

Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

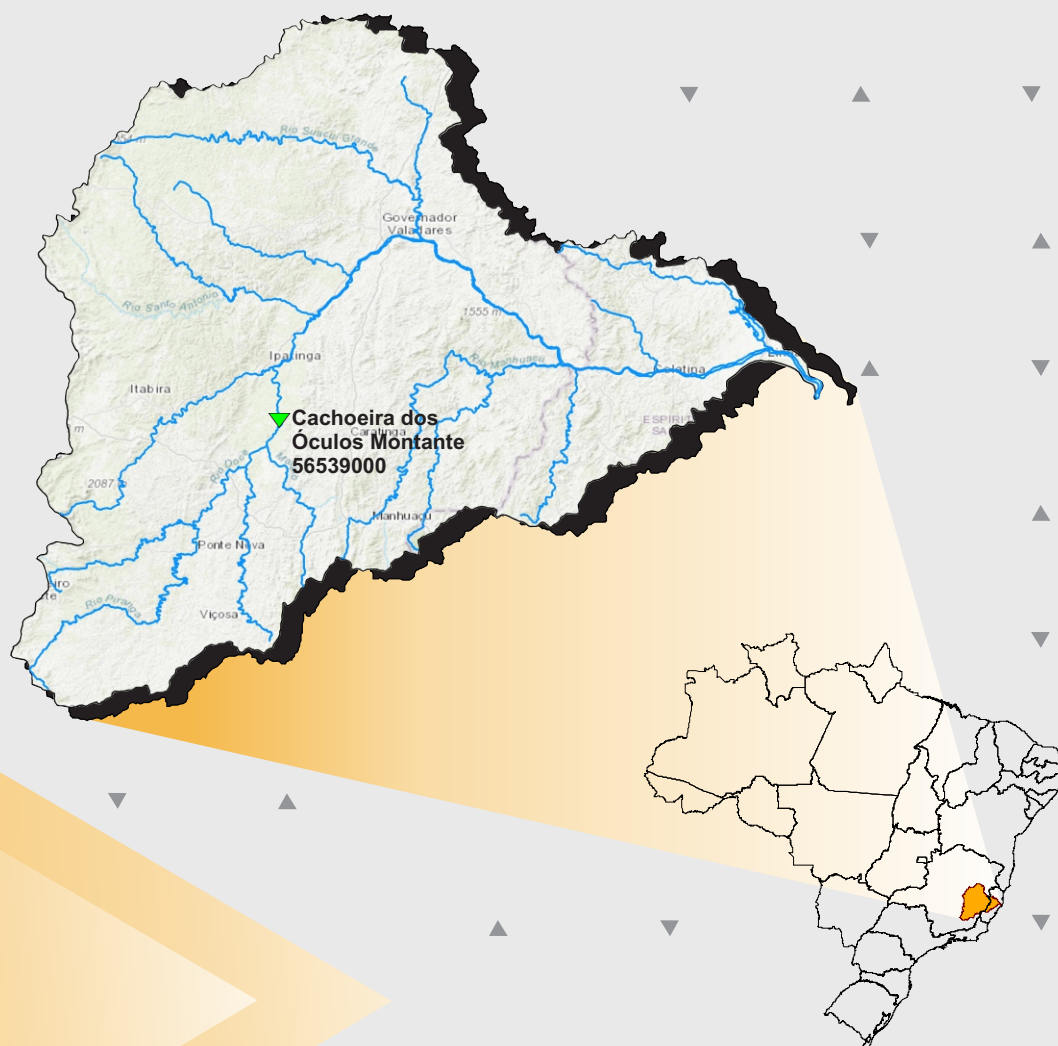
Análise de Frequências de Vazões dos Sistemas de Alerta

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Doce

Rio Doce em Cachoeira dos Óculos Montante

Código 56539000

Municípios Atendidos: Córrego Novo - MG e Dionísio - MG



2022

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/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: Cachoeira dos Óculos Montante
Código: 56539000
Municípios Atendidos: Córrego Novo - MG e Dionísio - 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	<p>Freire, Paula Kristhina Cordeiro Análise de frequência de vazões dos sistemas de alerta: Sistema de alerta Bacia do Rio Doce, Rio Doce, estação fluviométrica Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, municípios atendidos Córrego Novo - MG e Dionísio – MG / Paula Kristhina Cordeiro Freire; Eber José de Andrade Pinto. – Fortaleza: CPRM, 2022. 1 recurso eletrônico: PDF</p> <p>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 978-65-5664-318-2</p> <p>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.</p> <p style="text-align: right;">CDD 551.48</p>
------	---

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

Vice-Presidente

Cassiano de Souza Alves - Interino

Conselheiros

Antônio Simões Brando Júnior

Cassio Roberto da Silva

Fernando Antônio Freitas Lins

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

Márcio 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 memorian*)

