

Desenvolvido por:



FUNDAÇÃO
renova

**RELATÓRIO TÉCNICO – ATUALIZAÇÃO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS
ESTUDO DE MANCHA DE INUNDAÇÃO ENTRE OS TRECHOS T13 A T16**

Dezembro/2020



**RELATÓRIO TÉCNICO – ATUALIZAÇÃO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS
ESTUDO DE MANCHA DE INUNDAÇÃO ENTRE OS TRECHOS T13 A T16**

Belo Horizonte / Dezembro de 2020

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	8
3	BASE DE DADOS.....	8
4	CURVAS-CHAVE E ANÁLISE DE FREQUÊNCIA.....	11
4.1	Estação Fazenda Cachoeira D’Antas (56425000).....	12
4.2	Estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000)	14
4.3	Estação Belo Oriente (56719998).....	16
4.4	Estação Governador Valadares (56850000).....	18
4.5	Estação Tumiritinga (56920000).....	20
4.6	Estação Resplendor Jusante (56948005).....	22
4.7	Estação Colatina (56994500)	24
5	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	26
5.1	Definição das vazões nos trechos.....	30
5.2	Cálculo das vazões das cheias de 2016 e 2020	35
6	CONCLUSÃO	45

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Localização das estações fluviométricas analisadas.	10
Figura 4.1 – Curva-chave Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	12
Figura 4.2 – Distribuição de probabilidade Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	13
Figura 4.3 – Distribuição escolhida para Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	13
Figura 4.4 – Curva-chave Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	14
Figura 4.5 – Distribuição de probabilidade Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	15
Figura 4.6 – Distribuição escolhida para a Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	15
Figura 4.7 – Curva-chave Estação Belo Oriente.	16
Figura 4.8 – Distribuição de probabilidade Estação Belo Oriente.	17
Figura 4.9 – Distribuição escolhida para a Estação Belo Oriente.	17
Figura 4.10 – Curva-chave Estação Governador Valadares.	18
Figura 4.11 – Distribuição de probabilidade Estação Governador Valadares.	19
Figura 4.12 – Distribuição escolhida para a Estação Governador Valadares.	19
Figura 4.13 – Curva-chave Estação Tumiritinga.	20
Figura 4.14 – Distribuição de probabilidade Estação Tumiritinga.	21
Figura 4.15 – Distribuição escolhida para a Estação Tumiritinga.	21
Figura 4.16 – Curva-chave Estação Resplendor Jusante.	22
Figura 4.17 – Distribuição de probabilidade Estação Resplendor Jusante.	23
Figura 4.18 – Distribuição escolhida para a Estação Resplendor Jusante.	23
Figura 4.19 – Curva-chave Estação Colatina.	24
Figura 4.20 – Distribuição de probabilidade Estação Colatina.	25
Figura 4.21 – Distribuição escolhida para a Estação Colatina.	25
Figura 5.1 – Curva regional distribuição Exponencial.	29
Figura 5.2 – Curva regional distribuição Gumbel.	29
Figura 5.3 – Curva Regional.	30
Figura 5.4 – Localização dos Pontos de Controle e Áreas de Drenagem.	34
Figura 5.5 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	36
Figura 5.6 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	36
Figura 5.7 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Belo Oriente.	37
Figura 5.8 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Governador Valadares.	37
Figura 5.9 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Tumiritinga.	38
Figura 5.10 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Colatina.	38
Figura 5.11 – Fluviograma janeiro de 2020 Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	39
Figura 5.12 – Fluviograma janeiro de 2020 Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	39
Figura 5.13 – Fluviograma janeiro de 2020 Estação Belo Oriente.	40
Figura 5.14 – Fluviograma janeiro de 2020 Estação Governador Valadares.	40
Figura 5.15 – Fluviograma janeiro de 2020 Estação Colatina.	41
Figura 5.16 – Curvas representativas para a cheia de 2016.	43
Figura 5.17 – Curvas representativas para a cheia de 2020.	43

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Estações fluviométricas analisadas.....	9
Tabela 5.1 – Principais parâmetros estações utilizadas.....	26
Tabela 5.1 – Parâmetros regionais distribuição de probabilidade Exponencial.....	27
Tabela 5.2 – Parâmetros regionais distribuição de probabilidade Gumbel.....	27
Tabela 5.3 – Área de drenagem e $Q_{med-máx}$ das estações.....	29
Tabela 5.4 – Quantis de frequência para as curvas Exponencial e Gumbel.....	31
Tabela 5.5 – Vazões obtidas por regionalização – TR de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.....	32
Tabela 5.6 – Vazões máximas anos hidrológicos de 2016-2017 e 2019-2020 e TR associados.....	42
Tabela 5.7 – Quantis de frequência para as curvas Exponencial e Gumbel.....	44

1 INTRODUÇÃO

Neste documento é apresentada a atualização dos estudos hidrológicos que compreende uma das atividades para o desenvolvimento dos serviços objeto do Contrato nº 4800019842, firmado entre a FUNDAÇÃO RENOVA e a HIDROBR Consultoria LTDA, que compreende a prestação de serviço do projeto de Modelagem Hidrodinâmica do Rio Doce entre a UHE Risoleta Neves e a foz (trechos 13 a 16). Esse estudo consiste em uma revisão do Estudo Expedito de Inundação do rio Doce (elaborado pela SRK e HIDROBR), emitido em 29 de abril de 2019.

A elaboração do projeto consiste no desenvolvimento das seguintes atividades:

- Análise de dados básicos disponibilizados;
- Elaboração do modelo digital de terreno (MDT);
- Atualização dos estudos hidrológicos;
- Visita de campo;
- Levantamento das seções topobatimétricas complementares;
- Modelagem hidrodinâmica, conforme Ofício FEAM/CT - GRSA nº. 62/2020;
- Elaboração de memorial descritivo e mapas; e
- Apresentação de resultados.

Nessa atualização são apresentados os estudos realizados para cálculo das vazões notáveis, com tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, além das vazões das cheias naturais ocorridas em dezembro de 2016 e janeiro de 2020, no trecho de interesse para o estudo de Modelagem Hidrodinâmica do rio Doce entre a UHE Risoleta Neves e a Foz (trechos 13 a 16).

Para melhor compreensão, além deste item introdutório, este documento está dividido da seguinte maneira:

- Item 2: apresentação do objetivo dos estudos;
- Item 3: apresentação dos dados básicos utilizados;

- Item 4: apresentação dos estudos de análise e consistência dos dados hidrológicos;
- Item 5: apresentação dos estudos de regionalização;
- Item 6: item de conclusões e recomendações finais.

2 OBJETIVO

Este documento tem como objetivo detalhar a metodologia empregada para o cálculo das vazões para a modelagem hidráulica, assim como apresentar a análise dos dados de monitoramento disponíveis até o presente momento.

3 BASE DE DADOS

Para o desenvolvimento da regionalização de vazões foram analisadas estações fluviométricas existentes na bacia do rio Doce no trecho entre a UHE Risoleta Neves e a foz, cujos registros encontram-se disponíveis gratuitamente no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas - ANA. A **Tabela 3.1** apresenta as estações analisadas e a **Figura 3.1** ilustra a localização

A Fundação Renova disponibiliza por meio do site <http://www.monitoramentoriodoce.org/> os dados de monitoramento do Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS). Esses dados não foram utilizados neste trabalho uma vez que existe um histórico pequeno de dados, já que o esse monitoramento foi implementado a partir de 31 de julho de 2017, o que não possibilita uma análise estatística robusta para este fim aqui proposto.

Tabela 3.1 – Estações fluviométricas analisadas.

Código	Nome	Rio	Latitude	Longitude	Área de Drenagem (km ²)	Quantidade de anos consistidos dentro do período homogêneo	Disponibilidade de Dados
56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	Rio Doce	-19,9944	-42,6744	10100	32	De 22/11/1981 a 31/01/2020
56430000*	Ponte do Peres	Rio Doce	-19,9	-42,5833	12800	0	De 01/07/1968 a 31/01/1978
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Rio Doce	-19,7769	-42,4764	15900	32	De 13/09/1974 a 31/01/2020
56540001*	Cachoeira dos Óculos	Rio Doce	-19,7667	-42,4833	16100	0	De 21/10/1972 a 31/08/1975
56719998	Belo Oriente	Rio Doce	-19,3297	-42,3761	24200	33	De 18/10/1986 a 31/01/2020
56720000*	Cachoeira Escura	Rio Doce	-19,3314	-42,3717	24200	0	De 26/08/1939 a 31/08/1986
56850000	Governador Valadares	Rio Doce	-18,8831	-41,9508	40500	33	De 15/01/1938 a 31/01/2020
56920000	Tumiritinga	Rio Doce	-18,9711	-41,6417	55100	32	De 01/07/1972 a 31/03/2019
56941000*	Barra Do Cuieté	Rio Doce	-19,0664	-41,5356	59500	0	De 01/01/1972 a 30/11/1979
56948000*	Resplendor	Rio Doce	-19,3167	-41,25	61200	0	De 06/01/1938 a 30/11/1982
56948005	Resplendor – Jusante	Rio Doce	-19,3431	-41,2461	61200	14	De 01/05/1984 a 31/10/2004
56994500	Colatina	Rio Doce	-19,5333	-40,6297	76400	31	De 01/01/1938 a 31/01/2020
56994502*	Colatina – Jusante	Rio Doce	-19,5333	-40,6333	76400	0	De 18/09/1976 a 31/05/1983
56994510*	Colatina Corpo de Bombeiros (Linígrafo)	Rio Doce	-19,5303	-40,6236	76400	26	De 17/10/1985 a 30/11/2014
56998000*	Linhares	Rio Doce	-19,4075	-40,0639	82100	5	De 01/01/1967 a 09/12/1993

*Estações descartadas por apresentarem série histórica de medição inferior a 20 anos e/ou inconsistência de dados e/ou período de dados fora do período homogêneo de 1986 a 2020. A estação Colatina Corpo de Bombeiros, esta foi descartada, em razão da proximidade com a estação Colatina, que possui série histórica mais completa.

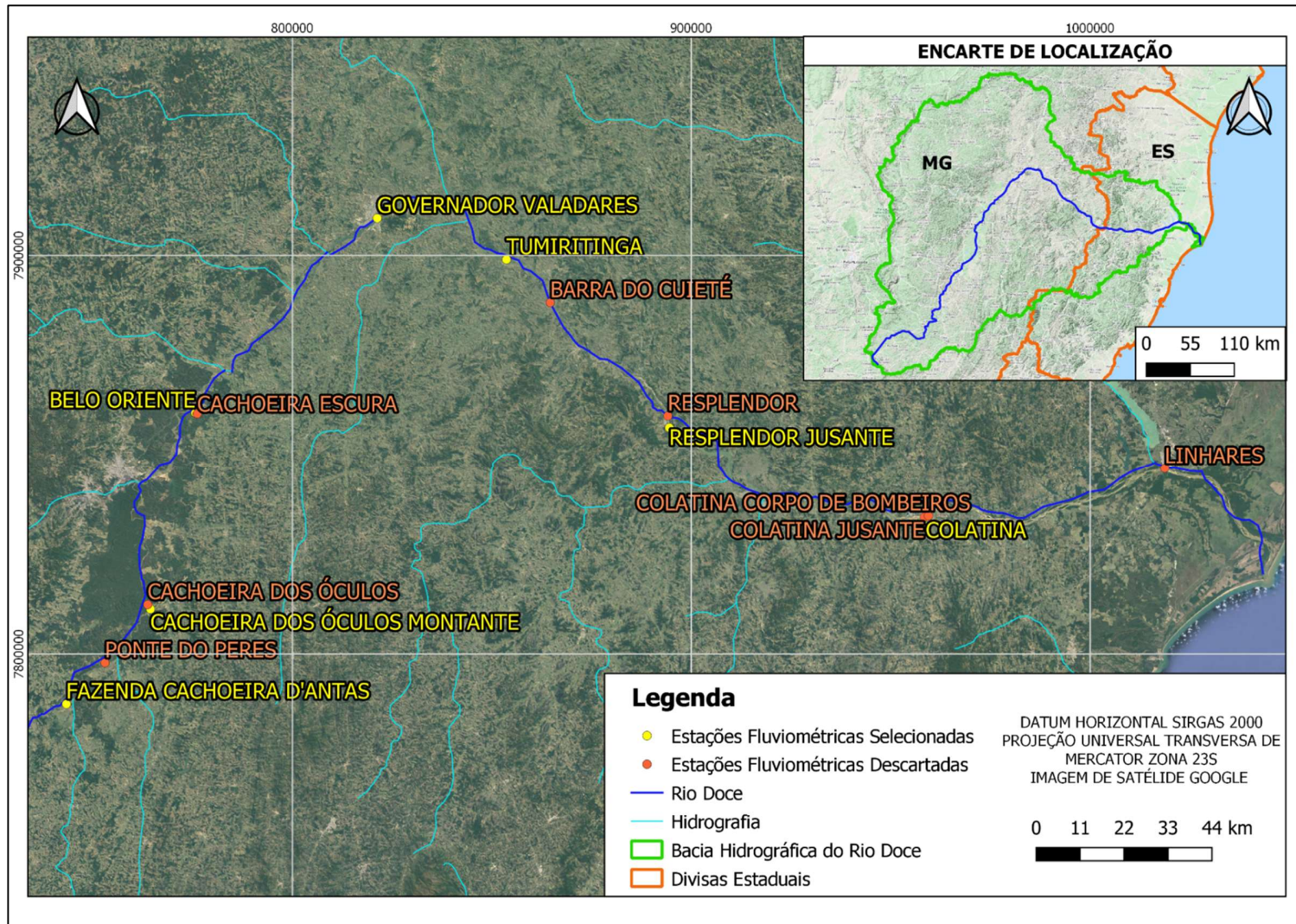


Figura 3.1 – Localização das estações fluviométricas analisadas.

Para o estudo de regionalização foi realizada a consistência dos registros diários de vazão das estações fluviométricas da **Tabela 3.1** que apresentam série histórica superior a 20 anos dentro do período homogêneo de 1986 a 2020, descartando os anos com falhas nos meses de cheia.

As estações fluviométricas selecionadas para o desenvolvimento do estudo foram Fazenda Cachoeira D'Antas, Cachoeira dos Óculos Montante, Belo Oriente, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor-Jusante e Colatina.

4 CURVAS-CHAVE E ANÁLISE DE FREQUÊNCIA

As séries de medições dos resumos de descarga das estações selecionadas foram analisadas quanto a consistência e *outliers*. Os dados consistidos foram analisados graficamente em conjunto com os dados de medições diárias, de modo a avaliar suas aderências e comportamento da curva-chave.

Após a análise de consistência e aderência dos dados, foi realizada a análise de frequência das estações com séries de medições consistentes. Foram analisadas as seguintes distribuições teóricas de probabilidade: Exponencial, Gumbel e Lognormal. Salienta-se que não foram analisadas curvas teóricas de 3 parâmetros em razão da pouca disponibilidade de dados, inferior à 50 amostras, critério adotado pela HIDROBR para adoção do terceiro parâmetro, o qual induz a uma grande sensibilidade do ramo superior das curvas de ajuste quando analisadas curvas com poucos dados amostrais, enviesando os resultados. Tal critério é também citado no livro “Hidrologia Estatística” dos autores Mauro Naghettini e Éber José Andrade Pinto, publicado pela CPRM em 2007.

Conforme será detalhado nos subitens a seguir, onde são apresentadas as curvas-chave e análises de frequência para cada estação utilizada, verificou-se que as estações Fazenda Cachoeira d'Antas, Cachoeira dos Óculos Montante e Belo Oriente apresentaram melhor ajuste à distribuição de probabilidade pela curva Exponencial, enquanto para as demais estações em estudo, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor Jusante e Colatina, um melhor ajuste foi observado para a curva de Gumbel.

4.1 Estação Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000)

A estação Fazenda Cachoeira D'Antas, posicionada no rio Doce, no município São José do Goiabal/MG, possui uma área de drenagem de 10.100 km² e apresenta dados diários de vazão entre 22/11/1981 e 31/01/2020 e 135 medições de cota e vazão entre 22/11/1981 e 05/02/2020 presentes no Resumo de Descargas. A **Figura 4.1** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes à tendência do Resumo de Descargas.

