

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 Belo Oriente

Código 56719998

Municípios Atendidos: Belo Oriente - MG e Bugre - 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: Belo Oriente

Código: 567199998

Municípios Atendidos: Belo Oriente – MG e Bugre - MG

Paula Kristhina Cordeiro Freire

Eber José de Andrade Pinto



FORTALEZA

2022

PROGRAMA GESTÃO DE RISCO E RESPOSTA A DESASTRES
AÇÃO LEVANTAMENTOS, ESTUDOS, PREVISÃO E ALERTA DE
EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

PROJETO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES
NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE COTAS 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 Belo Oriente, código 567199998, municípios
atendidos Belo Oriente - MG e Bugre – 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 978-65-5664-321-2

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

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 Dulcinea 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 Belo Oriente, código 56719998. 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 Belo Oriente (56719998)
Figura 04 – Perfil da seção transversal do Rio Doce da seção de réguas de Belo Oriente
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 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 do curso d'água, 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.

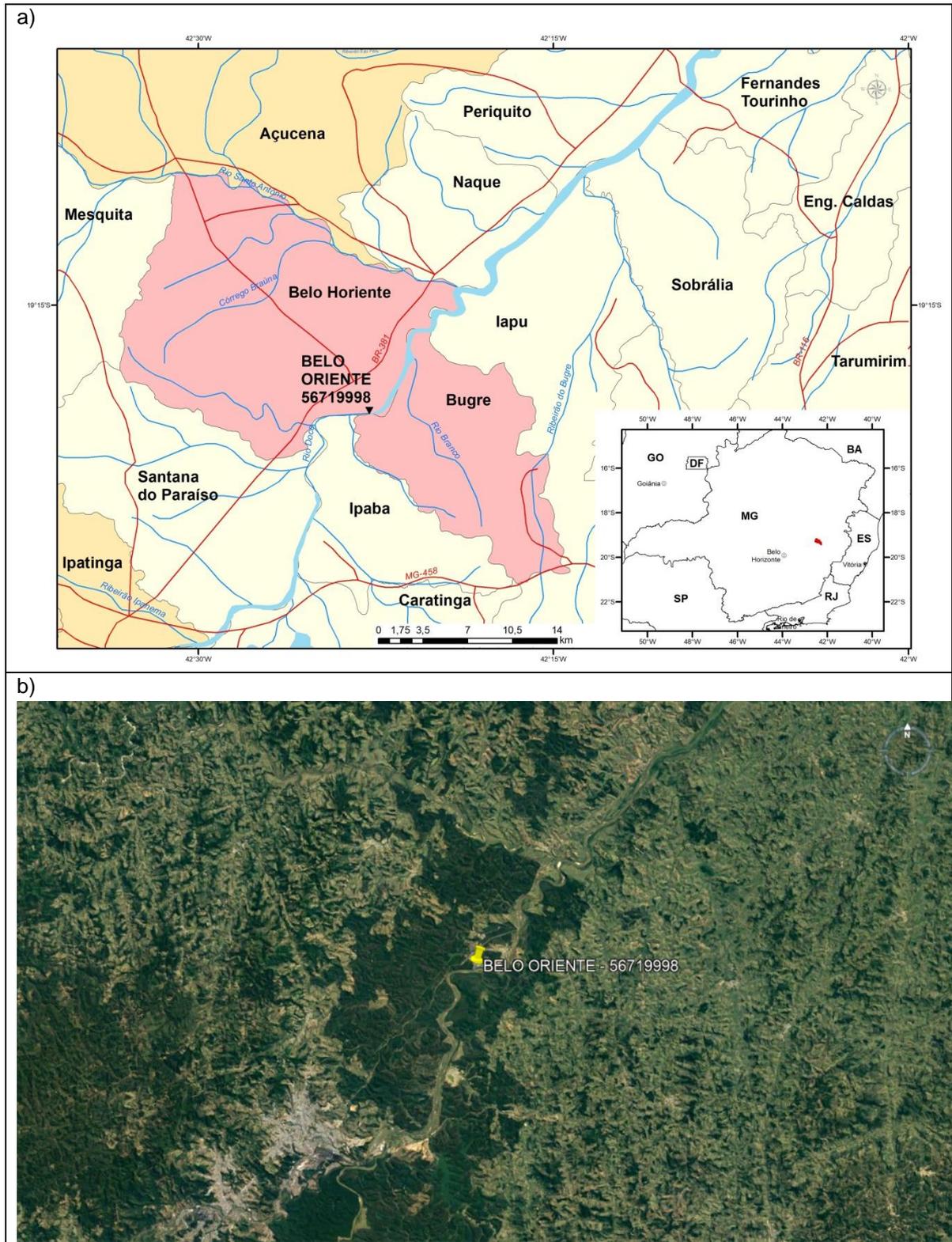
Quando a cota de alerta é alcançada, havendo um risco mais elevado de ocorrer uma inundação, o monitoramento é intensificado com emissão mais frequente de boletins incluindo as previsões para os níveis dos rios nos municípios monitorados. Já a cota de inundação significa que o ponto mais baixo da cidade 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 Belo Oriente, código 56719998, está localizada na Latitude 19°19'40"S e Longitude 42°23'51"O, nas margens do Rio Doce, cerca de 30 km a jusante da confluência do Rio Piracicaba com o Rio Doce e possui uma área de drenagem de 24.200 km². Conforme especificado na ficha descritiva, revisada em 10/06/2021, a estação fluviométrica está instalada na margem esquerda do Rio Doce, ao lado da área onde se encontram as bombas da empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A.. O acesso à estação se dá partindo de Ipatinga para Governador Valadares, percorrer cerca de 6 km depois do trevo de Santana do Paraíso e entrar à direita na placa "M. Rio Doce". Percorrer cerca de 0,3 km e atravessar a linha do trem (CVRD), entrando à esquerda mais 3,1 km até a seção de réguas.

Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Belo Oriente (56719998)





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

A estação de Belo Oriente possui, desde 16/10/1986, seção de régua limnimétrica 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 10/06/2021, desde outubro de 2013 estão

instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do rio Doce.

Ao longo do histórico da estação houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, foram acrescentados 100 cm a partir de 01/07/2015, às cotas da estação. Nesta estação, a cota de alerta é de 860 cm (3307 m³/s) e a cota de inundação de 900 cm (3573 m³/s). Vale ressaltar que estas cotas foram atualizadas e acrescentadas de 100 cm, ou seja, para o período anterior a 01/07/2015, antes do rebaixamento da cota do zero da régua, correspondiam aos valores de 760 cm para a cota de alerta, e 800 cm para a cota de inundação. A cota de transbordamento da calha no trecho onde está instalada a estação fluviométrica de Belo Oriente, código 56719998, conforme especificado na ficha descritiva, revisada em 10/06/2021, ocorre a partir da cota de 550 cm pela margem direita. 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. Esta figura também apresenta graficamente as cotas de alerta (860 cm - 3307 m³/s) e de inundação (900 cm – 3573 m³/s) para a estação de Belo Oriente, bem como, as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre 1987 e 2020, a maior cota observada (868,8 cm em jan/1997) e a maior cota com medição de descarga líquida (617 cm em 18/01/2003). Estes valores corresponderiam às cotas de 968,8 cm e 717 cm nas escalas atuais, após mudança da cota do zero da régua.

Como pode ser visto na figura 04, o perfil da seção transversal foi levantado até a cota 726 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 (868,8 cm). Também se observa que há somente 04 medições de vazão para cotas superiores a 354 cm e ausência de medições no intervalo de 532 a 617 cm.

A máxima cota observada de toda série histórica da estação foi de 868,8 cm e ocorreu em jan/1997. Esse valor da cota máxima observada foi estabelecido a partir do levantamento da marca de cheia, como consta na ficha de inspeção da estação datada de 15/01/1997. A diferença entre a máxima cota com vazão medida (2450 m³/s na cota 617 cm) e a máxima cota observada nas réguas (868,8 cm) é de 251,8 cm.

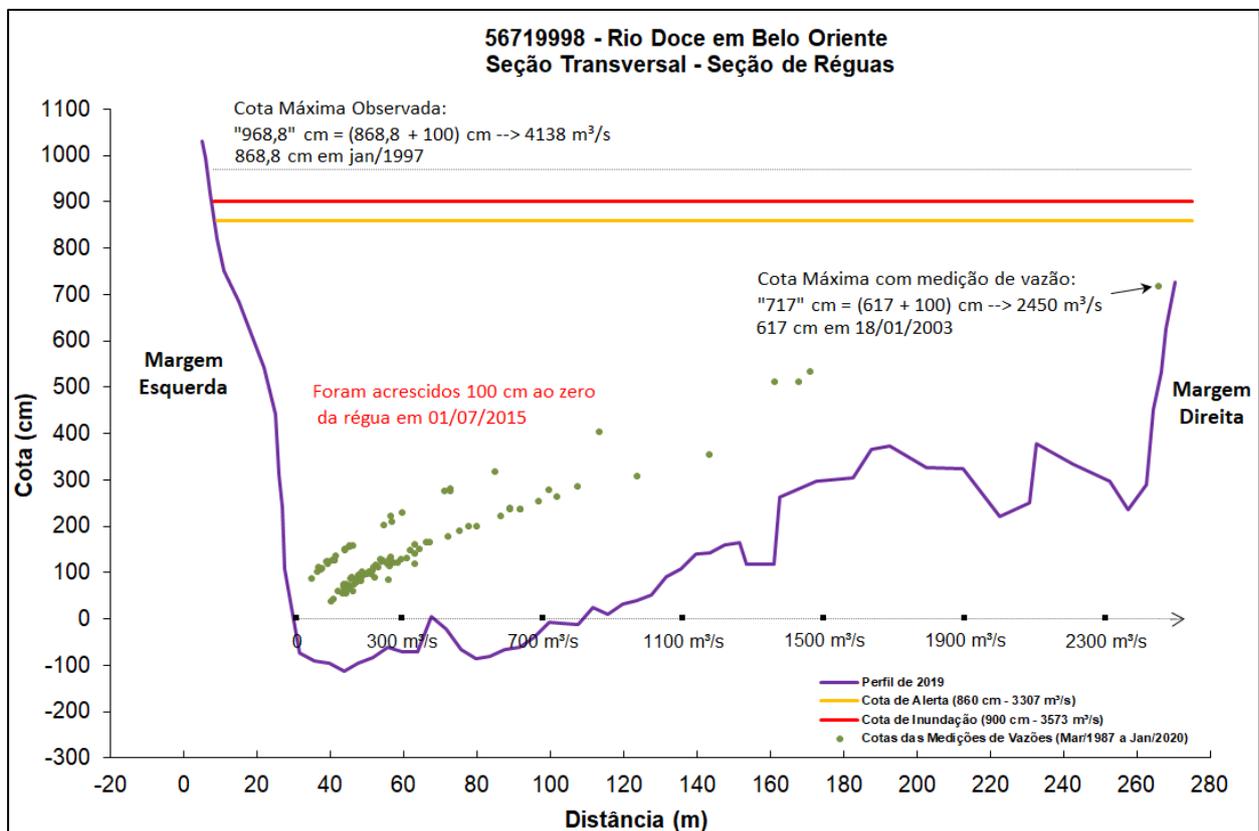
Na figura 05 observa-se o histograma apresentando a frequência de ocorrência das cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) em cada mês. Observa-se que o maior número de cotas máximas para a estação de Belo Oriente, código 56719998, ocorre no mês de janeiro, com 14 ocorrências dentre as 34 cotas máximas da série.

