

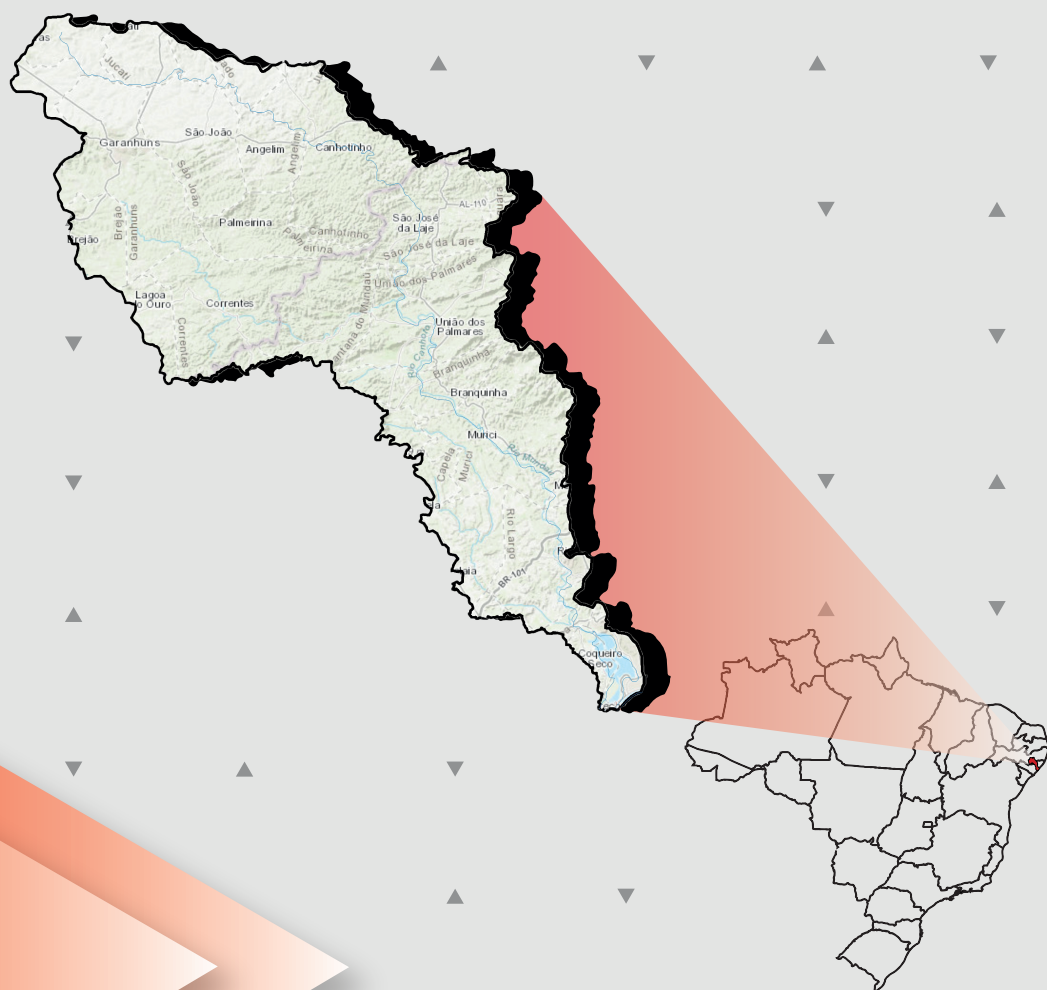
Disponibilidade hídrica do Brasil

Estudos de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta

Sistema de Alerta: Bacia do rio Mundaú

Rio Mundaú em Fazenda Boa Fortuna
Código: 39770000



2020



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM

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

PROGRAMA GESTÃO DE RISCO E RESPOSTA A DESASTRES

DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO BRASIL
ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO NAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES

DOS SISTEMAS DE ALERTA

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Mundaú

Rio: Mundaú

Estação Fluviométrica: Fazenda Boa Fortuna
Código: 39770000

Múcio Valença Virães
Eber José de Andrade Pinto



RECIFE
2020

PROGRAMA GESTÃO DE RISCO E RESPOSTA A DESASTRES

PROJETO DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO BRASIL ESTUDOS DE REGIONALIZAÇÃO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA

Executado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM
Superintendência Regional de Recife

Copyright @ 2020 CPRM - Superintendência Regional de Recife
Avenida Sul, 2291 - Afogados
CEP: 50770-011
Recife - PE – Brasil
Telefone: 0(xx)(81) 3316-1400
Fax: 0(xx)(31) 3316-1403
<http://www.cprm.gov.br>

Ficha Catalográfica

V813 Virões, Múcio Valença
Regionalização de Vazões nas Hidrográficas Brasileiras: Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta. Sistema de Alerta da Bacia do Mundaú. Fazenda Boa Fortuna, código 39770000 / Múcio Valença Virões; Eber José de Andrade Pinto. – Recife: CPRM, 2020.
30 p.; anexos

Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Projeto Disponibilidade Hídrica do Brasil – Estudos de Regionalização nas Bacias Hidrográficas Brasileiras.