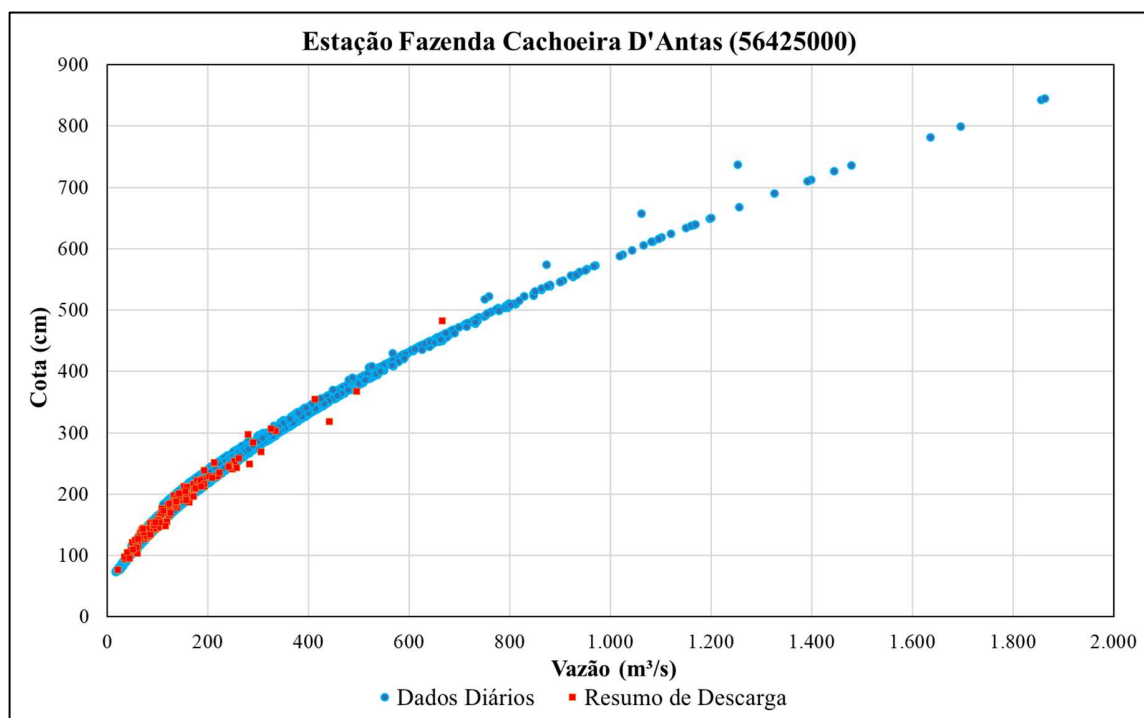


Figura 4.1 – Curva-chave Estação Fazenda Cachoeira D'Antas.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Exponencial, como pode ser visto nas **Figura 4.2** e **Figura 4.3**.

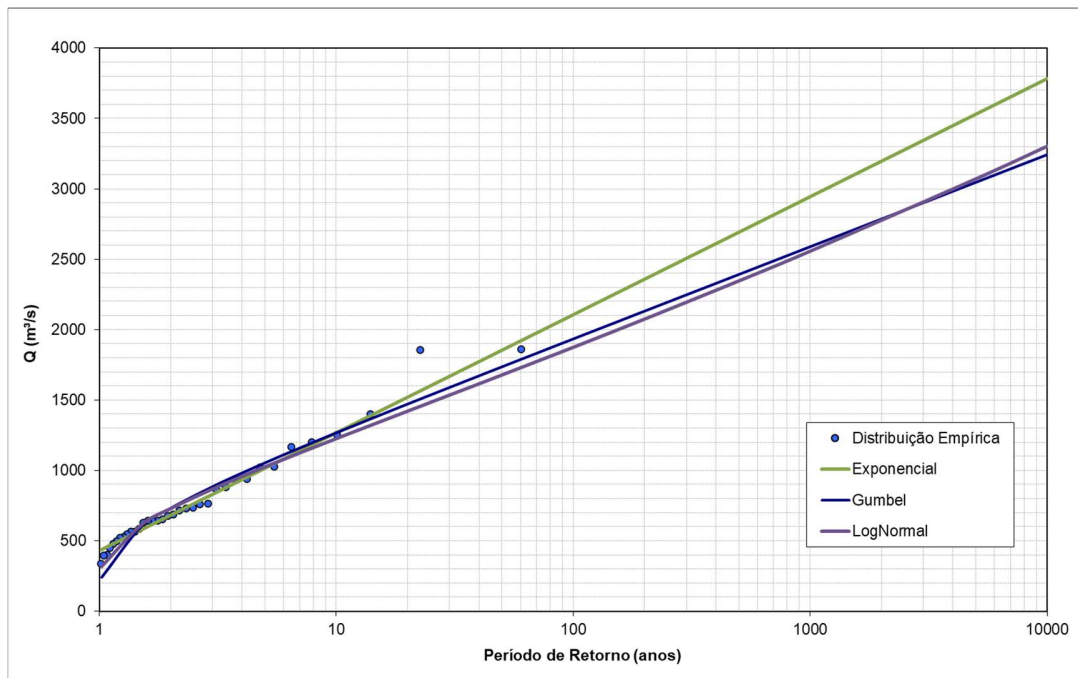


Figura 4.2 – Distribuição de probabilidade Estação Fazenda Cachoeira D'Antas.

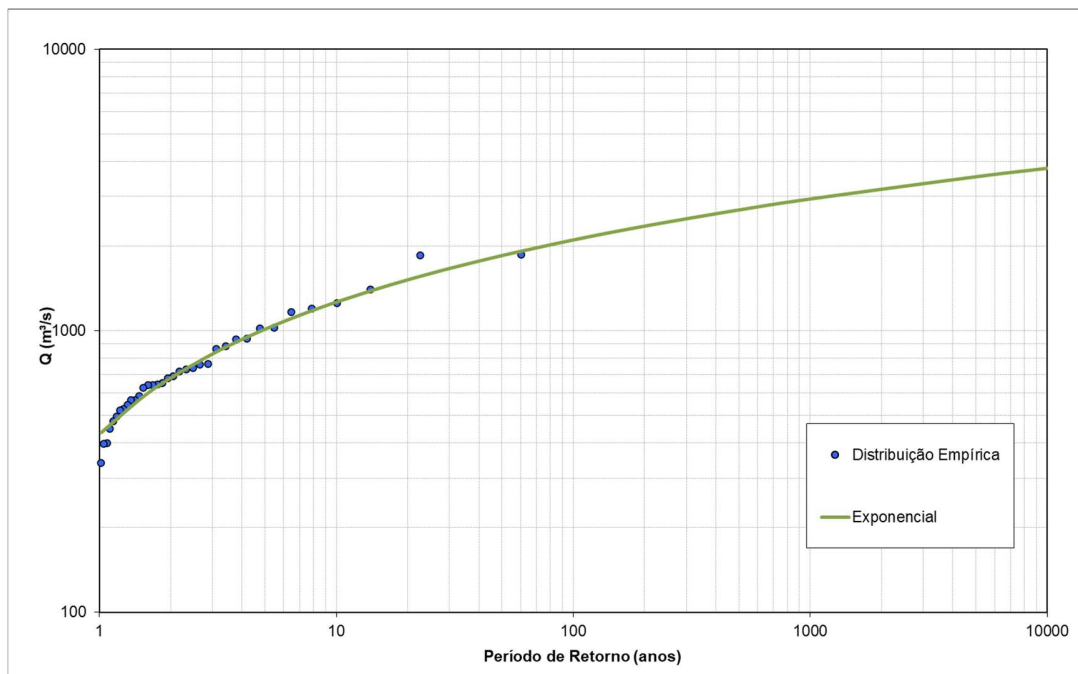


Figura 4.3 – Distribuição escolhida para Estação Fazenda Cachoeira D'Antas.

4.2 Estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000)

A estação Cachoeira dos Óculos Montante, localizada no rio Doce, no município de Córrego Novo/MG, possui uma área de drenagem de 15.900 km² e apresenta dados diários de vazão entre 13/09/1974 e 31/01/2020 e 155 medições de cota e vazão entre 16/01/1974 e 31/01/2020 presentes no Resumo de Descargas. A **Figura 4.4** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes à tendência do Resumo de Descargas.

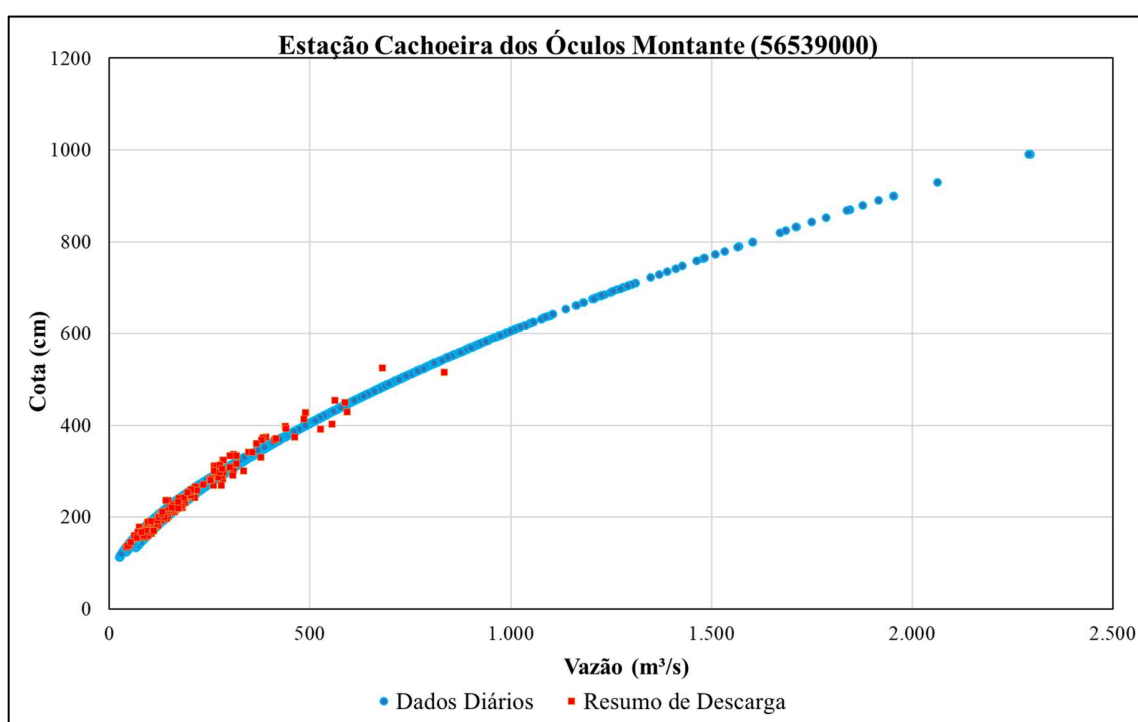


Figura 4.4 – Curva-chave Estação Cachoeira dos Óculos Montante.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Exponencial, como pode ser visto nas **Figura 4.5** e **Figura 4.6**.

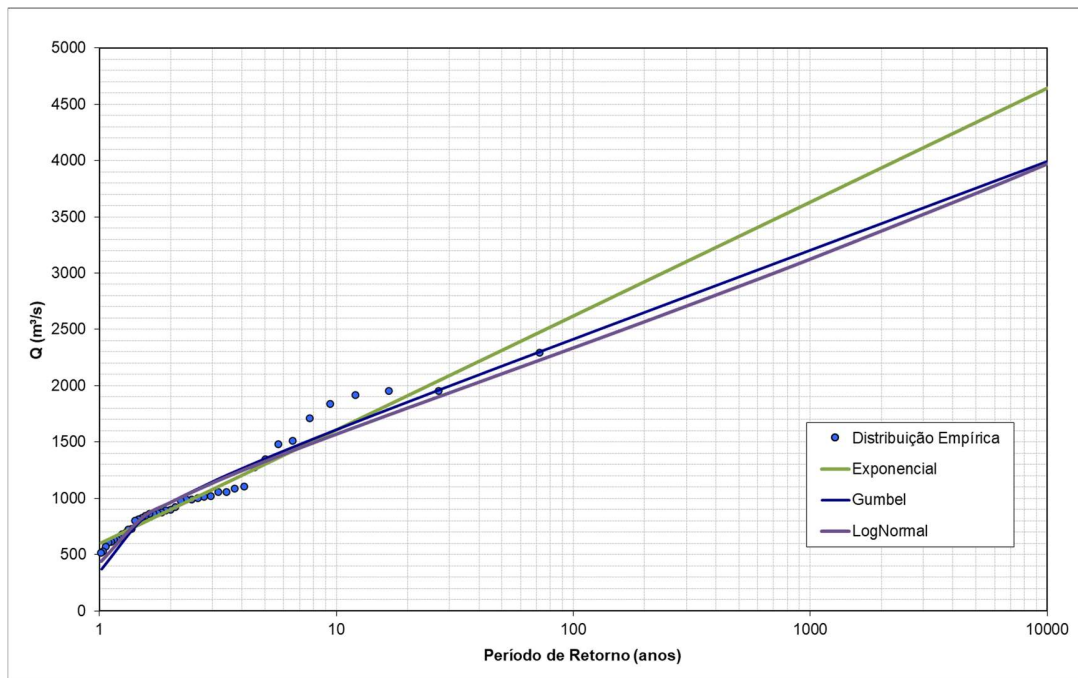


Figura 4.5 – Distribuição de probabilidade Estação Cachoeira dos Óculos Montante.

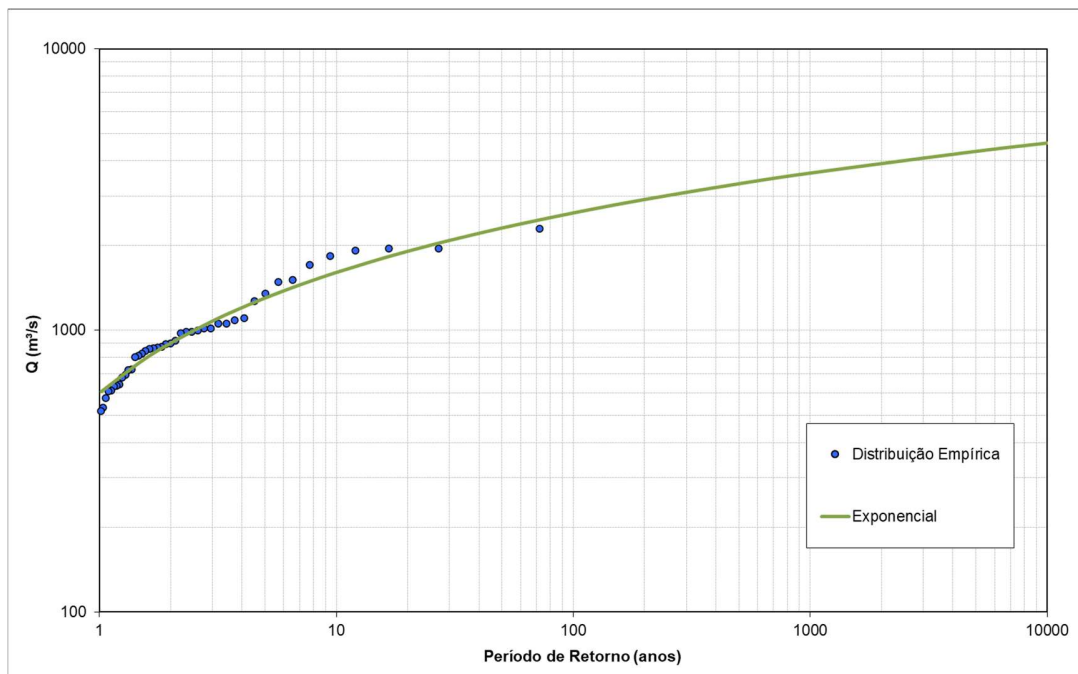


Figura 4.6 – Distribuição escolhida para a Estação Cachoeira dos Óculos Montante.

4.3 Estação Belo Oriente (56719998)

A estação Belo Oriente, localizada no rio Doce, no município de Belo Oriente/MG, possui uma área de drenagem de 24.200 km² e apresenta dados diários de vazão entre 18/10/1986 e 31/01/2020 e 108 medições de cota e vazão entre 14/07/1987 e 29/01/2020 presentes no Resumo de Descargas.

A **Figura 4.7** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes às tendências do Resumo de Descargas. É importante ressaltar que há duas tendências divididas em dois períodos, sendo o primeiro entre 01/01/1986 e 30/06/2015 e o segundo entre 01/07/2015 e 31/01/2020.

Esta instabilidade da curva-chave ocorre, pois o rio Doce possui, em alguns trechos, o leito móvel, em razão da elevada quantidade de arraste de material de fundo. Essa condição gera uma alteração da calha a cada grande evento de cheia, podendo ser encontradas diferentes relações Cota vs Vazão, conforme pode ser observado nesta estação, a qual apresenta duas tendências.