No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 34 valores, sendo 01 valor superior à cota de alerta (860 cm), ou seja 2,94%. Destes 34 valores, 05 valores são superiores à maior cota com medição de vazão (617

cm). A razão entre as cotas máximas com medição de vazão e a observada é 1,41 (868,8 cm / 617 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.

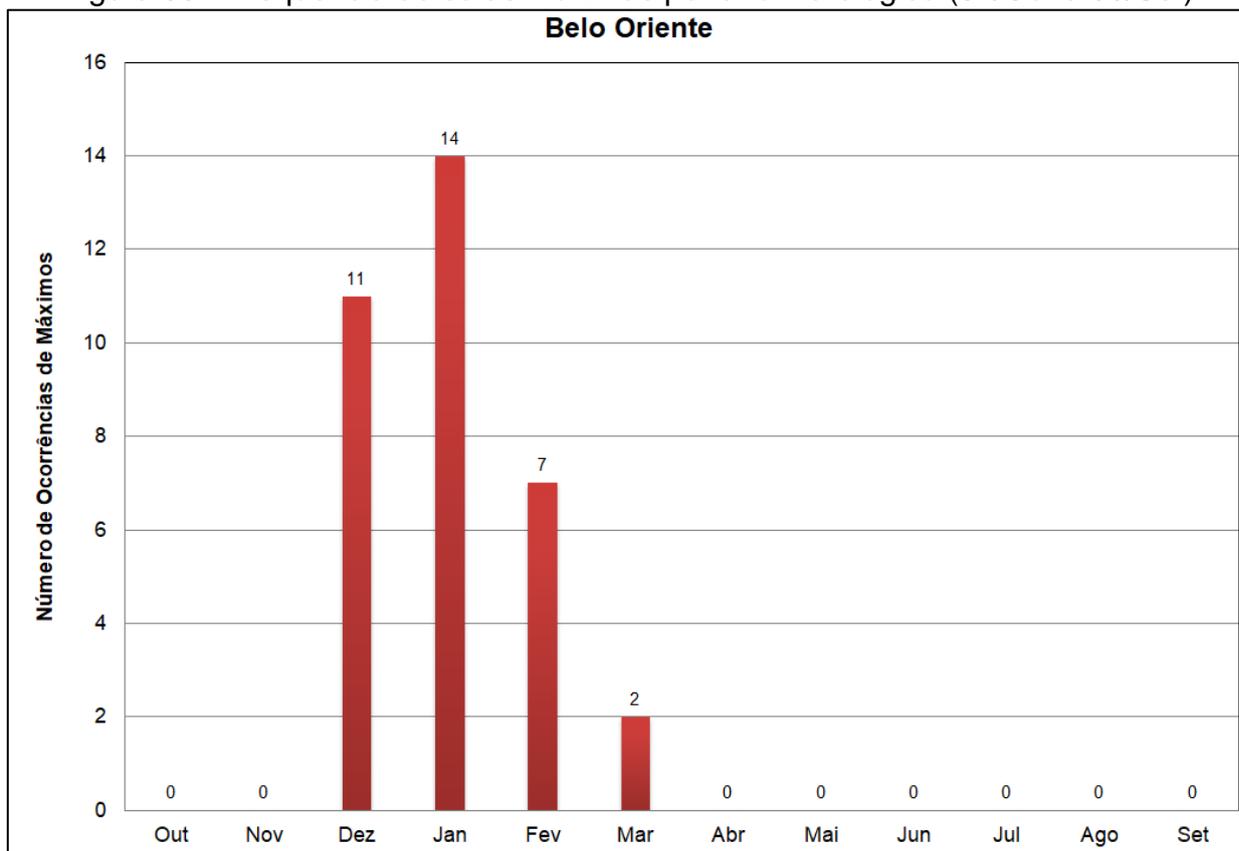
Tais características mencionadas criam dificuldades à extrapolação do ramo superior da curva chave e ampliam a incerteza na estimativa das vazões a partir das cotas superiores a 717 cm. Todavia, é necessário mencionar que as medições de vazões em cotas altas envolvem riscos à segurança dos técnicos que podem inviabilizar a realização do trabalho e, além disso, a frequência de ocorrência de grandes cheias pode ser baixa.

