

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

FERNANDO JUSTINO NASCIMENTO MATIAS

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO RIO  
GRANDE\_UPGRH-GD8

UBERLÂNDIA-MG

2018

FERNANDO JUSTINO NASCIMENTO MATIAS

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO RIO  
GRANDE\_UPGRH-GD8

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho  
Coorientador Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva

UBERLÂNDIA - MG

2018

FERNANDO JUSTINO NASCIMENTO MATIAS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M433r Matias, Fernando Justino Nascimento, 1987  
2018 Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Baixo Rio Grande\_UPGRH-GD8 [recurso eletrônico] / Fernando Justino Nascimento Matias. - 2018.

Orientador: Hudson de Paula Carvalho.

Coorientador: Claudionor Ribeiro da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.859>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Ecologia. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Aspectos ambientais. 3. Bacias hidrográficas. 4. Água - Manejo. I. Carvalho, Hudson de Paula, (Orient.). II. Silva, Claudionor Ribeiro da, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental. IV. Título.

---

CDU: 574

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO RIO  
GRANDE\_UPGRH-GD8

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 30 de novembro de 2018.

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi

UFU

Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva

UFU

Prof. Dr. Gilberto Coelho

UFLA



---

Prof. Dr. Hudson de Paulo Carvalho

ICIAG-UFU

(Orientador)

UBERLÂNDIA - MG

2018

Ao meu pai Alfredo (Carlos) Mahoque (in memoriam) e  
ao meu pai de criação Justino Matias (in memoriam), por  
todo apoio nesta jornada e pelo amor com que me criaram.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Altíssimo Deus, por me abençoar, me escolher e confiar, proporcionando-me conforto e fé em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho, e coorientador, Prof. Dr. Claudionor da Silva, pela orientação, sobretudo, pela competência técnico-científica, meu respeito e admiração.

À equipe do Laboratório de Hidrologia, pelo agradável convívio e auxílio nas atividades internas. Em especial a Márcia Batistela, Darione Leal, Pedro Corsino, Lisiane Mendes, João Carlos, Natália Mendes, Letícia Oliveira e Gabriel Alves.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, por terem contribuído de forma significativa para o meu crescimento profissional e pessoal.

À minha esposa, Olga Betuel Pelembe, e à minha filha, Lesley Matias, por todo apoio, conselhos e por sempre acreditarem em mim.

À minha família por todo o suporte nesta caminhada, em especial, aos meus irmãos Leonor Matias, Jossias Matias, Mario Matias, Ruth Matias e Almeida Matias, pela educação que me proporcionaram e pela confiança depositada.

À minha mãe, Nely Simbine, por todo apoio, meu respeito e amor incondicional.

Aos amigos que fizeram parte destes momentos, sempre me ajudando e incentivando.

À secretária do Programa de Pós-Graduação, Marília, pela disponibilidade em resolver os problemas.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço ao Instituto de Bolsa de Moçambique (IBE), pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

O meu muito obrigado.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande-UPGRH-GD8 .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2 - Etapas metodológicas propostas e aplicadas no estudo.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 3 - Localização espacial das estações fluviométricas situadas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 4 – Mapa hipsométrico da UPGRH-GD8 .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura5 - Mapa de Declividade da UPGRH-GD8. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6 – Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão média mínima de sete dias de duração (<math>Q_7</math>) .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 7 - Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão máxima diária (<math>Q_{máx.}</math>) .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 8 - Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (Dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão mínima garantida em 90% do tempo (<math>Q_{90}</math>) .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 9 - Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão mínima garantida em 95% do tempo (<math>Q_{95}</math>) .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 10 - Regiões hidrologicamente homogêneas para vazões (<math>Q_{máx.}</math>, <math>Q_{7,10}</math>, <math>Q_{90}</math> e <math>Q_{95}</math>) obtidas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande (UPGRH-GD8), em Minas Gerais .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 11 – Regressão matemática do parâmetro <math>\sigma</math> da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (<math>Q_7</math>), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 12 - Regressão matemática do parâmetro <math>\mu</math> da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (<math>Q_7</math>), versus as áreas das sub-baciasda região homogênea I .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 13 - Regressão matemática do parâmetro <math>\sigma</math> da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (<math>Q_7</math>), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II.....</b>	<b>62</b>

