



REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

**ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MÁXIMAS E A
DEFINIÇÃO DAS COTAS PARA INSTALAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS AUTOMÁTICOS NA
REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL DE REFERÊNCIA (RHNR)**

**Rio: Piranhas-Açu
Estação Fluviométrica: Sítio Vassouras
Código: 37410000
Município: Pombal-PB**

**Recife
2025**

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL

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 MÁXIMAS E A DEFINIÇÃO
DAS COTAS PARA INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS
AUTOMÁTICOS NA REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL DE
REFERÊNCIA (RHNR)

Rio: Piranhas-Açu

Estação Fluviométrica: Sítio Vassouras

Código: 37410000

Município: Pombal-PB

Múcio Valença Virões

Eber José de Andrade Pinto



Recife

2025

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Alexandre Silveira de Oliveira

SECRETARIA NACIONAL DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Ana Paula Bitencourt

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Francisco Valdir Silveira (interino)

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Francisco Valdir Silveira

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Alice Silva de Castilho (interina)

Diretor de Administração e Finanças

Alice Silva de Castilho (interina)

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Hidrologia

Andrea de Oliveira Germano

Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada

Emanuel Duarte Silva

Achiles Monteiro (*in memoriam*)

Chefe do Departamento de Gestão Territorial

Diogo Rodrigues Andrade da Silva

Chefe da Divisão de Geologia Aplicada

Tiago Antonelli

Coordenação Executiva do DEHID - Projeto Regionalização de Vazões

Eber José de Andrade Pinto

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE RECIFE

Superintendente

Hortência Maria Barboza de Assis

Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial

Robson de Carlo da Silva

Gerente de Geologia e Recursos Minerais

Felipe José da Cruz Lima

Gerente de Infraestrutura Geocientífica

Douglas Silva Luna

Gerente de Administração e Finanças

Omar Jose Evangelista de Barros

REALIZAÇÃO

Superintendência de Recife

AUTORES

Múcio Valença Virões

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

Paula Krsthina Cordeiro Freire – REFO

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MAPA

Janaína Marise França de Araújo –SUREG/RE

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Nelma Fabrícia da P. Ribeiro Botelho – SUREG/RE

Ficha Catalográfica
Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

V813p Virões, Múcio Valença.

Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: análise de frequência de vazões máximas e a definição das cotas para instalação de equipamentos automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR): rio: Piranhas-Açu, estação fluviométrica: Sítio Vassouras, código: 37410000, município: Pombal-PB / Múcio Valença Virões, Eber José de Andrade Pinto. – Recife: Serviço Geológico do Brasil, 2025.

1 recurso eletrônico : PDF; il. color; 3.260 kbytes.

Programa Gestão de Riscos e de Desastres.

Ação levantamentos, estudos, previsão e alerta de eventos hidrológicos críticos.

ISBN 978-65-5664-669-5

1. Hidrologia. 2. Vazões naturais. 3. Bacias hidrográficas. I. Pinto, Eber José de Andrade. II. Título.

CDD 551.48

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Nelma Botelho CRB-4 2341

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – SGB

Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - SGB

www.sgb.gov.br

<https://rigeo.sgb.gov.br>

seus@sgb.gov.br

APRESENTAÇÃO

O projeto Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras é uma iniciativa dentro do programa de Gestão de Riscos e Resposta a 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 igualda 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 e a recomendação de cotas (níveis) para instalação de equipamentos automáticos no rio Piranhas-Açu especificamente na estação fluviométrica Sítio Vassouras, código 37410000. Esta estação fluviométrica faz parte Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) e constitui um ponto de acompanhamento das vazões e cotas nesta região, no Estado da Paraíba.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	06
2 METODOLOGIA	11
2.1 Análise de Frequência Local	11
2.2 Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência	13
3 RESULTADOS	17
3.1 Análise de Frequência Local	17
3.2 Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência	18
4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	21
REFERÊNCIAS	23
ANEXO I – Ficha Descritiva da Estação Fluviométrica.....	25
ANEXO II – Distribuições de Gumbel e Log-normal.....	29
ANEXO III – Dados utilizados, curva chave e as estatísticas.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização das estações fluviométricas da RHNR.	07
Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Sítio Vassouras.	08
Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Sítio Vassouras...	10
Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica.	17
Figura 05 – Cota mínima de instalação de equipamentos.	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Objetivos Gerais da RHNR.	13
Tabela 02 – Riscos Hidrológicos.	15
Tabela 03 – Probabilidade de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil.	15
Tabela 04 – Critérios para instalação dos equipamentos da RHNR.	16
Tabela 05 – Tempo de Retorno (V azões em m^3/s).	18
Tabela 06 – Cotas para instalação dos equipamentos da estação fluviométrica...	19

1 INTRODUÇÃO

O estudo das águas superficiais é fundamental para adequada gestão dos recursos hídricos. Para que isto ocorra se faz necessário a implantação de uma rede de monitoramento hidrológico que seja eficiente e capaz de fornecer informações necessárias aos usos múltiplos das águas fluviais.

Conforme Maranhão e Pereira (2017), as primeiras iniciativas institucionais do estabelecimento da Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN, início do século XX, ocorrem através do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalando as primeiras estações no Brasil. Em 1934 o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) estende a atuação hidrológica pelo país. Em 1960 é criado o Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAE) que recebe, entre suas atribuições, as atividades de hidrologia nacional. Porém em 1969, com novas competências relacionadas ao setor elétrico, passa a se chamar Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Também neste ano surge a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), através do Decreto-Lei nº 764, de 15 de agosto de 1969, absorvendo a atividade de manutenção e operação da RHN sob responsabilidade do DNAEE. Em 28 de dezembro de 1994, pela Lei nº 8.970, a CPRM passa a ser uma empresa pública, com funções de Serviço Geológico do Brasil (SGB).

Assim nasce a parceria entre a Agência Nacional de Águas (ANA), criada através da Lei nº 9.984/2000, art.4, inciso 13, e o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), principal parceiro no planejamento, gerenciamento e operação da RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional, através do Acordo de Cooperação Técnica – ACT nº 003/2014, com o intuito de revitalizar a capacitação técnica dos profissionais envolvidos e revisar a rede de monitoramento existente no Brasil.

Em agosto de 2015, ANA e SGB/CPRM firmaram um Memorando de Entendimento com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, *United States Geological Survey*) dedicado à capacitação técnica dos seus profissionais. E a partir deste evento, foi definido pelos especialistas envolvidos a revisão da rede existente, construindo uma Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR para atender com excelência as demandas da gestão de recursos hídricos brasileira, promovendo dados confiáveis e representativos. Esta rede deverá atender os interesses da União a partir de 06 objetivos gerais: Transferência e compartilhamento Interestaduais e Internacionais, eventos hidrológicos críticos, balanços e disponibilidades hídricas, mudanças e tendências de longo prazo, qualidade da água e regulação dos recursos hídricos.

A localização das 33 estações fluviométricas que compunham a RHNR em 2022 sob a responsabilidade da Superintendência Regional do Recife (SUREG-RE) está apresentada na Figura 01.