Figura 04 – Perfil da seção transversal do Rio Doce da seção de régua de Belo Oriente



Fonte: Elaborada pelos autores.

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



Fonte: Elaborada pelos autores

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 realizadas 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 Belo Oriente, código 56719998, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) apresentadas no Anexo III.

A série de vazões apresentou um valor atípico superior (outlier) quando avaliada pelo teste de Grubbs e Beck, optou-se por não retirá-lo da série. As hipóteses nulas de independência e estacionariedade foram aceitas para o nível de significância de 5%. O teste de homogeneidade não foi aplicado, pois a série de vazões é curta. 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 aceita no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) para o nível de significância de 5%. A distribuição Log-Pearson Tipo III apresentou o menor desvio padrão dos resíduos entre a distribuição empírica e a teórica dentre as distribuições. 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 (7,31972)

σ_{lnX} é o parâmetro de escala (0,37880)

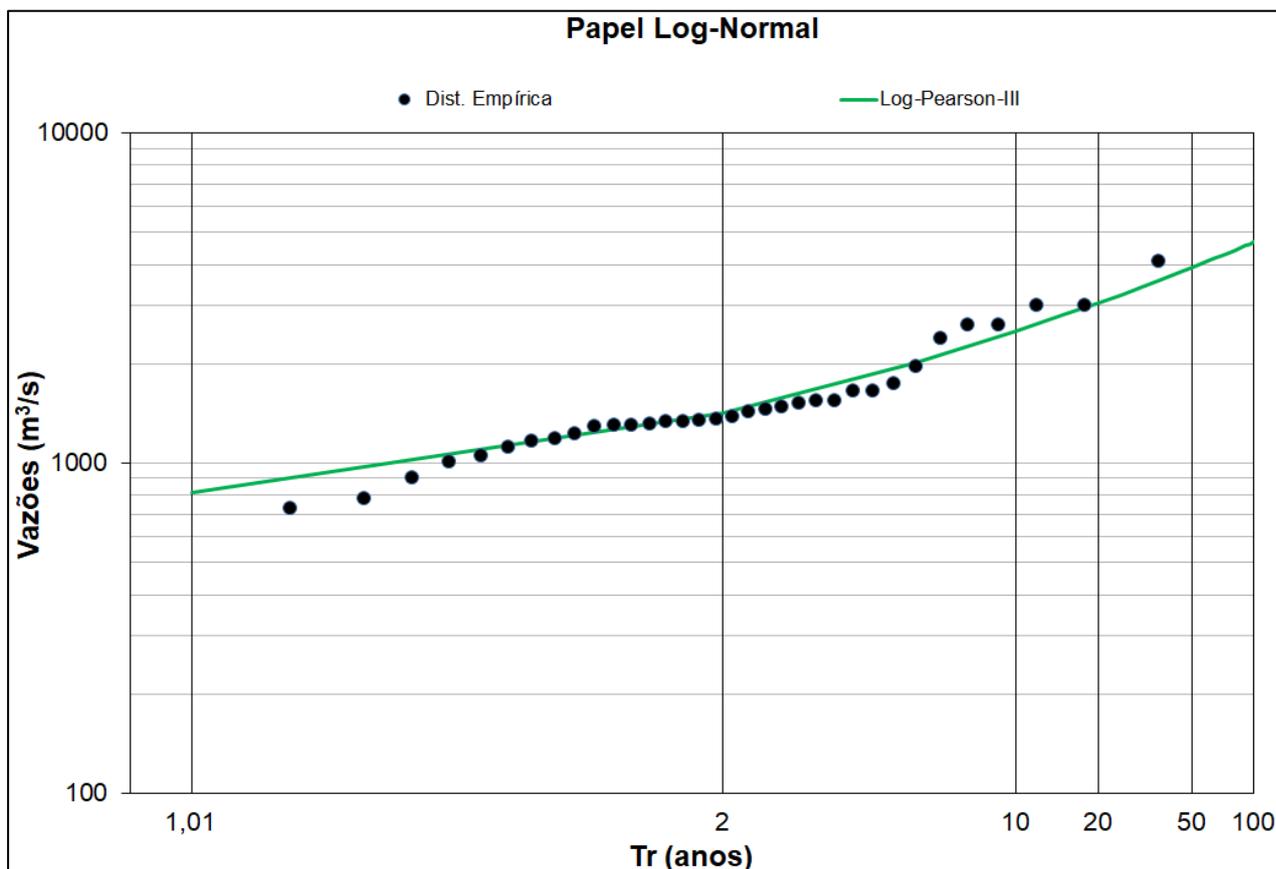
γ_{lnX} é o parâmetro de forma (0,95189)