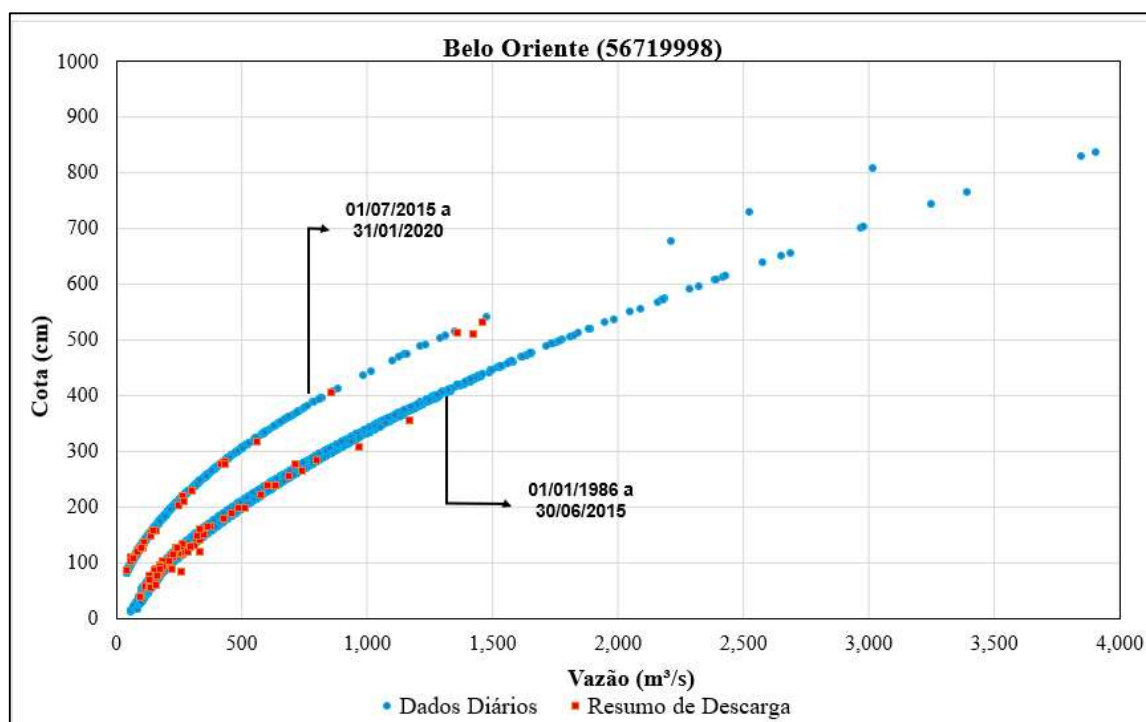


Figura 4.7 – Curva-chave Estação Belo Oriente.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Exponencial, como pode ser visto nas **Figura 4.8** e **Figura 4.9**.

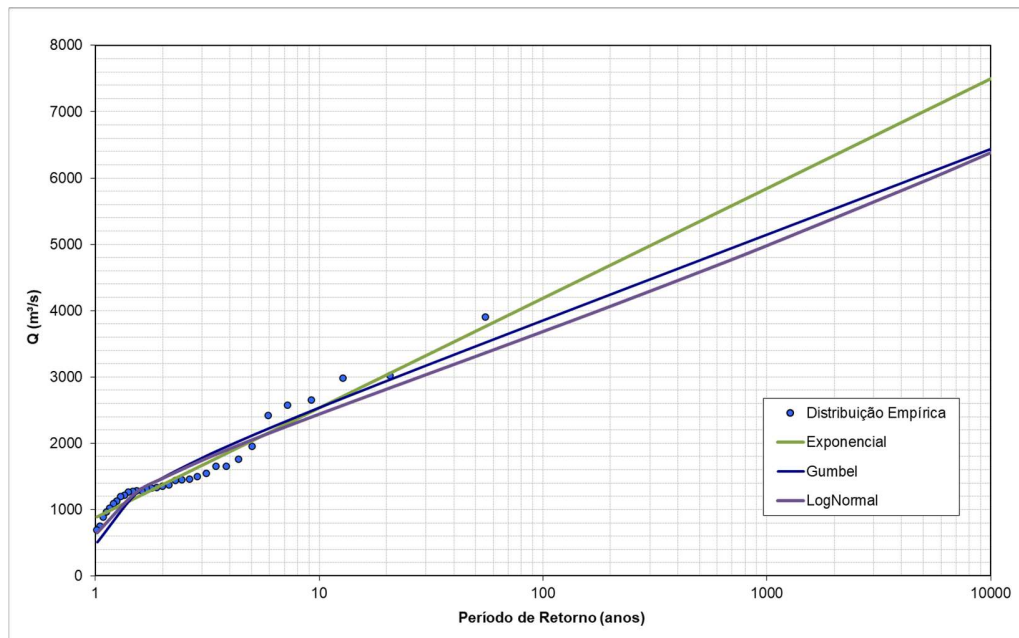


Figura 4.8 – Distribuição de probabilidade Estação Belo Oriente.

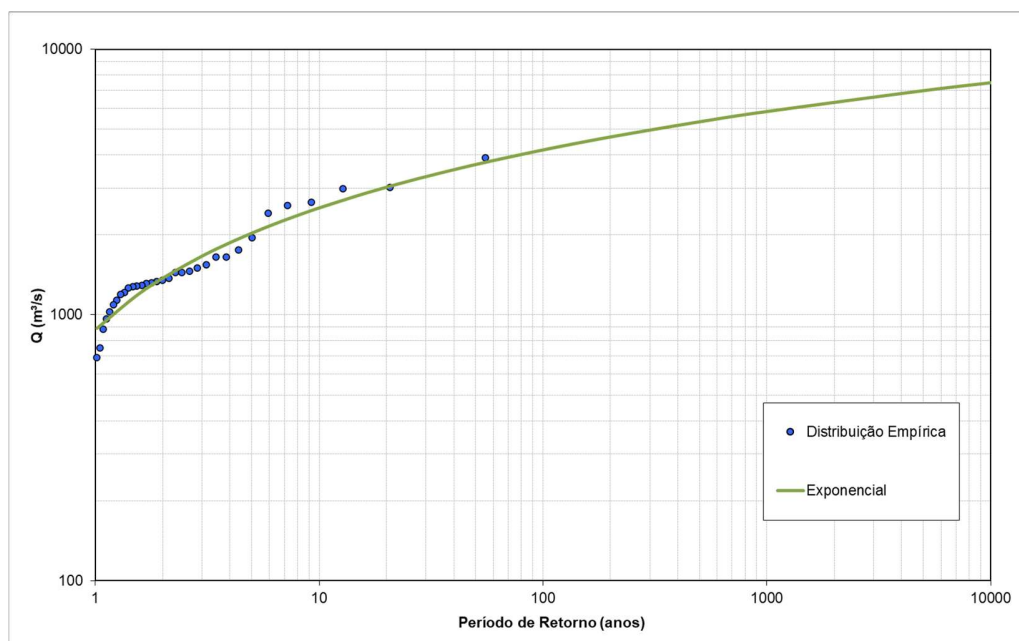


Figura 4.9 – Distribuição escolhida para a Estação Belo Oriente.

4.4 Estação Governador Valadares (56850000)

A estação Governador Valadares, posicionada no rio Doce, no município de Governador Valadares/MG, possui uma área de drenagem de 40.500 km² e apresenta dados diários de vazão entre 15/01/1938 e 31/01/2020 e 163 medições de cota e vazão entre 26/06/1969 e 11/02/2020 presentes no Resumo de Descargas. A **Figura 4.10** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes à tendência do Resumo de Descargas.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Gumbel, como pode ser visto nas **Figura 4.11** e **Figura 4.12**.

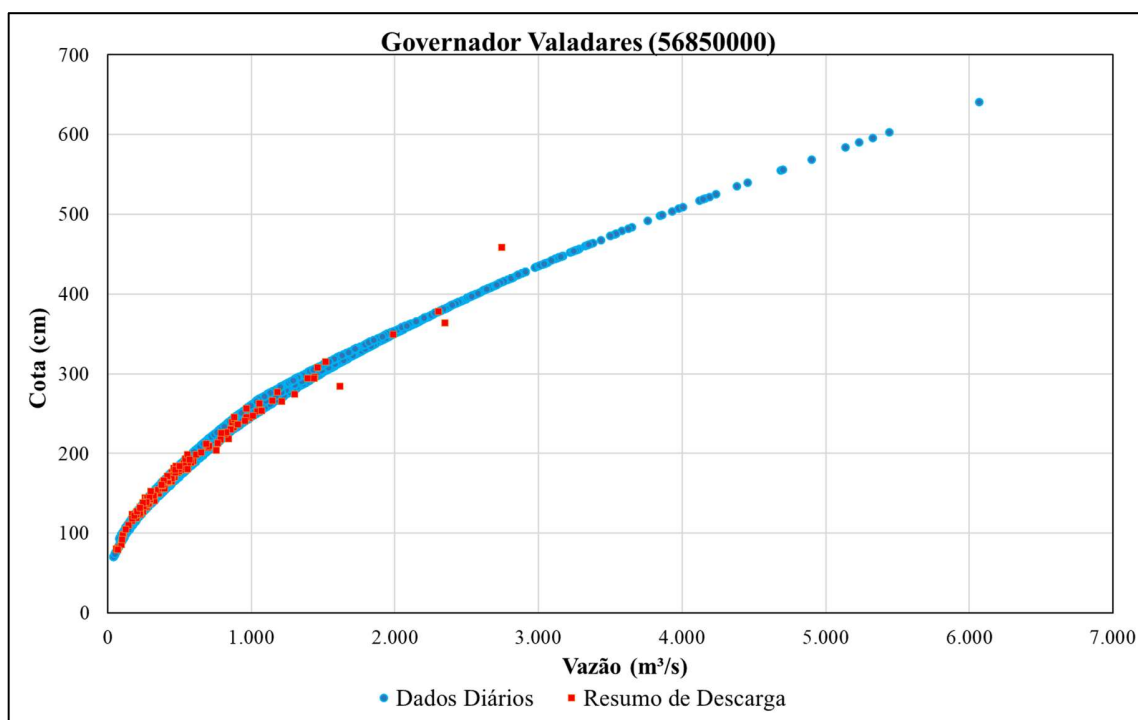


Figura 4.10 – Curva-chave Estação Governador Valadares.

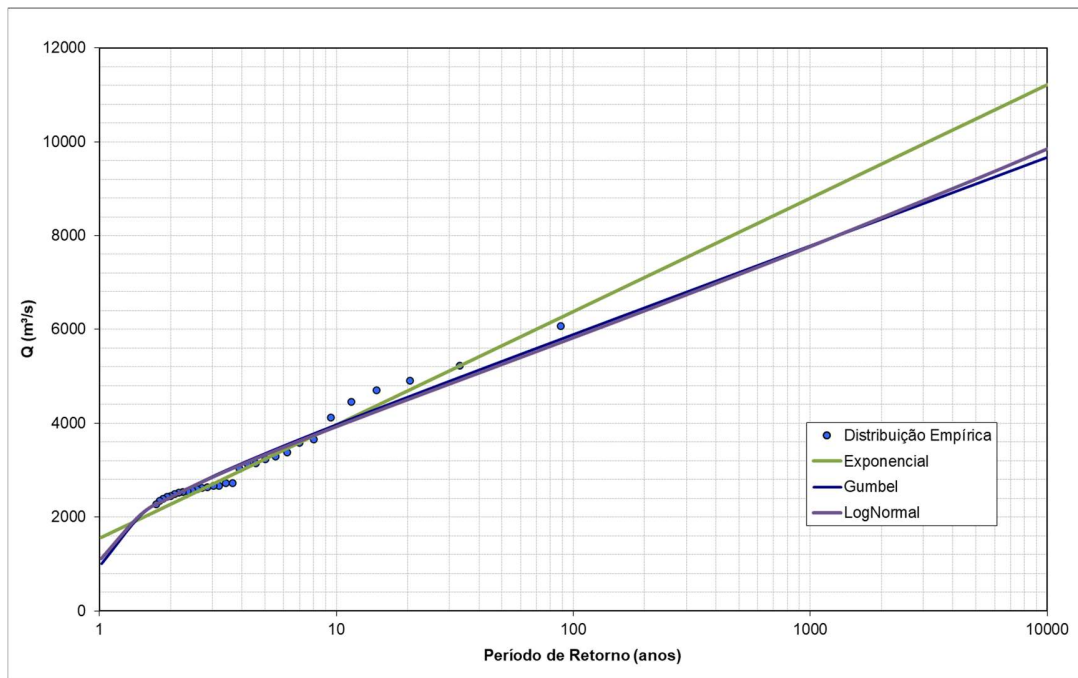


Figura 4.11 – Distribuição de probabilidade Estação Governador Valadares.

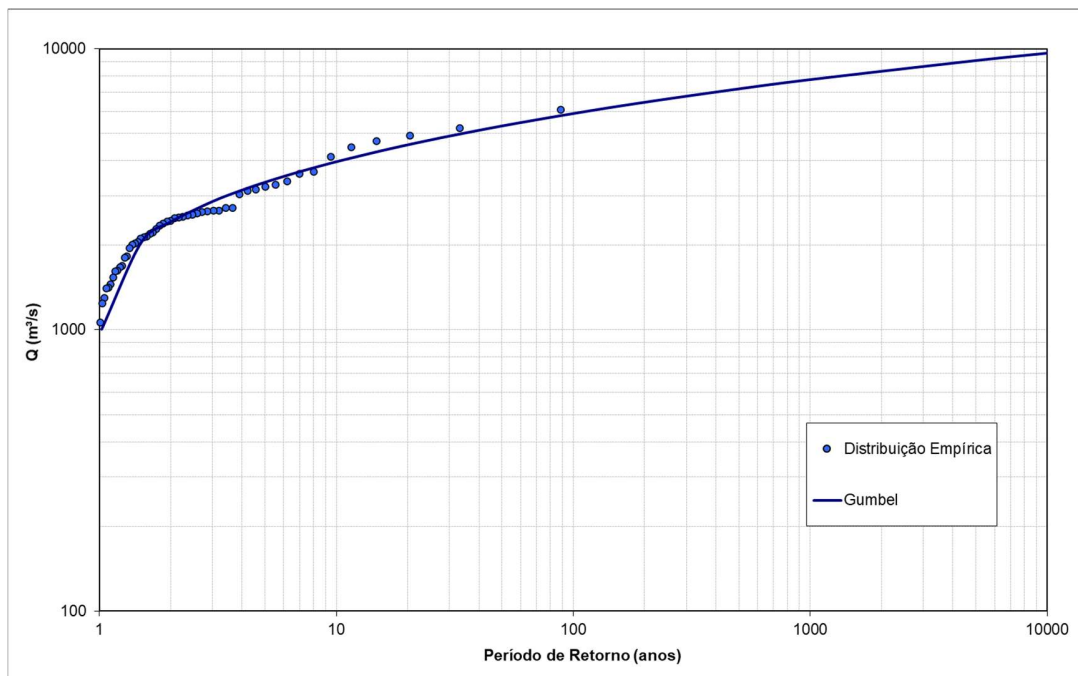


Figura 4.12 – Distribuição escolhida para a Estação Governador Valadares.

4.5 Estação Tumiritinga (56920000)

A estação Tumiritinga, localizada no rio Doce, no município de município de Galiléia/MG, possui uma área de drenagem de 55.100 km² e apresenta dados diários de vazão entre 01/07/1972 e 31/03/2019 e 157 medições de cota e vazão entre 09/10/1972 e 26/09/2019 presentes no Resumo de Descargas. A **Figura 4.13** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes à tendência do Resumo de Descargas.

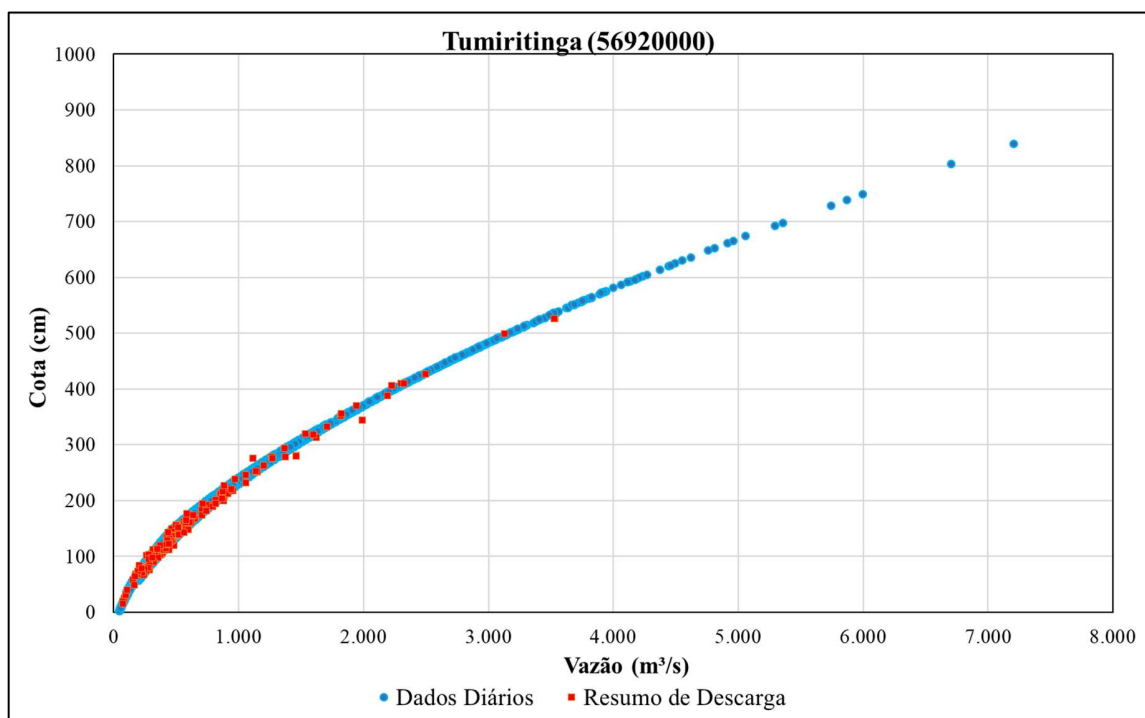


Figura 4.13 – Curva-chave Estação Tumiritinga.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Gumbel, como pode ser visto nas **Figura 4.14** e **Figura 4.15**.