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 Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000. 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 nesta região, 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 Cachoeira dos Óculos Montante
Figura 04 – Perfil da seção transversal do Rio Doce da seção de réguas na estação de Cachoeira dos Óculos Montante
Figura 05 - Frequência de cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)
Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Vazões em m^3/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 Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, está localizada na Latitude 19°47'11"S e Longitude 42°28'59"O, nas margens do Rio Doce, dentro do Parque Estadual do Rio Doce, e possui uma área de drenagem de 15.900 km². Conforme especificado na ficha descritiva, revisada em 26/04/2019, a estação fluviométrica está instalada na margem direita do Rio Doce, 600 m a montante da barra do ribeirão dos Óculos e 1300 m a montante da cachoeira dos Óculos. O acesso à estação se dá por rodovia asfaltada até Ipatinga, seguindo sentido Pingo D'água e depois por 8,1 km sentido Córrego Novo. Entrar à direita e seguir 6,4 km por estrada de terra até a Fazenda Boa Sorte. Por Raul Soares seguir para Córrego Novo, Pingo D'água e daí até a Fazenda Boa Sorte onde está localizada a estação, a aproximadamente 1000 m a jusante da sede da fazenda (a 64 km de Raul Soares).

Figura 02 – Localização dos municípios beneficiados pelo SACE Rio Doce



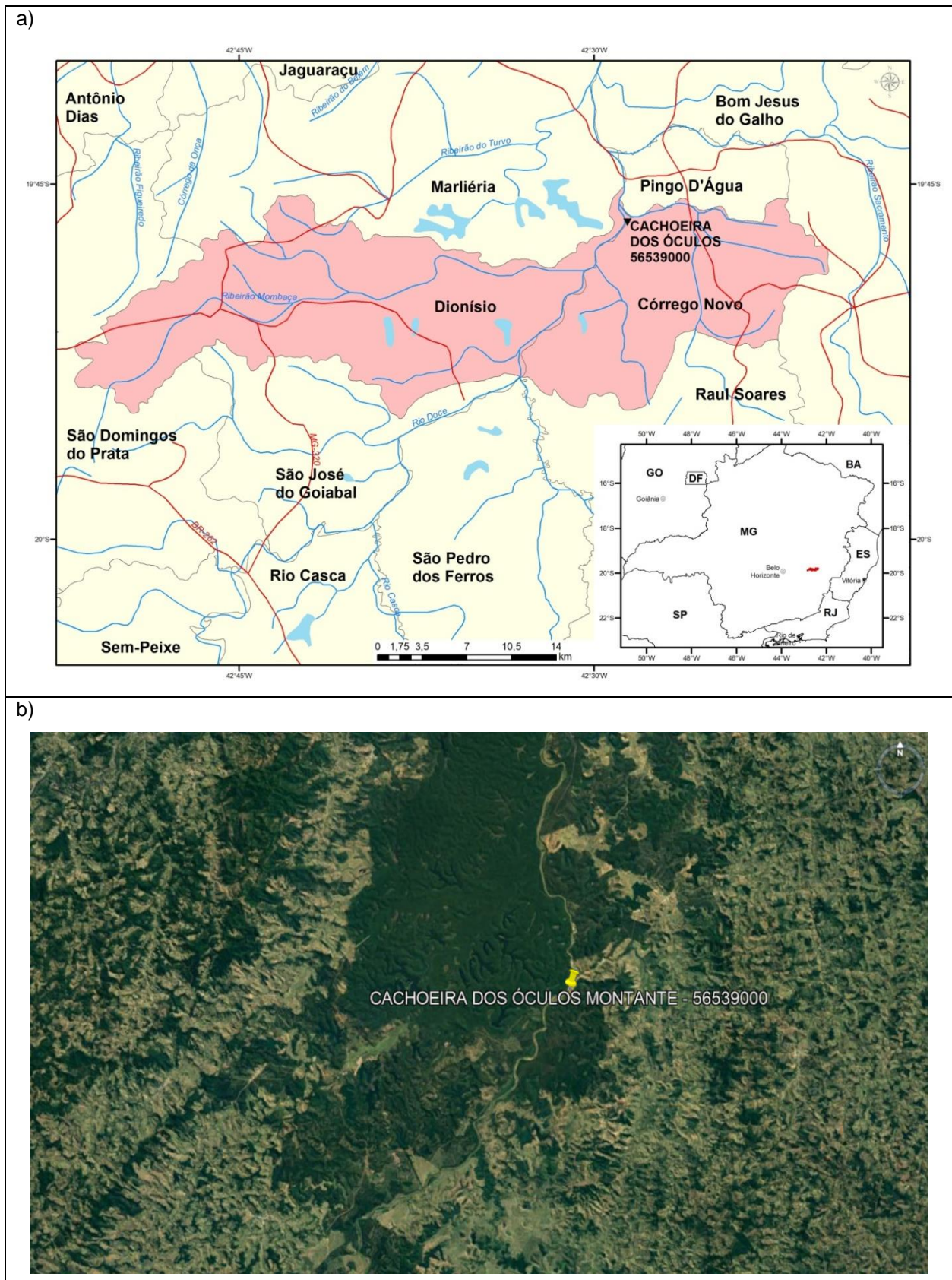
Fonte: CPRM (2021)