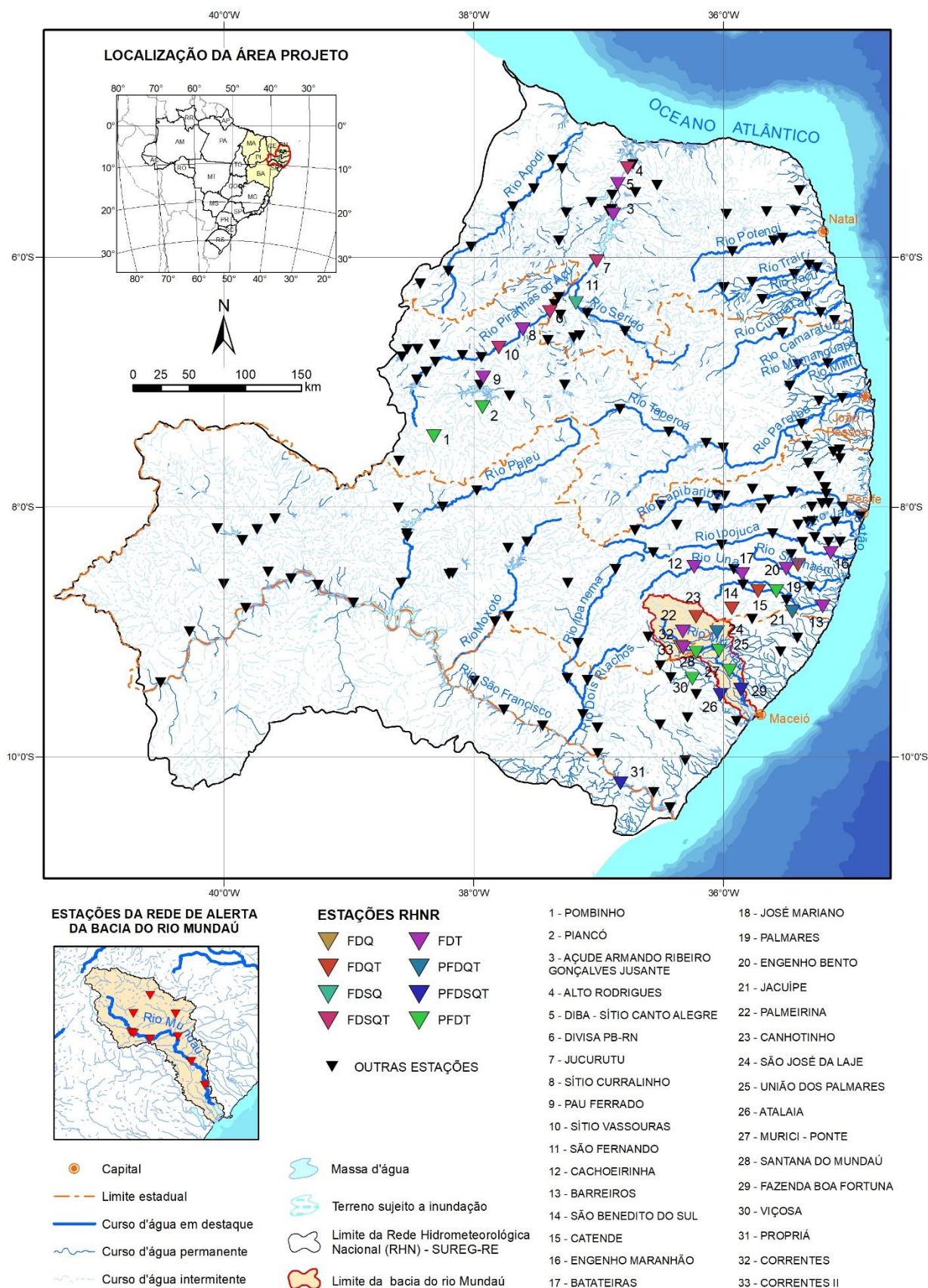


Figura 01 – Localização das estações fluviométricas da RHNR em 2022. Fonte: Elaborado pela equipe do projeto.

A estação de Sítio Vassouras, código 37410000, está localizada na Latitude 06°43'33"S e Longitude 37°47'51"O, no rio Piranhas-Açu, no município de Pombal-PB, e possui uma área de drenagem de 15.200 km². O rio Piranhas-Açu nasce no Município de Bonito de Santa Fé, Estado da Paraíba, nas proximidades da Serra da Mata Fresca, numa altitude aproximada de 600,0 m. Seus principais afluentes são os rios Piancó e Seridó, pela margem direita, e o rio Peixe, pela margem esquerda. A estação fluviométrica está instalada na margem esquerda do rio Piranhas-Açu, na ponte da rodovia BR-230, em local denominado Sítio Vassouras distante, 06 km de Pombal, e sua seção de medição está localizada na ponte para cotas altas, PI na margem esquerda e PF na margem direita, distanciados entre si em 190,00 m. A Figura 02 ilustra a localização da estação de Sítio Vassouras.

Desde maio de 1962 existem réguas linimétricas instaladas para realização de duas leituras diárias pelo observador dos níveis do rio Piranhas-Açu, as 07 e as 17 h.

Nesta estação, desde agosto de 2010, estão instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do rio Piranhas-Açu.

Ao longo do histórico da estação não houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, não foram acrescidos 100 cm ou outro valor as cotas da estação. Maiores detalhes sobre a estação podem ser encontrados na sua ficha descritiva que consta do Anexo 01.

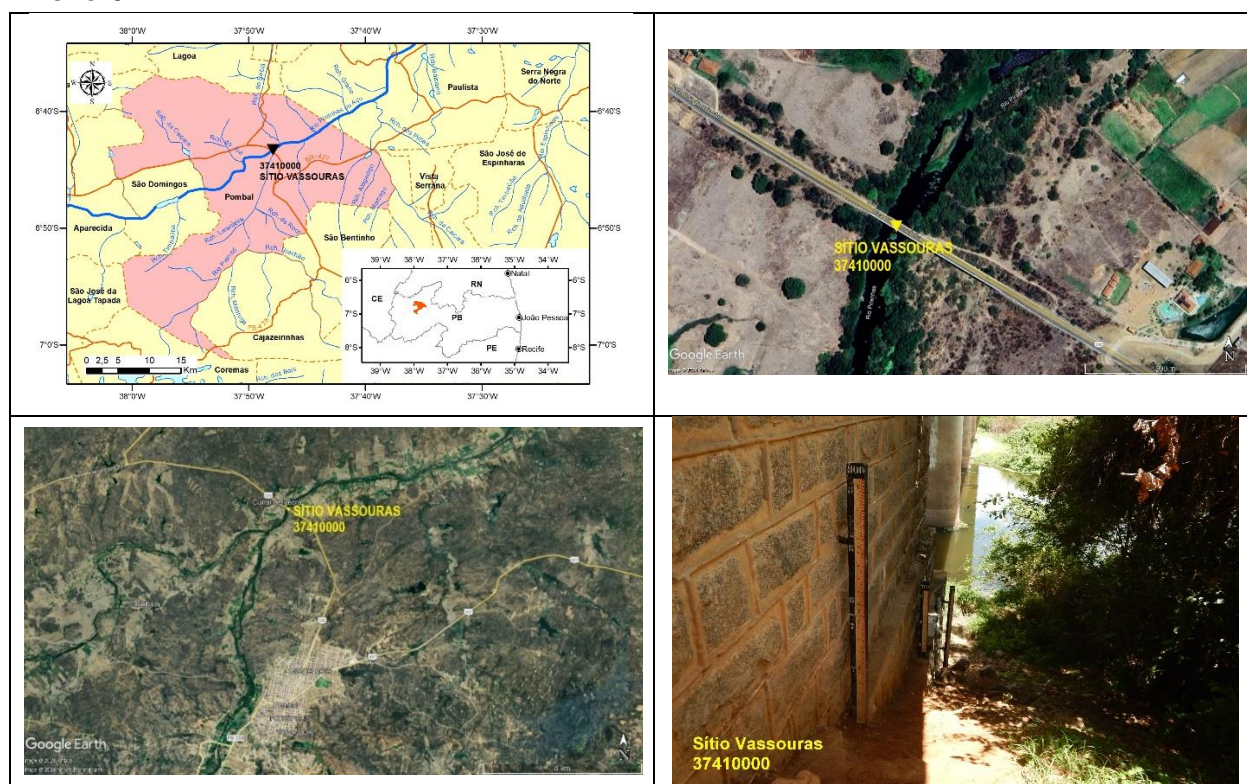


Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Sítio Vassouras. Fonte: Equipe do projeto, Google Earth (2024) e arquivo fotográfico do Projeto da RHN.