<b>Figura 14 - Regressão matemática do parâmetro <math>\mu</math> da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos (<math>Q_7</math>), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 15 - Regressão matemática do parâmetro <math>\sigma</math> da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da <math>Q_{máx}</math>, versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 16 - Regressão matemática do parâmetro <math>\mu</math> da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da <math>Q_{máx}</math>, versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 17 - Regressão matemática do parâmetro <math>\sigma</math> da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da <math>Q_{máx}</math>, versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 18 - Regressão matemática do parâmetro <math>\mu</math> da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da <math>Q_{máx}</math>, versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 19 - Regressão matemática do parâmetro da <math>Q_{90}</math> versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 20 - Regressão matemática do parâmetro da <math>Q_{90}</math> versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 21 - Regressão matemática do parâmetro da <math>Q_{95}</math> versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 22 - Regressão matemática do parâmetro da <math>Q_{95}</math> versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 23 - Comparação dos resultados da <math>Q_{7,10}</math> para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), pelo Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas). CNS significa coeficiente de Nash-Sutcliffe.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 24 - Comparação dos resultados da <math>Q_{7,10}</math> para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), pelo Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas). CNS significa coeficiente de Nash-Sutcliffe.....</b>	<b>75</b>



- Figura 25 - Comparação dos resultados da  $Q_{90}$  para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe ..... 78**
- Figura 26 -Comparação dos resultados da  $Q_{90}$  para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe ..... 78**
- Figura 27 -Comparação dos resultados da  $Q_{95}$  para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe ..... 79**
- Figura 28 -Comparação dos resultados da  $Q_{95}$  para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop)e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe ..... 79**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Relação das estações fluviométricas encontradas na UPGRH-GD8.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 2 - Períodos em anos das séries históricas das estações fluviométricas excluídos e utilizados na fase de modelagem e validação .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 3 - Faixa de valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) e sua respectiva classificação .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 4 - Características físicas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD8 .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 5 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima de sete dias de duração (Q<sub>7</sub>) anuais de cada estação e as possíveis variáveis preditoras .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 6 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão máxima diária (Q<sub>máx.</sub>) anuais de cada estação e as possíveis variáveis preditoras.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 7 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão mínima garantida em 90% do tempo (Q<sub>90</sub>) e as possíveis variáveis preditoras .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 8 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão mínima garantida em 95% do tempo (Q<sub>95</sub>) e as possíveis variáveis preditoras .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 9 - Modelos de regressão ajustados para estimativa da Q<sub>7,10</sub> em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande em Minas Gerais ....</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 10 - Modelos de regressão ajustados para estimativa da Q<sub>máx</sub> em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande em Minas Gerais</b>	<b>68</b>
<b>Tabela 11. Modelos de regressão ajustados para estimativa da Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub> em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande em Minas Gerais</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 12. Resultados da estimativa da Q<sub>7,10</sub>, por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, em cada sub-bacia hidrográfica agrupada nas regiões homogêneas I e II e delimitadas a partir das suas respectivas estações fluviométricas .....</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 13 - Comparação da eficiência na estimativa da Q<sub>máx.</sub>, dado pelo teste de Nash-Sutcliffe (CNS), entre os modelos hidrológicos obtidos neste trabalho e aquele preconizado no Atlas Digital das Águas de Minas, nas duas regiões homogêneas .....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BH	Bacia Hidrográfica
BHBRG	Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CFBH	Características físicas da bacia hidrográfica
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
C <sub>NS</sub>	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
MDE	Modelo digital de elevação
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RHH	Regiões hidrologicamente homogêneas
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UHE	Usina Hidrelétrica
UPGRH- GD8	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Baixo Rio Grande

