

Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

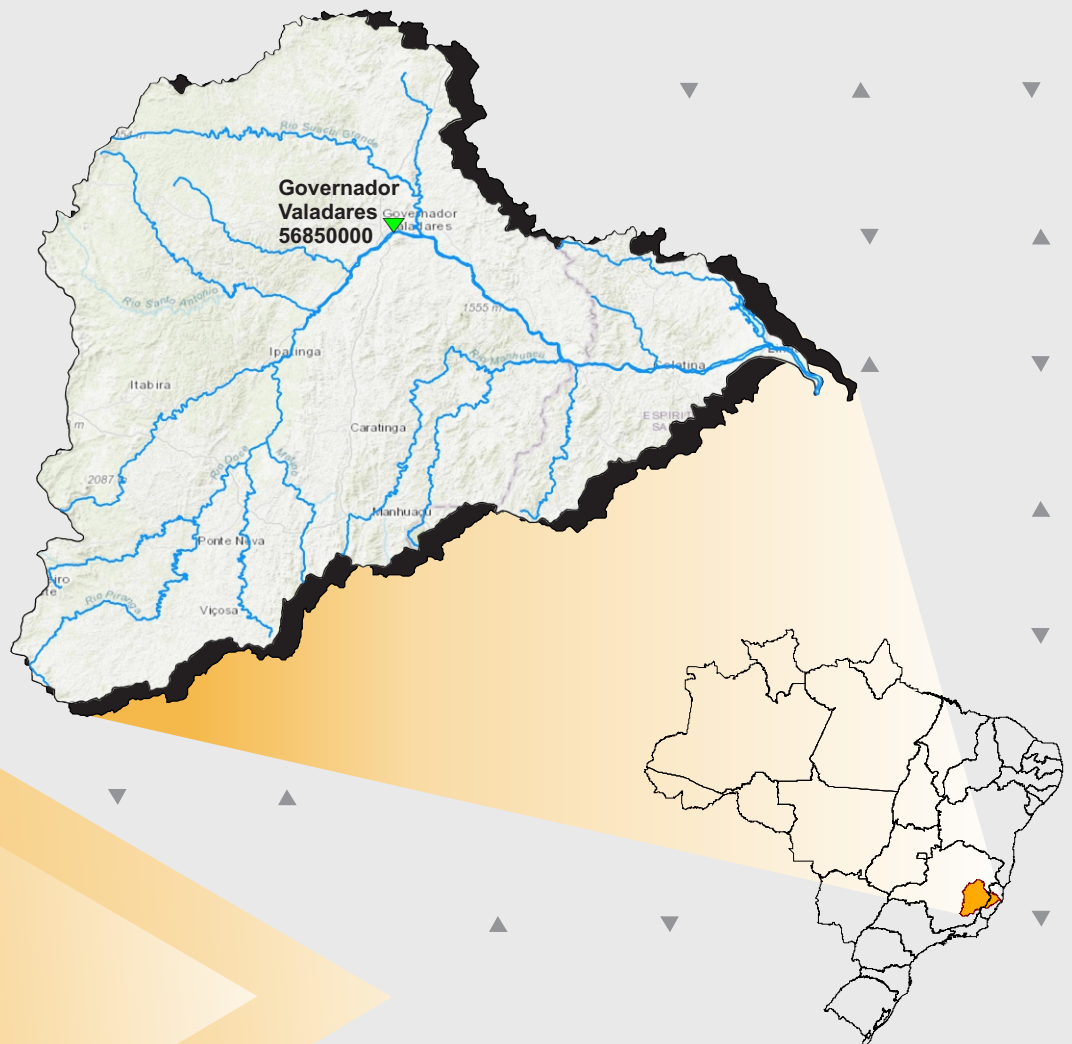
Análise de Frequências de Vazões dos Sistemas de Alerta

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Doce

Rio Doce em Governador Valadares

Código 56850000

Município Atendido: Governador Valadares-MG



2022

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA
RESIDÊNCIA DE FORTALEZA

PROGRAMA GESTÃO DE RISCOS E DE DESASTRES
AÇÃO LEVANTAMENTOS, ESTUDOS, PREVISÃO E ALERTA DE EVENTOS
HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

PROJETO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES

DOS SISTEMAS DE ALERTA

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Doce

Rio: Doce
Estação Fluviométrica: Governador Valadares
Código: 56850000
Município Atendido: Governador Valadares - MG

Paula Kristhina Cordeiro Freire
Eber José de Andrade Pinto



FORTALEZA

2022

PROGRAMA GESTÃO DE RISCOS E DE DESASTRES
AÇÃO LEVANTAMENTOS, ESTUDOS, PREVISÃO E ALERTA DE
EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

PROJETO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES
NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA

Executado pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM
Residência de Fortaleza

Copyright @ 2022 CPRM – Residência de Fortaleza
Rua Rodrigues Júnior, 840 - Centro
Fortaleza - CE
CEP: 60.060-000
Telefone: (85) 3878-0200
Fax: (85) 3878-0240
<http://www.cprm.gov.br>

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F866	Freire, Paula Kristhina Cordeiro Análise de frequência de vazões dos sistemas de alerta: Sistema de alerta Bacia do Rio Doce, Rio Doce, estação fluviométrica Governador Valadares, código 56850000, município atendido Governador Valadares - MG / Paula Kristhina Cordeiro Freire; Eber José de Andrade Pinto. – Fortaleza: CPRM, 2022. 1 recurso eletrônico: PDF Título da capa: Projeto de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras. Programa Gestão de Riscos e de Desastres. Ação Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos Hidrológicos Críticos. ISBN 978-65-5664-326-7 1.Hidrologia – Brasil. 2. Regionalização de Vazões. 3. Análise de Frequência Local. I. Pinto, Eber José de Andrade. II. Título. III. Título da capa: Projeto de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras. CDD 551.48
------	---

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Giovania Freire CRB-3/911

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM

É permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Adolfo Sachsida

SECRETÁRIO EXECUTIVO

Hailton Madureira de Almeida

SECRETÁRIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Lília Mascarenhas Sant'Agostino

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM

CONSELHO DE ADMINISTRAÇÃO

Presidente

Lília Mascarenhas Sant'Agostino

Conselheiros

Antônio Simões Brando Júnior

Cassio Roberto da Silva

Fernando Antônio Freitas Lins

Marisa Maia de Barros

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente Interino

Cassiano de Souza Alves

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

RESIDÊNCIA DE FORTALEZA

Maria da Guia Lima
Chefe da Residência

Maria Dulcinéa Madureira Rolim Bessa
Coordenador Executivo REFO

Luiz da Silva Coelho
Assistente de Produção de Hidrologia e Gestão Territorial

Edney Smith de Moraes Palheta
Assistente de Produção de Geologia e Recursos Minerais

Iris Pereira Gomes
Assistente de Produção de Infraestrutura Geocientífica

Alzira Barros Cardoso
Assistente de Administração e Finanças

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS BACIAS BRASILEIRAS

Departamento de Hidrologia
Frederico Cláudio Peixinho

Divisão de Hidrologia Aplicada
Adriana Dantas Medeiros
Achiles Monteiro (*In memoriam*)

Coordenação Executiva do DEHID
Projeto de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras
Eber José de Andrade Pinto

Equipe Executora

Denise Christina de Rezende Melo – SUREG/GO
Francisco Fernando Noronha Marcuzzo – SUREG/PA
Múcio Valença Virões – SUREG/RE
Myrla de Souza Batista Vieira – SEDE
Paula Kristhina Cordeiro Freire – REFO

Sistema de Informações Geográficas e Mapa

Ivete Souza do Nascimento – SUREG/BH

APRESENTAÇÃO

O projeto Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras é uma iniciativa dentro do programa de Gestão de Riscos e de Desastres que tem por objetivo ampliar o conhecimento sobre a disponibilidade hídrica no território nacional, bem como, sobre a frequência de ocorrência das vazões e/ou das cotas.

O conhecimento da disponibilidade de água doce de uma bacia hidrográfica é o principal instrumento de gestão de recursos hídricos, com base no qual pode ser concedido de forma adequada e sustentável o direito de uso deste bem, seja para fins energéticos, de irrigação, de abastecimento e outros. Além disto, o conhecimento da frequência é uma informação útil para o planejamento nos setores elétrico, agrícola, abastecimento público e na adoção de políticas públicas.

Dentre os objetivos da ação dos Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos Hidrológicos Críticos, destaca-se a realização de estudos de análise de frequência local das séries históricas de vazões máximas ou cotas máximas das estações fluviométricas.

A análise de frequência possibilita a determinação das vazões máximas ou cotas máximas associadas a uma probabilidade de ser igualada ou superada. Os resultados da análise, ou seja, os quantis serão utilizados como valores de projeto no dimensionamento de diversas estruturas hidráulicas ou de aproveitamento dos recursos hídricos. Esta análise estatística também pode ser utilizada de forma inversa, ou seja, estimar a frequência de um evento de cheia ocorrido, definindo se o evento foi raro ou ordinário. Tipo de informação que é bastante útil para sistemas de alerta de cheias que poderão divulgar, além das previsões e dos valores observados, a raridade do evento acompanhado.

Este estudo apresenta os resultados da análise de frequência das vazões máximas observadas no Rio Doce especificamente na estação fluviométrica Governador Valadares, código 56850000. Esta estação fluviométrica faz parte do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da bacia do Rio Doce e constitui um ponto de acompanhamento das vazões e cotas na cidade de Governador Valadares, no Estado de Minas Gerais.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	01
2 – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL.....	09
3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL.....	11
4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	13
5 – REFERÊNCIAS.....	15
ANEXO I.....	17
ANEXO II.....	21
ANEXO III.....	29

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SACE Rio Doce
Figura 02 – Localização dos municípios beneficiados pelo SACE Rio Doce
Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Governador Valadares (56850000)
Figura 04 – Perfil da seção transversal do Rio Doce da seção de réguas na estação de Governador Valadares
Figura 05 - Frequência de cotas máximas anuais por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) para cada mês
Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Vazões em m³/s, associadas a diferentes tempos de retorno

ANEXOS

- Anexo I – Ficha Descritiva da Estação Fluviométrica
Anexo II – Distribuições Candidatas
Anexo III – Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico, Curvas-chave, Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia e Estatísticas da Série

1 – INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Doce está situada na região sudeste, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste e possui uma área de drenagem de 83.400 km², sendo 86% dentro do Estado de Minas Gerais e 14% no Estado do Espírito Santo e abrange um total de 230 municípios.