A Figura 03 apresenta o perfil da seção transversal na seção de réguas da estação. Esta figura apresenta as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre maio/1962 e agosto/2021 e a máxima cota observada (925 cm 11/04/1985).

A diferença entre a máxima cota observada nas réguas e a cota da vazão máxima medida (1636 m³/s na cota 827 cm) é de 98 cm. No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 45 valores máximos, sendo 05 destes superiores a 827 cm (cota da vazão máxima medida). A razão entre a cota máxima observada e a cota da medição da vazão máxima é 1,12 (925 cm / 827 cm). Segundo Tucci (2002), a melhor curva-chave, aquela com menor extrapolação do ramo superior, possui a razão entre as cotas máximas observadas e com medição de vazão inferior a 1,25. Na Figura 03 também se observa baixa densidade de medições de vazões no intervalo entre 700 e 1636 m³/s. A seção de medição está localizada na ponte junta à seção de réguas, como está apresentado na ficha descritiva da estação no Anexo I. A estação apresenta área de drenagem de 15.200 km².

As características mencionadas no parágrafo anterior criam dificuldades a extrapolação do ramo superior da curva-chave e ampliam a incerteza na estimativa das vazões a partir das cotas superiores a 827 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.

A não alteração da cota do zero da régua, a ausência de mudanças significativas na geometria do trecho onde está instalada a estação fluviométrica, associada às incertezas da estimativa das vazões em cotas altas citadas anteriormente e, também, ao fato de 11,1% da série de cotas máximas por ano hidrológico estar no ramo extrapolado da curva-chave, sugere que o estudo poderia ser realizado através da análise da frequência de cotas.

Entretanto, a análise através da frequência de vazões foi considerada a melhor opção devido à manutenção desse estudo, pois as estações da RHNR podem sofrer deslocamentos para uma outra posição posteriormente. A reinstalação de réguas em outra seção, afastada do original, pode modificar a relação entre cota e vazão no ramo superior, afetando a análise de frequência de cotas máximas.

No entanto é importante frisar que tais modificações não afetarão a análise de frequência de vazões deste estudo, se estas alterações não gerarem significativos incrementos ou decréscimos na área de drenagem da estação associadas a grandes variações de vazões para um mesmo evento hidrológico, ou ainda outras modificações impactantes nas condições hidrológicas atual da estação. Nestes casos de modificações significativas se tratará de uma nova estação, o que demandará uma nova série histórica para um novo estudo de análise de frequência de máximas.

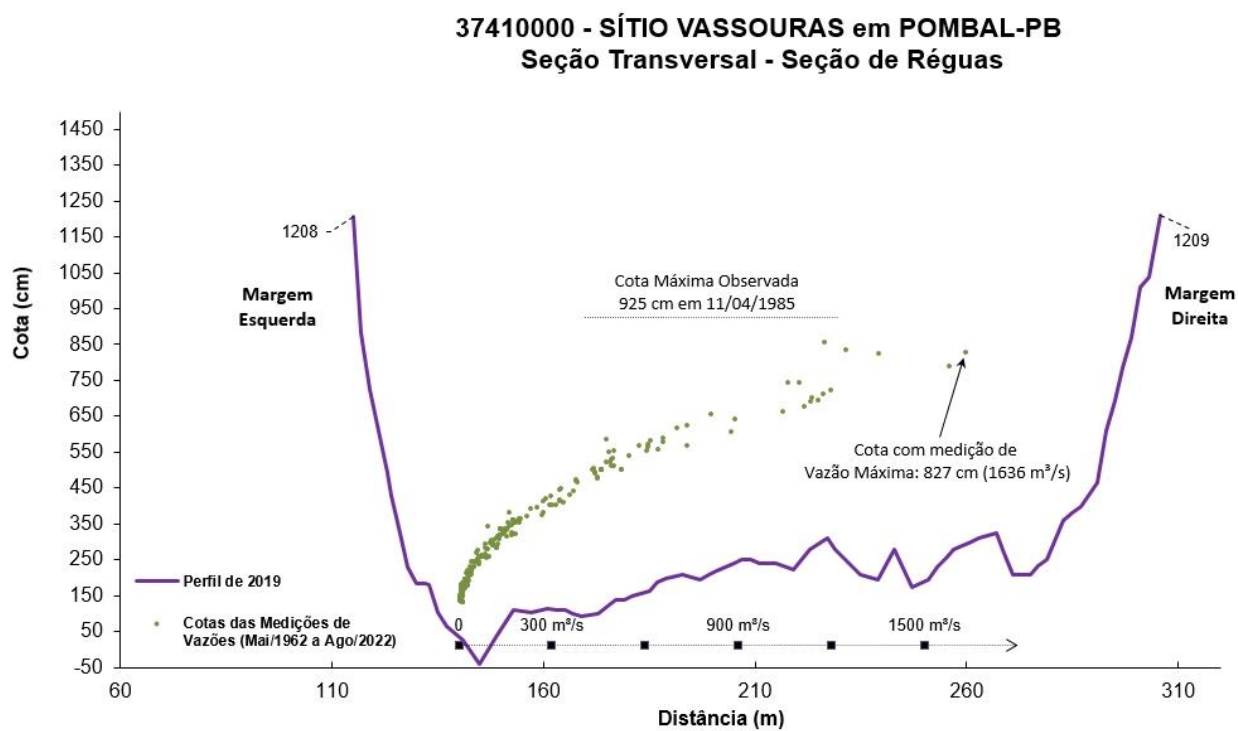


Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Sítio Vassouras. Fonte: Elaborado pelos autores.

2 METODOLOGIA

2.1 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-chaves; verificar a continuidades 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. Nos estudos de análise de frequência local de máximos por ano hidrológico do projeto de Regionalização são adotadas as distribuições candidatas de 02 parâmetros conforme recomendação de Hosking e Wallis (1997). As distribuições candidatas são as distribuições de Gumbel e Log-Normal.

- 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.

2.2 Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência

Segundo o relatório Maranhão e Pereira (2017), a implantação da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) buscará atender os interesses da União agrupados em 6 (seis) objetivos gerais. A Tabela 01 apresenta estes objetivos.

Tabela 01 – Objetivos Gerais da RHNR.

Nº	Objetivos Gerais
1	Transferências e Compartilhamentos Interestaduais e Internacionais
2	Eventos Hidrológicos Críticos
3	Balanços e disponibilidades hídricas
4	Mudanças e tendências de longo prazo
5	Qualidade da água
6	Regulação dos Recursos Hídricos

Fonte: Elaborado pelos autores.