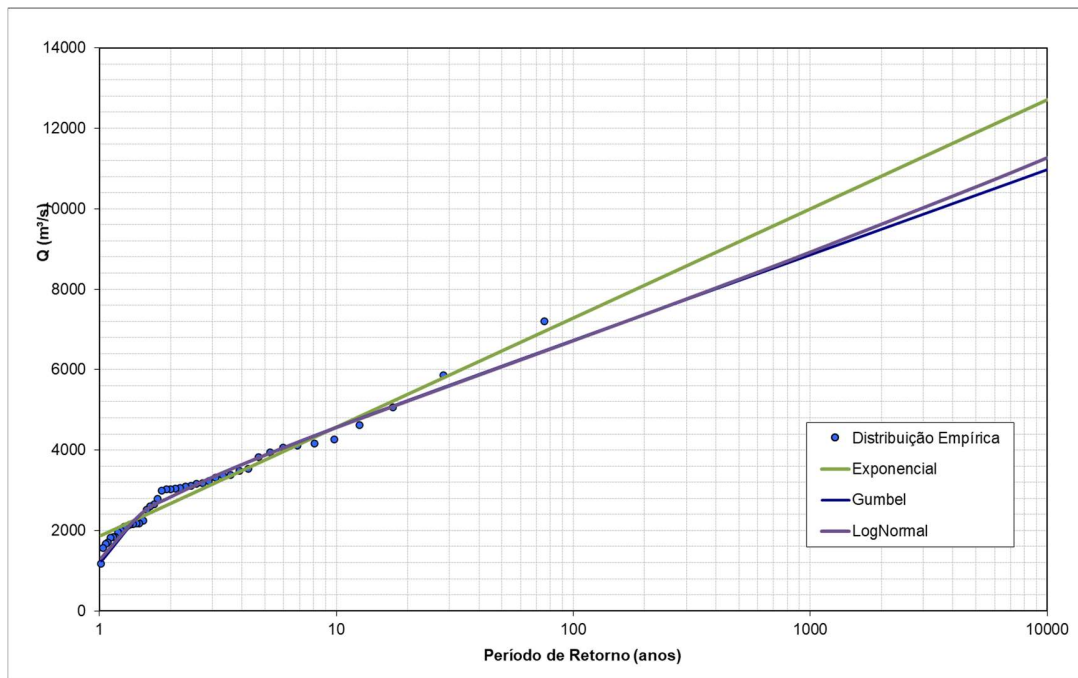


Figura 4.14 – Distribuição de probabilidade Estação Tumiritinga.

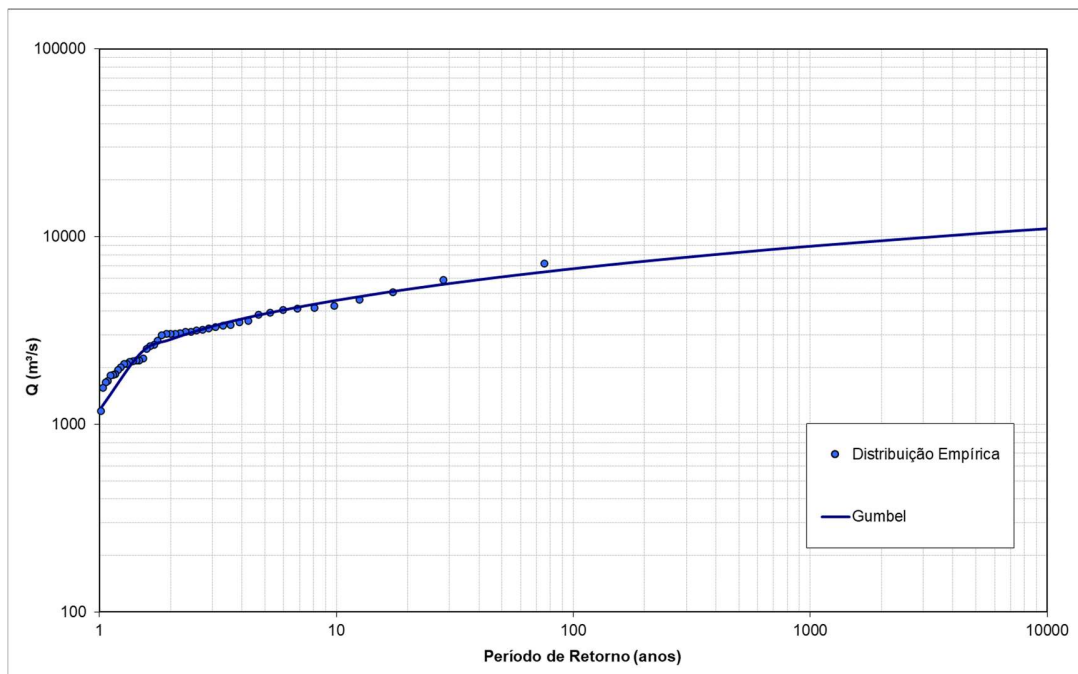


Figura 4.15 – Distribuição escolhida para a Estação Tumiritinga.

4.6 Estação Resplendor Jusante (56948005)

A estação Resplendor Jusante, localizada no rio Doce, no município de Resplendor/MG, possui uma área de drenagem de 61.200 km² e apresenta dados diários de vazão entre 01/05/1984 e 31/10/2004 e 62 medições de cota e vazão entre 21/03/1984 e 06/04/2000 presentes no Resumo de Descargas.

A **Figura 4.16** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes à tendência do Resumo de Descargas. Salienta-se que para esta estação foram disponibilizados os dados apenas até 2004, contudo, por se tratar de dados diários, optou-se por não realizar o preenchimento do período faltante, além disso, trata-se de uma importante estação em termos de posicionamento geográfico, não sendo justificável sua eliminação da análise.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Gumbel, como pode ser visto nas **Figura 4.17** e **Figura 4.18**

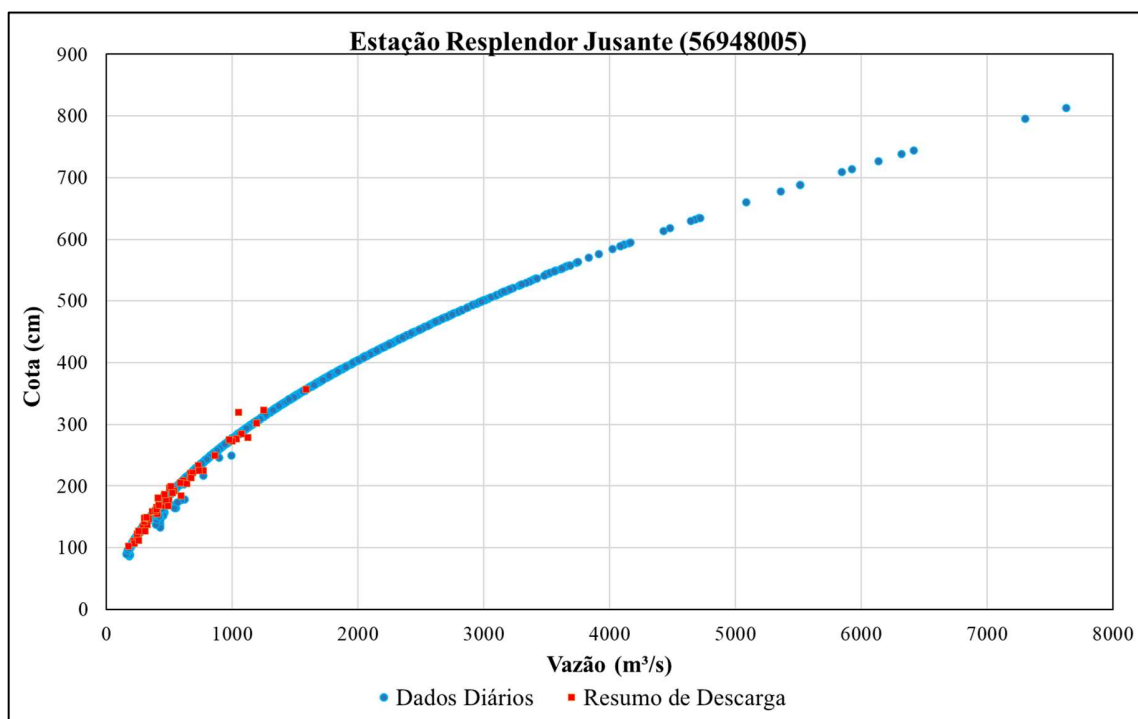


Figura 4.16 – Curva-chave Estação Resplendor Jusante.

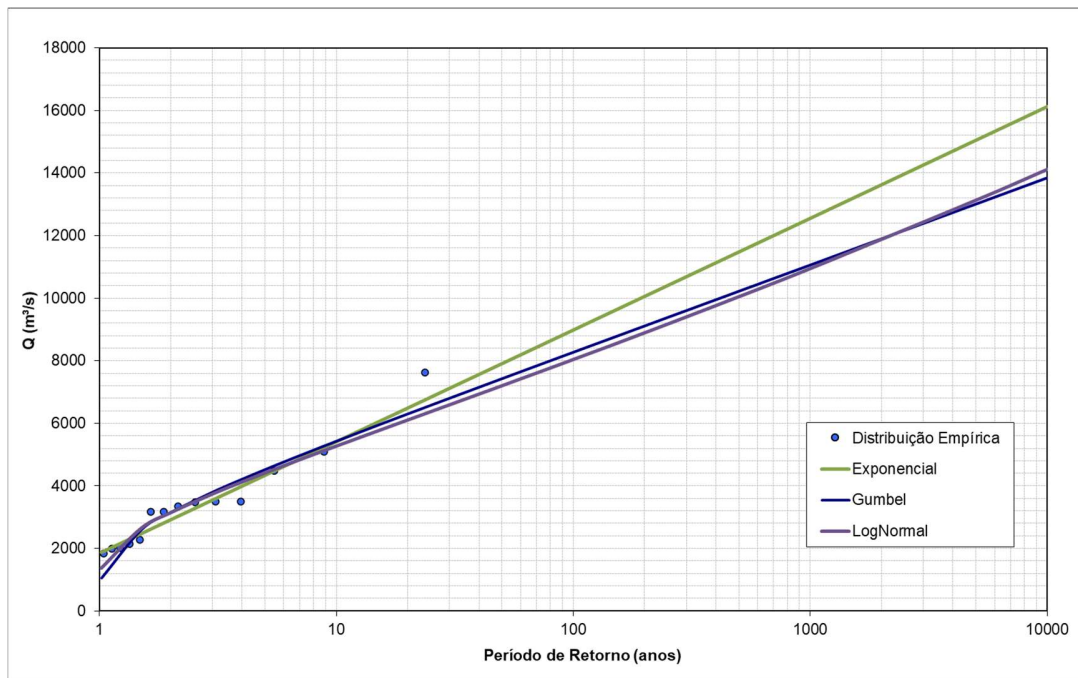


Figura 4.17 – Distribuição de probabilidade Estação Resplendor Jusante.

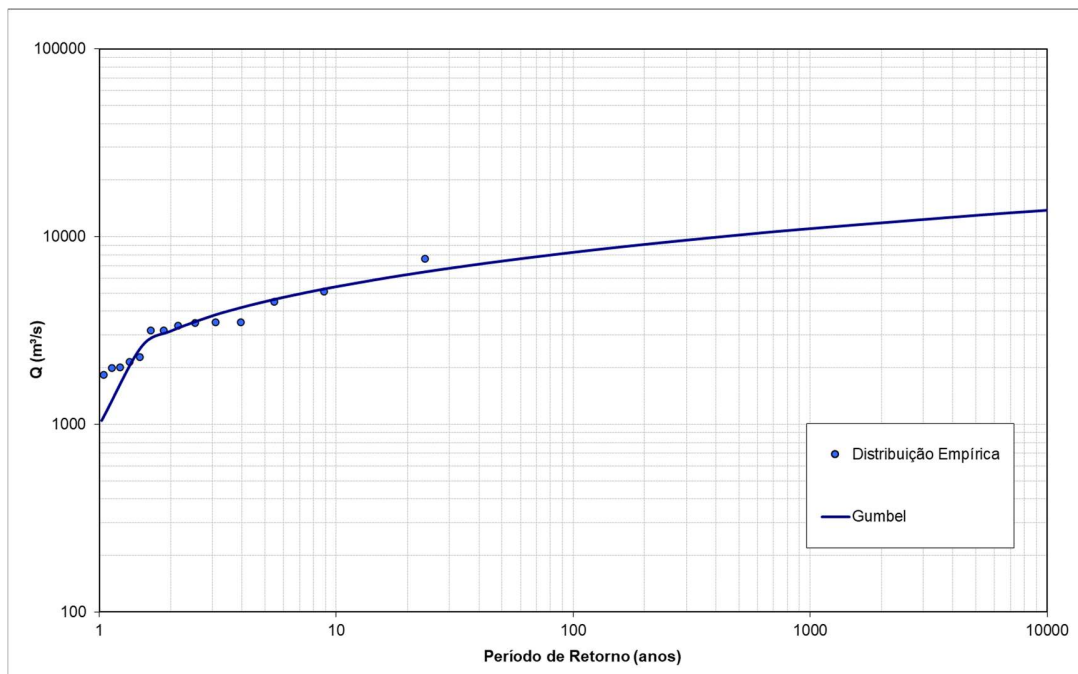


Figura 4.18 – Distribuição escolhida para a Estação Resplendor Jusante.

4.7 Estação Colatina (56994500)

A estação Colatina, localizada no rio Doce, no município de Colatina/ES, possui uma área de drenagem de 76.400 km² e apresenta dados diários de vazão entre 01/01/1938 e 31/01/2020 e 279 medições de cota e vazão entre 23/01/1939 e 30/01/2020 presentes no Resumo de Descargas. A **Figura 4.19** ilustra a curva-chave dessa estação, onde é possível notar que todos os dados diários se apresentam aderentes às tendências do Resumo de Descargas.

Segundo os dados do portal Hidroweb, a estação Colatina apresenta 16 equações de curvas-chave diferentes válidas para períodos distintos. Assim como explicitado no item 4.3, esta instabilidade da curva-chave ocorre pois o Rio Doce possui, em alguns trechos, o leito móvel, em razão da elevada quantidade de arraste de material de fundo. Essa condição gera uma alteração da calha a cada grande evento de cheia, podendo ser encontradas diferentes relações Cota vs Vazão.

A distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou aos dados disponíveis de vazão para esta estação foi a Gumbel, como pode ser visto nas **Figura 4.20** e **Figura 4.21**

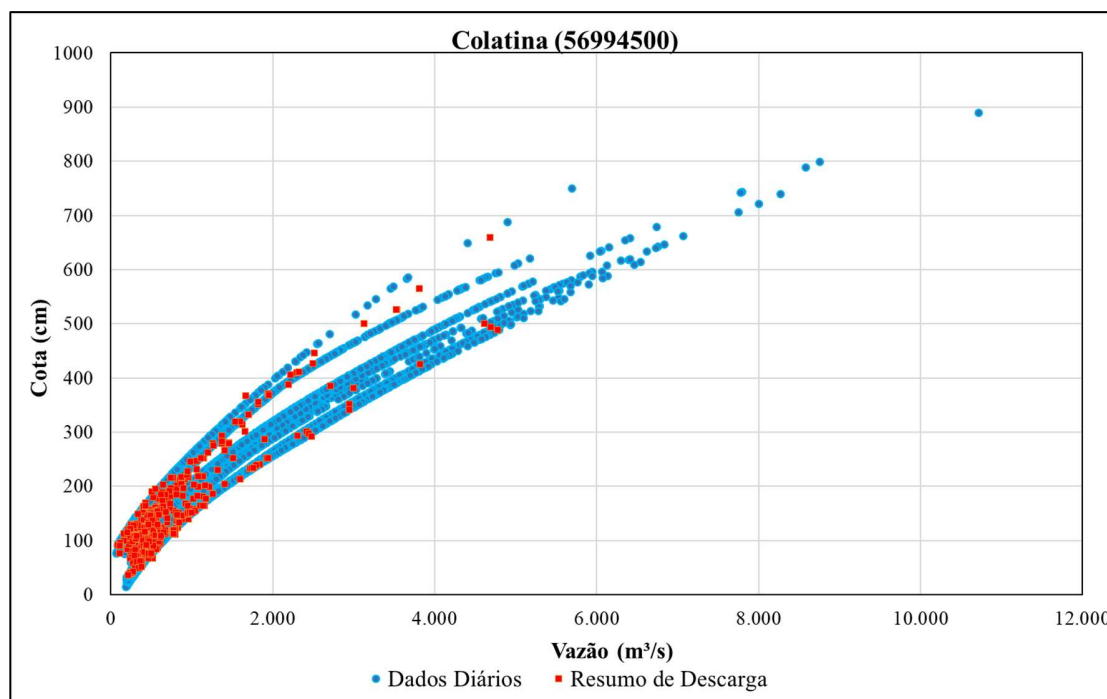


Figura 4.19 – Curva-chave Estação Colatina.