Ao longo do histórico da estação não houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, não foram acrescentados 100 cm ou outro valor às cotas da estação. Nesta estação, a cota de alerta é de 1000 cm ($2329 \text{ m}^3/\text{s}$) e a cota de inundação é de 1250 cm ($3377 \text{ m}^3/\text{s}$) que é igual à cota de transbordamento na seção. A cota de transbordamento da calha no trecho onde está instalada a estação fluviométrica de Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, segundo a ficha descritiva revisada em 26/04/2019, ocorre a partir da cota de 1250 cm pela margem direita. Segundo CPRM (2010, p. 09), em 2005 a seção de régua foi deslocada para sua atual localização, situando-se a aproximadamente 500 m a montante da seção antiga. 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 régua da estação. Esta figura também apresenta graficamente as cotas de alerta ($1000 \text{ cm} - 2329 \text{ m}^3/\text{s}$) e inundação ($1250 \text{ cm} - 3377 \text{ m}^3/\text{s}$) para a estação de Cachoeira dos Óculos Montante, bem como, as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre 1974 e 2020, a maior cota observada (991 cm em 01/02/1979) e a maior cota com medição de descarga líquida (515 cm em 23/01/1985). O valor da cota

máxima observada foi estabelecido a partir do levantamento da marca de cheia como consta na ficha de inspeção da estação de 13/05/1979.

Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Cachoeira dos Óculos Montante



c)

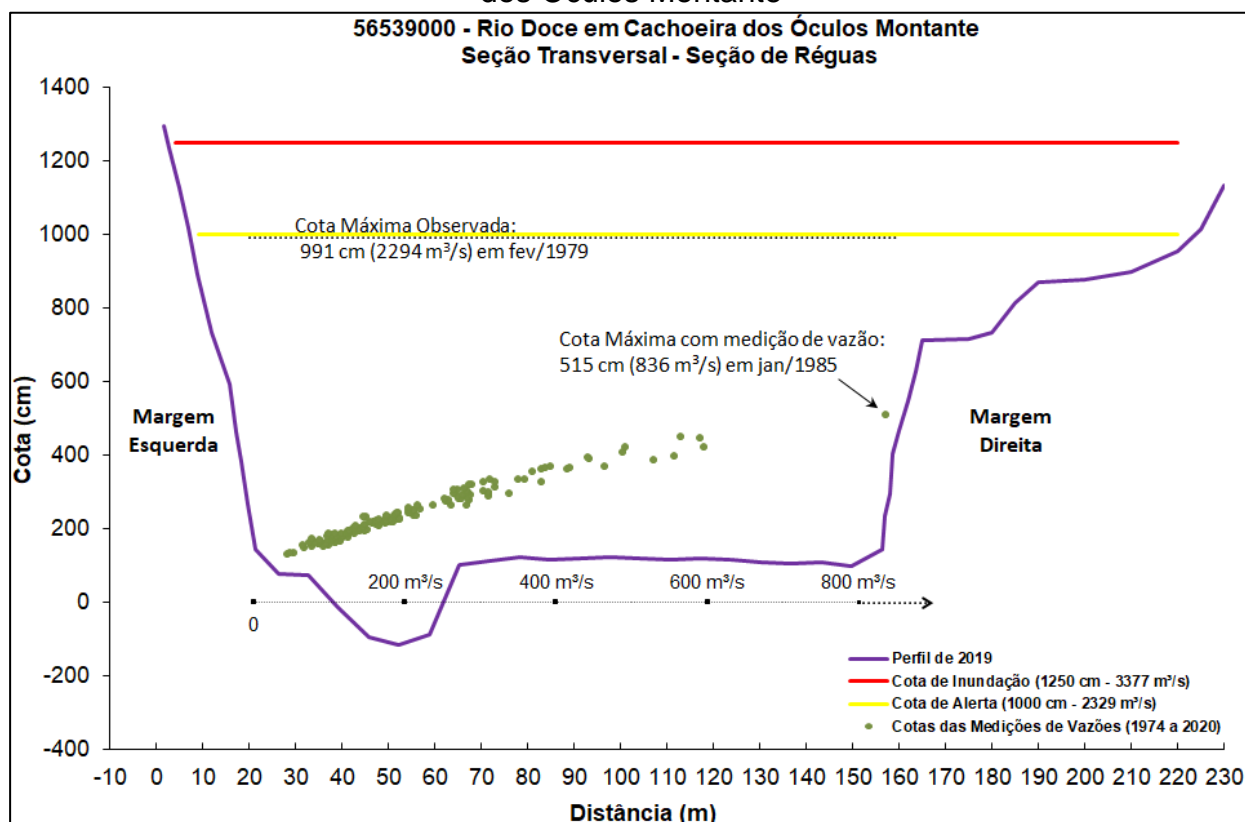


d)



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 Cachoeira dos Óculos Montante



Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser visto na figura 04, para cotas superiores a 454 cm há somente 01 medição de vazão, na cota 515 cm, e a partir desta cota se observa ausência de medições de vazão. A diferença entre a máxima cota com vazão medida (836 m³/s na cota 515 cm) e a máxima cota observada nas réguas (991 cm) é de 476 cm.