As nascentes do Rio Doce situam-se no Estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, sendo que suas águas percorrem cerca de 850 km, até atingir o Oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência, no Estado do Espírito Santo. Existem dois rios de dominialidade federal na bacia do Rio Doce: o Rio Doce e o Rio José Pedro, afluente do Rio Manhuaçu (PLANO..., 2010).

A bacia limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, a sudoeste com a bacia do Rio Grande, a oeste com a bacia do Rio São Francisco, ao norte e noroeste com a bacia do Rio Jequitinhonha, e bacias do litoral sul do Espírito Santo e a nordeste com as bacias do litoral norte do Espírito Santo. Os principais afluentes do Rio Doce pela margem esquerda são os Rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande, em Minas Gerais; São José e Pancas no Espírito Santo. Já pela margem direita são os Rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté e Manhuaçu em Minas Gerais; Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce no Espírito Santo (PLANO..., 2010).

As inundações que assolam a região têm sua origem agravada por ações antrópicas como o desmatamento e o manejo inadequado do solo e o assoreamento advindo de resíduos minerais, industriais e domésticos. As áreas próximas ao leito principal, denominadas de planície de inundação, vêm sendo sistematicamente ocupadas pela população, agravando os impactos ocasionados pelas enchentes (CPRM, 2003). Ao longo da história foi comum o registro de eventos de cheias com perdas de vidas humanas e de grandes danos materiais. Em fevereiro de 1979 houve uma grande cheia que motivou a instalação pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) de uma rede telemétrica com transmissão de dados hidrometeorológicos via telefone. Na década de 90 também foram instaladas na bacia algumas estações com transmissão via satélite. Entretanto, mesmo com a rede telemétrica já instalada não foi possível implantar o sistema de alerta de cheias. Somente após a ocorrência de outra grande cheia na bacia, em janeiro de 1997, foi viável o estabelecimento do sistema de alerta de cheias da bacia do Rio Doce. Inicialmente esta iniciativa foi tomada pela CPRM, Serviço Geológico do Brasil, e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ao longo dos anos de operação também participaram como parceiros o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (SIMGE/IGAM) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Atualmente o Sistema de Alerta de Eventos Críticos da Bacia do Rio Doce – SACE Rio Doce – é operado em parceria entre CPRM e a ANA.

As principais atividades da operação do SACE rio Doce consistem na coleta dos dados hidrometeorológicos, o armazenamento dessas informações, a sua análise, a elaboração da previsão hidrológica e a sua divulgação. Durante todo o período chuvoso os dados hidrometeorológicos são obtidos em mais de 50 pontos instalados na Bacia do rio Doce. Os níveis dos rios nas estações fluviométricas monitoradas com as respectivas cotas de alerta e de inundação são divulgados por meio de um boletim.

Quando a cota de alerta é alcançada, havendo um risco mais elevado de ocorrer uma inundação, o monitoramento é intensificado com emissão mais frequente de boletins incluindo as previsões para os níveis dos rios nos municípios monitorados. Já a cota de inundação significa que o ponto mais baixo da cidade começa a ser inundado. No decorrer da operação do SACE rio Doce os boletins são transmitidos diariamente para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Corpo de Bombeiros, Polícia Militar, Defesa Civil e prefeituras dos municípios da bacia do rio Doce.

O SACE rio Doce tem como objetivo alertar direta e indiretamente 16 municípios quanto ao risco de ocorrência de inundações na bacia do rio Doce. Os municípios diretamente beneficiados são: Ponte Nova, Nova Era, Coronel Fabriciano, Timóteo, Açucena, Governador Valadares, Tumiritinga, no Estado de Minas Gerais; Colatina e Linhares, no Estado do Espírito Santo, para os quais são elaborados boletins técnicos sobre a evolução do nível dos rios nos pontos monitorados. Os municípios indiretamente beneficiados, ou seja, que podem acompanhar a evolução das cheias nas estações de monitoramento hidrológico localizadas em municípios a montante na bacia hidrográfica, são: Antônio Dias, Ipatinga, Resplendor, Galiléia, Conselheiro Pena, Aimorés, no Estado de Minas Gerais; e Baixo Guandu, no Estado do Espírito Santo.

A localização das onze estações fluviométricas que compõem o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da bacia do Rio Doce e os municípios beneficiados pelo SACE estão apresentados nas Figuras 01 e 02.

A estação de Governador Valadares, código 56850000, está localizada na Latitude 18°52'59,8"S e Longitude 41°57'03,2"O, nas margens do Rio Doce, município de Governador Valadares-MG e possui uma área de drenagem de 40.500 km². Conforme especificado na ficha descritiva, revisada em 06/05/2019, a estação fluviométrica está instalada na margem direita do Rio Doce, 1,7 km a jusante da barra do córrego da Onça, 1,5 km a montante da barra do córrego Figueira, 24,60 m a jusante da ponte na BR-116, que liga a cidade de Governador Valadares-MG à Caratinga - MG, sobre o Rio Doce e dentro da área do SAEE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto. O acesso à estação se dá pela rodovia Belo Horizonte - Monlevade – Governador Valadares (BR-381). A Figura 03 ilustra a localização e foto da seção de réguas da estação de Governador Valadares.

Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SACE Rio Doce



Fonte: CPRM (2021)

Figura 02 – Localização dos municípios beneficiados pelo SACE Rio Doce



Fonte: CPRM (2021)

A área de drenagem do Rio Doce em Governador Valadares é da ordem de 40.000km², destes, cerca de 25% pertencem à bacia do Rio Santo Antônio e 15% à bacia do Rio Piracicaba, ambos afluentes do Rio Doce pela margem esquerda. Esses rios: Doce, Piracicaba e Santo Antônio, são os principais responsáveis pelas enchentes ocorridas na cidade de Governador Valadares. (ANA, CPRM, IGAM, 2004)