1. Hidrologia - Brasil. 2. Regionalização de Vazões. 3. Análise de Frequência Local. I.Título

CDD 551.48

Direitos desta edição: CPRM - Serviço Geológico do Brasil
É permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Bento Albuquerque

SECRETÁRIO EXECUTIVO

Marisete Fátima Dadald Pereira

SECRETÁRIO DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Alexandre Vidigal de Oliveira

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM/SGB)

CONSELHO DE ADMINISTRAÇÃO

Presidente

Alexandre Vidigal de Oliveira

Vice-Presidente

Esteves Pedro Colnago

Conselheiros

Cassio Roberto da Silva

Fernando Antônio Freitas Lins

Geraldo Medeiros de Moraes

Lília Mascarenhas Sant'Agostino

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente

Esteves Pedro Colnago

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

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE RECIFE

Vanildo Almeida Mendes (in memorian)
Superintendente

Robson de Carlo da Silva
Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial

Cleide Regina Moura da Silva
Gerente de Geologia e Recursos Minerais

Douglas Silva Luna
Gerente de Infraestrutura Geocientífica

Gilberto Augusto Pinto Ribeiro Júnior
Gerente de Administração e Finanças

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS BACIAS BRASILEIRAS

Departamento de Hidrologia
Frederico Cláudio Peixinho

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

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

Equipe Executora

Cynthia Pedrosa Teixeira – RETE
Denise Christina de Rezende Melo – SUREG/GO
Francisco F. N. 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 ação dentro do programa de Gestão de Risco e Resposta a Desastres que tem por objetivo ampliar o conhecimento sobre a disponibilidade hídrica no território nacional.

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, é uma informação útil para o planejamento nos setores elétrico, agrícola, abastecimento público e na adoção de políticas públicas.

Dentre os vários objetivos do projeto Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras, 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 no rio Mundaú especificamente na estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna, código 39770000. Esta estação fluviométrica faz parte do sistema de alerta de cheias do rio Mundaú e constitui um ponto de acompanhamento das vazões e cotas nesta região, no Estado de Alagoas.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	01
2 – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL	06
3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL.....	08
4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	10
5 – REFERÊNCIAS	12
ANEXO I	13
ANEXO II	17
ANEXO III	20

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SAH rio Mundaú.
Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna.
Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Fazenda Boa Fortuna.
Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Vazões em m³/s

ANEXOS

- Anexo I – Ficha Descritiva da Estação Fluviométrica
Anexo II – Distribuições de Gumbel e Log-normal
Anexo III – Dados utilizados e as estatísticas

1 – INTRODUÇÃO

A bacia do rio Mundaú está situada na região Nordeste e possui uma área de drenagem de 4.150 km², sendo 52% dentro do Estado de Pernambuco e 48% no Estado de Alagoas. Infelizmente é comum ouvirmos ao longo da história registro de eventos de cheias com perdas de vidas humanas e de grandes danos materiais, o que não foi diferente nesta bacia. Em junho de 2010, ocorreu uma cheia de grandes proporções, evento crítico que provocou enormes destruições nas cidades atingidas. Isso motivou mais tarde a implantação do Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) da Bacia do rio Mundaú em dezembro de 2017. Esta iniciativa foi tomada pela CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil em parceria com a ANA – Agência Nacional de Águas, a SEMARH-AL – Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (Previsão Meteorológica) e a APAC-PE - Agência Pernambucana de Águas e Clima (Previsão Meteorológica).

As principais atividades da operação do SAH rio Mundaú 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 09 pontos instalados na Bacia do rio Mundaú. 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. A CPRM transmite semanalmente para a SEMARH-AL (sala de alerta), Defesa Civil e prefeituras dos municípios da bacia do Mundaú, um boletim contendo os níveis dos rios nas estações fluviométricas. Além destes níveis, o boletim contém a cota de alerta e de inundação de algumas estações da bacia.

Hoje em dia o SAH rio Mundaú tem como objetivo alertar 02 municípios da bacia quanto ao risco de ocorrência de enchentes. Os municípios beneficiados são Murici e União dos Palmares localizados no Estado de Alagoas.

A localização das nove estações fluviométricas que compõem o Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Mundaú está apresentada na Figura 01.

A estação de Fazenda Boa Fortuna, código 39770000, está localizada na Latitude 09°28'02"S e Longitude 35°51'35"O, no rio Mundaú e possui uma área de drenagem de 3.560 km², a maior entre as estações da rede do Alerta da Bacia do Mundaú. O rio Mundaú é um rio federal com nascente a 800 metros de altitude no município de Garanhuns, Pernambuco, e percorre 176 km até seu exutório na lagoa do Mundaú, Alagoas, cuja bacia hidrográfica pertence à sub-bacia 39. A estação fluviométrica está instalada na margem esquerda do rio Mundaú nas proximidades da Destilaria Central da

cidade de Rio Largo, Alagoas. A Figura 02 ilustra a localização da estação de Fazenda Boa Fortuna.