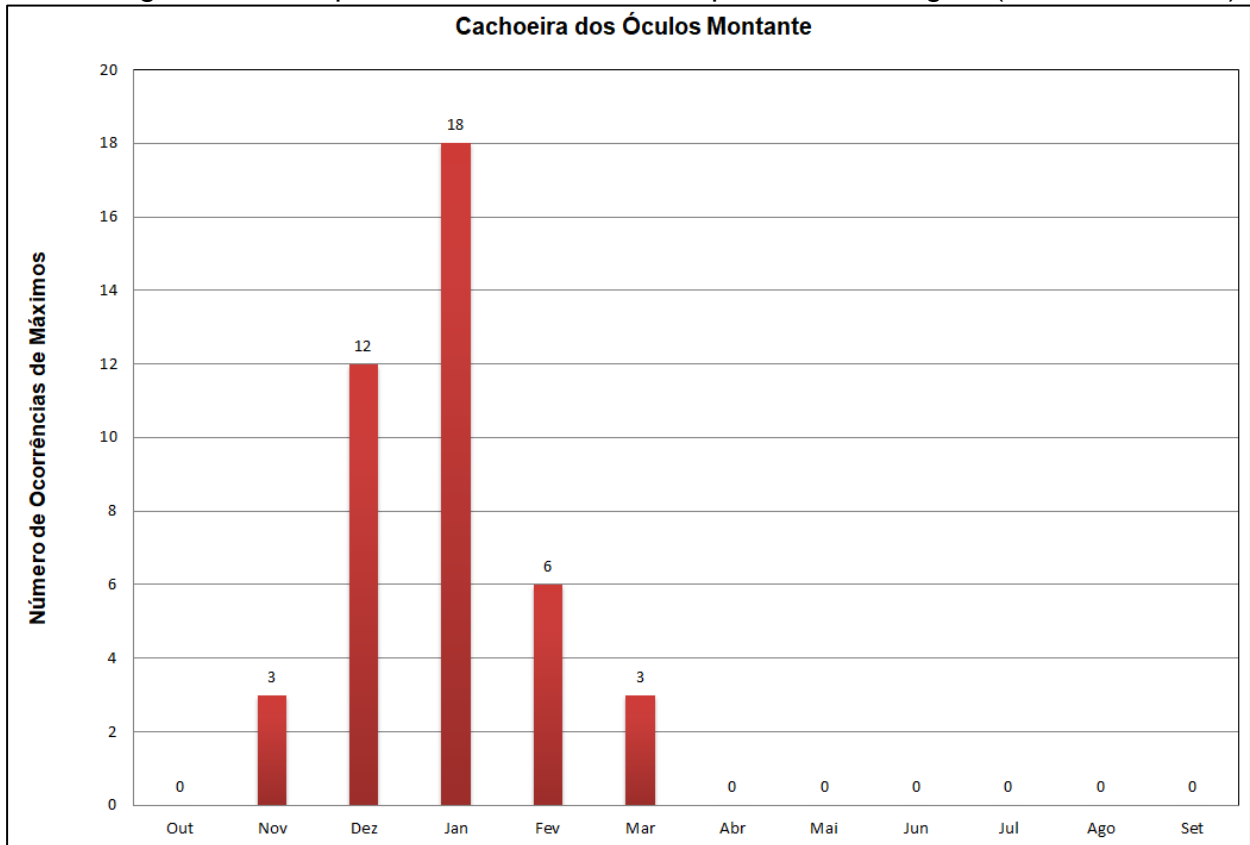
Na figura 05 observa-se o histograma apresentando a frequência de ocorrência das cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) em cada mês. Observa-se que o maior número de cotas máximas para a estação de Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, ocorre no mês de janeiro, com 18 ocorrências dentre as 42 cotas máximas da série.

No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 42 valores, sendo 31 valores superiores à maior cota com medição de vazão (515 cm). A razão entre as cotas máximas, ou seja, a maior cota observada com a maior cota que possui medição de vazão é de 1,92 (991 cm/515 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 515 cm. Todavia, 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 por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)



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 Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, 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 (6,87746)

σ_{lnX} é o parâmetro de escala (0,38282)