A locação e instalação de uma estação fluviométrica que comporá uma rede deverá atender vários critérios como os descritos em Maranhão e Pereira (2017), World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010), ANA e SGB (2021), Kenney (2010) e Rantz *et al.* (1982). Em relação a instalação de equipamentos automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) o relatório da Maranhão e Pereira (2017), apresenta os seguintes critérios em relação ao posicionamento dos equipamentos:

Página 27 do arquivo PDF

“...A cota máxima é importante para a posição ideal da PCD, das referências de níveis - RNs e das quantidades de lances de réguas a serem instaladas na futura estação. ...”

Página 33 do arquivo PDF

“...73. Sobre o abrigo da PCD.

Deve estar localizada acima do nível de cheia; ...”

Além de Maranhão e Pereira (2017), destacam-se World Meteorological Organization (2010) e Sauer e Turnipseed (2010) como referências que tratam sobre este tema de locação de estação fluviométrica e posicionamento de equipamentos.

World Meteorological Organization (2010) sugere os seguintes critérios para posicionamento de equipamentos em uma estação fluviométrica: “...

- **Os instrumentos, abrigo e outra edificação devem estar acima de todos os níveis de inundação registrados. Sensores de nível devem permitir tanto a medição de inundações como de secas. ...**

Em relação aos níveis altos da água (cotas altas), World Meteorological Organization (2010), além do item acima, também afirma que “...devem ser pesquisadas as marcas de cheia de grandes enchentes do passado, bem como indagado aos moradores locais sobre os níveis de enchentes históricas. Essas informações deverão ser utilizadas pelo engenheiro para tomar uma decisão sobre a elevação na qual o

registrador de níveis (cotas) deve ser instalado para ficar acima de quaisquer enchentes que provavelmente ocorrerão no futuro. O abrigo do registrador deve ser instalado de forma a ser protegido de detritos transportados durante grandes enchentes. Também devem ser pesquisadas evidências sobre grandes mudanças no curso d'água, incluindo erosão e deposição nas margens que ocorreram durante enchentes notáveis do passado. Essas evidências, se encontradas, dão alguma indicação de mudanças que podem ser esperadas na ocorrência de grandes enchentes do futuro..." (Tradução livre).

Sauer e Turnipseed (2010) sugerem vários critérios para a escolha do local de instalação uma nova estação fluviométrica que fará parte da *USGS National Streamflow Information System (NSIP)*. Em relação ao posicionamento de equipamentos faz as seguintes menções: "...

- O poço tranquilizador, por exemplo o tubulão do linígrafo (se usado), e o abrigo do instrumento registrador dos níveis dá água (cotas) podem estar localizados em uma margem do curso d'água, ponte, represa ou outra estrutura adequada, desde que os outros critérios de seleção do local sejam atendidos. **Não instale a estrutura que abrigará os equipamentos registradores de nível (cota) onde ela possa sofrer danos durante enchentes.**
- ...
- **O abrigo de instrumentos deve ser instalado em uma cota alta o suficiente para estar acima do nível de inundação de 0,5% de excedência (200 anos), se possível. ...**

Analisando as recomendações de World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010) e Maranhão e Pereira (2017) fica claro a preocupação com o posicionamento dos equipamentos de forma a garantir a medição dos níveis (cotas) dos grandes eventos de cheias. Sauer e Turnipseed (2010) se diferenciam de World Meteorological Organization (2010) e Maranhão e Pereira (2017) ao definir que os equipamentos devem ser instalados, se possível, em uma cota alta o suficiente para estar acima do nível de inundação de 0,5% de excedência (200 anos), ou seja, um critério objetivo.

Ao se adotar um tempo de retorno, T , como referência na definição do nível mínimo para instalação dos equipamentos também se assume uma probabilidade de que pelo menos um evento igual ou superior a cheia de T anos possa ocorrer em n anos de vida útil. Essa probabilidade é o risco hidrológico, $R = 1 - [1 - (1/T)]^n$. No caso de uma estação fluviométrica, a vida útil é número de anos de operação. A Tabela 02 apresenta os riscos hidrológicos associados aos tempos de retorno de 100, 200 e 250 anos para diferentes vidas uteis.

Tabela 02 – Riscos Hidrológicos.

T (anos)	“Vida Útil “, n anos de operação da estação fluviométrica								
	20	30	50	69	100	138	173	200	250
100	18,2%	26,0%	39,5%	50,0%	63,4%	75,0%	82,4%	86,6%	91,9%
200	9,5%	14,0%	22,2%	29,2%	39,4%	49,9%	58,0%	63,3%	71,4%
250	7,7%	11,3%	18,2%	24,2%	33,0%	42,5%	50,0%	55,1%	63,3%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando o risco hidrológico supera 50%, a probabilidade de ocorrer pelo menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil é maior que a probabilidade de não ocorrer pelo menos uma vez tal evento. Observa-se na Tabela 02, que o risco hidrológico para eventos de 100 anos de tempo de retorno passa a ser superior a 50% quando a vida útil é maior que 69 anos. No caso de eventos de 200 anos de tempo de retorno, o risco hidrológico será maior que 50% quando a vida útil superar 138 anos e, 173 anos no caso de tempo de retorno de 250 anos.

De forma inversa, a Tabela 03 apresenta as probabilidades de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil.

Tabela 03 – Probabilidade de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil.

T (anos)	“Vida Útil “, n anos de operação da estação fluviométrica								
	20	30	50	69	100	138	173	200	250
100	81,8%	74,0%	60,5%	50,0%	36,6%	25,0%	17,6%	13,4%	8,1%
200	90,5%	86,0%	77,8%	70,8%	60,6%	50,1%	42,0%	36,7%	28,6%
250	92,3%	88,7%	81,8%	75,8%	67,0%	57,5%	50,0%	44,9%	36,7%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Baseando-se nas recomendações de World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010) e Maranhão e Pereira (2017), considerando os objetivos gerais da RHN, bem como, a ocorrência das grandes cheias no Brasil, como por exemplo as enchentes de 2010 no rio Mundaú e em maio de 2024 no Rio Grande do Sul e com o objetivo de garantir a medição dos níveis (cotas) dos grandes eventos de cheias que podem ocorrer no futuro, sugere-se os critérios apresentados na Tabela 04 para definição da cota mínima para instalação dos equipamentos da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR).

Tabela 04 – Critérios para instalação dos equipamentos da RHNR.

Objetivos gerais	CRITÉRIO – Considerando o objetivo da estação fluviométrica, instalar os equipamentos de registro de níveis na maior cota entre as opções.
Transferências e Compartilhamentos Interestaduais e Internacionais ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Eventos Hidrológicos Críticos ²	A cota associada a cheia de 250 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Balanços e disponibilidades hídricas ³	A cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Mudanças e tendências de longo prazo ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Qualidade da água ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Regulação dos Recursos Hídricos ³	A cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)

1-O registro de grandes cheias é importante para garantir o atendimento dos objetivos, bem como, preservar os equipamentos caros dos efeitos deletérios da passagem de uma enchente.

2-Os eventos críticos da bacia do rio Mundaú em 2010 e de maio de 2024 no Rio Grande do Sul ensinaram a importância de não se perder os equipamentos na passagem de eventos raros.