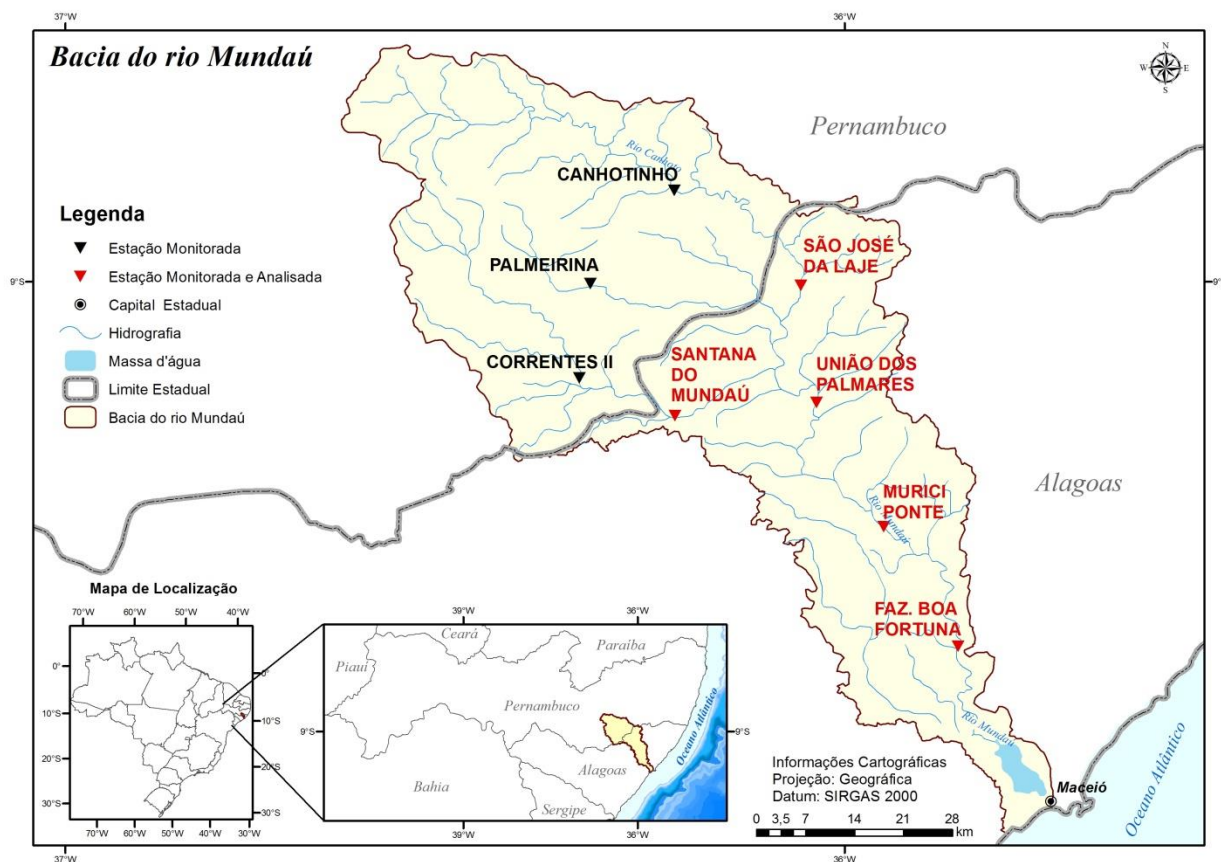


Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SAH rio Mundaú.

A estação de Fazenda Boa Fortuna possui, desde outubro de 1965, régua linimétrica instalada para realização de duas leituras diárias pelo observador dos níveis do rio Mundaú, as 07 e as 17 hs.

Nesta estação, desde agosto de 1996, estão instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do rio Mundaú. Contudo só há dados disponíveis a partir de junho de 2005, porém só a partir de março de 2009 tais dados se encontram mais consistentes.

Ao longo do histórico da estação não houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, não foram acrescentados 100 cm ou outro valor as cotas da estação. Nesta estação, a cota de alerta é de 647 cm e a cota de Atenção de 580 cm (10/06/2020). A estação se encontra em região de fazenda e não foi estabelecida a cota de inundação. Maiores detalhes sobre a estação podem ser encontrados na sua ficha descritiva que consta do Anexo 01.

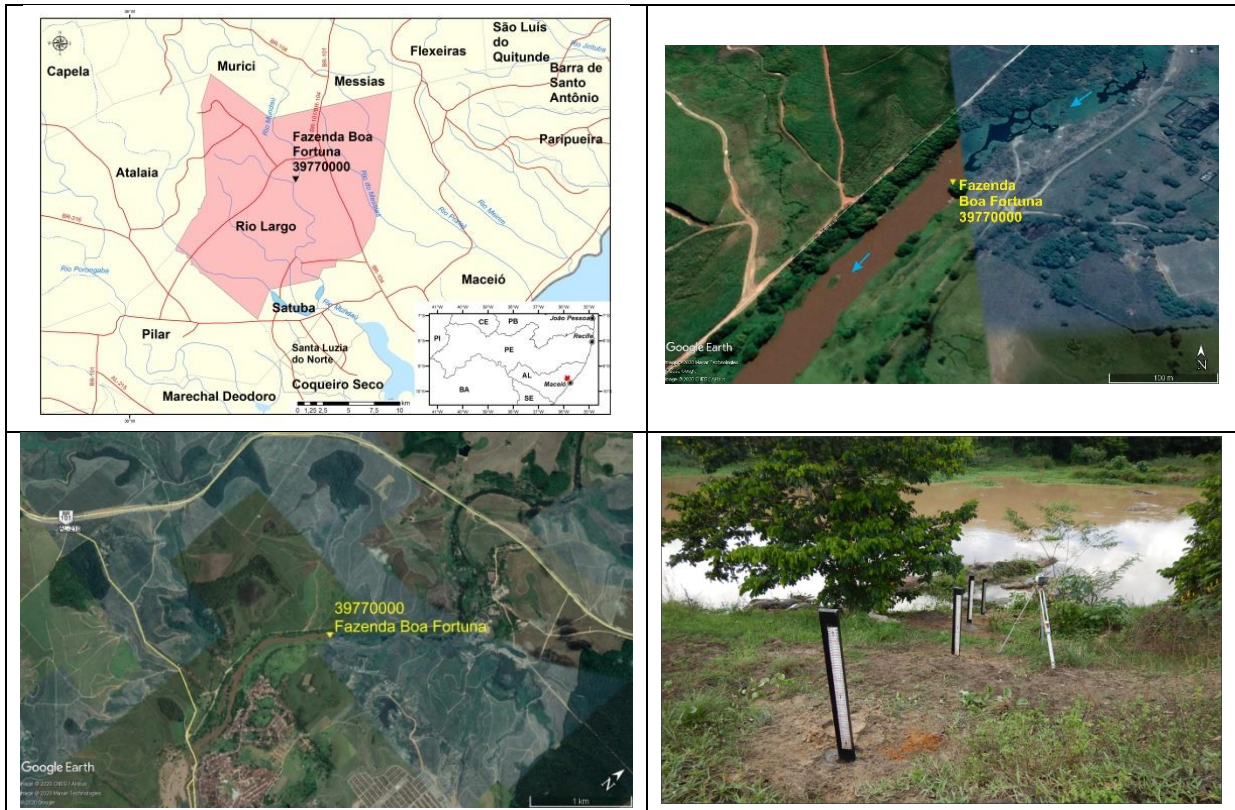


Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna.