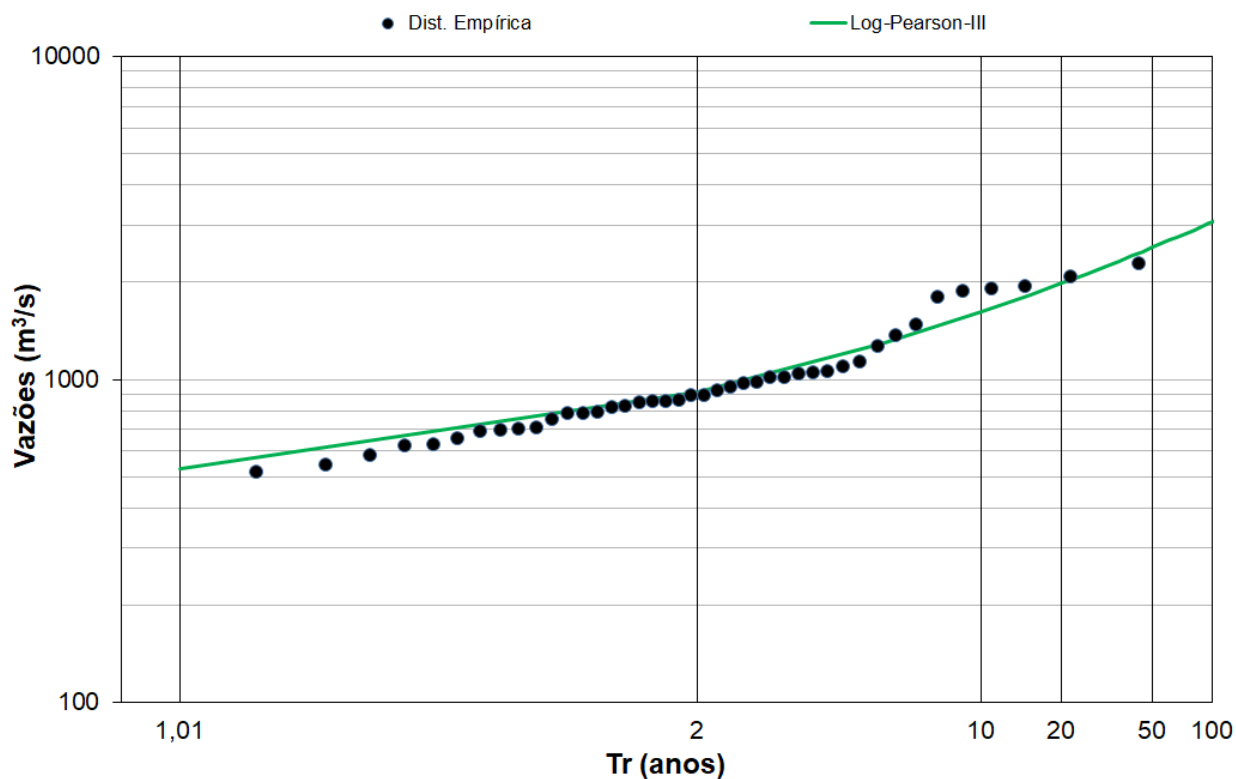
γ_{lnX} é o parâmetro de forma (1,00012)

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

$$\alpha = \frac{4}{\gamma^2} \quad (3,99905) \text{ e}$$

$$\beta = \left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right| \quad (0,19143)$$

Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica
Papel Log-Normal



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)	911	1297	1621	1831	1990	2121	2232	2416	2567	2696	2861	3002	3086

Fonte: Elaborada pelos autores

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

a) No dia 01/02/1979 o Rio Doce em Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, alcançou a cota de 991 cm. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resposta: *Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 991 cm com a curva-chave válida para a 01/02/1979 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III).*

Para a cota 991, aceitando-se a extrapolação da curva-chave disponível, os parâmetros são $a = 57,746$, $h_0 = 0,27$ m e $n = 1,625$ (Anexo III). Dessa forma temos:

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

$$Q(991 \text{ cm}) = 57,746 \left(\frac{991}{100} - 0,27 \right)^{1,625}$$

$$Q(991 \text{ cm}) = 2294 \text{ m}^3/\text{s}$$

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, $\mu_{\ln X} = 6,87746$ é o parâmetro de posição, $\sigma_{\ln X} = 0,38282$ é o parâmetro de escala e $\gamma_{\ln X} = 1,00012$ é o parâmetro de forma da Log-Pearson Tipo III e $G()$ é a FAP da distribuição Gama com parâmetros $\alpha = \frac{4}{\gamma^2} = 3,99905$ e $\beta = \left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right| = 0,19143$. No EXCEL pode ser utilizada a função $DIST.GAMA(x, \text{alfa}, \text{beta}, \text{cumulativo})$.

Substituindo os valores na equação 03 temos:

$$T = \frac{1}{1 - G \left(\ln(2294) - 6,87746 + \frac{2 \cdot 0,38282}{1,00012}; 3,99905; 0,19143 \right)} = 33,12 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 33,12 anos corresponde a probabilidade de 3,02% da vazão de 2.294 m³/s associada a cota 991 cm ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 2294 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{33,12} 100 = 3,02 \%$$

b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de alerta em Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000?

Resposta: A cota de alerta em Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000, é 1000 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 2329 m³/s (Ramo 03). 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 1000 cm é de 35 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 2,86%.

c) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de inundação em Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000?

Resposta: A cota de inundação em Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000 é 1250 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 3377 m³/s (Ramo 03). 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 1250 cm é de 142 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 0,71%.