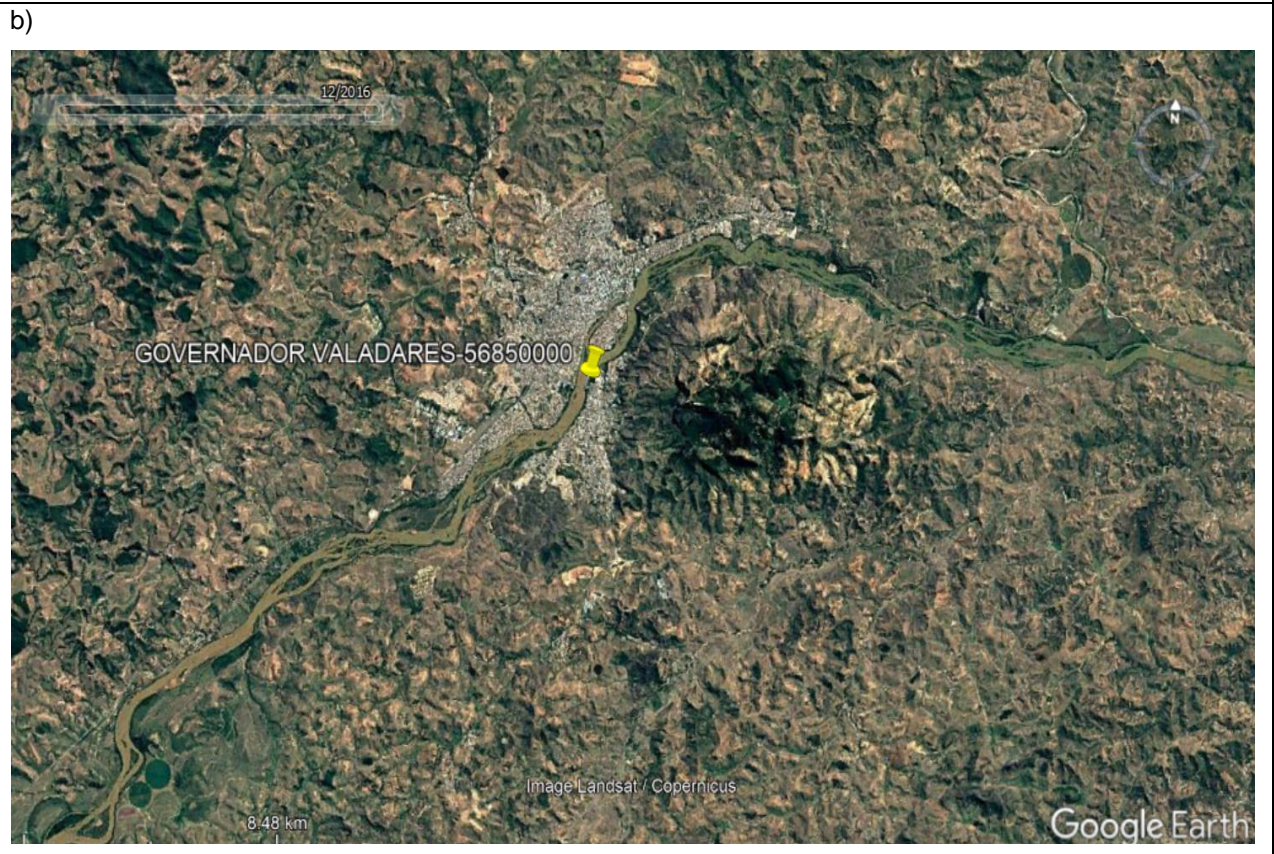
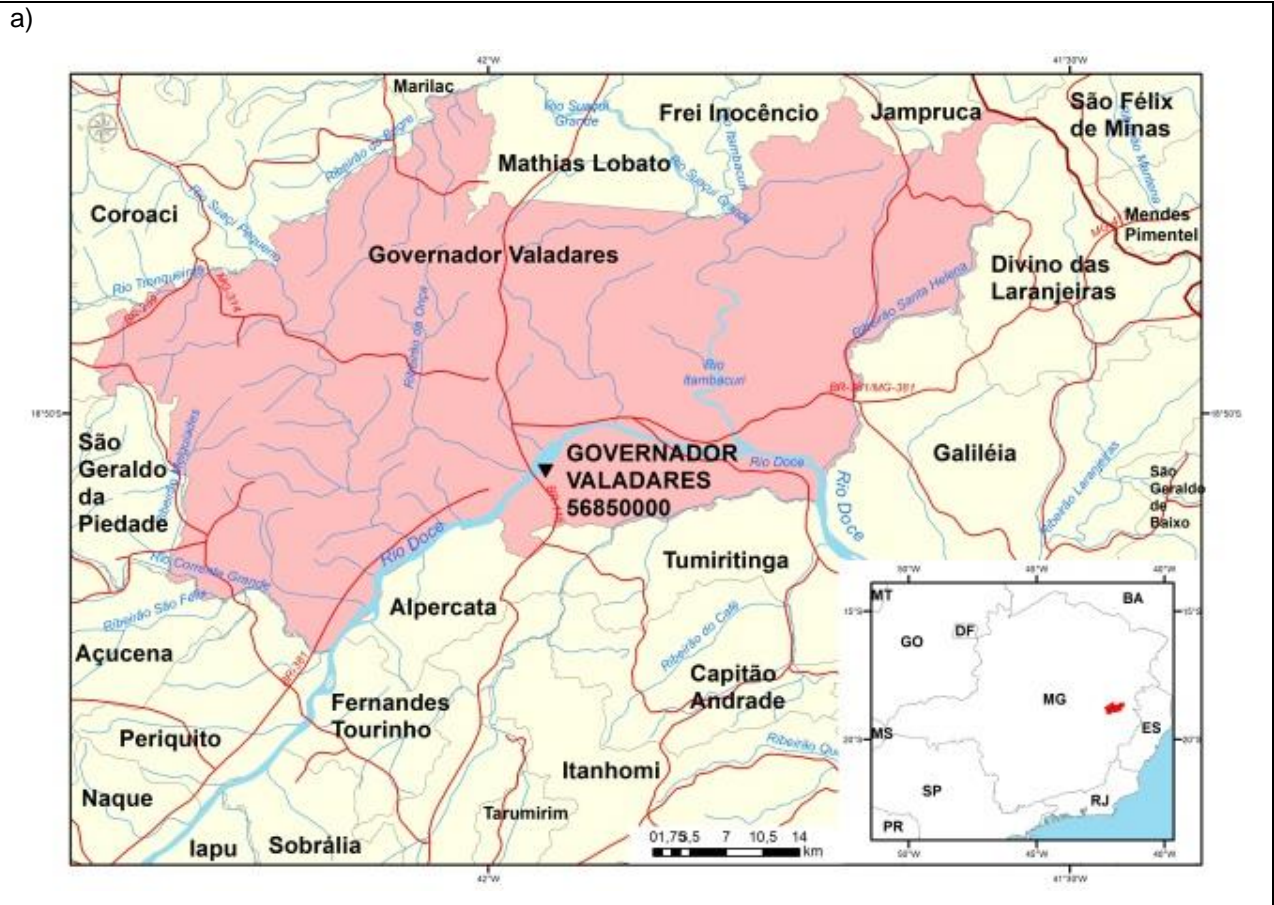
A estação de Governador Valadares possui, desde dezembro de 1937, seção de réguas linimétricas convencional instalada para realização de duas leituras diárias pelo observador hidrológico dos níveis do Rio Doce, as 07 e 17 horas. Nesta estação, segundo a ficha descritiva revisada em 06/05/2019, desde setembro de 2013, estão instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do Rio Doce. Além disso, a estação de Governador Valadares possuía desde a instalação do alerta de cheias da bacia do Rio Doce um equipamento telemétrico para aquisição de dados de nível e chuva via telefone.

Ao longo do histórico da estação não houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, não foram acrescidos 100 cm ou outro valor às cotas da estação. Nesta estação, a cota de atenção é de 300 cm (1378 m³/s), a cota de alerta de 320 cm (1598 m³/s) e a cota de inundação de 360 cm (2076 m³/s). Ressalva-se que a cota de inundação se refere ao início do alagamento na cidade de Governador Valadares. A cota de transbordamento da calha no trecho onde está instalada a estação fluviométrica de Governador Valadares, código 56850000, segundo a ficha descritiva revisada em 06/05/2019, ocorre a partir da cota de 463 cm pela margem direita. Segundo Ficha Descritiva e Relatório de Inspeção de 13/08/1972, a seção de réguas foi deslocada nesta data para 129 m a jusante da Ponte São Raimundo e 66 m a jusante da seção anterior devido a estar, à época, sendo vandalizada constantemente. Maiores detalhes sobre a estação podem ser encontrados na sua ficha descritiva que consta do Anexo I.

A Figura 04 apresenta o perfil da seção transversal do Rio Doce na seção de réguas da estação fluviométrica. Esta figura também apresenta graficamente as cotas de alerta (320 cm) e inundação (360 cm) para a cidade de Governador Valadares, bem como, as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre 1969 e 2020, a maior cota observada (659 cm em fev/1979) e a maior cota com medição de descarga líquida (458 cm em 22/01/2016). O valor da cota máxima observada foi estabelecido a partir do levantamento da marca de cheia como citado em Castilho (1999).

Como pode ser visto nesta figura, o perfil da seção transversal foi levantado até a cota 517 cm para a margem direita. Vale lembrar que é de grande importância que os levantamentos de seção transversal sejam realizados até no mínimo a cota máxima observada (659 cm). Também se observa que, para cotas superiores a 315 cm há somente 04 medições de vazão, e ausência de medições de vazão para cotas superiores a 458 cm. A diferença entre a máxima cota com vazão medida (2744 m³/s na cota 458 cm) e a máxima cota observada nas réguas (659 cm) é de 201 cm.

Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Governador Valadares (56850000)



c)

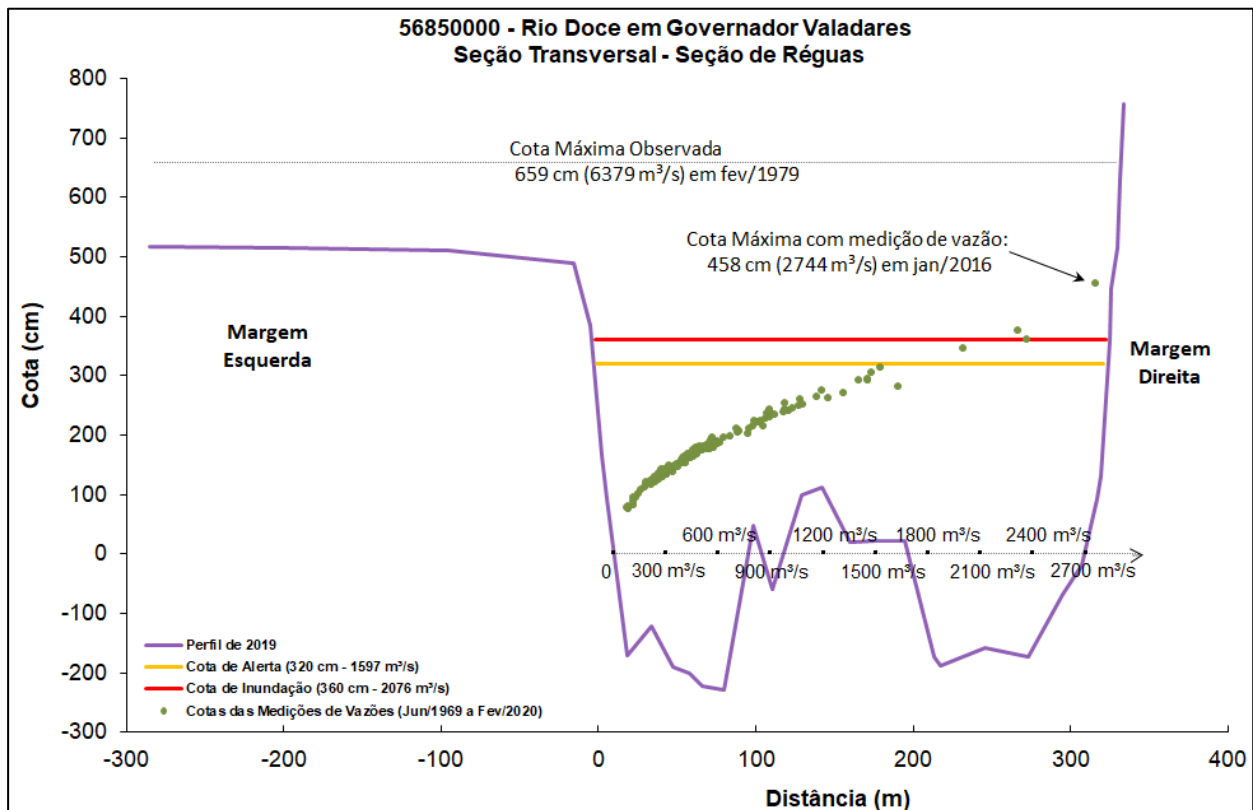


d)



Fonte: a) e d) Elaborada pela DHT/SUREG-BH; b) e c) Elaborada pelos autores a partir do Google Earth