3-O atendimento dos objetivos não será significativamente prejudicado se houver a perda do registro da passagem de eventos de grandes cheias.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3 RESULTADOS

3.1 Análise de Frequência Local

A análise de frequência local das vazões do rio Piranhas-Açu em Sítio Vassouras, código 37410000, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez) apresentadas no Anexo III. A distribuição de frequência selecionada foi a Log-Normal, com os parâmetros calculados pelo método dos momentos-L e também apresentados no Anexo III. As duas distribuições candidatas não foram rejeitadas pelo teste de aderência. A distribuição Log-Normal foi selecionada por apresentar menor desvio padrão dos resíduos entre a distribuição empírica e a teórica. A Figura 04 apresenta o gráfico com as distribuições empírica e teórica ajustadas.

A inversa da distribuição Log-Normal é a calculada da seguinte forma:

$$x_T = EXP(\mu + \sigma \cdot Z_{(1-1/T)}) \quad (01)$$

Onde:

T é o tempo de retorno (anos)

x_T é o quantil associado a tempo de retorno, T

$Z_{(1-1/T)}$ é o valor da variável normal padrão associada a probabilidade $(1 - 1/T)$. Pode ser obtida em tabelas ou empregando métodos numéricos para inverter $\Phi(x)$ apresentada no Anexo II.

μ é o parâmetro de posição (5,9686)

σ é o parâmetro de escala (1,0427)

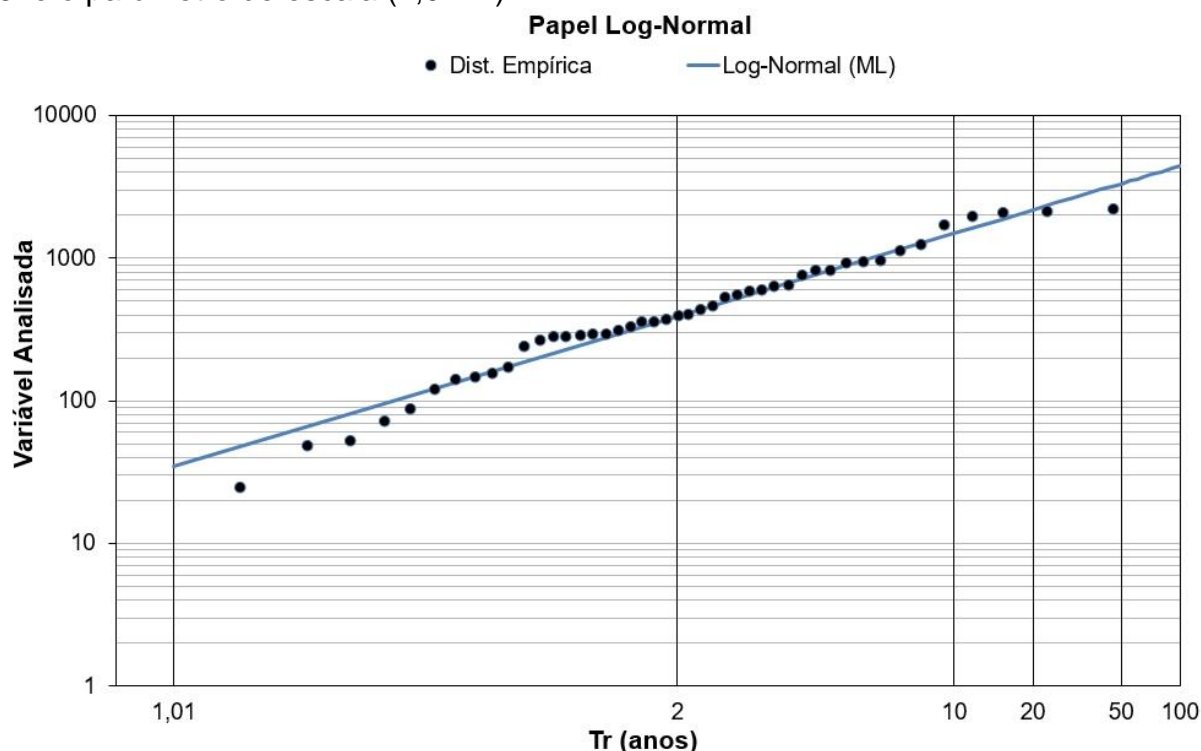


Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica. Fonte: Elaborado pelos autores.

A equação 01 permite o cálculo das vazões associadas a diferentes tempos de retorno. A Tabela 05 apresenta as vazões associadas a diferentes tempos de retorno.

Tabela 05 – Tempo de Retorno (Vazões em m³/s).

	Tempo de Retorno, T (anos)											
	10	15	20	25	30	50	75	90	100	150	200	250
Vazões (m³/s)	1488	1870	2173	2426	2646	3328	3943	4242	4422	5162	5736	6210

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2 Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência

Após o cálculo das vazões associadas a diferentes tempos de retorno é possível estimar as respectivas cotas invertendo a curva chave da estação fluviométrica.

As vazões da série histórica foram calculadas com a equação da curva-chave de formato potencial como apresentada no Anexo III.

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

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 de ajustes.

A inversa da equação da curva chave é a seguinte:

$$h = \left(\frac{Q}{a} \right)^{1/n} + h_0 \quad (02)$$

Os parâmetros das curvas chave de diferentes períodos e amplitudes de cotas encontram-se no Anexo III.

Os critérios para definição das cotas mínimas de instalação dos equipamentos da RHNR, dependendo do objetivo da estação fluviométrica, estão apresentados na Tabela 04. Um critério comum a todos os objetivos das estações fluviométricas é “a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)”.

A cota máxima observada na estação de Sítio Vassouras, código 37410000, foi de 925 cm. A vazão associada a esta cota é de 2175 m³/s como calculado no item 4-Exemplos de Aplicação.

Os outros critérios apresentados na Tabela 04 são as cotas associadas as cheias de 100, 200 e 250 anos de tempo de retorno. Estas vazões foram calculadas como ilustrado no item 4-Exemplos de Aplicação e os valores constam da Tabela 05. O cálculo

das cotas associadas a estas vazões é realizado empregando a equação (02) e adotando os parâmetros da curva chave mais recente apresentados no Anexo III.

Analisando o Anexo III observa-se que a curva chave mais recente tem período de validade de 24/04/2020 a 31/12/2021 e o ramo superior da curva chave tem uma amplitude de cotas de 329 a 850 cm. As estimativas de vazões associadas as cotas superiores a 850 cm foram realizadas estendendo o ramo superior da curva chave até a cota de interesse. Dessa forma foi possível a estimativa das cotas associadas as vazões de 100, 200 e 250 anos de tempo de retorno uma vez que estas cotas são maiores que o limite superior de validade da curva chave.

A Tabela 06 resume os critérios de definição da cota mínima para instalação dos equipamentos da estação de Sítio Vassouras, código 37410000.

Tabela 06 – Cotas para instalação dos equipamentos da estação fluviométrica.

CRITÉRIO	Q (m³/s)	Cota (cm)
Cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno	4442	1304*
Cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno	5736	1476*
Cota associada a cheia de 250 anos de tempo de retorno	6210	1533*
Cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)	2637*	1025 cm (925 cm + 100 cm)

*Estimativa a partir da extrapolação da curva chave.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A ficha descritiva da estação que se encontra no Anexo I não apresenta o objetivo ou objetivos da estação fluviométrica. Documentos internos do SGB determinam que os objetivos gerais desta estação são estimar balanços e disponibilidades hídricas e também contribuir para a regulação dos recursos hídricos, a cota de instalação dos equipamentos será associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno. ***Sendo assim, com as informações disponíveis na elaboração deste relatório, sugere-se, para o momento, que a cota de instalação dos equipamentos seja superior a 1304 cm. A Figura 05 ilustra o posicionamento dos equipamentos na seção de réguas da estação.***

A Figura 05 apresenta o perfil da seção transversal de régua levantada em 2019 até a cota de 1209 cm. Todavia, alguns perfis de seção de medição levantados em anos anteriores alcançou a cota de 1300 cm em 1985. Assim recomenda-se que os perfis anuais da seção de réguas sejam levantados em cotas superiores à tais cotas nas duas margens, pois auxiliará na extrapolação do ramo superior da curva chave caso ocorra cheias maiores que a ocorrida em 1985 (cota máxima observada de 925 cm).