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Problema e hipótese de pesquisa	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	19
2.1	A bacia hidrográfica	19
2.2	Vazões máximas e mínimas de referência	19
2.3	Critérios para a concessão de outorga de uso da água em Minas Gerais	22
2.4	Imagem do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	23
2.5	Regionalização Hidrológica	25
2.6	Correlação, modelo de regressão	28
2.7	Análise Multivariada - Análise de Aglomerados (Clusters)	29
2.8	Coefficiente de Nash-Sutcliffe (CNS)	31
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	33
3.1	Caraterização da área de estudo	33
3.2	Materiais utilizados	34
3.3	Metodologia	35
3.4	Estimativa de vazões de referência ( $Q_{7,10}$ , $Q_{90}$ , $Q_{95}$ ) e máximas por meio do Atlas Digital das Águas de Minas	45
3.5	Estimativa de $Q_{7,10}$ por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais	46
3.6	Avaliação dos modelos matemáticos para estimativa da vazão	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	48
4.1	Estações fluviométricas usadas para delimitação das sub-bacias	48
4.2	Matriz de correlação	52

<b>4.3</b>	<b>Identificação e delimitação de regiões homogêneas .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>Equações de regionalização da <math>Q_{7,10}</math> .....</b>	<b>60</b>
<b>4.5</b>	<b>Equações de regionalização da <math>Q_{máx}</math> .....</b>	<b>64</b>
<b>4.6</b>	<b>Equações de regionalização das vazões <math>Q_{90}</math> e <math>Q_{95}</math> .....</b>	<b>68</b>
<b>4.7</b>	<b>Comparação dos valores de <math>Q_{7,10}</math> estimada pelo modelo obtido neste trabalho com aqueles estimados pelo Atlas Digital das Águas de Minas e Deflúvios Superficiais de Minas Gerais .....</b>	<b>71</b>
<b>4.8</b>	<b>Eficiência dos modelos hidrológicos obtidos neste trabalho <i>versus</i> Atlas Digital das Águas de Minas, na estimativa de <math>Q_{máx}</math> .....</b>	<b>75</b>
<b>4.9</b>	<b>Eficiência dos modelos hidrológicos obtidos neste trabalho <i>versus</i> Atlas Digital das Águas de Minas, na estimativa de <math>Q_{90}</math> e <math>Q_{95}</math> .....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE A - RESULTADO DOS TESTES DE ADERÊNCIA PARA DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DE PROBABILIDADE .....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B - RESULTADOS DE VAZÕES OBSERVADOS, MODELO DE REGIONALIZAÇÃO PROPOSTA (PROP), ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS (ATLAS) E PELO DEFLÚVIOS SUPERFICIAIS DE MINAS GERAIS (DEFLÚVIOS) .....</b>	<b>95</b>

## RESUMO

MATIAS, Fernando J.N. **Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Baixo Rio Grande-UPGRH-GD8**. 2018. 103f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018<sup>1</sup>

A regionalização hidrológica de vazões é uma técnica utilizada para estimar a disponibilidade hídrica em locais não monitorados ou com carência de dados observados, ou seja, medições de parâmetros hidrológicos coletados numa bacia específica. Esta técnica caracteriza-se por ser uma ferramenta útil no processo de concessão de outorgas de direitos de uso da água, construção de barramentos, entre outras. A regionalização permite ajustar modelos de regressão nas regiões consideradas homogêneas, usando as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo principal propor modelos hidrológicos para a estimativa de vazões máximas e mínimas de referência, por meio de regionalização hidrológica, na Bacia Hidrográfica da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Baixo Rio Grande. Utilizaram-se, inicialmente, dados de 11 estações fluviométricas administradas pela Agência Nacional de Águas. Determinou-se a vazão mínima média de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos, média máximas diária e as vazões com 90 e 95% de permanência no tempo. Foram identificadas duas regiões hidrologicamente homogêneas pelo método hierárquico, por meio de distância Euclidiana (dissimilaridade), usando o algoritmo de Ward. Empregou-se a distribuição de probabilidade de Gumbel (máximos e mínimos) e foi possível ajustar equações de regressão em cada região considerada homogênea. Resultados da modelagem demonstraram que a área da bacia hidrográfica foi a característica física que produziu os melhores ajustes para estimativa de vazões. Foi feita a comparação com os modelos desenvolvidos no estudo e as metodologias de Atlas Digital da Águas de Minas e Deflúvios Superficiais de Minas Gerais a partir de indicadores de eficiência amplamente utilizados em modelagem hidrológica, mostrando muito bom desempenho dos modelos propostos neste trabalho, na estimativa das vazões de referência e média máxima diária anual.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Planejamento de recursos hídricos. Análise de cluster. Algoritmo de Ward. Disponibilidade hídrica.