Figura 04 – Perfil da seção transversal da seção de réguas na estação de Governador Valadares



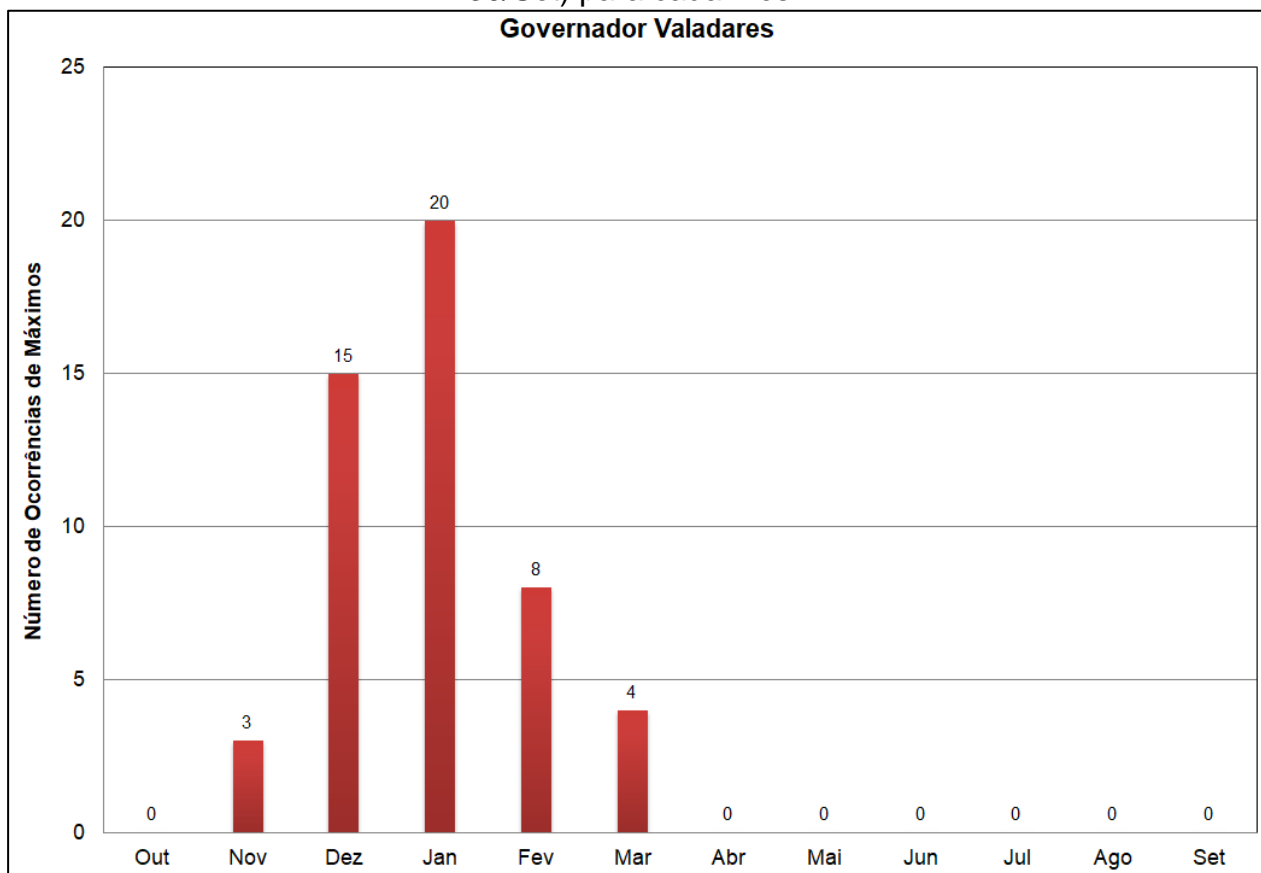
Fonte: Elaborada pelos autores

Na figura 05 observa-se o histograma apresentando a frequência de ocorrência das cotas máximas anuais por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) em cada mês. Observa-se que o maior número de cotas máximas para a estação de Governador Valadares, código 56850000, ocorre no mês de janeiro, com 20 ocorrências dentre as 50 cotas máximas da série.

No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 50 valores, sendo 42 valores superiores à cota de alerta (320 cm), ou seja, 84%, e 35 valores superiores à cota de inundação (360 cm), ou seja, 70%. Destes 50 valores, 10 valores superiores à maior cota com medição de vazão (458 cm). A razão entre as cotas máximas, ou seja, a maior cota observada com a maior cota que possui medição de vazão é de 1,44 (659 cm / 458 cm). Segundo Tucci (2002), as melhores curvas chave, aquelas com menor extrapolação do ramo superior, possuem a razão entre as cotas máximas com medição de vazão e a observada inferior a 1,25.

Tais características mencionadas criam dificuldades à extrapolação do ramo superior da curva-chave e ampliam a incerteza na estimativa das vazões a partir das cotas superiores a 458 cm. Entretanto, é necessário mencionar que, as medições de vazões em cotas altas envolvem riscos à segurança dos técnicos que podem inviabilizar a realização do trabalho e, além disso, a frequência de ocorrência de grandes cheias pode ser baixa.

Figura 05 - Frequência de cotas máximas anuais por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) para cada mês



Fonte: Elaborada pelos autores

Mesmo com as considerações associadas às incertezas das estimativas das vazões em cotas altas citadas anteriormente, foi realizada a análise de frequência de vazões máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set).

2 – METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL

A análise estatística deve ser realizada utilizando séries históricas representativas do processo analisado, sem a presença de erros acidentais ou sistemáticos e possuindo um número mínimo de elementos para garantir uma boa confiabilidade nas extrapolações. É recomendável o emprego de séries com pelo menos 30 anos hidrológicos e aceitável no mínimo 15 anos hidrológicos.

Considerando Pinto (2013) e Naghettini e Pinto (2007), foram definidas as seguintes etapas para análise de frequência local de máximos por ano hidrológico:

- Avaliar a consistência dos dados e organizar a série de cotas ou vazões máximas por ano hidrológico.

Na etapa de consistência procura-se identificar problemas com os registros de cotas ou vazões que poderiam desacreditar as informações. Para tanto podem ser realizados métodos consagrados no meio técnico, como por exemplo, verificar se há mudança do zero da régua (mudança de referência); verificar a presença de erro de metro nas cotas; verificar a presença de erro de 1/2 metro nas cotas; verificar a presença de erro de digitação; comparar a cota máxima com a cota média diária; avaliar o comportamento dos cotogramas das estações de montante e jusante; verificar as cotas máximas da série disponível nos bancos de dados com os boletins de campo; avaliar os dados que estão como duvidosos ou estimados; avaliar o preenchimento de falhas (média, linígrafo e PCD); verificar as medições de vazões; analisar as curvas-chave; verificar a continuidade das vazões, etc.

- Verificar a presença de valores atípicos (*outliers*)

A presença de valores atípicos (superiores e inferiores) é avaliada com o critério baseado na amplitude interquartil, AIQ (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 39), e com o teste de Grubbs e Beck (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 287). O valor atípico pode ter origem em erros de medição ou de processamento, mas, também pode ser o produto de causas naturais indeterminadas. Se for identificado que o valor atípico é inconsistente, este deve ser excluído da amostra. Em caso de presença de *outliers* realmente observados deve-se avaliar a manutenção ou retirada destes pontos amostrais atípicos. Pois, a presença de pontos atípicos em uma dada amostra, pode afetar drasticamente o ajuste da distribuição de probabilidades.

- Avaliar a independência, a homogeneidade e a estacionariedade das séries.

A independência dos valores de uma série significa que nenhuma observação pode influenciar a ocorrência, ou não ocorrência, da observação seguinte. No projeto de Regionalização de Vazões do Brasil a hipótese de independência é avaliada com o teste não paramétrico proposto por Wald e Wolfowitz (1943). A descrição detalhada deste teste é encontrada em Naghettini e Pinto (2007, p. 264).

Uma amostra é considerada homogênea quando todos os elementos provêm de uma única e idêntica população. A recomendação é avaliar a homogeneidade da série por meio do teste não-paramétrico proposto por Mann e Whitney (1947), o qual está descrito em detalhes em Naghettini e Pinto (2007, p. 265).

A estacionariedade de uma série, de um ponto de vista intuitivo, está associada a não alteração das características estatísticas ao longo do tempo o que significa a não existência de tendências, saltos e outras propriedades. Nos trabalhos da Regionalização a verificação da estacionariedade das séries é efetuada pelo teste não-paramétrico de Spearman, o qual encontra-se descrito em Naghettini e Pinto (2007, p. 267).

- Estimar a distribuição empírica.

A estimativa da distribuição empírica é realizada com ordenação decrescente da série e o cálculo da posição de plotagem pela fórmula de Weibull, ou seja, no caso de séries de máximos por ano hidrológico temos $P(P > p) = m/(N + 1)$, onde m é número de ordem e N o tamanho de amostra.

- Definir as distribuições teóricas de probabilidades candidatas a modelagem das vazões ou cotas máximas por ano hidrológico.

A definição da distribuição teórica de probabilidade é de suma importância, pois valores calculados para um mesmo período de retorno podem apresentar grandes variações quando estimados por diferentes distribuições. Os modelos teóricos candidatos são as distribuições de dois parâmetros Gumbel e Log-Normal e de três parâmetros GEV, Log-Normal com três parâmetros e a Log-Pearson Tipo III. No caso de séries inferiores a 30 anos serão avaliadas somente distribuições com dois parâmetros.

- Calcular os parâmetros das distribuições teóricas de probabilidades candidatas.

A estimativa dos parâmetros das distribuições candidatas é efetuada pelo método dos momentos-L (HOSKING; WALLIS, 1997). O Anexo II apresenta as funções densidade e acumulada de probabilidades das distribuições candidatas e as equações para cálculo dos parâmetros.

- Definir a distribuição teórica que será adotada na modelagem das séries a partir da verificação da aderência à distribuição empírica.