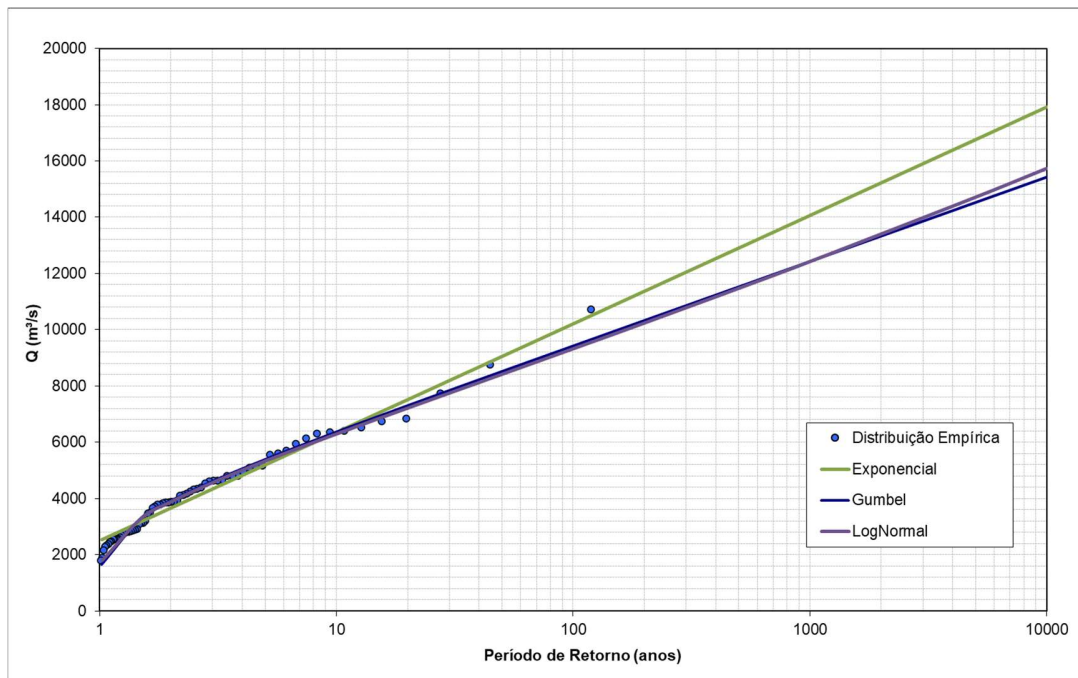


Figura 4.20 – Distribuição de probabilidade Estação Colatina.

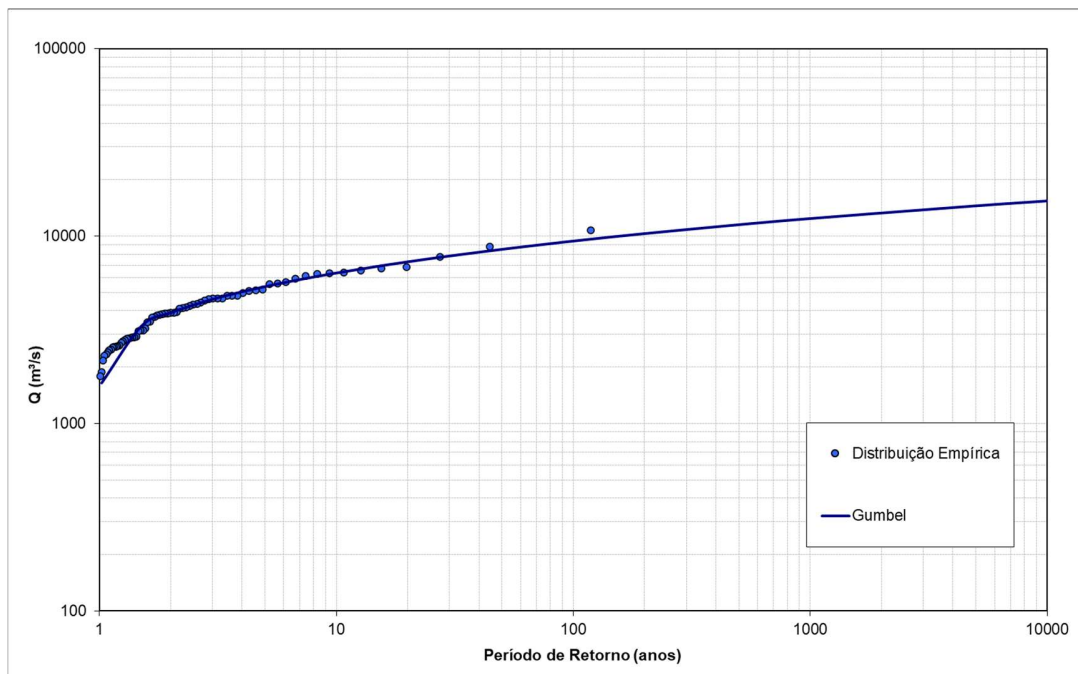


Figura 4.21 – Distribuição escolhida para a Estação Colatina.

A **Tabela 4.1** apresenta os principais parâmetros das estações utilizadas no estudo.

Tabela 4.1 – Principais parâmetros estações utilizadas

Estação	Média	Desvio padrão	Assimetria	Distribuição	Posição	Escala
56425000	792,81	364,04	1,55	Exponencial	428,77	364,04
56539000	1037,59	439,17	1,27	Exponencial	598,42	439,17
56719998	1597,99	719,00	1,59	Exponencial	878,99	719,00
56850000	2597,07	1050,67	1,30	Gumbel	2124,23	819,21
56920000	3031,29	1180,11	1,28	Gumbel	2500,19	920,13
56948005	3400,68	1550,25	1,66	Gumbel	2703,00	1208,73
56994500/ 56994502	4180,31	1672,63	1,30	Gumbel	3427,55	1304,15

5 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Para realizar o cálculo das vazões dos eventos de cheias de 2016 e 2020 e o cálculo das vazões notáveis de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos de tempo de retorno no trecho de interesse foi utilizado o método de regionalização denominado *index-flood*, ou cheia-índice. Este método assume que, em uma região homogênea, as vazões adimensionais (razão entre vazão máxima e fator de adimensionalização) obedecem a uma distribuição de probabilidades única, ou seja, uma mesma distribuição de frequência para os dados avaliados, a partir de um fator de escala local denominado *index-flood* ou fator de adimensionalização. Cabe destacar que neste estudo o fator de adimensionalização adotado foi a média das vazões máximas das séries diárias ($Q_{med-máx}$).

Dessa forma, para cada série calculou-se a $Q_{med-máx}$ e, posteriormente, adimensionalizou-se a mesma seu respectivo parâmetro índice. Por meio da série adimensionalizada obteve-se os parâmetros das distribuições Exponencial para as estações Fazenda Cachoeira d'Antas, Cachoeira dos Óculos Montante e Belo Oriente, e Gumbel para as estações Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor

Jusante e Colatina. É importante ressaltar que foi considerado um período de medição homogêneo entre o ano hidrológico de 1986-1987 ao ano hidrológico de 2019-2020. O ano hidrológico de 2019-2020 apresenta período chuvoso incompleto, pois os dados mais recentes disponibilizados de monitoramento datam de 31/01/2020, entretanto este ano hidrológico não foi descartado das séries históricas uma vez que o pico de vazão ocorreu ao final de janeiro.

Os valores das médias das vazões máximas e parâmetros regionais da distribuição Exponencial das estações Fazenda Cachoeira d'Antas, Cachoeira dos Óculos Montante e Belo Oriente são apresentados na **Tabela 5.1**, enquanto os valores das médias das vazões máximas e parâmetros regionais da distribuição Gumbel das estações Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor Jusante e Colatina são apresentados na **Tabela 5.2**.

Tabela 5.1 – Parâmetros regionais distribuição de probabilidade Exponencial.

Estação		Nº dados da série	desvio padrão	(média - desvio padrão)
Fazenda Cachoeira D'Antas	56425000	32	0,4728	0,5272
Cachoeira dos Óculos Montante	56539000	32	0,4156	0,5844
Belo Oriente	56719998	33	0,4499	0,5501
Parâmetros Regionais			0,446	0,554

Tabela 5.2 – Parâmetros regionais distribuição de probabilidade Gumbel.

Estação		Nº dados da série	α	β
Governador Valadares	56850000	33	0,3282	0,8106
Tumiritinga	56920000	32	0,3207	0,8149
Resplendor Jusante	56948005	14	0,3554	0,7949
Colatina	56994500	31	0,3694	0,7868
Parâmetros Regionais			0,341	0,803

A fim de construir uma curva regional, os parâmetros de posição e escala das distribuições ajustadas para cada estação foram ponderados, resultando em parâmetros e uma distribuição regional. Distribuição que obteve um ajuste satisfatório nas séries de cada estação, podendo ser utilizada como uma curva representativa para a região. A curva regional obtida para a distribuição Exponencial é apresentada na **Figura 5.1**, enquanto a curva regional obtida para a distribuição Gumbel é apresentada na **Figura 5.2**. Salienta-se que o ramo inferior a 2 anos de período de retorno dessa curva não está bem ajustado, porém essa é uma característica inerente à distribuição de Gumbel, contudo, os valores das vazões notáveis estudadas são sempre superiores, sendo, dessa maneira, representativos os resultados da curva teórica para os períodos de retorno de interesse. Para vazões inferiores a 2 anos, iremos gerar uma curva ajustada com a empírica.

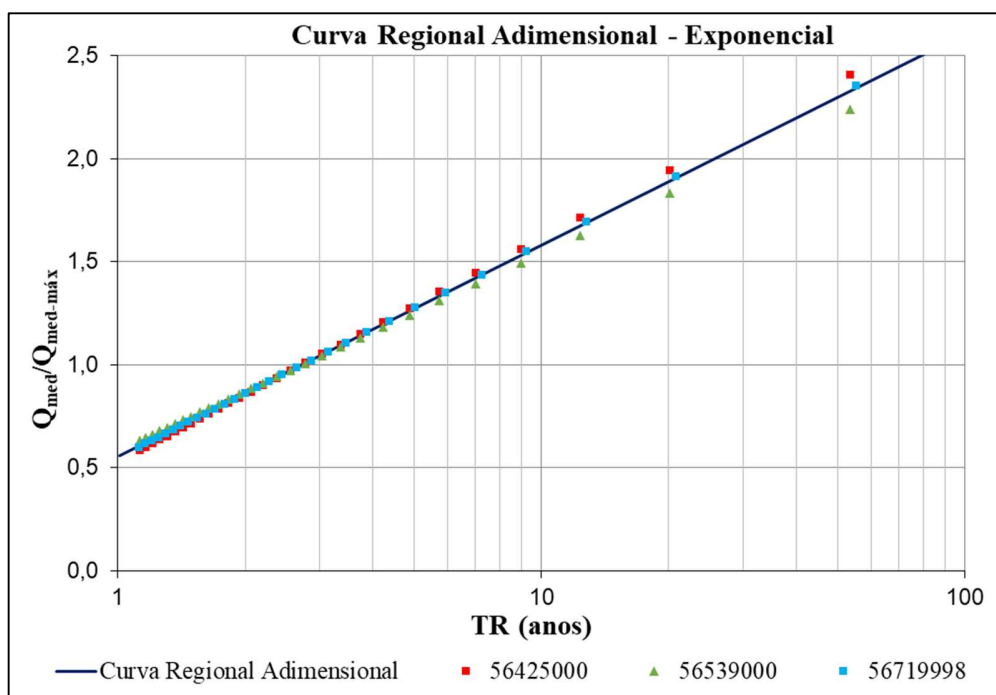


Figura 5.1 – Curva regional distribuição Exponencial.

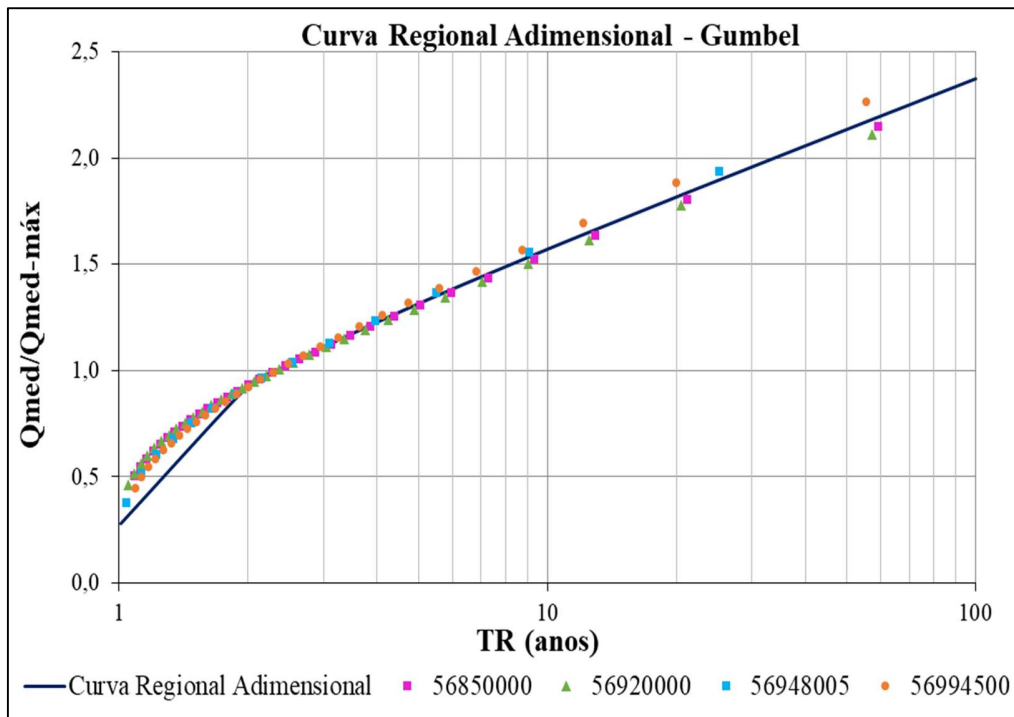


Figura 5.2 – Curva regional distribuição Gumbel.

A partir dos pares ordenados de área de drenagem e $Q_{med-máx}$ apresentados na **Tabela 5.3** plotou-se a equação regional que define o comportamento das vazões para diferentes áreas de drenagem, apresentada na **Figura 5.3**.

Tabela 5.3 – Área de drenagem e $Q_{med-máx}$ das estações.

Código	Área de Drenagem (km ²)	$Q_{med-máx}$ (m ³ /s)
56425000	10100	782
56539000	15900	981
56719998	24200	1598
56850000	40500	2642
56920000	55100	3017
56948005	61200	3401
56994500	76400	4464

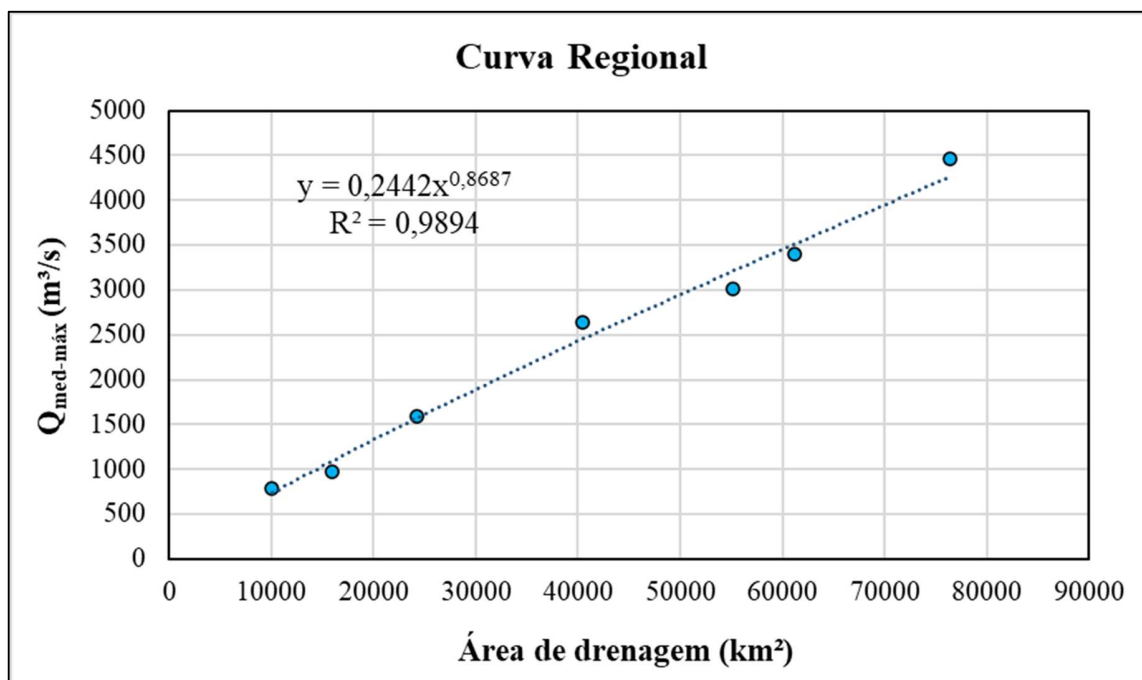


Figura 5.3 – Curva Regional.

