulic Engineering, 2015.

OLIVEIRA, D. *Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type I Error Rate and Power under Different Distributions*. Journal of Medicine Cincinnati. v. 36, n. 3, p. 171–176, 2008.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T. *Medições de vazão*. In: PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. Hidrologia básica. 1ª ed. Rio de Janeiro, 1976. cap 10, p. 182.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. *Estudo da vazão em cursos d'água*. Viçosa: UFV, 2006. (Caderno didático).

REIS, E. D; POLICARPO, L. G. A. *Geração estocástica de séries sintéticas de vazões para simulação do assoreamento da PCH Salto do Paraopeba - MG*. 2017. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, 2017.

RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Ed. EESC/USP. São Carlos – SP, 1998, 840 p.

SCHLEISS, A. D.; ABDERREZZAK, K. E. K.; MOSSELMAN, E.; HABERSACK, H.; LEBERT, F.; AELBRECHT, D.; LAPERROUSAZ, E. Physical model experiments for sediment supply to the old Rhine through induced bank erosion. *International Journal of Sediment Research*, v. 28, n. 4, p. 431-447, 2016.

SCHIN, S. Bed load transport in a physical scale model of two merging mountain streams. In: ROWINSKI, P. (Ed.), *Experimental Methods in Hydraulic Research, Series: Geoplanet: Earth and Planetary Sciences*. Springer, Heidelberg, Berlin, 1999. p. 275-286.

STRECK, R. L. SCHIELPEROOT, T.; LEEUW, A. J. *Physical modeling of flow and sediment transport using distorted scale modeling*. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, 2009.

TEIXEIRA, G. M. *Determinação do assoreamento do reservatório da PCH Cachoeirão*. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2013.

TEIXEIRA, E. K. C.; REIS, E. D.; HERMENEGILDO, D. H. L.; FERNANDES, M. A. *Influência de Dados Faltantes na Determinação de Vazões Mínimas de Estiagem*. XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Peru, 2016.

TUNG, F. B.; YEN, A. C. Technical Report No. 5. A Procedure for Computation of Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface, Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers, November, 2005.



VALE, V. L. *Reconstituição da calha natural do reservatório da PCH Salto do Paraopeba*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D. *Previsão de Demanda: uma aplicação dos modelos Boxjenkins na área de assistência técnica de computadores pessoais*. Revista Gestão & Produção v.10, n.1, p.47-67. São Paulo, 2003.

WU, F.; CHEN, C. C. *Bayesian Updating of Parameters for a Sediment Entrainment Model via Markov Chain Monte Carlo*. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, DOI:10.1061/ASCE0733-9429, 135:1, 22.

## APÊNDICE A

```
# CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA
# Descrição dos parâmetros de entrada da função:
# vazoes são os dados originais de vazões
# Nseries é o número de séries a serem geradas
# ano0 - ano inicial dos dados a serem estudados
# anof - ano final dos dados a serem estudados
# No caso de serem estudados todos os dados: ano0 = 1967 e
  anof = 2016
# No caso dos cinco últimos anos: ano0 = 2012 e anof = 2016
# Os anos devem ser os anos iniciais do ano hidrológico
# Ao final, os valores são convertidos para o modelo reduzido
#(prop)
# Ao final, as vazões anuais serão majoradas através da matriz
# QNmajor

QSN<-function(vazoes,Nseries,ano0,anof)
{
# Raiz do erro médio quadrático da curva-chave de sedimentos
erro<-71.1965917536406

# Relação de escala entre as vazões do protótipo e do modelo
#reduzido
prop<-12416

# Número de dados a serem estudados
Nanos<-anof-ano0+1

# Matriz dos dados de vazões que serão geradas
Qsinteticamatriz<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)

# Matriz dos dados de descargas sólidas totais que serão
#calculadas
Qsolidos<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)

# Dados de vazões dos anos de estudo
QNsintetica<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Dados de descargas sólidas totais dos anos de estudo
QNsolidos<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Matriz com os K gerados pelo rnorm para majorar as vazões
#anuais
QNmajor<-matrix(nrow=Nanos,ncol=Nseries)

# Número total de dados da série histórica de vazões anuais
N<-length(vazoes)
```

```

# Média dos dados
M<-mean(vazoes)

# Desvio padrão dos dados
dp<-sd(vazoes)

# Variância dos dados
Var<-var(vazoes)

# Autocorrelação dos dados
ACF<-c(acf(vazoes))

# Lag 1 dos dados
ACFLAG1<-c(ACF$acf)

# Geração dos dados de vazão através do modelo AR(1)
for (contador in 1:Nseries)
{

  aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
  matriz sintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
  Qdado1<-matrix(M)
  Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
  Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)
  Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
  Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
  Qdados123<-rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
  Qproxdado<-rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))

  for (k in 4:(N+9))
  {
    Qproxdado<-
rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+
aleat2[k]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
  }

  Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

  while (any(Qsintetica<0)==TRUE)
  {
    aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
    matriz sintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
    Qdado1<-matrix(M)
    Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
    Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)

```

```

        Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
        Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
        Qdados123<-
rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
        Qproxdado<-
rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))

        for (k in 4:(N+9))
        {
                Qproxdado<-
rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+
aleat2[k]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
        }

        Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

}

# Geração dos dados de descargas sólidas totais a partir das
vazões geradas anteriormente
for (i in 1:N)
{
        Qsinteticamatriz[i,contador]<-Qsintetica[i]

# Calcula a descarga sólida total com base na regressão
Qst<-0.0077*(Qsinteticamatriz[i,contador]**3.1787)

# Gera um novo valor de descarga sólida total
Qsolidos[i,contador]<-rnorm(1,Qst,erro)
while(Qsolidos[i,contador]<0)
{
        Qsolidos[i,contador]<-rnorm(1,Qst,erro)
}

}

# Armazenamento dos dados nas matrizes finais e geração dos
#dados de vazões majoradas através da multiplicação pelo K
#(gerado pelo rnorm)
l<-1
for (j in (N-Nanos+1):N)
{
        QNsintetica[l,contador]<-Qsinteticamatriz[j,contador]
        QNmajor[l,contador]<-rnorm(1,3.71,1.16)
        QNsolidos[l,contador]<-Qsolidos[j,contador]
        l<-l+1
}

```

```

}

# Conversão dos dados para a escala do modelo reduzido e
#exportação dos arquivos com os resultados
for (w in 1:Nseries)
{
  maj<-QNmajor[,w]
  form<-sprintf('%sM.txt',w)
  write.table(maj,file=form)
  mat1<-QNsintetica[,w]*QNmajor[,w]/prop
  form<-sprintf('%sQ.txt',w)
  write.table(mat1,file=form)
  mat2<-QNsintetica[,w]/prop
  form<-sprintf('%sL.txt',w)
  write.table(mat2,file=form)
  mat3<-QNsolidos[,w]/prop
  form<-sprintf('%sS.txt',w)
  write.table(mat3,file=form)
}
}

```