A Figura 03 apresenta o perfil da seção transversal na seção de régua da estação. Esta figura também apresenta as cotas de alerta no local da estação na propriedade da Fazenda Boa Fortuna, bem como, as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre Outubro/1965 e Março/2019 e a máxima cota observada (1238 cm 18/06/2010). Esse valor da cota máxima foi estabelecido a partir dos levantamentos da marca de cheia pela ENGECON em 2010 e determinação das cotas altimétricas das referências de nível em 2018 realizados pela CPRM, Superintendência Regional de Recife (SUREG-RE). A data para cota máxima em 18/06/2010 foi obtida através da nota técnica da ANA (Nota Técnica n2 064/2010/SGH-ANA), porém as últimas leituras da PCD neste mês vão até as 06:00 AM de 19/06/2010, não superando a cota de 810 cm neste período de cheia, sugerindo que essa cota máxima obtida pelo levantamento da marca de cheia pode ter ocorrido em algum momento do dia 19 após as 06 da manhã e não no dia 18 a noite (as leituras da dupla leitura no dia 18 foram 693 e 810 cm). Para o estudo aqui desenvolvido aqui, optou-se pela data 18/06/2010, conforme ANA, acreditando que a PCD que foi perdida na cheia apresentou problema.

A diferença entre a máxima cota com vazão medida (639 m³/s na cota 818 cm) e a máxima cota observada nas régua é de 420 cm. No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 43 valores, sendo 10 valores superiores a 818 cm. A razão entre as cotas máximas com medição de vazão e a observada é 1,51 (1238 cm / 818 cm). Segundo Tucci (2002), a melhor curva-chave, aquela com menor extrapolação do ramo superior, possui a razão entre as cotas máximas com medição de

vazão e a observada inferior a 1,25. Na Figura 03 também se observa ausência de medições de vazões no intervalo de 400 a 600 m³/s. A seção de medição está localizada a jusante da seção de réguas, como está apresentado na ficha descritiva da estação no Anexo I. Em 2020 a seção de réguas foi deslocada 370 m para montante da seção de medição de vazões como se observa na ficha descritiva. No período anterior a 2020 as seções de réguas e de medições eram bem próximas. Sendo a estação de maior área de drenagem em monitoramento na bacia do Mundaú, recebe boa parte de todo o escoamento superficial da região.

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 818 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 23,3% da série de cotas máximas por ano hidrológico estar no ramo extrapolado da curva-chave, sugere o estudo através da análise da frequência de cotas.

Contudo a análise através da frequência de vazões foi considerada a melhor opção devido à manutenção desse estudo, pois recebemos a informação verbal que algumas estações da rede de alerta da bacia do Mundaú podem ser reinstaladas em outra posição em um futuro breve. A reinstalação de réguas em outra seção, afastada da 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. Caso contrário se tratará de uma nova estação, o que demandará uma nova série histórica para um novo estudo de análise de frequência de máximas.