Além disso, mesmo com as dificuldades inerentes ao trabalho de operação de uma rede hidrometeorológica, quando houver uma oportunidade, ou seja, a ocorrência de cheias no rio Piranhas-Açu, recomenda-se uma intensificação nas medições de vazões em cotas superiores a 827 cm para melhorar a extrapolação do ramo superior da curva chave.

Como indicado no relatório Maranhão e Pereira (2017), também se sugere que seja incluído na ficha descritiva os objetivos da estação fluviométrica de Sítio Vassouras, código 37410000. Porém se os objetivos a serem estabelecidos para a estação fluviométrica forem diferentes dos adotados neste relatório será necessário a revisão da cota mínima para instalação dos equipamentos.

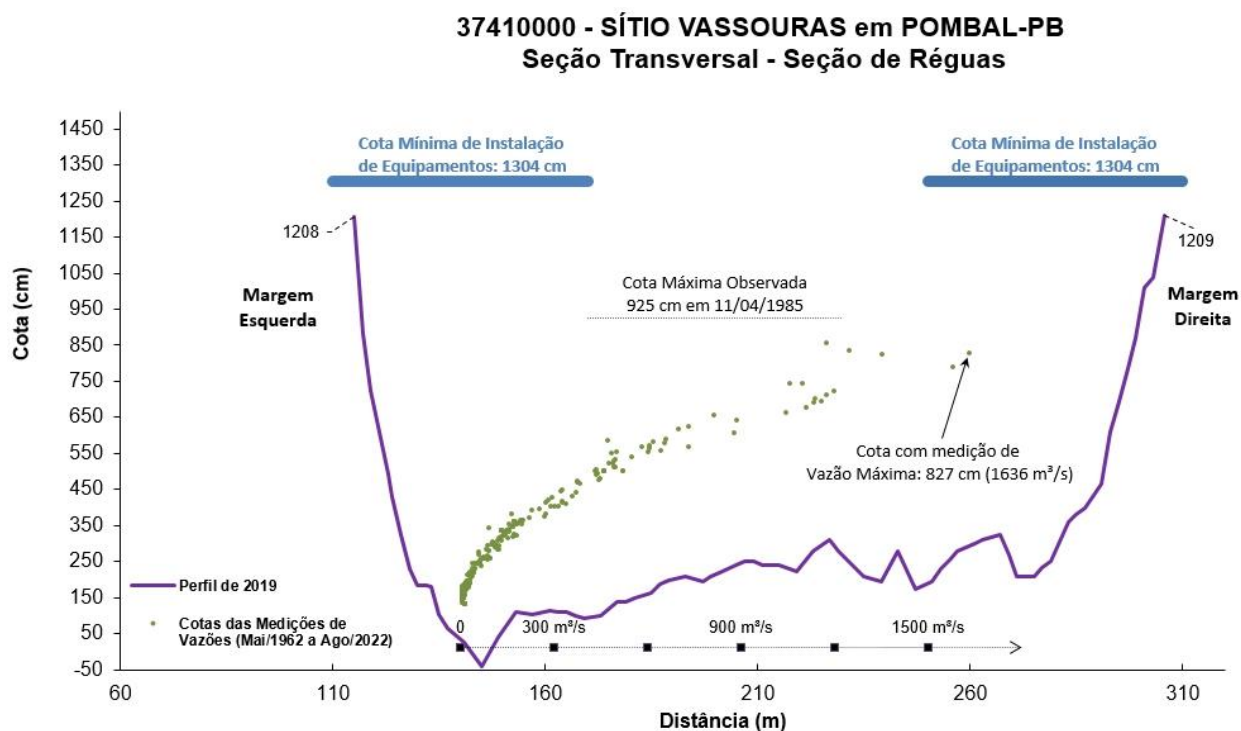


Figura 05 – Cota mínima de instalação de equipamentos. Fonte: Elaborado pelos autores.

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- a) O rio Piranhas-Açu em Sítio Vassouras, código 37410000, alcançou a cota de 925 cm durante a cheia em 11/04/1985. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resp: Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 925 cm com a curva-chave válida para a data de 11/04/1985 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III) com amplitude de cotas de 741 a 900 cm.

Extrapolando, para a cota 925 cm os parâmetros são $a = 23,4110$, $h_0 = 1,10$ m e $n = 2,160$ (Anexo III). Dessa forma temos:

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

$$Q(925\text{cm}) = 23,4110 (925/100 - 1,10)^{2,160}$$

$$Q(925\text{cm}) = 2175 \text{ m}^3/\text{s}$$

Numa segunda etapa, para se calcular o tempo de retorno será necessário estimar a variável Normal Padrão da equação 01. Dessa forma temos:

$$Z_{(1-1/T)} = \frac{(\ln(x_T) - \mu)}{\sigma} \quad (02)$$

A vazão calculada foi de $2175 \text{ m}^3/\text{s}$, o parâmetro de posição é $\mu = 5,9686$, e o de escala é $\sigma = 1,0427$. Substituindo os valores na equação 02 temos:

$$Z_{(1-1/T)} = \frac{(\ln(x_T) - \mu)}{\sigma} = \frac{(\ln(2175) - 5,9686)}{1,0427} = 1,6460$$

Levando o valor 1,6460 em uma tabela de inversa da distribuição Normal Padrão ou executando a função `DIST.NORMP.N` do Excel obtém-se: $P(Z \leq 1,6460) = 0,95012$.

O tempo de retorno será:

$$T = \frac{1}{1 - P(Z \leq z)} = \frac{1}{1 - 0,95012} = 20 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 20 anos corresponde à probabilidade de 5% da vazão $2175 \text{ m}^3/\text{s}$ (associada à cota 925 cm) ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 2175 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{20} 100 = 5 \%$$

- b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota registrada com medição da maior vazão em Sítio Vassouras, código 37410000?

Resp: A cota registrada com medição da maior vazão em Sítio Vassouras, código 37410000, é 827 cm / 1636m³/s (20/04/1974). Considerando a curva-chave desta data e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 1649 m³/s (Ramo 02). Com a vazão calculada e os parâmetros da distribuição de Log-Normal a partir da equação 02 se obtém $Z_{(1-1/T)}$ e por consequência $P(Z \leq z)$. Por fim, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 827 cm é de 11,95 anos. A probabilidade da vazão associada à maior cota registrada de ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 8,37%.

- c) Qual a vazão com tempo de retorno de 100 anos em Sítio Vassouras, código 37410000?