A aderência da distribuição teórica candidata à curva da distribuição empírica é verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A descrição detalhada destes testes é encontrada em Naghettini e Pinto (2007, p. 275 - 278).

- Estimar os quantis associados a diferentes tempos de retorno.

Após a conclusão das etapas anteriores, calcular os quantis associados a diferentes tempos de retorno de interesse.

3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL

A análise de frequência local das vazões do Rio Doce em Governador Valadares, código 56850000, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) apresentadas no Anexo III. Neste anexo também são apresentados alguns endereços de vídeos disponíveis na Internet de eventos de cheia registrados na região.

A série de vazões apresentou valores atípicos superiores (outliers) através do critério baseado na amplitude interquartil, AIQ, não apresentando quando avaliada pelo teste de Grubbs e Beck. Optou-se por não retirá-los da série. As hipóteses nulas de independência, homogeneidade e estacionariedade foram aceitas para o nível de significância de 5%. A distribuição de frequência selecionada foi a Log-Pearson Tipo III, com os parâmetros calculados pelo método dos momentos-L e também apresentados no Anexo III. A distribuição Log-Pearson Tipo III foi selecionada por apresentar menor desvio padrão dos resíduos entre a distribuição empírica e a teórica. A Figura 06 apresenta o gráfico com as distribuições empírica e teórica ajustadas.

Como o parâmetro de forma é positivo, $\gamma_{lnX} > 0$, os quantis da Log-Pearson Tipo III podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \exp \left\{ \mu_{lnX} - \frac{2\sigma_{lnX}}{\gamma_{lnX}} + G^{-1} \left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta \right) \right\} \quad (01)$$

Onde T é o tempo de retorno (anos)

μ_{lnX} é o parâmetro de posição (7,8258)

σ_{lnX} é o parâmetro de escala (0,38078)

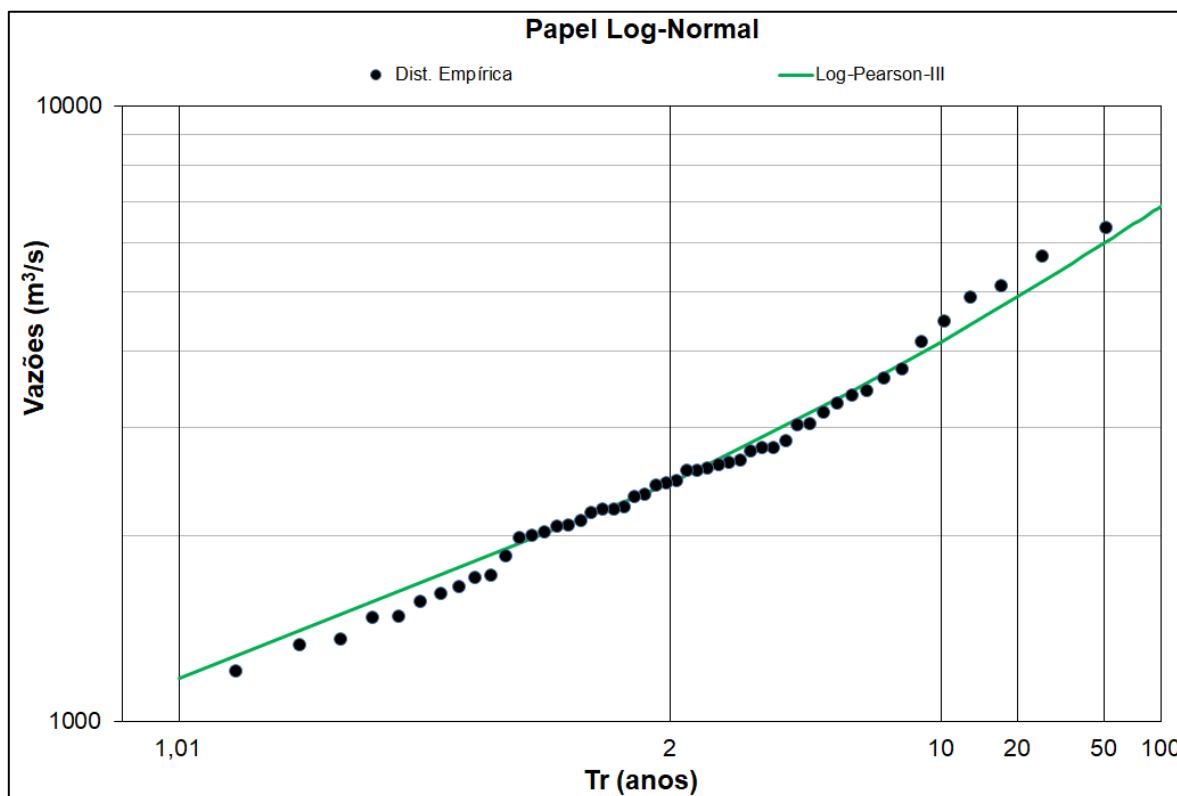
γ_{lnX} é o parâmetro de forma (0,45995)

$G^{-1}()$ é a inversa da distribuição Gama com parâmetros

$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$ (18,90764) e

$\beta = \left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right|$ (0,087569)

Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica



Fonte: Elaborada pelos autores

A equação 01 é válida para tempos de retorno de 1,01 até 100 anos. Empregando a equação 01 foi possível calcular as vazões associadas a diferentes tempos de retorno. Os resultados estão apresentados na Tabela 01.

Tabela 01 – Vazões em m^3/s , associadas a diferentes tempos de retorno

	Tempo de Retorno, T (anos)												
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90	100
Vazão (m^3/s)	2431	3409	4139	4580	4902	5157	5370	5715	5989	6218	6505	6745	6886

Fonte: Elaborada pelos autores

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- a) Em fevereiro de 1979 o Rio Doce em Governador Valadares, código 56850000, alcançou a cota de 659 cm. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resp: Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 659 cm com a curva-chave válida para fevereiro de 1979 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III).

Para a cota 659, aceitando-se a extrapolação da curva-chave disponível, os parâmetros são $a = 311,8853$, $h_0 = 0,45$ m e $n = 1,663$ (Anexo III). Dessa forma temos:

$$Q(h) = a (h - h_0)^n$$

$$Q(659 \text{ cm}) = 311,8853 \left(\frac{659}{100} - 0,45 \right)^{1,663}$$

$$Q(659 \text{ cm}) = 6379 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para se calcular o tempo de retorno será necessária a inversão da equação 01. Dessa forma temos:

$$G^{-1} \left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta \right) = \ln[x(T)] - \mu_{\ln X} + \frac{2\sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}} \quad (02)$$

$$T = \frac{1}{1 - G \left(\ln[x(T)] - \mu_{\ln X} + \frac{2\sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}}, \alpha, \beta \right)} \quad (03)$$

onde, $\mu_{\ln X} = 7,825278$ é o parâmetro de posição, $\sigma_{\ln X} = 0,380775$ é o parâmetro de escala e $\gamma_{\ln X} = 0,459951$ é o parâmetro de forma da Log-Pearson Tipo III e $G()$ é a FAP da distribuição Gama com parâmetros $\alpha = \frac{4}{\gamma^2} = 18,90764$ e $\beta = \left| \frac{\sigma}{2} \right| = 0,087569$. No EXCEL pode ser utilizada a função $\text{DIST.GAMA}(x, \text{alfa}, \text{beta}, \text{cumulativo})$.

Substituindo os valores na equação 03 temos:

$$T = \frac{1}{1 - G \left(\ln(6379) - 7,825278 + \frac{2 \cdot 0,380775}{0,459951}; 18,90764; 0,087569 \right)} = 68,04 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 68,04 anos corresponde a probabilidade de 1,47% da vazão de 6.379 m³/s associada a cota 659 cm ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 6379 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{68,04} 100 = 1,47 \%$$

b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de alerta em Governador Valadares, código 56850000?

Resp: A cota de alerta em Governador Valadares, código 56850000, é 320 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 1597 m³/s (Ramo 02). Substituindo a vazão calculada e os parâmetros da distribuição Log-Pearson Tipo III na equação 03, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 320 cm é de 1,12 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 89,05%.

c) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de inundação em Governador Valadares, código 56850000?

Resp: A cota de inundação em Governador Valadares, código 56850000 é 360 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 2076 m³/s (Ramo 02). Substituindo a vazão calculada e os parâmetros da distribuição Log-Pearson Tipo III na equação 03, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 360 cm é de 1,5 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 66,77%.

5 – REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS.

Definição da planície de inundação da cidade de Governador Valadares: Relatório técnico final. Belo Horizonte: ANA; MME; CPRM; IGAM, 2004. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14817>. Acesso em: 16 ago. 2021.

CASTILHO, A. S. **Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce:** Relatório técnico da operação do sistema de alerta - Dezembro de 1998 a Março de 1999. Belo Horizonte: CPRM, 1999.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Contra Enchentes na Bacia do Rio Doce.** Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta – Dezembro de 2002 a Abril de 2003. Belo Horizonte: CPRM, 2003.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce:** Relatório Técnico do Sistema – Estudos Complementares. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Doce:** Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta no período de novembro de 2020 a abril de 2021. Belo Horizonte: CPRM, 2021.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis:** - an approach based on L-moments. New York: Cambridge University Press, 1997.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, p. 50-60, 1947. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>. Disponível em: <https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-18/issue-1/On-a-Test-of-Whether-one-of-Two-Random-Variables/10.1214/aoms/1177730491.full>. Acesso em: 05 mar. 2021.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em 17 abr. 2021.

PINTO, E. J. A. **Atlas Pluviométrico:** metodologia para definição das equações intensidade-duração-frequência do Projeto Atlas Pluviométrico. Belo Horizonte: CPRM, 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/11560>. Acesso em: 08 mar. 2021.