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

$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$ (4,41454) e

$\beta = \left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right|$ (0,18029)

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 m³/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) | 1423 | 2016 | 2508 | 2824 | 3064 | 3259 | 3425 | 3699 | 3623 | 4114 | 4358 | 4565 | 4688 |

Fonte: Elaborada pelos autores

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

a) Em janeiro de 1997 o rio Doce em Belo Oriente, código 56719998, alcançou a cota de 868,8. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resp: *Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 868,8 cm com a curva-chave válida para jan/1997 utilizando a equação AIII-01(Anexo III). Vale destacar que após o rebaixamento do zero da régua em 01/07/2015, este nível corresponderia a 968,8 cm nas régua da seção fluviométrica, 100 cm a mais na referência atual.*

Para a cota 868,8 cm em jan/1997, aceitando-se a extrapolação da curva-chave disponível, os parâmetros são $a = 123,882$, $h_0 = -0,31$ m e $n = 1,597$ (Anexo III). Dessa forma temos:

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

$$Q(868,8 \text{ cm}) = 123,882 \left(\frac{868,8}{100} + 0,31 \right)^{1,597}$$

$$Q(868,8 \text{ cm}) = 4138 \text{ m}^3/\text{s}$$

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, $\mu_{\ln X} = 7,31972$ é o parâmetro de posição, $\sigma_{\ln X} = 0,37880$ e o parâmetro de escala e $\gamma_{\ln X} = 0,95189$ é o parâmetro de forma da Log-Pearson Tipo III e $G()$ é a FAP da distribuição Gama com parâmetros $\alpha = \frac{4}{\gamma^2} = 4,41454$ e $\beta = \left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right| = 0,18029$. No EXCEL pode ser utilizada a função `DIST.GAMA(x, alfa, beta, cumulativo)`.

Substituindo os valores na equação 03 temos:

$$T = \frac{1}{1 - G\left(\ln(4138) - 7,31972 + \frac{2,0,37880}{0,95189}; 4,41454; 0,18029\right)} = 61,35 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 61,35 anos corresponde a probabilidade de 1,63% da vazão de 4.138 m³/s associada a cota 868,8 cm ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 4138 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{61,35} 100 = 1,63 \%$$

b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de alerta em Belo Oriente, código 56719998?

Resp: A cota de alerta em Belo Oriente, código 56719998, é 860 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 3307 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 860 cm é de 26,38 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 3,79%.

c) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de inundação em Belo Oriente, código 56719998?

Resp: A cota de inundação em Belo Oriente, código 56719998 é 900 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 3573 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 900 cm é de 35,11 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 2,85%.

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.

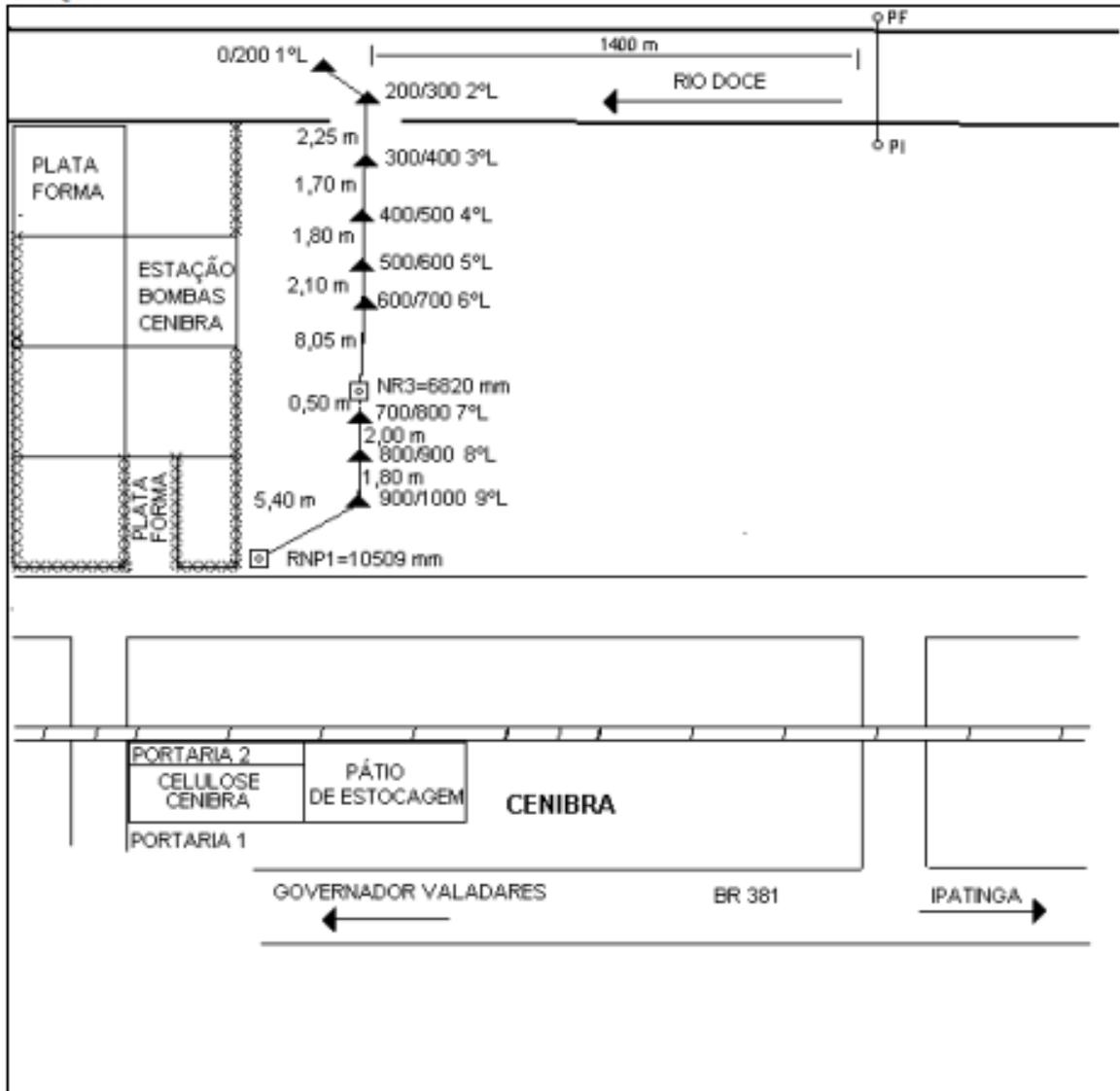
ANEXO I
Ficha Descritiva
Estação Fluviométrica de Belo Oriente, código 56719998