5 – REFERÊNCIAS

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

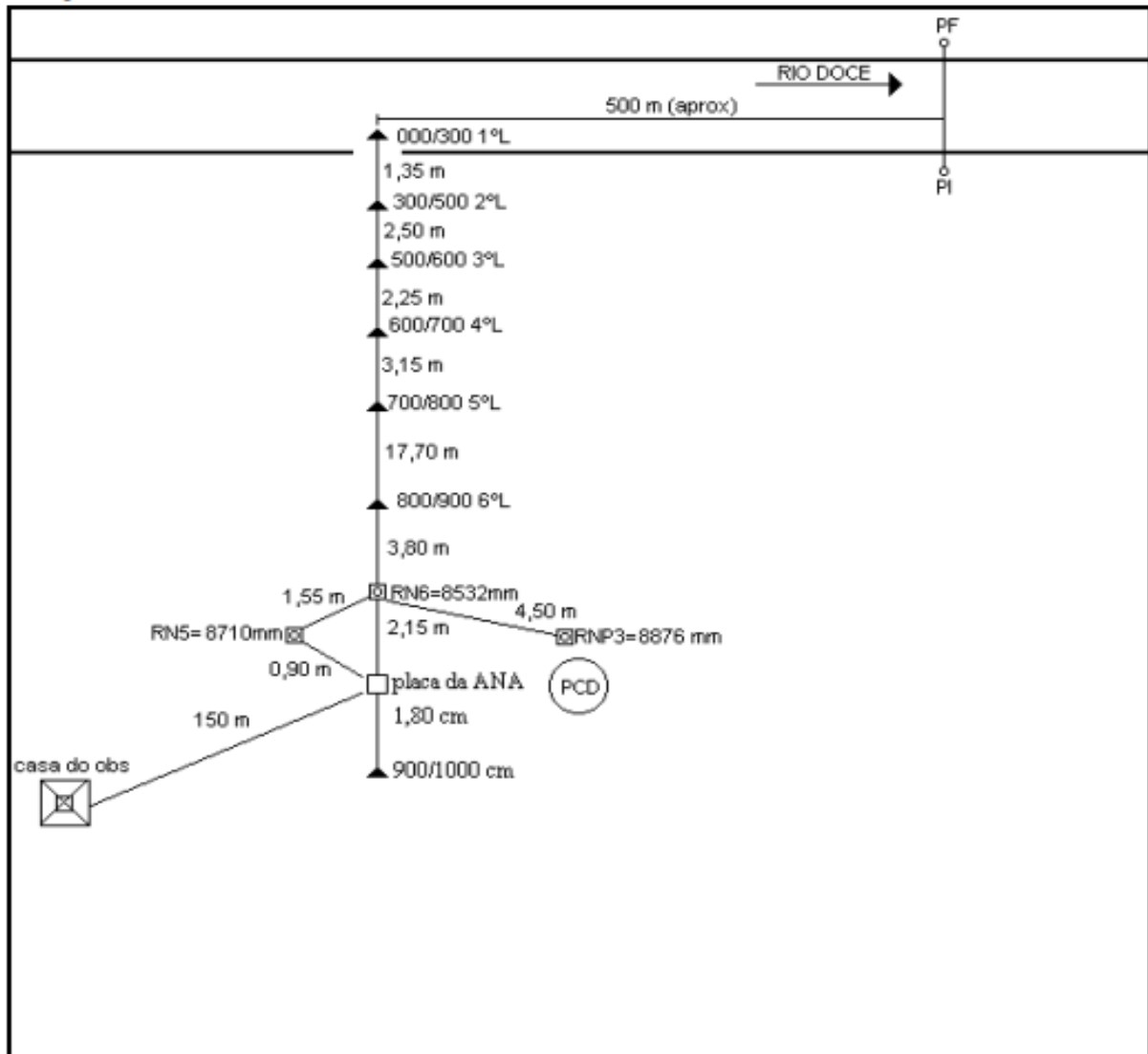
Estação Fluviométrica de Cachoeira dos Óculos Montante, código 56539000