PLANO integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Doce: volume 1 – relatório final. [S.l.]: Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010. Plano integrado de recursos

hídricos da bacia hidrográfica do Rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do Rio Doce. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acesso em: 22 abr. 2021.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Brasília: ANA; Porto Alegre, UFRGS. 2002.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, p. 378-388, 1943. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731358>. Disponível em: <https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-14/issue-4/An-Exact-Test-for-Randomness-in-the-Non-Parametric-Case/10.1214/aoms/1177731358.full?tab=ArticleLink>. Acesso em: 05 mar. 2021.

ANEXO I

Ficha Descritiva

Estação Fluviométrica de Governador Valadares, código 56850000

ESTAÇÃO: GOVERNADOR VALADARES		TIPO: FRDSQT	CÓDIGO: 56850000		
REGIÃO HIDROGRÁFICA: Atlântico Leste		BACIA: Atlântico, Trecho Leste			
RIO: 56001000 - RIO DOCE		UF: MG	MUNICÍPIO: Governador Valadares		
ENTIDADE COORDENADORA: ANA		ENTIDADE OPERADORA: CPRM/BH			
ÁREA DE DRENAGEM (Km²): 39.828		DRENAGEM GERAL: Oceano Atlântico			
LAT.: -18°53'00.00" LONG.: -41°57'03.00"		INST.: GPS ETREX LEGEND	DATUM: WGS-84		
ALT.(m): 150 m	INST.: Carta topográfica	DATUM: SAD-69	REF. CART.: SE-24-Y-A-IV		
FOLHA: Governador Valadares		ESCALA: 1:100.000	ANO: 1980		
ESTAÇÃO	TIPO	DATA DA INSTALAÇÃO	DATA DA EXTINÇÃO	ENTIDADE	
FLUVIOMÉTRICA	F	21.12.37		DIV.ÁGUAS/DNPM	
FLUVIOGRÁFICA	FR	01.01.76		CPRM	
SEDIMENTOMÉTRICA	S				
QUALIDADE DAS ÁGUAS	Q	11.02.76		CPRM	
ESTAÇÃO TELEMÉTRICA: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não DATA DA INSTALAÇÃO:					
LOCALIZAÇÃO: 1,7 km à jusante da barra do cór. da Onça, 1,5 km à montante da barra do cór. Figueira, 24,60 m a jusante da ponte da BR 116 sobre o rio Doce que liga Valadares a Caratinga, dentro da área do SAEE na margem direita do rio.					
ACESSIBILIDADE: Pela rodovia Belo Horizonte - Monlevade - Governador Valadares (BR-381).					
DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO (RÉGUAS, LANCES, RRNN, SM, SR, PI, PF, etc.)					
MARGEM: direita					
RÉGUAS: 5 lances com 3 escalas esmaltadas e 4 de PVC.					
1º LANCE 000/200 cm					
2º LANCE 200/300 cm					
3º LANCE 300/500 cm					
4º LANCE 500/600 cm					
5º LANCE 600/700 cm					
RRNN: RNP5# 5768 mm parafuso de ferro chumbado no pilar de sustentação do abrigo telemétrico.					
RNS# 4644 mm parafuso chumbado na base da cerca					
mp6# 8045 mm					
SEÇÃO MEDIDORA: Única, 147,20 m à jusante das escalas.					
PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA:					
Medição detalhada com molinete, de barco, em qualquer época do ano. Largura aproximada de 310 m.					
QUALIDADE DE ÁGUA: Quatro parâmetros: temperatura, pH, OD e condutividade elétrica.					
EQUIPAMENTOS					
ESPÉCIE	Nº PATRIMÔNIO	Nº SÉRIE	PROPRIETÁRIO	EM OPERAÇÃO	DATA INSTALAÇÃO
PCD-HOBECO-GOES			ANA-021.713	sim	21/09/2013
PCD-HOBECO-GPRS	8566-2747		CPRM	sim	

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES:

POTAMOGRAFIA: Rio Doce - Nasce na Serra Trapizonga, município de Ressaquinha-MG, com o nome de rio Piranga. Afluentes m.e.: rio Carmo, rio Piracicaba, Santo Antonio, Suaçuí Grande, m.d.: rio Chopotó, Casca, Matipó, Cuité, Manhuaçu, Guandu. Deságua no Oceano Atlântico-ES.

POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE:

MONTANTE: CENIBRA

JUSANTE: TUMIRITINGA

CARACTERÍSTICA DO TRECHO:

Regime:

Perene Intermitente

Efêmero

Conformação:

Retilínio Anastomosado

Curvo Meandrante

Leito

Regular Irregular

NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS

NATUREZA:

ME: Arenosa com vegetação de grande porte

MD: Arenosa com vegetação de grande porte

INCLINAÇÃO:

ME: Baixa

MD: Baixa

NATUREZA DO LEITO: Rocha

CONTROLE: Corredeira

LOCALIZAÇÃO: Jusante

DISTÂNCIA (m):

COTA DE TRANSBORDAMENTO (cm): 4,63 m

MARGEM DIREITA

MARGEM ESQUERDA

OBSERVADOR:

NOME:

PROFISSÃO:

GRAU DE INSTRUÇÃO:

ENDEREÇ

FONE:

BAIRRO:

CEP:

CIDADE:

ESTADO:

DISTÂNCIA DA RESIDÊNCIA ATÉ A ESTAÇÃO (m):

MEIO DE COMUNICAÇÃO MAIS PRÓXIMO DA CASA DO OBSERVADOR

DISTÂNCIA DA CASA DO OBSERVADOR (m)

OBSERVAÇÃO:

NA AUSÊNCIA DO OBSERVADOR PROCURAR PO

NOME:

ENDEREÇO:

FONE:

BAIRRO:

CEP:

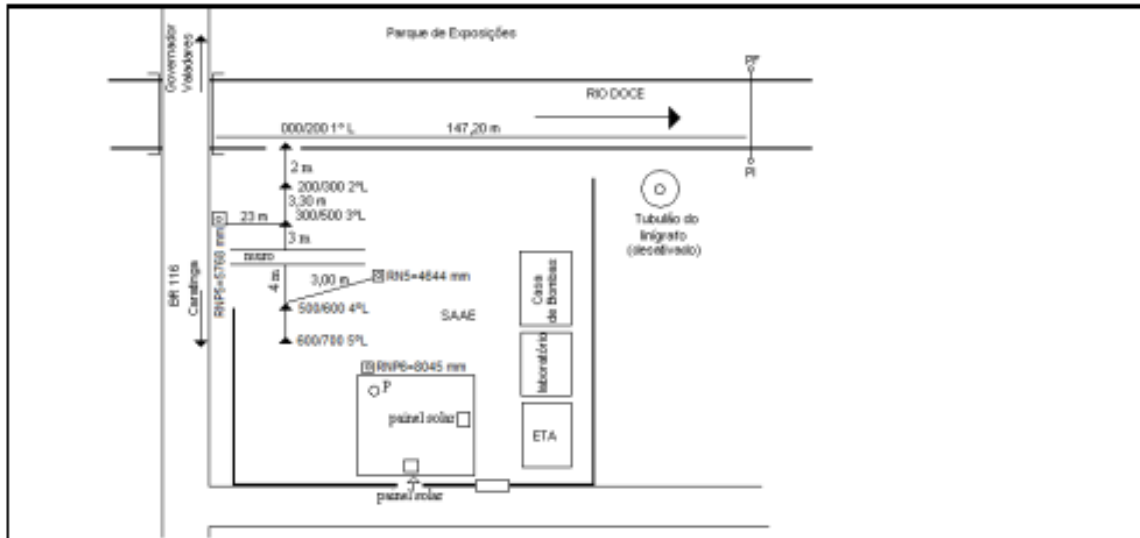
CIDADE:

ESTADO:

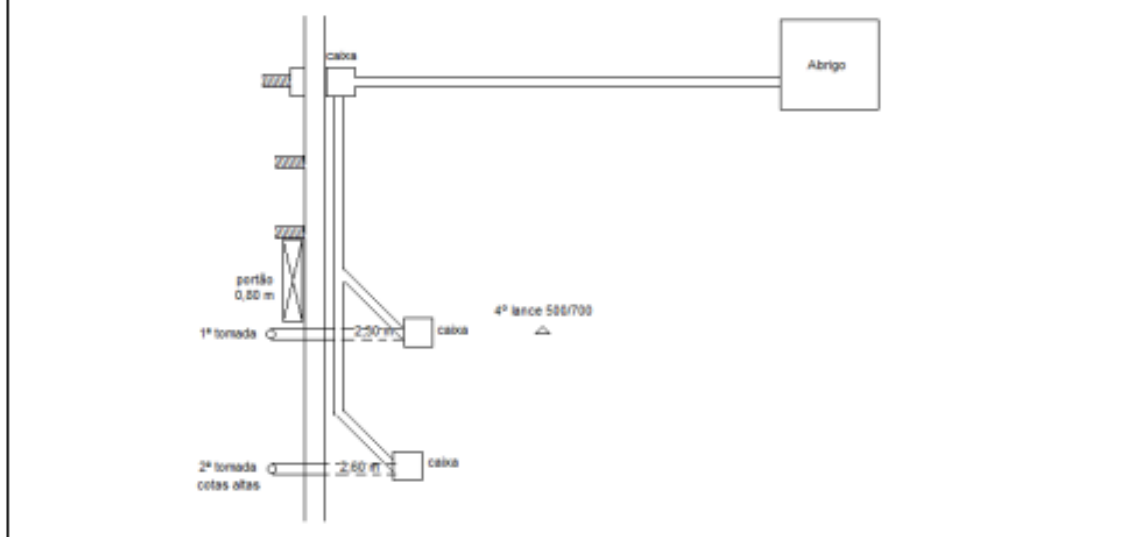
OBSERVAÇÕES:

Não efetua pagamento ao Fundo Rural. Equipamento PCD-HOBECO (GPRS): Plataforma automática de coleta de dados, composta por barômetro, modem GPRS, sensor de pressão, pluviômetro, antena e painel solar. PCD-HOBECO (GOES): Plataforma automática de coleta de dados, composta por barômetro, modem GPRS, sensor de pressão, pluviômetro, antena e painel solar. Caixa de passagem dentro do SAAE, junto ao portão, na direção da seção de régua.