| ESTAÇÃO: BELO ORIENTE | | TIPO: FRDT | CÓDIGO: 56719998 | | |
|---|---------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| REGIÃO HIDROGRÁFICA: Atlântico Leste | | BACIA: Atlântico, Trecho Leste | | | |
| RIO: 56001000 - RIO DOCE | | UF: MG | MUNICÍPIO: Belo Oriente | | |
| ENTIDADE COORDENADORA: ANA | | ENTIDADE OPERADORA: CPRM/BH | | | |
| ÁREA DE DRENAGEM (Km²): 24.245 | | DRENAGEM GERAL: Oc. Atlântico | | | |
| LAT.: -19°16'47.00" LONG. -42°33'17.00" | | INST.: GPS GARMIN ETREX LEGEND | | DATUM: WGS-84 | |
| ALT.(m): 211 m | | INST.: Carta topográfica | DATUM: SAD-69 | REF. CART.: SE-23-Z-D-III | |
| FOLHA: Dom Cavati | | ESCALA: 1:100.000 | | ANO: 1980 | |
| ESTAÇÃO | TIPO | DATA DA INSTALAÇÃO | DATA DA EXTINÇÃO | ENTIDADE | |
| FLUVIOMÉTRICA | F | 16.10.86 | | CPRM | |
| FLUVIOGRÁFICA | FR | | | | |
| SEDIMENTOMÉTRICA | S | | | | |
| QUALIDADE DAS ÁGUAS | Q | 07.88 | | CPRM | |
| ESTAÇÃO TELEMÉTRICA: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não DATA DA INSTALAÇÃO: | | | | | |
| LOCALIZAÇÃO: Ao lado da área da casa de bombas de Cenibra. | | | | | |
| ACESSIBILIDADE: Partindo de Ipatinga para Governador Valadares percorrer cerca de 6 km depois do trevo de Santana do Paraiso e entrar a direita na placa "M. Rio Doce". Percorrer cerca de 0,3 km e atravessar a linha do trem (CVRD), entrando a esquerda mais 3,1 km até a seção de régua. | | | | | |
| DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO (RÉGUAS, LANCES, RRNN, SM, SR, PI, PF, etc.) | | | | | |
| MARGEM: esquerda | | | | | |
| RÉGUAS: 8 lances com 9 régua de alumínio fixadas em estacas suporte | | | | | |
| 1º LANCE: 0/200 cm | | 9º LANCE: 900/1000 cm | | | |
| 2º LANCE: 200/300 cm | | | | | |
| 3º LANCE: 300/400 cm | | | | | |
| 4º LANCE: 400/500 cm | | | | | |
| 5º LANCE: 500/600 cm | | | | | |
| 6º LANCE: 600/700 cm | | | | | |
| 7º LANCE: 700/800 cm | | | | | |
| 8º LANCE: 800/900 cm | | | | | |
| RRNN: RNP1= 10509 mm Parafuso de ferro chumbado em base de concreto | | | | | |
| RN4= 6814 mm calota de alumínio chumbada em base de concreto | | | | | |
| SEÇÃO MEDIDORA única, situada a 1.400 m a montante das escalas | | | | | |
| PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA: 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 GPRS | 8566.2749 | | CPRM | sim | 18/10/2013 |
| PCD-HOBECO GOES | | | ANA-025831 | sim | |