ESTAÇÃO: CACHOEIRA DOS ÓCULOS MONT. TIPO: FDSQT CÓDIGO: 56539000					
REGIÃO HIDROGRÁFICA: Atlântico Leste			BACIA: Atlântico, Trecho Leste		
RIO: 56001000 - RIO DOCE		UF: MG	MUNICÍPIO: Córrego Novo		
ENTIDADE COORDENADORA: ANA		ENTIDADE OPERADORA: CPRM/BH			
ÁREA DE DRENAGEM (Km²): 15.836		DRENAGEM GERAL: Oceano Atlântico			
LAT.: -19°47'11.00" LONG. -42°28'59.00"		INST.: GPS GARMIN ETREX LEGEND		DATUM: WGS 84	
ALT.(m): 210 m	INST.: Carta topográfica	DATUM:	REF. CART.: SE-23-Z-D-VI		
FOLHA: Caratinga		ESCALA: 1:100.000		ANO: 1980	
ESTAÇÃO	TIPO	DATA DA INSTALAÇÃO	DATA DA EXTINÇÃO	ENTIDADE	
FLUVIOMÉTRICA	F	13.09.74		CPRM	
FLUVIOGRÁFICA	FR				
SEDIMENTOMÉTRICA	S				
QUALIDADE DAS ÁGUAS	Q				
ESTAÇÃO TELEMÉTRICA: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não DATA DA INSTALAÇÃO: 31/10/2012					
LOCALIZAÇÃO: 600 m a montante da barra do ribeirão dos Óculos e aproximadamente 1300 m a montante da Cachoeira dos Óculos.					
ACESSIBILIDADE: Por rodovia asfaltada até Ipatinga. Seguir sentido Pingo D'água e depois por 8,1 km sentido Córrego Novo. Entrar à direita e seguir 6,4 km (por estrada de terra) até a Faz. Boa Sorte. Por Raul Soares seguir para Córrego Novo, Pingo D'água e daí até a Faz. Boa Sorte onde está localizada a estação, aprox. 1000m a jusante da sede da fazenda. (a 64 km de Raul Soares); ou de Caratinga-Bom Jesus do Galho-Pingo D'água e daí até a estação 65 Km (ver croqui da ficha pluviométrica).					
DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO (RÉGUAS, LANCES, RRNN, SM, SR, PI, PF, etc.):					
MARGEM: direita					
RÉGUAS: 7 lances com 9 réguas denteadas fixadas em estacas suporte:					
1º LANCE	000/300 cm				
2º LANCE	300/500 cm				
3º LANCE	500/600 cm				
4º LANCE	600/700 cm				
5º LANCE	700/800 cm				
6º LANCE	800/900 cm				
7º LANCE	900/1000 cm				
RRNN: RNP3= 8876 mm parafuso chumbado em base de concreto.					
RN5= 8710 mm parafuso chumbado em base de concreto.					
RN6= 8532 mm parafuso chumbado em base de concreto.					
SEÇÃO MEDIDORA Única, 500 m a jusante das escalas.					
PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA:					
Processos convencionais. Medição detalhada com molinete e de barco em qualquer época do ano.					
QUALIDADE DE ÁGUA: Quatro parâmetros: temperatura, pH, OD e condutividade elétrica.					
EQUIPAMENTOS					
ESPÉCIE	Nº PATRIMÔNIO	Nº SÉRIE	PROPRIETÁRIO	EM OPERAÇÃO	DATA INSTALAÇÃO
PCD-HOBECO			ANA-025.490	sim	

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES:

POTAMOGRAFIA: Rio Doce - Nasce na Serra Trapizonga - município de Ressaquinha-MG, com o nome de rio Piranga. Afluentes me.: rio Carmo, Piracicaba, Santo Antonio, Suaçuí grande; md.: rio Chopotó, Casca, Matipó, Cuité, Manhuaçu, Guandu. Deságua no Oceano Atlântico - ES. Área da Bacia hidrográfica: 84.700 km ² .					
POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE: MONTANTE: FAZENDA CACHOEIRA D'ANTAS JUSANTE: CENIBRA					
CARACTERÍSTICA DO TRECHO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> Regime: <input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente <input type="radio"/> Efêmero </td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> Conformação: <input type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado <input type="radio"/> Curvo <input checked="" type="radio"/> Meandrante </td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> Leito <input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular </td> </tr> </table>			Regime: <input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente <input type="radio"/> Efêmero	Conformação: <input type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado <input type="radio"/> Curvo <input checked="" type="radio"/> Meandrante	Leito <input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular
Regime: <input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente <input type="radio"/> Efêmero	Conformação: <input type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado <input type="radio"/> Curvo <input checked="" type="radio"/> Meandrante	Leito <input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular			
NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"> NATUREZA: ME: Arenosa com vegetação de grande porte MD: Arenosa com vegetação de grande porte </td> <td style="width: 50%;"> INCLINAÇÃO: ME: Média MD: Média </td> </tr> </table>			NATUREZA: ME: Arenosa com vegetação de grande porte MD: Arenosa com vegetação de grande porte	INCLINAÇÃO: ME: Média MD: Média	
NATUREZA: ME: Arenosa com vegetação de grande porte MD: Arenosa com vegetação de grande porte	INCLINAÇÃO: ME: Média MD: Média				
NATUREZA DO LEITO: Arenoso					
CONTROLE: Cachoeira LOCALIZAÇÃO: Jusante DISTÂNCIA (m): 1400 m					
COTA DE TRANSBORDAMENTO (cm): <input type="checkbox"/> MARGEM DIREITA <input type="checkbox"/> 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 POR NOME: _____ ENDEREÇO _____ FONE: _____ BAIRRO: _____ CEP: _____ CIDADE: _____ ESTADO: _____					
OBSERVAÇÕES: Não efetua pagamento ao Fundo Rural.					