5.1 Definição das vazões nos trechos

Com o objetivo de caracterizar as contribuições de vazões dos afluentes representativos do rio Doce, foram definidos pontos de controle subdividindo o trecho de interesse. Ao todo foram definidos 19 pontos de controle cujas áreas de drenagem foram delimitadas e calculadas.

A partir da área de drenagem de cada ponto, utilizou-se a equação da curva regional para calcular a vazão de período de retorno de 2,72 anos (referente aos pontos de controle entre as estações Fazenda Cachoeira D’Antas e Belo Oriente) e 2,33 anos (referente aos pontos de controle entre as estações Governador Valadares e Colatina). O valor de 2,72 anos corresponde ao tempo de retorno associado ao quantil adimensionalizado de vazão equivalente a 1 considerando a distribuição Exponencial e o valor de 2,33 anos corresponde ao tempo de retorno associado ao quantil adimensionalizado de vazão equivalente a 1 considerando a distribuição Gumbel.

Posteriormente, para calcular a vazão média com tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, multiplicou-se as vazões associadas aos TR de 2,72 pelos quantis regionais da distribuição Exponencial e multiplicou-se as vazões associadas aos TR de 2,33 anos pelos quantis regionais da distribuição Gumbel (**Tabela 5.4**).

Tabela 5.4 – Quantis de frequência para as curvas Exponencial e Gumbel.

TR (anos)	Q(τ) Exponencial	Q(τ) Gumbel
2	0,863	0,928
5	1,272	1,315
10	1,581	1,571
25	1,990	1,894
50	2,299	2,134
100	2,608	2,372

Por último, os valores de vazões médias com tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos foram ajustados segundo a Equação de Fuller, (**Equação 1**), cujas vazões médias máximas diárias são convertidas em vazões máximas diárias, sendo essa metodologia amplamente utilizada no meio técnico.

$$Q_p = Q(1 + 2,66 \times A^{-0,3}) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo, Q_p a vazão máxima, em m^3/s , Q a vazão média máxima diária, em m^3/s e A a área de drenagem, em km^2 .

Tal ajuste se faz necessário pois as vazões de pico não ocorrem nos mesmos horários em que os dados de vazão são coletados nas estações fluviométricas, provocando uma defasagem entre as vazões máximas registradas pelas séries de dados e as vazões de pico que efetivamente preencheram a calha dos cursos d'água.

A **Tabela 5.5** apresenta os resultados do cálculo das vazões máximas notáveis associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos para os pontos de interesse. A localização dos pontos de controle é ilustrada na **Figura 5.4**.

Tabela 5.5 –Vazões obtidas por regionalização – TR de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Ponto	Descrição	Área de Contribuição (km ²)	Quantis para Cálculo das Vazões	Q _{MÁXIMA} (m ³ /s)					
				TR 2 anos	TR 5 anos	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos	TR 100 anos
0	Área de Contribuição da UHE Risoleta Neves	8999	Exponencial	673	992	1233	1552	1794	2035
1	Rio Doce logo a jusante da UHE Risoleta Neves	10080	Exponencial	739	1090	1354	1705	1970	2235
2	Rio Doce após confluência com Rio Casca	12835	Exponencial	903	1330	1654	2082	2405	2729
3	Rio Doce após confluência com Rio Matipó	15389	Exponencial	1050	1547	1923	2420	2796	3172
4	Rio Doce após confluência com Ribeirões Monbança, Cachoeira dos Óculos e Turvo	17934	Exponencial	1192	1756	2183	2748	3175	3602
5	Rio Doce após confluência com Rio Piracicaba	23398	Exponencial	1487	2192	2725	3429	3962	4495
6	Rio Doce após confluência com Ribeirões Água Limpa, Lagoa Nova, Taquaruçu	24401	Exponencial	1540	2270	2822	3551	4103	4655
7	Rio Doce após confluência com Rio Santo Antônio	34827	Gumbel	2230	3159	3774	4552	5128	5700
8	Rio Doce após confluência com Rio Corrente	38312	Gumbel	2416	3422	4088	4930	5555	6175
9	Rio Doce logo a jusante da UHE Baguari após confluência com Rio Suaçuí Pequeno	40913	Gumbel	2553	3616	4320	5210	5869	6524
10	Rio Doce após confluência com Rio Suaçuí Grande	53340	Gumbel	3190	4519	5398	6510	7334	8153

Ponto	Descrição	Área de Contribuição (km ²)	Quantis para Cálculo das Vazões	Q _{MÁXIMA} (m ³ /s)					
				TR 2 anos	TR 5 anos	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos	TR 100 anos
11	Rio Doce após confluência com Rio Batata, Rib. São Paulo, Rib. Traíra	56277	Gumbel	3337	4727	5647	6810	7673	8529
12	Rio Doce após confluência com Rio Caratinga	59511	Gumbel	3498	4955	5919	7138	8042	8939
13	Rio Doce após confluência com Rio Eme e Rib. Resplendor	62451	Gumbel	3643	5160	6164	7434	8375	9310
14	Bacia Hidrográfica Rio Manhuaçu	71304	Gumbel	4073	5770	6893	8312	9365	10410
15	Rio Doce após confluência com Rio Guandu	75573	Gumbel	4278	6060	7239	8730	9836	10933
16	Rio Doce após confluência com Rio Santa Maria e Rio Pancas	77742	Gumbel	4381	6206	7414	8941	10073	11198
17	Rio Doce após confluência com Rio Bananal	79799	Gumbel	4479	6344	7580	9140	10298	11447
18	Rio Doce após confluência com Lagoa Juparanã	82432	Gumbel	4603	6521	7790	9394	10584	11765

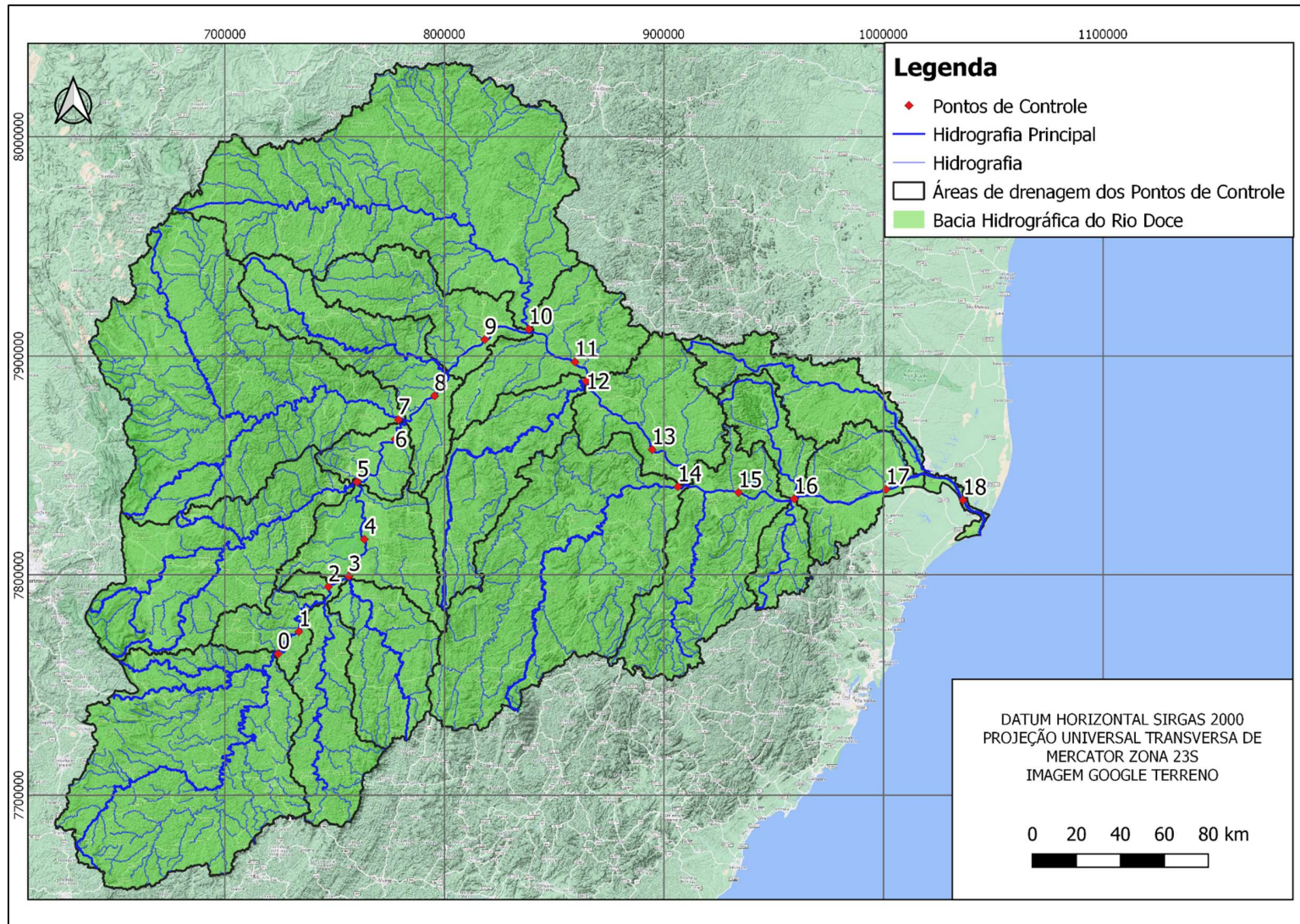


Figura 5.4 – Localização dos Pontos de Controle e Áreas de Drenagem.

5.2 Cálculo das vazões das cheias de 2016 e 2020

Segundo os dados diários de vazões das estações fluviométricas selecionadas para este estudo, as cheias dos anos hidrológicos de 2016/2017 e 2019/2020 ocorreram entre os dias 16 e 18 de dezembro de 2016 e entre os dias 26 e 28 de janeiro de 2020, conforme apresentado das **Figura 5.5 a Figura 5.15**.

Conforme já mencionado, a estação Resplendor possui dados até 2004, dessa forma a mesma foi desconsiderada para essa análise. Ainda, é importante ressaltar que a estação Tumiritinga não possui dados cadastrados para 2020, portanto esta estação não foi considerada para o cálculo da vazão de cheia de 2020 nos pontos de controle.

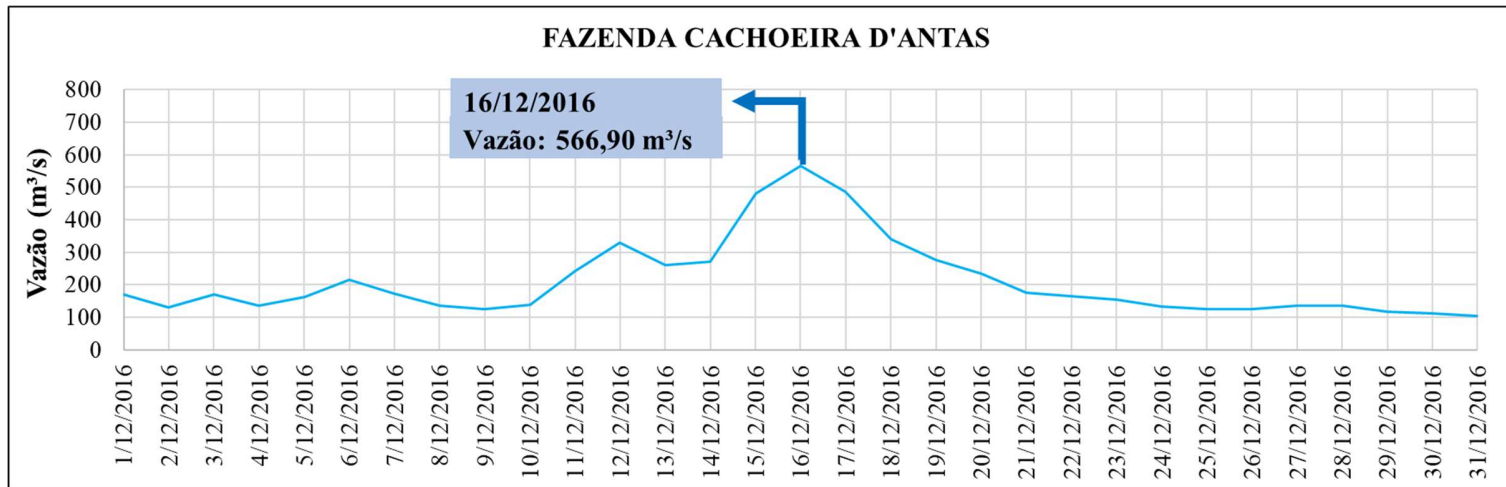


Figura 5.5 – Fluviograma dezembro de 2016 Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.

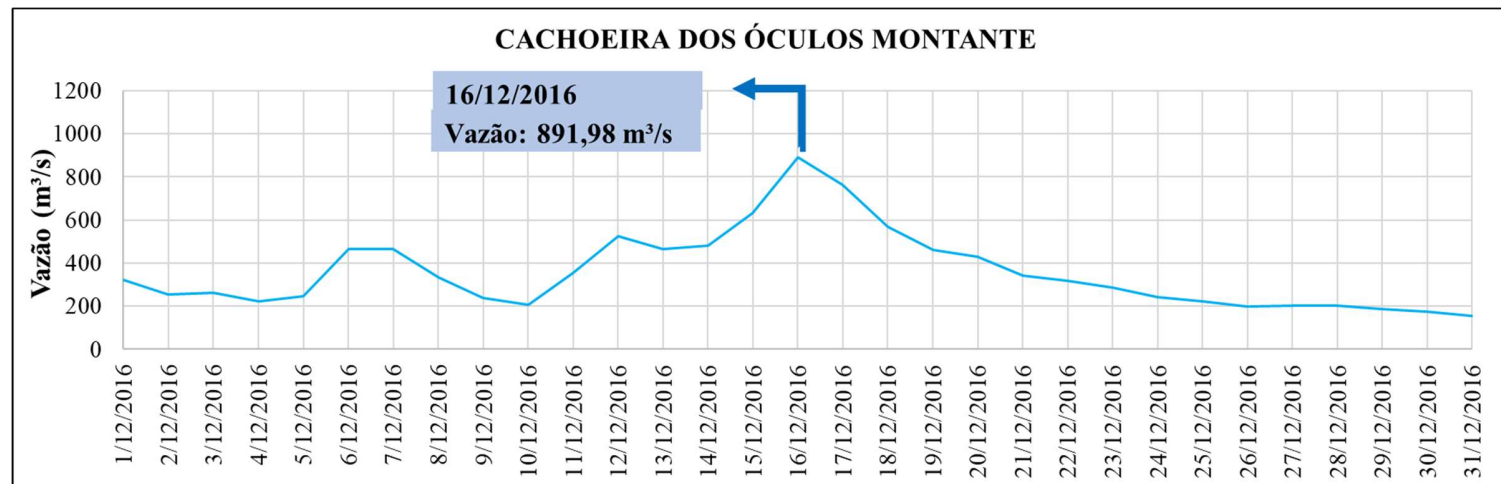


Figura 5.6 - Fluviograma dezembro de 2016 Estação Cachoeira dos Óculos Montante.

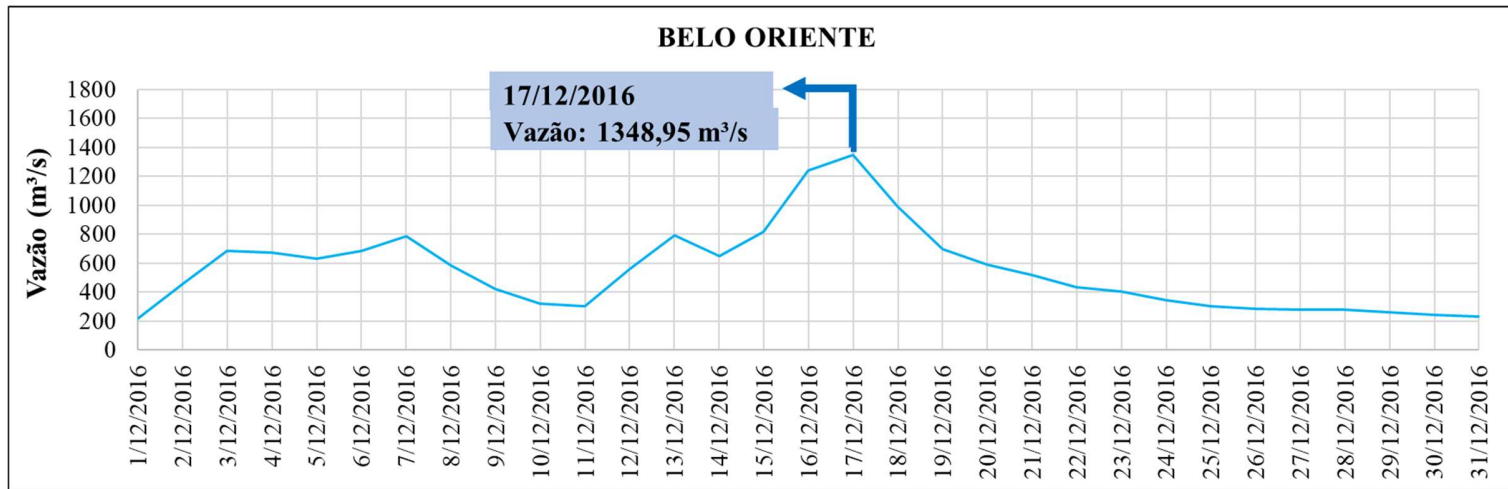


Figura 5.7 - Fluviograma dezembro de 2016 Estação Belo Oriente.