CROQUI:



TELEMETRIA



ANEXO II
Distribuições Candidatas

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

- Função Densidade de Probabilidade

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

Parâmetros: α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de posição

Limites: $-\infty \leq x < \infty$

- Função Acumulada de Probabilidades

$$F_x(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

- Inversa da função acumulada

$$x = \beta - \alpha \ln[-\ln(F(x))]$$

- Momentos L

$$\lambda_1 = \beta + \alpha\gamma_E \quad \lambda_2 = \alpha \ln(2) \quad \lambda_3 = \alpha[2\ln(3) - 3\ln(2)] \quad \lambda_4 = \alpha[5\ln(4) - 10\ln(3) + 6\ln(2)]$$

$$\tau_3 = 0,1699 \quad \tau_4 = 0,1504$$

- Estimativa dos parâmetros pelos momentos-L

$$\hat{\alpha} = \frac{l_2}{\ln(2)} \qquad \hat{\beta} = \frac{l_1}{\hat{\alpha} \gamma_E}$$

Onde l_1 e l_2 são os momentos-L amostrais e $\gamma_E = 0,5572157$ é a constante de Euler.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL

Os dados transformados pelo logaritmo natural, $\ln(x)$, se distribuem como uma normal

DISTRIBUIÇÃO NORMAL

- Função Densidade de Probabilidade

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)$$

Parâmetros: μ é o parâmetro de posição e σ é o parâmetro de escala

Limites: $-\infty \leq x < \infty$

- Função Acumulada de Probabilidades

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt$$

- Inversa da função acumulada

$x(F)$ não possui forma analítica

- Momentos-L

$$\lambda_1 = \mu \quad \lambda_2 = 0,5642\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sigma \quad \tau_3 = 0 \quad \tau_4 = 0,1226 = [30\pi^{-1}\arctan(\sqrt{2})] - 9$$

- Estimativa de parâmetros pelos momentos-L

$$\hat{\mu} = \lambda_1 \quad \hat{\sigma} = \lambda_2\sqrt{\pi}$$

OBS: Inicialmente os dados são transformados pelo logaritmo natural, $\ln(x)$. Em seguida são calculados os momentos-L e depois os parâmetros.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL (3P)

A função densidade de Probabilidade da Log-Normal (3P) é dada por:

$$f(x) = \frac{e^{ky-y^2/2}}{\alpha\sqrt{2\pi}} \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$$

A função Acumulada de probabilidade é dada por: $F(x) = \Phi(y)$

na qual, Φ denota a função de distribuição acumulada Normal padrão.

$x(F)$ não apresenta forma analítica explícita.

Parâmetros : ξ (Posição), α (Escala) e k (forma)

Os limites da função são:

Para, $k > 0$: $-\infty < x \leq \xi + \alpha/k$; $k = 0$: $-\infty < x < \infty$; $k < 0$: $\xi + \alpha/k \leq x < \infty$

Os parâmetros podem ser estimados pelos momentos-L com as seguintes equações:

$$k \approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1\tau_3^2 + E_2\tau_3^4 + E_3\tau_3^6}{1 + F_1\tau_3^2 + F_2\tau_3^4 + F_3\tau_3^6} \quad \text{para } |\tau_3| \leq 0,94$$

E_0	E_1	E_2	E_3	F_1	F_2	F_3
2,0466534	-3,6544371	1,8396733	-0,20360244	-2,0182173	1,2420401	-0,21741801

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k e^{-\frac{k^2}{2}}}{1 - 2\Phi(-k/\sqrt{2})} \quad \text{e} \quad \xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \right)$$

Nesta parametrização, a distribuição Log-Normal é a distribuição de uma variável aleatória X que está relacionada a uma variável aleatória Z de distribuição Normal padrão, pela seguinte equação:

$$X = \begin{cases} \xi + \alpha(1 - e^{-kZ})/k & k \neq 0 \\ \xi + \alpha Z & k = 0 \end{cases}$$

Z é variável normal central reduzida.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-PEARSON TIPO III

Uma variável x segue a distribuição Log-Pearson tipo III, quando a variável transformada $Y = \ln(X)$ distribui-se de acordo com a Pearson tipo III.

A distribuição Pearson Tipo III possui os parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ

Se $\gamma \neq 0$, temos $\alpha = 4/\gamma^2$, $\beta = \frac{1}{2}\sigma|\gamma|$ e $\xi = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$

Se $\gamma > 0$, então os limites de x são os seguintes: $\xi \leq x \leq \infty$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

$$F(x) = \frac{G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

Se $\gamma = 0$, então a distribuição é Normal e os limites de x são os seguintes: $-\infty \leq x \leq \infty$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

Se $\gamma < 0$, então os limites de x são os seguintes: $-\infty \leq x \leq \xi$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \frac{(\xi - x)^{\alpha-1} e^{-(\xi-x)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

$$F(x) = 1 - \frac{G\left(\alpha, \frac{\xi-x}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

$\Gamma(\alpha)$ é a função Gama dada por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

$G(\alpha, x)$ é a função Gama incompleta dada por:

$$G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad \text{e} \quad \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt$$

Os parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ da distribuição Pearson Tipo III podem ser calculados pelo método dos momentos-L com as equações

$$\begin{aligned} \mu &= \lambda_1 \\ \sigma &= \frac{\lambda_2 \pi^{1/2} c^{1/2} \Gamma(c)}{\Gamma\left(c + \frac{1}{2}\right)} \\ \gamma &= 2c^{-1/2} \sin al(\tau_3). \end{aligned}$$

A variável c é estimada considerando duas situações.

A primeira, se $0 < |\tau_3| < 1/3$, nesse caso adotar $z = 3\pi\tau_3^2$ e aplicar a equação

$$c \approx \frac{1 + 0,2906z}{z + 0,1882z^2 + 0,0442z^3}.$$

A segunda, se $1/3 \leq |\tau_3| < 1$, nessa situação adota-se $z = 1 - |\tau_3|$ e emprega-se a equação

$$c \approx \frac{0,36067z - 0,59567z^2 + 0,25361z^3}{1 - 0,78861z + 2,56096z^2 - 0,77045z^3}$$

A distribuição Pearson Tipo III com parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ , apresenta algumas relações importantes com as distribuições Gama e Normal, as quais facilitam a estimação dos quantis. Quando o parâmetro de forma γ é positivo, a Pearson-III está associada à distribuição Gama. Se o parâmetro de forma γ é negativo, a Pearson-III está associada à distribuição Gama refletida. E, quando o parâmetro de forma γ é igual a zero, a Pearson-III está relacionada à distribuição Normal. Considerando que uma variável X segue uma distribuição Pearson tipo III, com parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ , a relação entre esses parâmetros e os das distribuições Gama e Normal são as seguintes:

- Se $\gamma > 0$, então $X - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}$ segue uma distribuição Gama com parâmetros

$$\alpha = \frac{4}{\gamma^2} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{\sigma \cdot \gamma}{2}.$$

Desse modo, os quantis da Pearson-III com parâmetro de forma positivo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma} + G^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)$$

onde τ é o tempo de retorno e $G^{-1}()$ é a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β .

- Se $\gamma < 0$, então $-X + \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$ segue uma distribuição Gama com parâmetros $\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$ e $\beta = \left| \frac{\sigma \cdot \gamma}{2} \right|$. Desse modo, os quantis da Pearson-III com parâmetro de forma negativo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma} - G^{-1}\left(\frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)$$

onde τ é o tempo de retorno e $G^{-1}()$ é a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β .

- Se $\gamma = 0$, então x segue uma distribuição Normal com parâmetros μ e σ . Assim, os quantis da Pearson-III com parâmetro de forma nulo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu + \sigma \cdot Z_T$$

onde τ é o tempo de retorno e Z_T é a variável normal central reduzida associada uma probabilidade $(1-1/T)$. Recorde que, no programa Microsoft EXCEL, a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β pode ser calculada com a função INVGAMA() e a variável normal central reduzida com a função INV.NORMP().

Quando uma variável x segue a distribuição Log-Pearson tipo III, é um fato matemático que a variável transformada $Y = \ln(X)$ distribui-se de acordo com a Pearson tipo III. Assim, os parâmetros podem ser calculados por meio dos logaritmos dos valores observados e os quantis são estimados por meio das seguintes equações:

Para $\gamma_{\ln X} > 0$

$$x(T) = \exp\left\{\mu_{\ln X} - \frac{2\sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}} + G^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)\right\}$$

Para $\gamma_{\ln X} < 0$

$$x(T) = \exp\left\{\mu_{\ln X} - \frac{2\sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}} - G^{-1}\left(\frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)\right\}$$

Para $\gamma_{\ln X} = 0$

$$x(T) = \exp(\mu_{\ln X} + \sigma_{\ln X} \cdot Z_T)$$

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO GENERALIZADA DE EVENTOS EXTREMOS (GEV)

A função densidade de Probabilidade da GEV é dada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp[-(1-k)y - \exp(-y)]$$

$$\text{Para } k=0, \quad y = \frac{x-\xi}{\alpha}$$

$$\text{Para } k \neq 0 \quad y = -\frac{1}{k} \ln \left[1 - \frac{(x-\xi)k}{\alpha} \right].$$

Os limites da função são:

Para $k < 0$: $\xi + \frac{\alpha}{k} \leq x \leq \infty$, para $k = 0$: $-\infty \leq x \leq \infty$ e para $k > 0$: $-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k}$

$$F_x(x) = \exp[-\exp(-y)]$$

$$x(F) = \xi - \alpha \ln[-\ln(F)] \quad , k = 0$$

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - [-\ln(F)]^k \right\} \quad , k \neq 0$$