39770000 - Rio Mundaú em Fazenda Boa Fortuna
Seção Transversal - Seção de Réguas

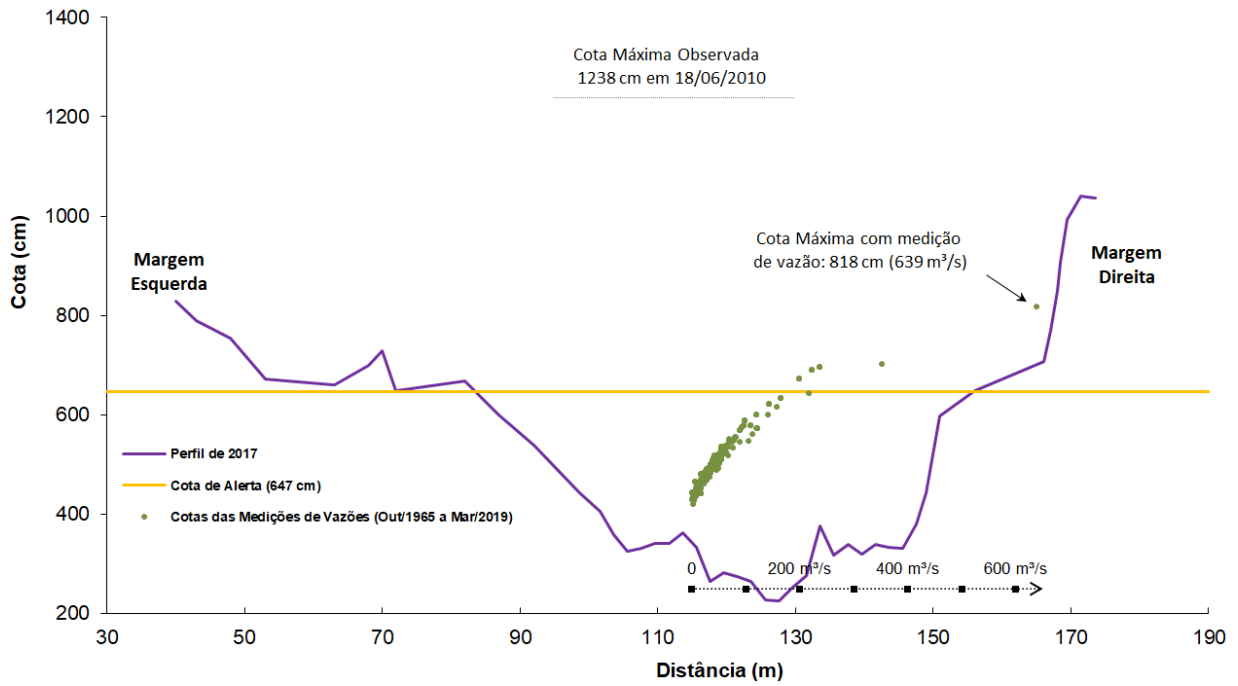


Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Fazenda Boa Fortuna.

2 – METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL

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

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

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

Na etapa de consistência procura-se identificar problemas com os registros de cotas ou vazões que poderiam desacreditar as informações. Para tanto podem ser realizados métodos consagrados no meio técnico, como por exemplo, verificar se há mudança do zero da régua (mudança de referência); verificar a presença de erro de metro nas cotas; verificar a presença de erro de 1/2 metro nas cotas; verificar a presença de erro de digitação; comparar a cota máxima com a cota média diária; avaliar o comportamento dos cotogramas das estações de montante e jusante; verificar as cotas máximas da série disponível nos bancos de dados com os boletins de campo; avaliar os dados que estão como duvidosos ou estimados; avaliar o preenchimento de falhas (média, linígrafo e PCD); verificar as medições de vazões; analisar as curvas-chaves; 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 e Pinto, 2007, página 39), e com o teste de Grubbs e Beck (Naghettini e Pinto, 2007, página 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), página 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), página 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), página 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 e 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), páginas de 275 a 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 Mundaú em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez) apresentadas no Anexo III. Neste anexo também constam alguns endereços de vídeos disponíveis na Internet dos principais eventos de cheia do rio Mundaú. 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 (5,9488)

σ é o parâmetro de escala (0,6676)

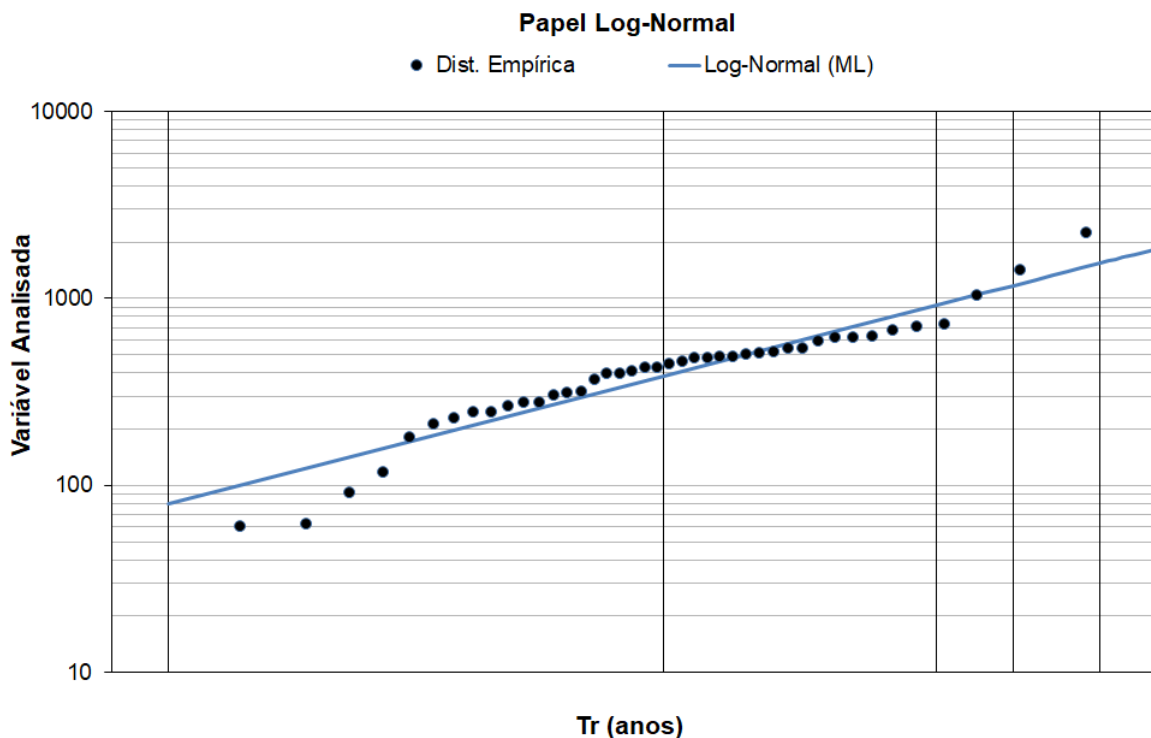


Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica

A equação 01 é válida para tempos de retorno de 1,01 até 100 anos. A Tabela 01 apresenta as vazões associadas a diferentes tempos de retorno.

Tabela 01 – Vazões em m³/s.