Resp: Considerando os parâmetros de posição e de escala da curva de distribuição obtida no estudo (Log-Normal), calcula-se a inversa da distribuição Normal Padrão para $T=100$ anos (INV.NORMP do Excel), obtendo-se $Z_{(1-1/T=0,99)} = 2,32635$. Aplicando a equação (01) obtém-se a vazão de 4422 m³/s.

$$x_T = EXP(5,9686 + 1,0427 \cdot 2,32635) = 4422 \text{ m}^3/\text{s}$$

O tempo de retorno de 100 anos corresponde à probabilidade de 1,0% da vazão 4422 m³/s ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 4422 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{100} 100 = 1 \%$$

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Brasília, DF: ANA: CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22628> . Acesso em: 9 out. 2024.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis**: an approach based on L-moments. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- KENNEY, T. A. **Levels at gaging stations**: section A, Surface-Water Techniques. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2010. cap. 3., 60 p. (Techniques and Methods 3 – A19). Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3A19/tm3A19.pdf>. Acesso em: 9 out. 2024.
- 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, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MARANHÃO, N.; PEREIRA, S. P. (coord.). **Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR**: relato do planejamento da RHNR e a definição das estratégias de implementação para os próximos anos (5 anos). [Brasília]: [CPRM: ANA], 2017. Grupo de Trabalho ANA-CPRM. Portaria ANA n. 151, de 31 de março de 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22172>. Acesso em: 9 out. 2024.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em: 9 out. 2024.
- PINTO, E. J. de A. **Atlas pluviométrico do Brasil**: metodologia para definição das equações intensidade-duração-frequência do Projeto Atlas Pluviométrico. Belo Horizonte: CPRM, 2013. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/11560>. Acesso em: 9 out. 2024.
- RANTZ, S. E. *et al.* **Measurement and computation of streamflow**: volume 2. Computation of discharge. Washington: USGS, 1982. v. 2, 631 p. (Geological Survey Water-Supply Paper 2175). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/wsp2175_vol2.pdf. Acesso em: 9 out. 2024.
- SAUER, V. B.; TURNIPSEED, D. P. **Stage measurement at gaging stations**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2010. cap. 3, 45 p. (Techniques and Methods 3–A7). Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/tm3a7.pdf>. Acesso em: 9 out. 2024.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Brasília: ABRH, 2002. 256 p.
- WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, n. 4, p. 378-388,

1943. DOI: 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.short>. Acesso em: 9 out. 2024.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on stream gauging**. Geneva: WMO, 2010. v. 1. (Fieldwork WMO-No. 1044). Disponível em:
<https://library.wmo.int/idurl/4/35848>. Acesso em: 9 out. 2024.

ANEXO I

Ficha Descritiva

Estação Fluviométrica de Sítio Vassouras, código 37410000

FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

Identificação

Código:	37410000	Estação:	Sítio Vassouras	Tipo:	FDSQT
Região hidrográfica:	Atlântico Trecho Norte/Nordeste			Sub-bacia:	37
Rio:	Rio Piranhas ou Açú			Bacia local:	Piranhas
Município:	Pombal	Estado:	PB	Roteiro:	2
Latitude:	-6.7290	Longitude:	-37.7940	Altitude (m):	175
Instrumento:	GPS	Datum:	WGS 84		
Área de dren. (km²):	15200	Instalada em:	01/01/1967	Extinta em:	
Coordenador:	ANA	Operador:	CPRM/SUREG RE		
Código da folha:	1255	Nome da folha:	POMBAL		
Órgão executor:	SUDENE	Ano:	1972	Escala:	1:100.000

Localização

Na ponte o rio Piranhas, rodovia BR-230, em local denominado Sítio Vassouras distante 6 km de Pombal.

Acessibilidade

Percorre-se 6 km sentido Sousa/PB

Altitudes Ortométricas

Seção de réguas

Margem: Margem esquerda

Réguas:

7 Réguas de alumínio graduados em centímetros, fixadas em suporte de madeira. Lances : 100/200, 100/200 (R), 200/300, 300/400, 400/600, 600/700, 700/900, 900/1000 cm.

Equipe:
Estação: Sítio Vassouras

Data: 25/01/2024
Código: 37410000

FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

Referências de nível

RN-01: 12099 mm. Parafuso chumbado em bloco de concreto na na murada da ponte na margem esquerda.

RN-02: 12422 mm. Parafuso chumbado em bloco de concreto junto a RN-1.

RN-03: 6111 mm.

Seções e processos de medição

Localizada na ponte para cotas altas, PI na margem esquerda e PF na margem direita, distanciados entresi 190,00 m.

Processo de medição: Vau/Ponte

Potamografia

O Rio Piranhas nasce no Município de Bonito de Santa Fé, Estado da Paraíba, nas proximidades da Serra da Mata Fresca, numa altitude aproximada de 600,0 m. Seus principais afluentes são os Rios Piancó e Seridó, pela margem direita, e o Rio Peixe, pela margem esquerda.

Características do trecho

Regime: Perene Conformação: Retilínea Fundo: Regular

Posição em relação à rede

Montante: Sítio Curralinho Jusante:

Natureza e inclinação das margens

Esquerda: Baixa Arenosa Sem Vegetação
Direita: Baixa Arenosa Sem Vegetação

Leito

Natureza: Arenosa Sem Vegetação

Controle

Controle: Canal Localização: Distância

Equipe: Data: 25/01/2024
Estação: Sítio Vassouras Código: 37410000

ANEXO II
Distribuição de Gumbel e Log-Normal.

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

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

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

$$\hat{\mu} = \lambda_1$$

$$\hat{\sigma} = \lambda_2\sqrt{\pi}$$

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 III

Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas anuais

Curva-Chave

Estatísticas da série

ANEXO III

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

Máximos por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão (m³/s)	Observações
1	1973	1973	01/05/1973	-	617	814,29	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
2	1974	1974	22/04/1974	-	886	1957	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
3	1975	1975	27/04/1975	-	558	638,25	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
4	1976	1976	17/03/1976	07:00	518	530,77	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
5	1977	1977	04/05/1977	-	910	2090	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
6	1978	1978	28/02/1978	07:00	542	594,11	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
7	1979	1979	30/03/1979	07:00	460	392,07	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
8	1980	1980	04/03/1980	17:00	838	1705	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
9	1981	1981	27/03/1981	07:00	562	649,53	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
10	1982	1982	24/04/1982	17:00	421	310,29	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
11	1983	1983	07/02/1983	17:00	330	155,82	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
12	1984	1984	22/04/1984	07:00	494	470,91	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
13	1985	1985	11/04/1985	17:00	925	2175	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
14	1986	1986	23/04/1986	17:00	518	548,73	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
15	1988	1988	23/04/1988	17:00	649	943,51	CM / Vazões geradas a partir da curva-chave
16	1989	1989	28/04/1989	07:00	610	815,26	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
17	1990	1990	02/05/1990	07:00	318	147,86	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
18	1991	1991	14/03/1991	17:00	474	439,30	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
19	1992	1992	05/04/1992	17:00	406	293,40	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
20	1993	1993	29/03/1993	07:00	268	88,756	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
21	1994	1994	22/01/1994	17:00	458	402,42	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
22	1995	1995	26/05/1995	07:00	534	591,43	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
23	1996	1996	07/05/1996	07:00	590	753,00	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
24	1997	1997	27/03/1997	17:00	312	139,97	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
25	1998	1998	25/03/1998	17:00	186	24,301	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
26	1999	1999	21/03/1999	17:00	400	281,89	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
27	2000	2000	17/04/2000	07:00	408	297,29	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
28	2002	2002	10/01/2002	17:00	438	358,53	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
29	2003	2003	28/02/2003	07:00	296	120,00	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
30	2004	2004	02/02/2004	07:00	702	1132	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

CM – Erro de digitação ou sem dados de boletim de Dupla Leitura (DL). Registro DL na estatística máxima do banco de Cotas Médias.