CROQUI:



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

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

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:

$$x(T) = \mu + \sigma \cdot Z_\tau$$

onde τ é o tempo de retorno e z_τ 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 $\gamma_{\ln X} = 0$

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

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	1974	1975	04/01/1975	07:00	528	792	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
2	1975	1976	15/11/1975	17:00	444	588	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
3	1976	1977	31/01/1977	17:00	530	797	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
4	1978	1979	01/02/1979	07:00	991	2294	Nivelamento da marca de cheia/Vazão gerada a partir da curva-chave
5	1981	1982	26/01/1982	17:00	630	1070	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
6	1982	1983	25/01/1983	-	598	980	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
7	1983	1984	12/12/1983	-	612	1019	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
8	1984	1985	29/01/1985	-	890	1917	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
9	1985	1986	04/01/1986	-	655	1143	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
10	1986	1987	13/03/1987	-	476	663	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
11	1987	1988	13/02/1988	-	570	903	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
12	1989	1990	23/12/1989	-	568	897	M/Vazão gerada a partir da curva-chave
13	1990	1991	20/01/1991	07:00	624	1053	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
14	1991	1992	25/01/1992	17:00	626	1059	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
15	1992	1993	13/12/1992	17:00	552	855	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
16	1993	1994	15/01/1994	07:00	464	634	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
17	1994	1995	27/12/1994	07:00	490	697	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
18	1995	1996	27/12/1995	17:00	528	792	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
19	1996	1997	05/01/1997	07:00	900	1953	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
20	1997	1998	18/12/1997	17:00	492	702	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

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

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – 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	1998	1999	08/01/1999	07:00	427	549	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
22	1999	2000	10/02/2000	07:00	554	860	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
23	2000	2001	04/01/2001	17:00	544	834	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
24	2001	2002	19/02/2002	07:00	556	865	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
25	2002	2003	18/01/2003	17:00	730	1373	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
26	2003	2004	13/01/2004	17:00	602	991	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
27	2004	2005	06/03/2005	07:00	766	1490	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
28	2005	2006	16/12/2005	07:00	540	823	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
29	2006	2007	12/01/2007	17:00	612	1019	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
30	2007	2008	17/03/2008	17:00	514	756	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
31	2008	2009	19/12/2008	17:00	882	1888	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
32	2009	2010	01/01/2010	17:00	580	930	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
33	2010	2011	29/12/2010	17:00	699	1276	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
34	2011	2012	05/01/2012	-	941	2104	Nivelamento da marca de cheia/Vazão gerada a partir da curva-chave
35	2012	2013	01/02/2013	17:00	497	714	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
36	2013	2014	25/12/2013	07:00	461	627	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
37	2014	2015	30/11/2014	17:00	414	521	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
38	2015	2016	07/11/2015	07:00	510	707	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
39	2016	2017	16/12/2016	17:00	572	872	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

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

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – 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
40	2017	2018	05/12/2017	17:00	654	1108	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
41	2019	2020	26/01/2020	17:00	862	1817	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
42	2020	2021	20/02/2021	17:00	590	958	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

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

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – 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:

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

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	Mín.	Max.
Ramo 1	01/09/1974 a 15/06/1977	57,746	0,27	1,625	150	650
Ramo 1	16/06/1977 a 12/11/1982	55,905	0,40	1,700	160	385
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	385	1000
Ramo 1	13/11/1982 a 25/03/1987	57,800	0,25	1,600	140	225
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	225	950
Ramo 1	26/03/1987 a 20/03/1989	70,544	0,51	1,571	150	297
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	297	800
Ramo 1	21/03/1989 a 12/01/2000	57,790	0,24	1,599	130	257
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	257	950
Ramo 1	13/01/2000 a 05/11/2005	70,544	0,51	1,571	130	297
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	297	800
Ramo 1	06/11/2005 a 05/12/2008	56,654	0,45	1,710	160	383
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	383	650
Ramo 1	06/12/2008 a 30/11/2014	55,890	0,39	1,695	120	389
Ramo 2		57,746	0,27	1,625	389	1000
Ramo 1	01/12/2014 a 08/02/2018	55,495	0,45	1,651	100	389
Ramo 2		60,658	0,57	1,626	389	1000
Ramo 1	09/02/2018 a 31/12/2021	55,997	0,44	1,716	100	383
Ramo 2		57,811	0,27	1,625	383	650
Ramo 3		57,746	0,27	1,625	650	1250

ANEXO III

Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia:

Dezembro/2017: <https://www.youtube.com/watch?v=it8HPxq1rKE>
 Janeiro/2020: <https://www.youtube.com/watch?v=Ku4I7hk1jfE>
<https://www.youtube.com/watch?v=ISPn3rKWD70>
 Fevereiro/2020: <https://www.youtube.com/watch?v=Bpsdq7G4lwE>
 Janeiro/2022: <https://www.youtube.com/watch?v=X0YaBs2axd4>

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
1045,0	447,2	2294,3	520,7	1773,6	1,4	900,1

1º Quartil m ³ /s	3º Quartil m ³ /s	AIQ m ³ /s
765,325	1098,750	333,425

Estatísticas da série transformada: Ln (X)

Média	Desvio-Padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	Assimetria	Mediana
6,8775	0,37520	7,73818	6,25517	1,48301	0,72760	6,80250

1º Quartil	3º Quartil	AIQ
6,64010	7,00182	0,36172

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
1044,9882	232,1201	0,2221	0,3337	0,2031

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 ($\mu, \sigma, \gamma, \alpha, \beta$)	6,877461	0,382820	1,000119	3,999049	0,191433



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