		Tempo de Retorno, T (anos)												
		2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90	100
Vazões (m ³ /s)		383	672	902	1044	1149	1233	1304	1418	1510	1587	1683	1764	1811

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- a) O rio Mundaú em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000, alcançou a cota de 1238 cm durante a grande cheia em 18/06/2010. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resp: Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 1238 cm com a curva-chave válida para a data de 18/06/2010 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III).

Para a cota 1238 cm, aceitando-se a extrapolação da curva-chave disponível limitada a 1050 cm, os parâmetros são $a = 56$, $h_0 = 4,15$ m e $n = 1,75$ (Anexo III). Dessa forma temos:

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

$$Q(1238\text{cm}) = 56 (1238/100 - 4,15)^{1,75}$$

$$Q(1238\text{cm}) = 2239 \text{ m}^3/\text{s}$$

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 $2239 \text{ m}^3/\text{s}$, o parâmetro de posição é $\mu = 5,9488$, e o de escala é $\sigma = 0,6676$. Substituindo os valores na equação 02 temos:

$$Z_{(1-1/T)} = \frac{(\ln(x_T) - \mu)}{\sigma} = \frac{(\ln(2239) - 5,9488)}{0,6676} = 2,64379$$

Levando o valor 2,64379 em uma tabela de inversa da distribuição Normal Padrão ou executando a função `DIST.NORMP.N` do Excel obtém-se: $P(Z \leq 2,64379) = 0,99590$.

O tempo de retorno será:

$$T = \frac{1}{1 - P(Z \leq z)} = \frac{1}{1 - 0,99590} = 244 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 244 anos corresponde à probabilidade de 0,41% da vazão $2239 \text{ m}^3/\text{s}$ (associada à cota 1238 cm) ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 2239 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{244} 100 = 0,41 \%$$

Atenção: A cota associada a uma vazão não necessariamente tem o mesmo tempo de retorno! Uma vez que a vazão obtida a partir de uma cota depende de uma equação não linear (curva-chave). A análise de frequência das cotas não gera os mesmos resultados da análise de frequência das vazões correspondentes.

- b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de alerta em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000?

Resp: A cota de alerta em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000, é 647 cm (10/06/2020). Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 244 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 647 cm é de 1,33 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 75,06%.

- c) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de extravasamento da calha em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000?

Resp: A cota de extravasamento da margem esquerda é 828 cm em Fazenda Boa Fortuna, código 39770000. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 670 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 828 cm é de 4,96 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de extravasamento ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 20,14%.

5 – REFERÊNCIAS

Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC. **Bacia Hidrográficas - Rio Mundaú**. Disponível em: < http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=19>. Acesso em: 23 março 2020.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **39770000-Fazenda Boa Fortuna: Ficha de nivelamento GPS**. Documento interno. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Recife, 2018.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39. Bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una, Goiana, Mundaú, Paraíba, Coruripe, Pratagi, Sirinhaém, São Miguel, Camaragibe, Abiaí, Gramame e Manguaba**. 152p.: il.; 4 anexos + 1 DVD. CPRM – Serviço Geológico do Brasil; execução técnica e autoria de Keyla Almeida dos Santos. – Recife: CPRM, 2015.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto de Monitoramento de Eventos Hidrológicos Extremos: Enchentes de Alagoas em Junho 2010**. Tomo I: Levantamento de Campo, Recife, 2010.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. Regional Frequency Analysis - an approach based on L-moments. Cambridge University Press, P.224, 1997.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. CPRM. CPRM, 2007.

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

ANEXO I
Ficha Descritiva
Estação Fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna, código 39770000

FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

Identificação

Código:	39770000	Estação:	Fazenda Boa Fortuna	Tipo:	FDSQT
Região hidrográfica:	Atlântico, Trecho Norte/Nordeste			Sub-bacia:	39
Bacia:	Mundaú	Rio:	Rio Mundaú		
Município:	Rio Largo	Estado:	AL	Roteiro:	97
Latitude:	-9,467	Longitude:	-35,860	Altitude (m):	38,00
Instrumento:	GPS	Datum:	WGS 84		
Área de dren. (km²):	3.560	Instalada em:	01/10/1965	Extinta em:	
Coordenador:	ANA	Operador:	CPRM/SUREG RE		
Código da folha:	SC.25-V-C-I	Nome da folha:	RIO LARGO		
Órgão executor:	SUDEN	Ano:	1999	Escala:	1:100.000

Localização

Margem esquerda do rio Mundaú, nas proximidades da Destilaria Central da cidade de Rio Largo.

Acessibilidade

De Maceió até o centro da cidade de Rio Largo seguir até o cemitério São Lourenço e de lá são mais 2km em rua calçada até a destilaria central.

Seção de réguas

Margem: Margem Esquerda

Réguas:

6 Lances de réguas de alumínio graduadas em centímetro fixadas em suporte de madeira. Lances: 400/500, 500/600, 600/700, 700/800, 800/900 e 900/1000 cm. Instaladas imediatamente a jusante do prédio onde se localiza a PCD.

Referências de nível

RN-09 : 14254 mm. Parafuso chumbado na parede do antigo prédio da SUCAM.

RN-10: 8881 mm. Parafuso chumbado em bloco de concreto a 50m do lance 900/1000cm.

RN-11: 9443 mm Parafuso chumbado em bloco de concreto, fixado ao solo entre os lances 9/10 m e 8/9 m.

Seções e processos de medição

Localizada 370 m a jusante da seção de réguas e definida por PI na margem esquerda e PF na margem direita, distância entre si 85,00 m.