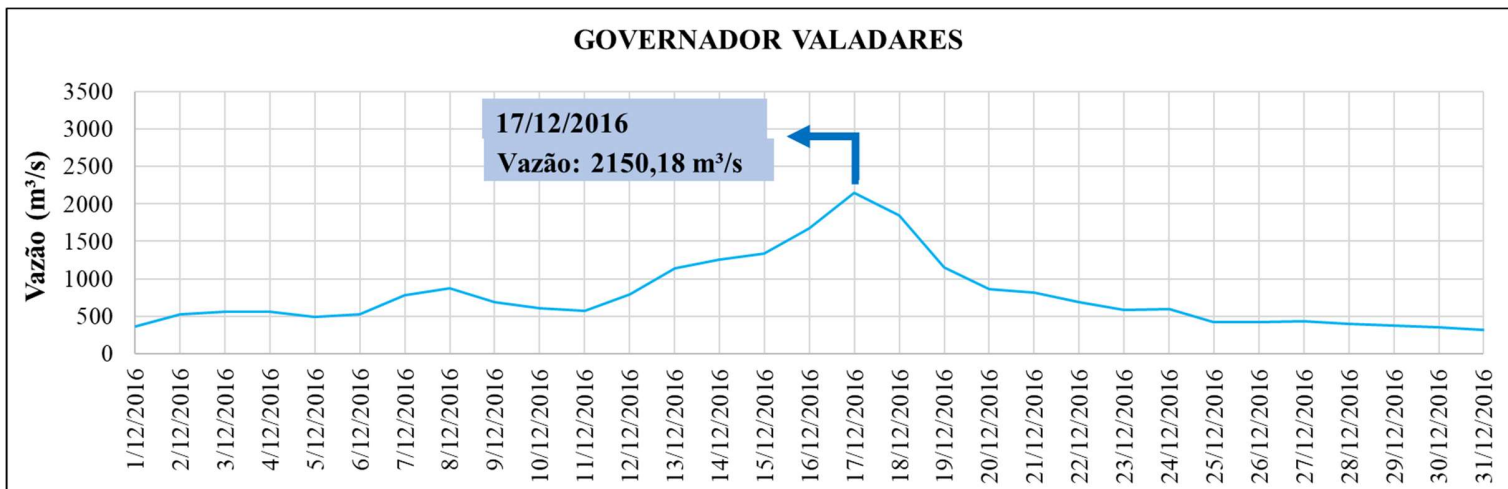


Figura 5.8 - Fluviograma dezembro de 2016 Estação Governador Valadares.

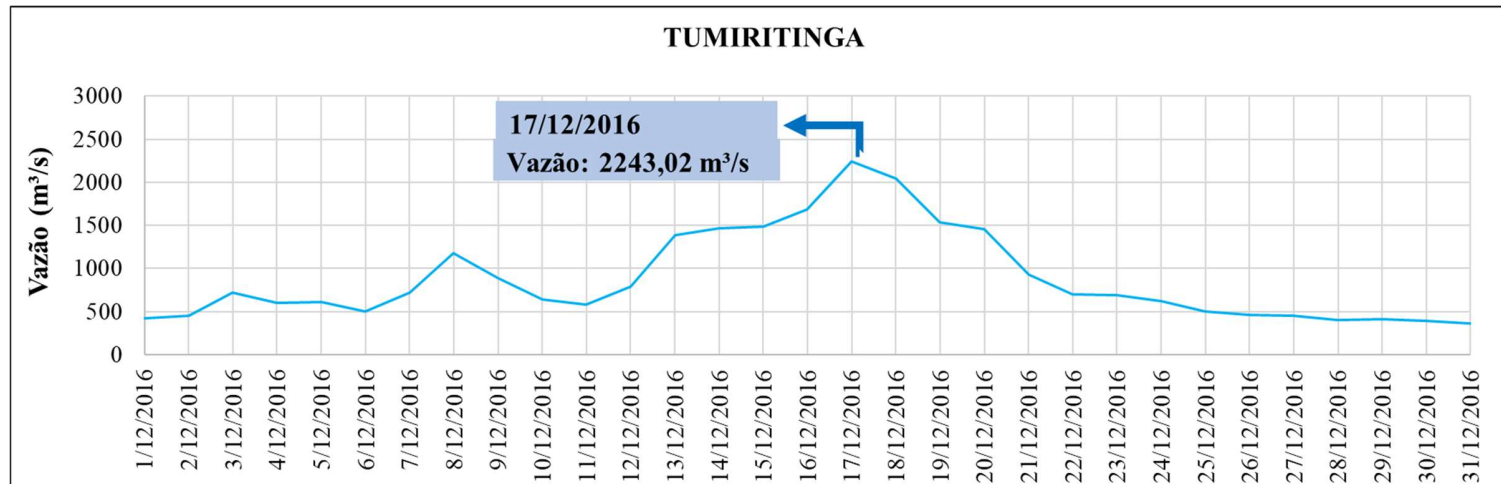


Figura 5.9 - Fluviograma dezembro de 2016 Estação Tumiritinga.

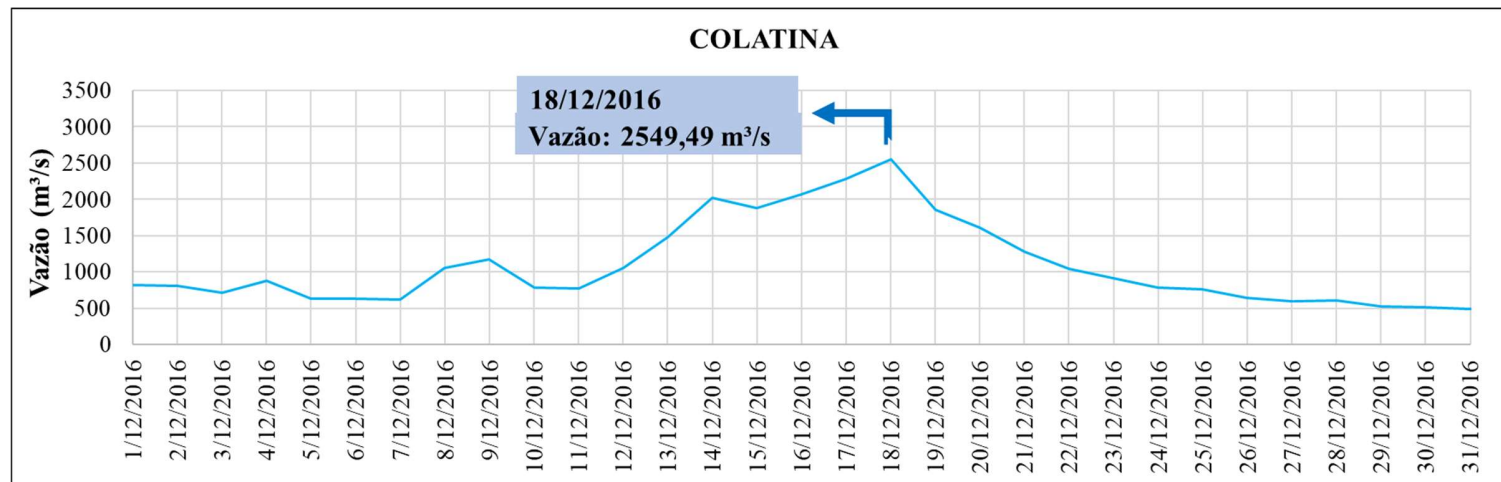


Figura 5.10 - Fluviograma dezembro de 2016 Estação Colatina.

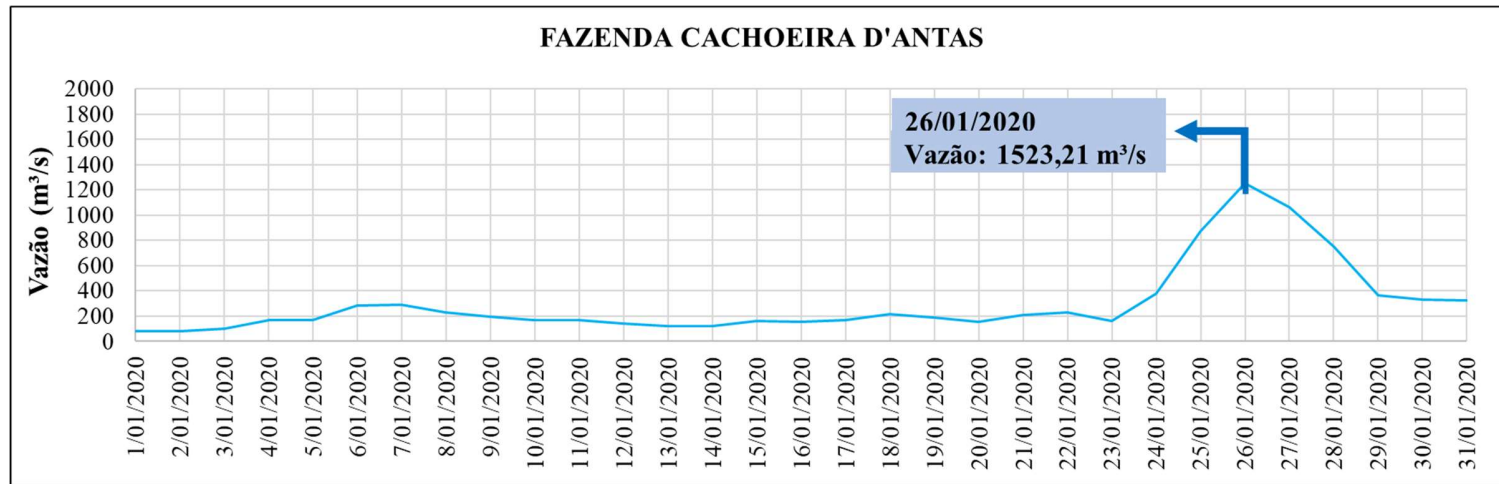


Figura 5.11 - Fluviograma janeiro de 2020 Estação Fazenda Cachoeira D'Antas.

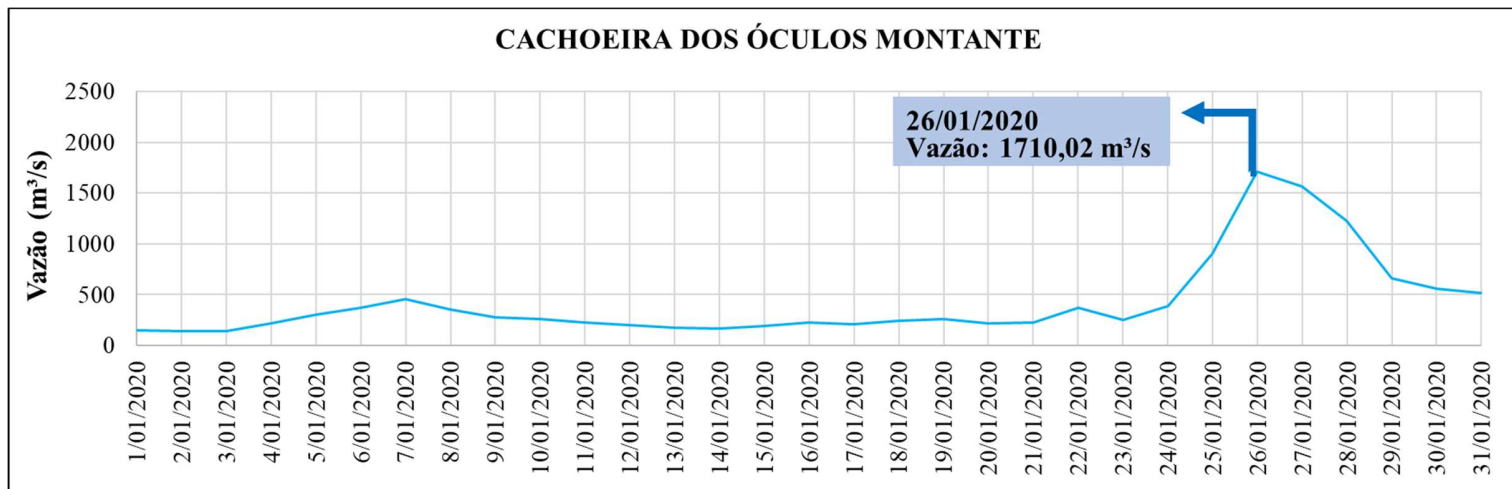


Figura 5.12 - Fluviograma janeiro de 2020 Estação Cachoeira dos Óculos Montante.

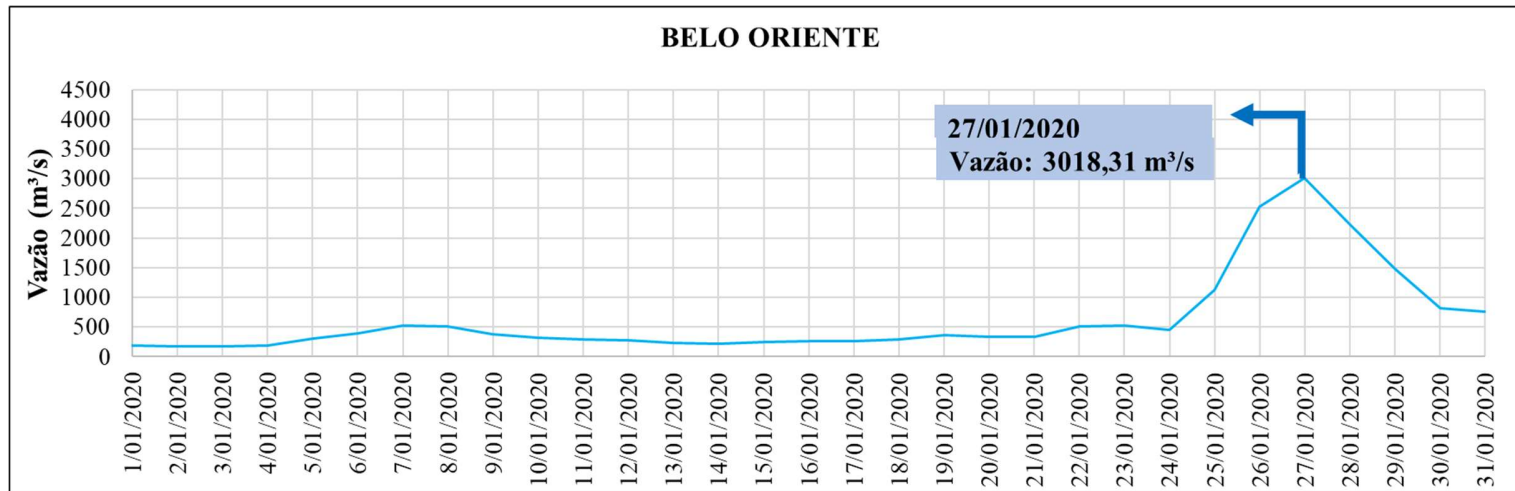


Figura 5.13 - Fluviograma janeiro de 2020 Estação Belo Oriente.

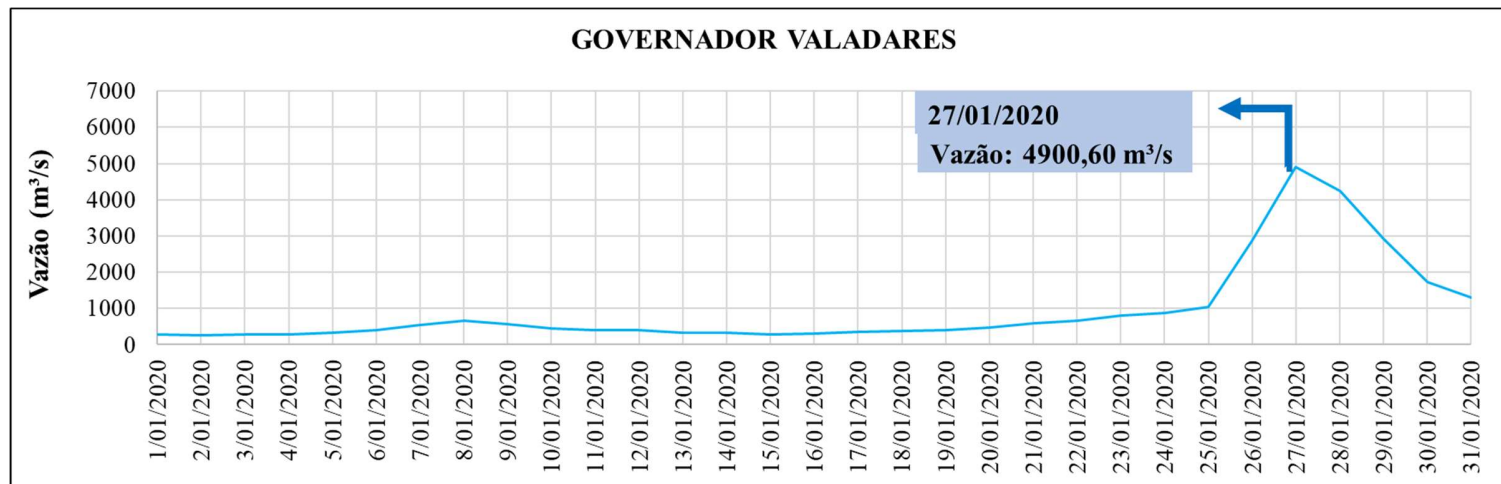


Figura 5.14 - Fluviograma janeiro de 2020 Estação Governador Valadares.