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES:

| | | | | | |
|--|--|---|--|--|---|
| <p>POTAMOGRAFIA: Rio Doce - Nasce na serra da 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, rio Matipó, rio Cuiete, Manhuaçu. Guandu. Deságua no Oc. Atlântico-ES. Area da Bacia hidrográfica: 84.700 km</p> | | | | | |
| <p>POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE: MONTANTE: CACHOEIRA DOS ÓCULOS MONT. JUSANTE: GOVERNADOR VALADARES</p> | | | | | |
| <p>CARACTERÍSTICA DO TRECHO:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> <p>Regime:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente</p> <p><input type="radio"/> Efêmero</p> </td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> <p>Conformação:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado</p> <p><input type="radio"/> Curvo <input type="radio"/> Meandrante</p> </td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 33%;"> <p>Leito</p> <p><input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular</p> </td> </tr> </table> | | | <p>Regime:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente</p> <p><input type="radio"/> Efêmero</p> | <p>Conformação:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado</p> <p><input type="radio"/> Curvo <input type="radio"/> Meandrante</p> | <p>Leito</p> <p><input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular</p> |
| <p>Regime:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Perene <input type="radio"/> Intermitente</p> <p><input type="radio"/> Efêmero</p> | <p>Conformação:</p> <p><input checked="" type="radio"/> Retilíneo <input type="radio"/> Anastomosado</p> <p><input type="radio"/> Curvo <input type="radio"/> Meandrante</p> | <p>Leito</p> <p><input checked="" type="radio"/> Regular <input type="radio"/> Irregular</p> | | | |
| <p>NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"> <p>NATUREZA:</p> <p>ME: Arenosa com vegetação rasteira</p> <p>MD: Arenosa com vegetação de médio porte</p> </td> <td style="width: 50%;"> <p>INCLINAÇÃO:</p> <p>ME: Média</p> <p>MD: Média</p> </td> </tr> </table> | | | <p>NATUREZA:</p> <p>ME: Arenosa com vegetação rasteira</p> <p>MD: Arenosa com vegetação de médio porte</p> | <p>INCLINAÇÃO:</p> <p>ME: Média</p> <p>MD: Média</p> | |
| <p>NATUREZA:</p> <p>ME: Arenosa com vegetação rasteira</p> <p>MD: Arenosa com vegetação de médio porte</p> | <p>INCLINAÇÃO:</p> <p>ME: Média</p> <p>MD: Média</p> | | | | |
| <p>NATUREZA DO LEITO: Arenoso</p> | | | | | |
| <p>CONTROLE: Cachoeira LOCALIZAÇÃO: Jusante DISTÂNCIA (m): 3000 m</p> | | | | | |
| <p>COTA DE TRANSBORDAMENTO (cm): 550 cm <input checked="" type="checkbox"/> MARGEM DIREITA <input type="checkbox"/> MARGEM ESQUERDA</p> | | | | | |
| <p>OBSERVADOR:</p> <p>NOME: _____ PROFISSÃO: _____</p> <p>GRAU DE INSTRUÇÃO: _____</p> <p>ENDEREÇO: _____ FONE: _____</p> <p>BAIRRO: _____ CEP: _____</p> <p>CIDADE: _____ ESTADO: _____</p> <p>DISTÂNCIA DA RESIDÊNCIA ATÉ A ESTAÇÃO (m): _____</p> <p>MEIO DE COMUNICAÇÃO MAIS PRÓXIMO DA CASA DO OBSERVADOR: Telefone _____</p> <p>DISTÂNCIA DA CASA DO OBSERVADOR (m): _____</p> <p>OBSERVAÇÃO:</p> <p>NA AUSÊNCIA DO OBSERVADOR PROCURAR PO</p> <p>NOME: _____</p> <p>ENDEREÇO: _____ FONE: _____</p> <p>BAIRRO: _____ CEP: _____</p> <p>CIDADE: _____ ESTADO: _____</p> | | | | | |
| <p>OBSERVAÇÕES:</p> <p>A partir de 15/09/2015 foi alterado o nome da estação de Cenibra para Belo Horizonte por determinação da ANA. Equipamento CAMPBELL: Plataforma automática de coleta de dados, composta por barômetro, modem GPRS, sensor de pressão, pluviômetro, antena e painel solar. PCD-HOBECO: Plataforma automática de coleta de dados, composta por barômetro, modem GPRS, sensor de pressão, pluviômetro, antena e painel solar.</p> | | | | | |

CROQUI:



ANEXO II
Distribuições Candidatas

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

- Função Densidade de Probabilidade

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

α = Parâmetro de escala β = 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

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

$$\hat{\beta} = \frac{l_1}{\gamma_E \hat{\alpha}}$$

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:

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

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
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 | 1986 | 1987 | 13/03/1987 | - | 346 | 1061 | */Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 2 | 1987 | 1988 | 14/02/1988 | - | 413 | 1358 | */Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 3 | 1989 | 1990 | 23/12/1989 | - | 431 | 1443 | M/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 4 | 1990 | 1991 | 20/01/1991 | 07:00 | 495 | 1756 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 5 | 1991 | 1992 | 26/01/1992 | 07:00 | 535 | 1974 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 6 | 1992 | 1993 | 14/12/1992 | 17:00 | 478 | 1671 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 7 | 1993 | 1994 | 07/01/1994 | 07:00 | 373 | 1178 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 8 | 1994 | 1995 | 26/12/1994 | 07:00 | 410 | 1345 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 9 | 1995 | 1996 | 28/12/1995 | 17:00 | 456 | 1563 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 10 | 1996 | 1997 | jan/97 | - | 868,8 | 4138 | Nivelamento da marca de cheia/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 11 | 1997 | 1998 | 19/12/1997 | 07:00 | 404 | 1317 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 12 | 1998 | 1999 | 05/01/1999 | 17:00 | 310 | 913 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 13 | 1999 | 2000 | 09/02/2000 | 17:00 | 402 | 1308 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 14 | 2000 | 2001 | 05/01/2001 | 07:00 | 383 | 1198 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 15 | 2001 | 2002 | 19/02/2002 | 17:00 | 445 | 1497 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 16 | 2002 | 2003 | 18/01/2003 | 07:00 | 612 | 2419 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 17 | 2003 | 2004 | 14/01/2004 | 07:00 | 457 | 1557 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 18 | 2004 | 2005 | 06/03/2005 | 17:00 | 649 | 2646 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 19 | 2005 | 2006 | 15/12/2005 | 07:00 | 440 | 1472 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 20 | 2006 | 2007 | 13/01/2007 | 07:00 | 416 | 1354 | 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 | 2007 | 2008 | 01/02/2008 | 17:00 | 368 | 1129 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 22 | 2008 | 2009 | 20/12/2008 | 07:00 | 650 | 2652 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 23 | 2009 | 2010 | 02/01/2010 | 17:00 | 426 | 1402 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 24 | 2010 | 2011 | 30/12/2010 | 17:00 | 478 | 1666 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 25 | 2011 | 2012 | 06/01/2012 | 07:00 | 711 | 3041 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 26 | 2012 | 2013 | 02/02/2013 | 07:00 | 344 | 1023 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 27 | 2013 | 2014 | 24/12/2013 | 07:00 | 404 | 1317 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 28 | 2014 | 2015 | 01/12/2014 | 07:00 | 265 | 739 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 29 | 2015 | 2016 | 19/01/2016 | 07:00 | 490# | 1239 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 30 | 2016 | 2017 | 17/12/2016 | 07:00 | 520# | 1374 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 31 | 2017 | 2018 | 07/02/2018 | 17:00 | 510# | 1327 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 32 | 2018 | 2019 | 01/01/2019 | 07:00 | 380# | 791 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 33 | 2019 | 2020 | 27/01/2020 | 07:00 | 818# | 3036 | DL/Vazão gerada a partir da curva-chave |
| 34 | 2020 | 2021 | 21/02/2021 | 07:00 | 552# | 1529 | 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

- Cotas acrescidas de 100 cm devido à mudança no zero das réguas a partir de 01/07/2015

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-chave 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 | 01/10/1986 a 13/03/2000 | 127,515 | -0,44 | 1,557 | 30 | 499 |
| Ramo 2 | | 123,882 | -0,31 | 1,597 | 499 | 870 |
| Ramo 1 | 14/03/2000 a 10/11/2013 | 114,949 | -0,43 | 1,493 | 40 | 118 |
| Ramo 2 | | 123,882 | -0,31 | 1,597 | 118 | 750 |
| Ramo 1 | 11/11/2013 a 30/06/2015 | 96,531 | -0,64 | 1,718 | 10 | 196 |
| Ramo 2 | | 127,515 | -0,44 | 1,557 | 196 | 400 |
| Ramo 1 | 01/07/2015 a 19/04/2019 | 96,394 | 0,25 | 1,647 | 40 | 296 |
| Ramo 2 | | 127,515 | 0,54 | 1,544 | 296 | 500 |
| Ramo 3 | | 123,712 | 0,62 | 1,582 | 500 | 950 |
| Ramo 1 | 20/04/2019 a 31/12/2021 | 99,892 | 0,25 | 1,612 | 40 | 296 |
| Ramo 2 | | 127,319 | 0,54 | 1,544 | 296 | 500 |
| Ramo 3 | | 123,712 | 0,62 | 1,582 | 500 | 950 |

ANEXO III

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 |
|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------|------------------------------|
| 1630,3 | 726,8 | 4137,9 | 738,6 | 3399,3 | 1,8 | 1388,1 |

| 1º Quartil m ³ /s | 3º Quartil m ³ /s | AIQ m ³ /s |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1255,9175 | 1669,7050 | 413,7875 |

Estatísticas da série transformada: Ln (X)

| Média | Desvio-Padrão | Máximo | Mínimo | Amplitude | Assimetria | Mediana |
|---------|---------------|---------|---------|-----------|------------|---------|
| 7,31972 | 0,38106 | 8,32794 | 6,60480 | 1,72314 | 0,72839 | 7,23564 |

| 1º Quartil | 3º Quartil | AIQ |
|------------|------------|---------|
| 7,13534 | 7,42040 | 0,28506 |

Momentos-L e Razões-L

| l_1 | l_2 | L-CV | L-SKEW | L-KURT |
|-----------|----------|--------|--------|--------|
| 1630,2744 | 362,2200 | 0,2222 | 0,3594 | 0,2963 |

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 ($\mu, \sigma, \gamma, \alpha, \beta$) | 7,31972 | 0,37880 | 0,95189 | 4,414538 | 0,180288 |



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