Equipe : Kleverson Holland Mat. 80.438.041

Data : 10/09/2020

Estação : Fazenda Boa Fortuna

Código : 39770000

Potamografia

O Rio Mundaú nasce em Garanhuns/PE, com 800m de altitude e 176,0 Km de extensão, tem direção predominante Noroeste-Sudeste, seus afluentes são Riacho Seco e Rio Canhoto. Deságua no Oceano Atlântico nas proximidades de Maceió. Coordenadas obtidas por GPS.

Características do trecho

Regime: Perene **Conformação:** Retilínea **Fundo:** Regular

Posição em relação à rede

Montante: Murici - Ponte ➡ **Fazenda Boa Fortuna** ➡ **Jusante:**

Natureza e inclinação das margens

Esquerda: Média Arenosa com Vegetação de Pequeno Porte

Direita: Alta Arenosa com Vegetação de Pequeno Porte

Leito

Natureza: Arenosa Sem Vegetação

Controle

Controle: Ponte **Localização:** Jusante **Distância (m):**

Observador

Nome:		Apelido:	
Endereço:		Complemento:	
Bairro:		Município:	
Estado:		CEP:	
Telefone fixo: () -		Celular:	
Autorizado:		Apelido:	
Endereço:		Complemento:	
Telefone fixo: () -		Celular:	() -
Leiturista:			

Observações

Equipamentos

PCD instalada em cima da casa de bombas - imediatamente a montante da seção de réguas.

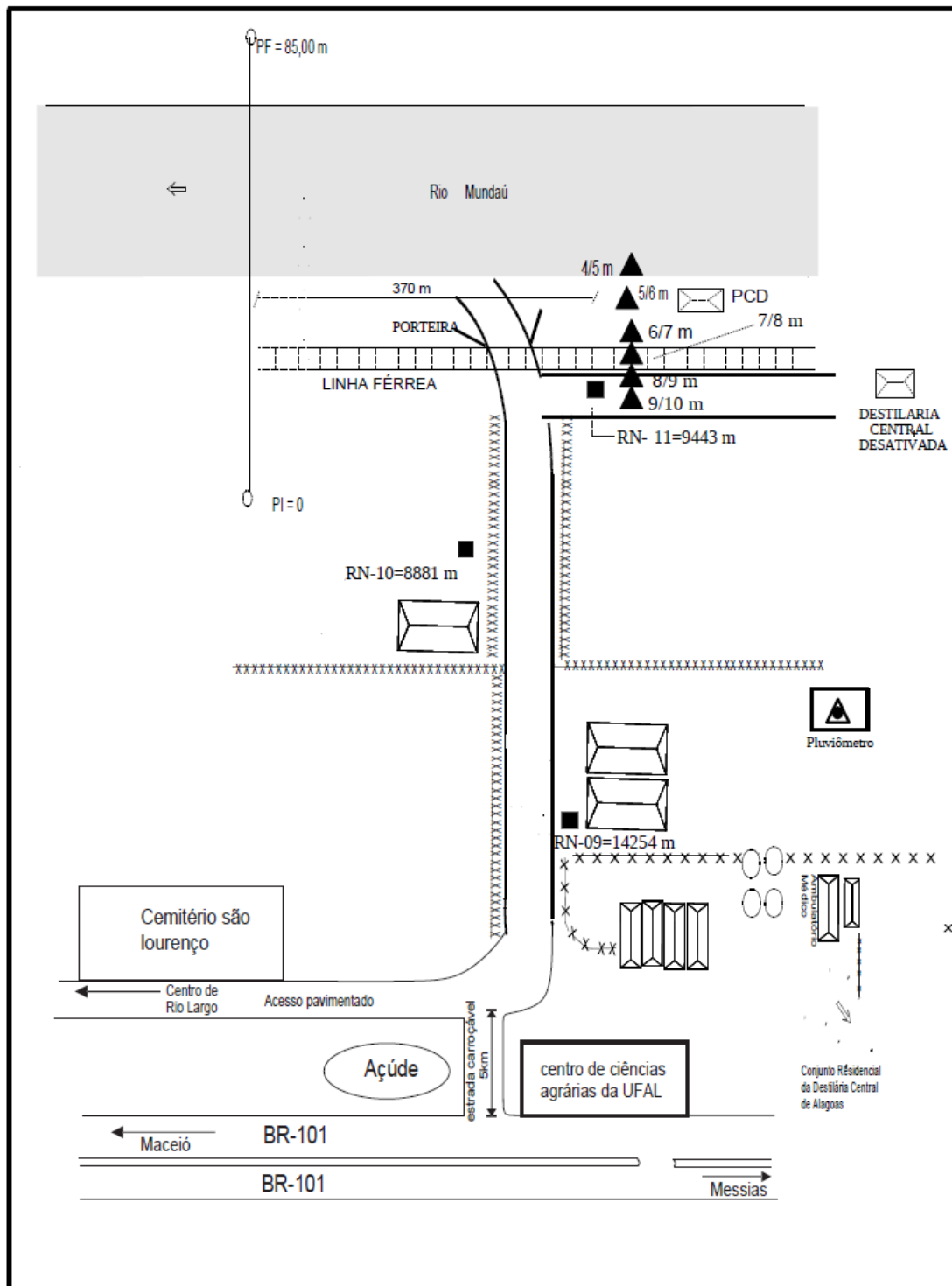
Equipe : Kleverson Holland Mat. 80.438.041

Data : 10/09/2020

Estação : Fazenda Boa Fortuna

Código : 39770000

MUNICÍPIO/UF	RIO	EM	CÓDIGO	ROTEIRO
Rio Largo/AL	Mundaú	Fazenda Boa Fortuna	39770000/00935056	97
TIPO	BACIA	PROJETO	DESENHISTA	DATA
PFDSQT	Mundaú	1422-350	Haroldo Gomes	25/08/2020