Onde k , α e ξ são os parâmetros de forma, escala e posição, respectivamente. A estimação dos parâmetros pelos momentos-L pode ser efetuada por meio das seguintes equações:

$$\hat{k} \approx 7,8590c + 2,9554c^2 \quad , \text{ para } -0,5 \leq \tau_3 \leq 0,5$$

Sendo

$$c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = \frac{(2\beta_1 - \beta_0)}{(3\beta_2 - \beta_0)} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{k}\lambda_2}{(1 - 2^{-\hat{k}})\Gamma(1 + \hat{k})}$$

$$\hat{\xi} = \lambda_1 - \frac{\hat{\alpha}}{\hat{k}} \left[1 - \Gamma(1 + \hat{k}) \right]$$

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico

Curvas-chave

Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia

Estatísticas da série

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão m ³ /s	Observações
1	1969	1970	30/01/1970	17:00	368	2192	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
2	1970	1971	11/11/1970	17:00	288	1365	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
3	1971	1972	26/11/1971	07:00	390	2446	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
4	1972	1973	14/03/1973	17:00	405	2625	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
5	1973	1974	05/01/1974	-	324	1718	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
6	1974	1975	05/01/1975	17:00	318	1657	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
7	1975	1976	14/11/1975	17:00	300	1479	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
8	1976	1977	01/02/1977	07:00	416	2760	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
9	1977	1978	08/03/1978	17:00	388	2422	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
10	1978	1979	fev/79	-	659	6378	Nivelamento da marca de cheia (Castilho, 1999) – Vazão gerada a partir da curva-chave
11	1979	1980	31/01/1980	07:00	438	3037	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
12	1980	1981	15/12/1980	07:00	314	1617	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
13	1981	1982	27/01/1982	17:00	450	3193	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
14	1982	1983	17/01/1983	17:00	380	2329	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
15	1983	1984	12/12/1983	17:00	372	2237	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
16	1984	1985	30/01/1985	-	542	4488	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
17	1985	1986	10/01/1986	17:00	400	2565	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
18	1987	1988	14/01/1988	-	358	2080	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
19	1989	1990	18/12/1989	07:00	400	2565	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
20	1990	1991	26/03/1991	17:00	406	2637	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Continuação

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão m ³ /s	Observações
21	1991	1992	07/02/1992	07:00	458	3298	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
22	1992	1993	15/12/1992	07:00	392	2469	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
23	1993	1994	15/01/1994	07:00	350	1992	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
24	1994	1995	27/12/1994	07:00	352	2014	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
25	1995	1996	29/12/1995	07:00	408	2661	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
26	1996	1997	06/01/1997	17:00	620	5719	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
27	1997	1998	19/12/1997	17:00	370	2214	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
28	1998	1999	06/01/1999	07:00	311	1572	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
29	1999	2000	10/02/2000	07:00	354	2036	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
30	2000	2001	06/01/2001	07:00	325	1728	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
31	2001	2002	02/01/2002	07:00	424	2859	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
32	2002	2003	19/01/2003	07:00	482	3623	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
33	2003	2004	17/01/2004	07:00	381	2340	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
34	2004	2005	07/03/2005	17:00	520	4162	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
35	2005	2006	16/12/2005	17:00	419	2797	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
36	2006	2007	13/12/2006	-	402	2589	*Vazão gerada a partir da curva-chave
37	2007	2008	02/02/2008	07:00	343	1865	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
38	2008	2009	21/12/2008	07:00	491	3748	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
39	2009	2010	08/12/2009	07:00	361	2087	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
40	2010	2011	31/12/2010	07:00	465	3392	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Continuação

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão m ³ /s	Observações
41	2011	2012	06/01/2012	17:00	569	4900	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
42	2012	2013	02/02/2013	17:00	310	1484	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
43	2013	2014	24/12/2013	17:00	439	3050	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
44	2014	2015	01/12/2014	17:00	284	1211	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
45	2015	2016	22/01/2016	07:00	470	3464	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
46	2016	2017	17/12/2016	07:00	370	2214	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
47	2017	2018	08/02/2018	07:00	418	2788	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
48	2018	2019	02/01/2019	07:00	296	1335	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
49	2019	2020	27/01/2020	17:00	582	5113	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
50	2020	2021	22/02/2021	17:00	364	2127	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III
Curvas-chave

As vazões da série histórica foram calculadas com a equação da curva-chave de formato potencial:

$$Q(h) = a (h - h_0)^n \quad (AIII-01)$$

Onde:

h é a cota a qual se quer calcular a vazão (m);

$Q(h)$ é a vazão calculada para a cota h (m³/s);

a , n e h_0 são parâmetros a serem determinados.

Os parâmetros das curvas-chaves utilizadas no estudo e disponibilizadas pela CPRM são os seguintes:

Curva-chave	Período	Parâmetros			Amplitude de Cotas (cm)	
		a	h_0 (m)	n	Min.	Max.
Ramo 1	01/06/1969 a 24/03/1974	308,8595	0,41	1,620	70	124
Ramo 2		487,1269	0,70	1,228	124	230
Ramo 3		311,8853	0,45	1,663	230	700
Ramo 1	25/03/1974 a 05/04/1975	315,1852	0,44	1,623	120	211
Ramo 2		311,8853	0,45	1,663	211	700
Ramo 1	06/04/1975 a 19/08/1984	311,8853	0,45	1,663	110	700
Ramo 1	20/08/1984 a 03/04/1997	308,5452	0,41	1,620	100	224
Ramo 2		311,8853	0,45	1,663	224	700
Ramo 1	04/04/1997 a 17/01/2003	349,1800	0,53	1,507	100	261
Ramo 2		360,0000	0,73	1,700	261	322
Ramo 3		311,8853	0,45	1,663	322	700
Ramo 1	18/01/2003 a 01/12/2014	326,1554	0,53	1,532	90	268
Ramo 2		360,2898	0,80	1,700	268	378
Ramo 3		311,8853	0,45	1,663	378	700
Ramo 1	02/12/2014 a 29/11/2016	308,8600	0,41	1,689	70	80
Ramo 2		256,3796	0,38	1,619	80	120
Ramo 3		326,1550	0,51	1,515	120	268
Ramo 4		360,2900	0,80	1,701	268	378
Ramo 5		311,8850	0,45	1,664	378	700
Ramo 1	30/11/2016 a 06/12/2017	308,8600	0,41	1,620	42	52
Ramo 2		313,6465	0,46	1,257	52	124
Ramo 3		487,1269	0,70	1,228	124	230
Ramo 4		311,8853	0,45	1,663	230	700
Ramo 1	07/12/2017 a 31/12/2021	326,1550	0,51	1,515	70	268
Ramo 2		360,2900	0,80	1,701	268	378
Ramo 3		311,8850	0,45	1,664	378	700

ANEXO III

Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia:

Evento de 02/1979:	https://www.youtube.com/watch?v=NPonRsM-DZU
Evento de 12/2008:	https://www.youtube.com/watch?v=UyFOW4TkPJE
Evento de 06/01/2012:	https://www.youtube.com/watch?v=xyDkHAm5pr4 https://www.youtube.com/watch?v=SQ0-YPiqhel https://www.youtube.com/watch?v=GyUXUXJkz_I
Evento de 22/01/2016:	https://globoplay.globo.com/v/4757348/?s=0s
Evento de 27/01/2020:	https://globoplay.globo.com/v/8270209/ https://www.hojeemdia.com.br/horizontes/rio-doce-atinge-quase-4-metros-ap%C3%B3s-chuvas-e-deixa-15-mil-desalojados-em-valadares-assista-ao-v%C3%ADdeo-1.769293

Estatísticas da série de Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Estatísticas da série

Média m ³ /s	Desvio-Padrão m ³ /s	Máximo m ³ /s	Mínimo m ³ /s	Amplitude m ³ /s	Assimetria	Mediana m ³ /s
2692,9	1120,1	6378,5	1210,7	5167,8	1,4	2457,425

1º Quartil m ³ /s	3º Quartil m ³ /s	AIQ m ³ /s
2019,685	3046,823	1027,138

Estatísticas da série transformada: Ln (X)

Média	Desvio-Padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	Assimetria	Mediana
7,82528	0,37744	8,76069	7,09892	1,66177	0,40910	7,80686

1º Quartil	3º Quartil	AIQ
7,61069	8,02185	0,41117

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
2692,9299	590,1775	0,2192	0,2672	0,2155

Função Acumulada de Probabilidade da Log-Pearson Tipo III está apresentada no Anexo II. Inversa da distribuição da Log-Pearson Tipo III também está descrita no Anexo II.

Parâmetros da Distribuição Log-Pearson Tipo III

Distribuição	Posição (μ)	Escala (σ)	Forma (γ)	Gama (α)	Gama (β)
Log-Pearson Tipo III ($\mu, \sigma, \gamma, \alpha, \beta$)	7,825278	0,380775	0,459951	18,90764	0,087569



Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta

ENDEREÇOS

Sede

SGAN- Quadra 603 – Conjunto J – Parte A – 1º andar
Brasília – DF – CEP: 70.830-030
Tel: 61 2192-8252
Fax: 61 3224-1616

Escritório Rio de Janeiro

Av Pasteur, 404 – Urca
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22.290-255
Tel: 21 2295-5337 – 21 2295-5382
Fax: 21 2542-3647

Superintendência Regional de Belo Horizonte

Av. Brasil, 1.731 - Funcionários
Belo Horizonte – MG – CEP: 30.140-002
Tel.: 31 3878-0376
Fax: 31 3878-0383

Residência de Fortaleza

Rua Rodrigues Júnior, 840 - Centro
Fortaleza – CE – CEP: 60.060-000
Tel.: 85 3878-0200
Fax: 85 3878-0240