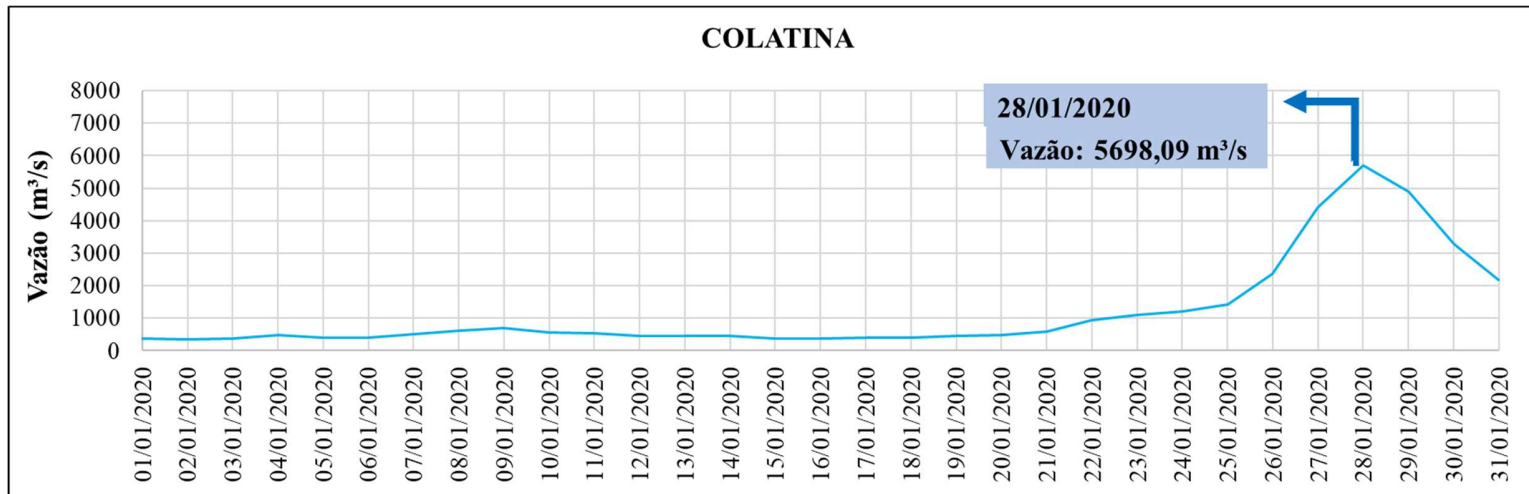


Figura 5.15 - Fluviograma janeiro de 2020 Estação Colatina.

As vazões máximas para cada estação e respectivos tempos de retorno associados são apresentados na **Tabela 5.6**. Observa-se que para o ano de 2016 as vazões de pico estão associadas à períodos de retorno que variam entre 1,16 a 1,95 anos enquanto para o ano de 2020 as vazões de pico estão associadas à períodos de retorno que variam entre 6,22 e 30,14 anos. Além disso, nota-se uma redução expressiva do TR associado para a estação Colatina, o que pode indicar uma heterogeneidade da precipitação na região ou mesmo o amortecimento das vazões provocada pelo reservatório da UHE Aimorés, sendo esse, provavelmente, o principal fator.

Tabela 5.6 – Vazões máximas anos hidrológicos de 2016-2017 e 2019-2020 e TR associados.

	Estação	Distribuição Teórica	Q_{médmax} 2016	TR (anos)	Q_{médmax} 2020	TR (anos)
56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	Exponencial	566,90	1,46	1253,21	9,63
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Exponencial	891,98	1,95	1710,02	12,57
56719998	Belo Oriente	Exponencial	1348,95	1,92	3018,31	19,60
56850000	Governador Valadares	Gumbel	2150,18	1,61	4900,60	30,14
56920000	Tumiritinga	Gumbel	2243,02	1,36	-	-
56994500	Colatina	Gumbel	2549,49	1,16	5698,09	6,22

A metodologia de Fuller, para transformação das vazões médias máximas em máximas instantâneas foi utilizada para o cálculo da vazão dos pontos de controle na **Tabela 5.7** que representarão as entradas de vazão na modelagem.

Para o desenvolvimento dos cálculos das vazões nos pontos de controle, plotou-se as áreas de drenagem das estações *versus* suas respectivas vazões de pico de modo a se obter uma equação representativa para cada cheia. As curvas para a cheia de 2016 são apresentadas na **Figura 5.16** e as curvas para a cheia de 2020 são apresentadas na **Figura 5.17**.

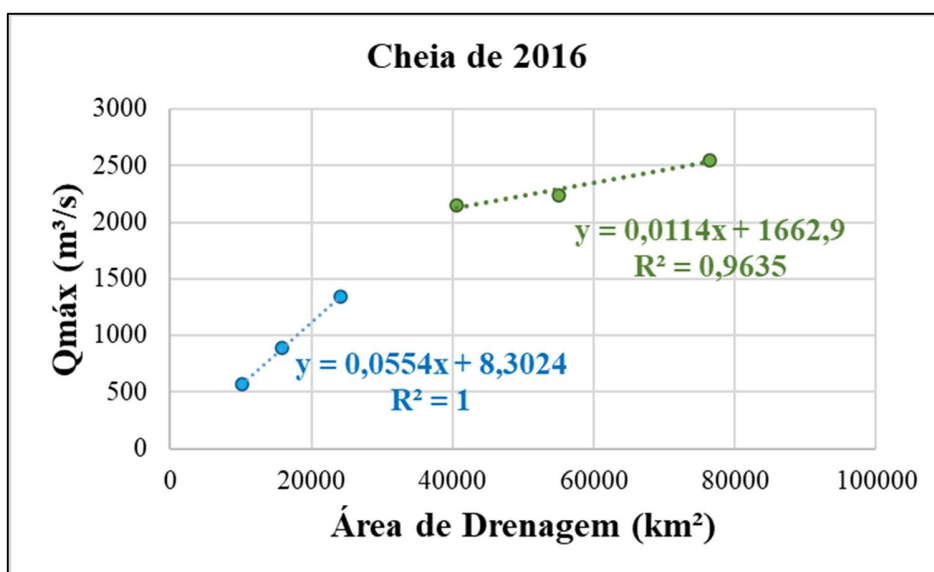


Figura 5.16 – Curvas representativas para a cheia de 2016.

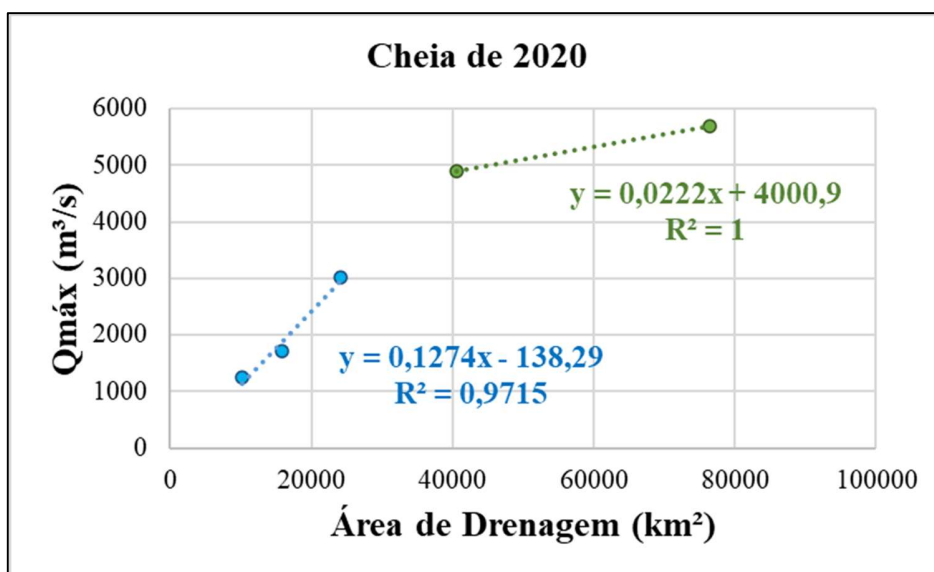


Figura 5.17 – Curvas representativas para a cheia de 2020.

O trecho em estudo possui duas tendências referentes ao comportamento da vazão máxima em relação ao aumento da área de contribuição. O trecho entre as estações Fazenda Cachoeira D'Antas e Belo Oriente (curvas azuis) possui reta com inclinação superior à inclinação da reta para o trecho entre

as estações Governador Valadares e Colatina (curvas verdes). Esta diferença de inclinação resulta em uma diminuição do acréscimo de vazão por aumento de área de contribuição para o trecho mais a jusante. Entre os dois trechos mencionados, encontra-se uma região de transição correspondente ao trecho entre as estações Belo Oriente e Governador Valadares.

A partir das equações advindas das regressões lineares apresentadas nas **Figura 5.16** e **Figura 5.17**, utilizou-se a área de drenagem de cada ponto de controle para calcular a vazão para os anos de cheias, 2016 e 2020. Para os pontos situados na região de transição, utilizou-se a equação da tendência mais próxima em distância. Os resultados são apresentados na **Tabela 5.7**.

Tabela 5.7 – Quantis de frequência para as curvas Exponencial e Gumbel.

Ponto	Descrição	Área de Contribuição (km ²)	Q MÁXIMA(m ³ /s)	
			2016	2020
0	Área de contribuição da UHE Risoleta Neves	8999	595	1183
1	Rio Doce logo a jusante da UHE Risoleta Neves	10080	662	1338
2	Rio Doce após confluência com Rio Casca	12835	831	1730
3	Rio Doce após confluência com Rio Matipó	15389	988	2091
4	Rio Doce após confluência com Ribeirões Monbança, Cachoeira dos Óculos e Turvo	17934	1143	2449
5	Rio Doce após confluência com Rio Piracicaba	23398	1474	3212
6	Rio Doce após confluência com Ribeirões Água Limpa, Lagoa Nova, Taquaruçu	24401	1535	3352
7	Rio Doce após confluência com Rio Santo Antônio	34827	2298	5325
8	Rio Doce após confluência com Rio Corrente	38312	2335	5396
9	Rio Doce logo a jusante da UHE Baguari após confluência com Rio Suaçuí Pequeno	40913	2363	5449
10	Rio Doce após confluência com Rio Suaçuí Grande	53340	2502	5712

Ponto	Descrição	Área de Contribuição (km ²)	Q MÁXIMA(m ³ /s)	
			2016	2020
11	Rio Doce após confluência com Rio Batata, Rib. São Paulo, Rib. Traíra	56277	2535	5775
12	Rio Doce após confluência com Rio Caratinga	59511	2571	5845
13	Rio Doce após confluência com Rio Eme e Rib. Resplendor	62451	2605	5909
14	Bacia Hidrográfica Rio Manhuaçu	71304	2706	6104
15	Rio Doce após confluência com Rio Guandu	75573	2755	6198
16	Rio Doce após confluência com Rio Santa Maria e Rio Pancas	77742	2780	6246
17	Rio Doce após confluência com Rio Bananal	79799	2804	6292
18	Rio Doce após confluência com Lagoa Juparanã	82432	2835	6351

6 CONCLUSÃO

Neste documento são apresentados os estudos realizados para cálculo das vazões notáveis, com tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos de tempo de retorno, além das vazões das cheias naturais ocorridas em dezembro de 2016 e janeiro de 2020, no trecho de interesse para o estudo de modelagem hidrodinâmica das cheias naturais do rio Doce entre a UHE Risoleta Neves e a foz. Salienta-se que o estirão fluvial em análise é contemplado com uma rede de informações hidrográficas operadas pela CPRM e ANA, totalizando 7 estações fluviométricas cujos dados foram analisados, consistidos e utilizados para a construção de curvas de regionalização de vazões.

Em relação aos estudos desenvolvidos são feitas as seguintes observações:

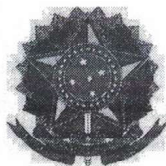
- Conforme mencionado no item 5.2, a estação Resplendor possui dados até 2004, dessa forma a mesma foi desconsiderada para a análise das cheias de 2016 e 2020. Já a estação Tumiritinga não possui dados cadastrados para 2020, portanto esta estação não foi considerada para o cálculo da vazão de cheia de 2020 nos pontos de controle. Destaca-

se que antes da entrega final do estudo, os dados disponibilizados pela ANA serão revistos a fim de confirmar se existe mais alguma atualização. Porém, caso algum dado ainda não esteja disponível, isso não acarretará perdas na calibração do modelo.

- O item 5 menciona sobre a característica inerente ao ramo inferior da curva de distribuição de Gumbel, que apresenta valores menos ajustados à curva para tempo de retorno inferior a 2 anos. Para esses casos será gerada a curva ajustada com a empírica.

Por fim, entende-se que os dados utilizados bem como a metodologia empregada para o cálculo das vazões são adequados e suficientes para a sua utilização no modelo de inundação hidrodinâmica, objetivo final de entrega.

Esse estudo hidrológico (subproduto 01, conforme cronograma protocolado FR.2020.1943) é de primordial importância, pois as vazões calculadas no presente relatório são um dos principais dados de entrada nas modelagens hidrodinâmicas que serão realizadas e que terão como resultado as manchas de inundação das cheias do rio Doce, conforme já discutidas e apresentadas também no Ofício FEAM/CT - GRSA nº. 62/2020.



Anotação de Responsabilidade Técnica - ART
Leinº 6.496, de 7 de dezembro de 1977

CREA-MG

ART de Obra ou Serviço
1420200000006307576

Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais

1. Responsável Técnico

VITOR LAGES DO VALE

Título profissional:

ENGENHEIRO CIVIL;

RNP: 1407658409

Registro: 04.0.0000118264

Empresa contratada:

HIDROBR CONSULTORIA LTDA

Registro: 62163

2. Dados do Contrato

Contratante: **FUNDAÇÃO RENOVA MARIANA**

Logradouro: **RUA SEMINÁRIO**

CNPJ: 25.135.507/0002-64

Nº: 000237

Cidade: **MARIANA**

Contrato: **4800019842**

Bairro: **CENTRO**

UF: **MG**

CEP: 35420000

Celebrado em: **31/07/2019**

Valor: **3.709.635,50**

Tipo de contratante: **PESSOA JURÍDICA DE DIREITO PRIVADO**

3. Dados da Obra/Serviço

Logradouro: **RUA SEMINÁRIO**

Nº: 000237

Cidade: **MARIANA**

Data de início: **31/07/2019** Previsão de término: **30/04/2022**

Bairro: **CENTRO**

UF: **MG**

CEP: 35420000

Finalidade: **OUTRO-DETALHAR CAMPO 5 OBSERV.**

Proprietário: **FUNDAÇÃO RENOVA MARIANA**

CNPJ: 25.135.507/0002-64

4. Atividade Técnica

1 - COORDENAÇÃO

Quantidade:

Unidade:

ESTUDO, OUTRAS FINALIDADES - GRUPO A (CIVIL), PARA OUTROS FINS

1.00

un

2 - ELABORAÇÃO

ESTUDO, OUTRAS FINALIDADES - GRUPO A (CIVIL), PARA OUTROS FINS

1.00

un

Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART

5. Observações

REVISÃO DOS ESTUDOS DE HIDRÁULICA V3 | MODELAG HIDROD BIDIM RIO DOCE

6. Declarações

7. Entidade de Classe

SINDICATO DE ENGENHEIROS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

8. Assinaturas

Declaro serem verdadeiras as informações acima

Felipe Henrique / Msc de *26* de *Setembro* de *2020*

Vitor Lages do Vale

VITOR LAGES DO VALE

RNP: 1407658409

9. Informações

- A ART é válida somente quando quitada, mediante apresentação do comprovante

do pagamento ou conferência no site do Crea.

- A autenticidade deste documento pode ser verificada no site

www.crea-mg.org.br ou www.confrea.org.br

- A guarda da via assinada da ART será de responsabilidade do profissional e do

contratante com o objetivo de documentar o vínculo contratual.

VALOR DA OBRA: R\$ R\$3.709.635,50. ÁREA DE ATUAÇÃO:

HIDROLOGIA, HIDROLOGIA,

FUNDAÇÃO RENOVA MARIANA

CNPJ: 25.135.507/0002-64

www.crea-mg.org.br | 0800.0312732



Valor da ART: 233,94

Registrada em: 25/09/2020

Valor Pago: 233,94

Nosso Número: 000000006036888