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

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

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 III
Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico
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	1974	1974	08/07/1974	-	716	326,22	Informação da estatística da cota média Vazões geradas a partir da curva-chave
2	1976	1976	06/10/1976	17:00	673	247,76	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
3	1977	1977	25/05/1977	7:00	813	540,23	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
4	1978	1978	19/07/1978	7:00	790	484,90	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
5	1979	1979	09/06/1979	7:00	684	266,86	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
6	1980	1980	10/06/1980	7:00	703	301,42	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
7	1981	1981	26/03/1981	7:00	710	314,66	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
8	1982	1982	29/04/1982	7:00	790	484,90	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
9	1983	1983	02/08/1983	7:00	581	117,77	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
10	1984	1984	19/07/1984	17:00	799	506,21	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
11	1985	1985	04/08/1985	17:00	709	312,75	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
12	1986	1986	22/07/1986	7:00	802	513,41	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
13	1987	1987	30/06/1987	7:00	652	213,17	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
14	1988	1988	18/07/1988	7:00	983	1035,88	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
15	1990	1990	14/07/1990	17:00	630	179,59	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
16	1991	1991	19/08/1991	7:00	876	706,22	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
17	1992	1992	05/04/1992	7:00	750	395,43	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
18	1993	1993	03/11/1993	17:00	834	593,22	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
19	1994	1994	21/06/1994	17:00	844	619,28	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
20	1995	1995	03/07/1995	17:00	690	277,56	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
21	1996	1996	26/08/1996	17:00	765	427,97	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
22	1997	1997	09/05/1997	07:00	882	723,12	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
23	1998	1998	28/07/1998	17:00	662	229,34	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
24	1999	1999	18/07/1999	7:00	540	91,06	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
25	2000	2000	02/08/2000	-	1050	1422,47	DL (Apesar de no banco constar como falha) Nota Técnica n2 064/2010/SGH-ANA Vazões geradas a partir da curva-chave
26	2001	2001	15/06/2001	7:00	780	539,76	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
27	2002	2002	21/6/2002	17:00	756	479,19	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
28	2003	2003	06/09/2003	7:00	755	476,73	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
29	2004	2004	15/06/2004	7:00	733	424,07	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

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 (m ³ /s)	Observações
30	2005	2005	04/06/2005	7:00	810	619,77	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
31	2007	2007	28/06/2007	7:00	709	369,66	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
32	2008	2008	18/05/2008	7:00	814	630,80	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
33	2009	2009	11/06/2009	7:00	748	459,69	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
34	2010	2010	18/06/2010	-	1238	2239,43	Nivelamento da marca de cheia (ENGECON) Proj. de Monitoramento de Eventos Hidrológicos Extremos Vazões geradas a partir da curva-chave
35	2011	2011	01/08/2011	7:00	764	499,04	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
36	2012	2012	20/08/2012	7:00	512	61,92	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
37	2013	2013	04/07/2013	17:00	720	394,20	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
38	2014	2014	07/10/2014	7:00	741	442,91	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
39	2015	2015	04/07/2015	17:00	664	276,40	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
40	2016	2016	30/05/2016	7:00	510	60,00	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
41	2017	2017	29/05/2017	7:00	831	678,58	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
42	2018	2018	01/05/2018	17:00	726	407,87	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
43	2019	2019	18/08/2019	7:00	649	247,92	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

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	01/01/1974 a 28/07/1998	29/07/1998 a 31/12/2019
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	420	390
		608	612
	a	57,64746528	60
	h_0 (m)	4,20	4,10
	n	1,50	1,59
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	608	612
		1100	1050
	a	36	56
	h_0 (m)	3,97	4,15
	n	1,90	1,75

ANEXO III

Estatísticas da série

Vídeos na INTERNET sobre alguns grandes eventos de cheia no rio Mundaú:

São José da Laje (1969): <https://www.youtube.com/watch?v=q8h4PUcc-wc>
 Reportagem da TV Globo (2010): <https://www.youtube.com/watch?v=Q9AAMgu6UXM>
 Fantástico (TV Globo), (2010): <https://www.youtube.com/watch?v=KnZqmcjIPAQ>
 União dos palmares (2010): <https://www.youtube.com/watch?v=JJRXep6XgTk>
 Santana do Mundaú, 18/06/2010: <https://www.youtube.com/watch?v=kCAXw6LdR5I>

Estatísticas da série de Vazões Máximas por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez)

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
480,0	370,7	2239,4	60,0	2179,4	3,0	428,0	277,0	540,0	263,0

Estatísticas da série transformada: Ln(X)

Média	Desvio- Padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	Assimetria	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	AIQ
5,94876	0,70500	7,71398	4,09434	3,61963	-0,57677	6,05905	5,62394	6,29156	0,66763

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
479,9842	166,8942	0,3477	0,3119	0,3467

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

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
5,9488	0,3767	0,0633	-0,1231	0,2675

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

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

Distribuição	Posição (μ)	Escala (σ)
Log-Normal (μ, σ)	5,9488	0,6676



Disponibilidade hídrica do Brasil

Estudos de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta

Endereços

Brasília/DF - Sede

Setor Bancário Norte - SBN
Quadra 02, Asa Norte
BLoço H - Edifício Central Brasília
Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Tel.: (61) 2108-8400

Escritório do Rio de Janeiro

Avenida Pasteur, 404 - Urca
Rio de Janeiro - RJ - Brasil
CEP: 22290-255
Tel.: (21) 2295-0032

Superintendência de DWXWSUREG/D7

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