ANEXO III

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

Máximos por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazões (m³/s)	Observações
31	2005	2005	31/03/2005	17:00	440	372,86	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
32	2006	2006	01/03/2006	17:00	735	1258	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
33	2007	2007	20/02/2007	17:00	420	332,44	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
34	2008	2008	03/04/2008	17:00	924	2170	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
35	2009	2009	08/05/2009	17:00	689	957,07	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
36	2010	2010	19/04/2010	07:00	420	363,47	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
37	2011	2011	05/03/2011	07:00	395	285,10	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
38	2012	2012	28/02/2012	07:00	240	71,448	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
39	2015	2015	28/03/2015	07:00	242	48,195	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
40	2016	2016	23/03/2016	07:00	334	172,47	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
41	2017	2017	25/03/2017	17:00	229	52,690	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
42	2018	2018	16/04/2018	07:00	380	245,15	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
43	2019	2019	03/04/2019	07:00	400	281,90	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
44	2020	2020	24/04/2020	07:00	638	906,46	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
45	2021	2021	23/04/2021	07:00	390	263,22	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

CM – Erro de digitação ou sem dados de boletim de Dupla Leitura (DL). Registro DL na estatística máxima do banco de Cotas Médias.

ANEXO III

Curva-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 de ajustes.

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

Curvas-Chaves	Período	01/01/1973	25/05/1985	31/07/2004
		24/05/1985	30/07/2004	28/07/2008
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	120	100	100
		741	332	547
	a	35,5053	30,0010	32,4048
	h_0 (m)	1,16	0,96	0,90
	n	1,944	2,000	1,950
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	741	332	547
		900	700	814
	a	23,4110	36,6894	36,6894
	h_0 (m)	1,10	1,13	1,13
Ramo 03	n	2,160	1,934	1,934
	Amplitude de cotas (cm)			814
				950
	a			23,4110
	h_0 (m)			1,10
	n			2,160

Curvas-Chaves	Período	29/07/2008	19/06/2009	01/03/2011
		18/06/2009	28/02/2011	16/06/2013
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	110	100	110
		656	450	400
	<i>a</i>	30,8838	36,4613	32,4048
	<i>ho (m)</i>	1,23	0,85	0,90
	<i>n</i>	1,967	1,902	1,950
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	656		
		700		
	<i>a</i>	23,4110		
	<i>ho (m)</i>	1,57		
	<i>n</i>	2,220		

Curvas-Chaves	Período	17/06/2013	20/11/2014	08/10/2015
		19/11/2014	07/10/2015	17/10/2016
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	120	100	100
		300	764	375
	<i>a</i>	36,6909	31,7575	38,7092
	<i>ho (m)</i>	1,13	1,19	1,11
	<i>n</i>	1,934	2,015	1,863
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)		764	375
			850	814
	<i>a</i>		23,4110	36,6909
	<i>ho (m)</i>		1,10	1,13
	<i>n</i>		2,160	1,934
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)			814
				850
	<i>a</i>			23,4110
	<i>ho (m)</i>			1,10
	<i>n</i>			2,160

Curvas-Chaves	Período	18/10/2016	05/07/2017	21/12/2017
		04/07/2017	20/12/2017	02/03/2018
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	100	120	100
		169	741	394
	<i>a</i>	31,4048	35,5053	38,7092
	<i>ho (m)</i>	1,02	1,16	1,10
	<i>n</i>	2,013	1,944	1,863
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	169	741	394
		375	850	800
	<i>a</i>	38,7092	23,4110	36,6909
	<i>ho (m)</i>	1,11	1,10	1,13
	<i>n</i>	1,863	2,160	1,934
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)	375		
		814		
	<i>a</i>	36,6909		
	<i>ho (m)</i>	1,13		
	<i>n</i>	1,934		
Ramo 04	Amplitude de cotas (cm)	814		
		850		
	<i>a</i>	23,4110		
	<i>ho (m)</i>	1,10		
	<i>n</i>	2,160		

Curvas-Chaves	Período	03/03/2018	29/07/2018	19/01/2019
		28/07/2018	18/01/2019	22/07/2019
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	100	100	100
		329	146	187
	<i>a</i>	31,1978	30,0000	33,3059
	<i>ho (m)</i>	0,94	1,10	1,03
	<i>n</i>	1,933	1,900	1,930
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	329	146	187
		850	850	394
	<i>a</i>	36,6909	36,6909	38,7092
	<i>ho (m)</i>	1,13	1,13	1,11
	<i>n</i>	1,934	1,934	1,863
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)			394
				850
	<i>a</i>			36,6909
	<i>ho (m)</i>			1,13
	<i>n</i>			1,934

Curvas-Chaves	Período	23/07/2019	21/08/2019
		20/08/2019	01/02/2020
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	100	100
		375	160
	a	38,7092	35,3102
	$ho (m)$	1,11	1,12
	n	1,863	1,935
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	375	160
		850	850
	a	36,6909	36,6909
	$ho (m)$	1,13	1,13
	n	1,934	1,934

Curvas-Chaves	Período	02/02/2020	24/04/2020
		23/04/2020	31/12/2021
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	100	100
		187	329
	a	33,3059	31,1978
	$ho (m)$	1,03	0,94
	n	1,930	1,933
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	187	329
		394	850
	a	38,7092	36,6909
	$ho (m)$	1,10	1,13
	n	1,863	1,934
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)	394	
		850	
	a	36,6909	
	$ho (m)$	1,13	
	n	1,934	

ANEXO III

Estatísticas da série

Estatísticas da Série

Média m³/s	Desvio- Padrão m³/s	Máximo m³/s	Mínimo m³/s	Amplitude m³/s	Assimetria	Mediana m³/s	1º Quartil m³/s	3º Quartil m³/s	AIQ m³/s
614,2	585,3	2175,3	24,3	2151,0	1,6	392,1	263,2	814,3	551,1

Estatísticas da série transformada: Ln(X)

Média	Desvio- Padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	Assimetria	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	AIQ
5,96864	1,04338	7,68492	3,19053	4,49439	-0,49497	5,97144	5,57298	6,70231	1,12933

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
614,2323	298,5564	0,4861	0,3693	0,1974

Momentos-L e Razões-L da série transformada: Ln(X)

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
5,9686	0,5883	0,0986	-0,0848	0,1605

Função Acumulada de Probabilidade da Log-Normal para Máximos (μ e σ são parâmetros da distribuição Log-Normal)

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \text{ onde } \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t)dt$$

Inversa da distribuição Log-Normal: $x(F)$ não possui forma analítica

Parâmetros da Distribuição Log-Normal

Fonte: Hosking e Wallis (1997), págs. 193 e 194

$$\text{Momentos - L: } \lambda_1 = \mu \quad \lambda_2 = 0,5642 \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sigma \quad \text{Parâmetros: } \hat{\mu} = \lambda_1 \quad e \quad \hat{\sigma} = \lambda_2 \sqrt{\pi}$$

Distribuição	Posição (μ)	Escala (σ)
Log-Normal (μ, σ)	5,9686	1,0427



Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

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 Recife

Avenida Sul, 2291, Afogados
Recife - PE - Brasil - CEP: 50770-011
Tel.: 81 3316-1400
Fax: 81 3316-1403

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

ISBN 978-65-5664-669-5