---

<sup>1</sup> Orientador: Hudson de Paula Carvalho – UFU

## ABSTRACT

MATIAS, Fernando. J. N. **Flow regionalization in the Baixo Rio Grande basin–UPGRH-GD8**. 2018. 103f. Dissertation (Master Program Environment and Environmental Quality), Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2018<sup>2</sup>.

The hydrological flow regionalization is a technique used to estimate water availability at non-monitored area or with a lack of observed data. It is based on measurements of hydrological parameters collected in a specific basin. This technique is a useful tool in the process of granting rights of water used, construction of buses, among others. Regionalization allows the adjustment of regression models in regions considered homogeneous, using the physical and climatic characteristics of the river basin. The aim of the present research was to propose the hydrological models for estimation of maximum and minimum reference flow, using hydrological regionalization in the Water Resources Planning and Management Unit of Baixo Rio Grande river basin. Data were obtained from National Water Agency, 11 fluviometric stations were used. The mean minimum flow of 7 consecutive days was determined with 10-year return period, maximum daily average and flow with 90 and 95% of permanence time. Two hydrologically homogeneous regions were identified by the hierarchical method using Euclidean distance (dissimilarity), and Ward algorithm. The Gumbel probability distribution (maximum and minimum) was used and it was possible to adjust regression equations in each region considered homogeneous. Modeling results showed that the watershed area was the physical characteristic that produced the best adjustments for flow estimation. The comparison was basin on the models developed in this study and with Digital Atlas methodologies of the Waters of Mines and Surface Deflúvios of Minas Gerais from efficiency indicators widely used in hydrological modeling, showing very good performance of the models proposed in this work, in the estimation of reference flow and annual maximum daily average.

**Keywords:** Hydrological modeling. water resources planning. Cluster analysis. Ward algorithm. Water availability.

---

<sup>2</sup> Adviser: Hudson de Paula Carvalho – UFU

## 1 INTRODUÇÃO

As participações antrópicas, ou seja, as ações econômicas, são responsáveis por modificações consideráveis no ambiente de bacias hidrográficas, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre o ciclo hidrológico. O conhecimento da disponibilidade da água ao longo da rede hidrográfica é bastante pertinente, pois com base nele é possível gerir os recursos hídricos de maneira a atender às demandas antrópicas, à concessão de outorgas e mitigar impactos ambientais causados pela atividade do ser humano.

A região da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Baixo Rio Grande (UPGRH-GD8) tem exposto mudanças significativas na degradação da qualidade e quantidade da água, devendo-se à mudança no uso do solo, à sobre-exploração dos recursos hídricos, ao crescimento demográfico e à industrialização acelerada. Ademais a UPGRH Baixo Rio Grande caracteriza-se por ter um enorme potencial de produção de água, devido a fatores fisiográficos e climáticos, citam-se o regime de precipitação, o uso do solo e o relevo. Com este intuito mostra o quão é importante avaliar os parâmetros das componentes do ciclo hidrológico que otimizam o desempenho em relação ao nível da bacia hidrográfica. Gao et al. (2018) regionalizaram as características das vazões sobre a Bacia do Rio Jinghedo, noroeste da China, resultando com maior destaque nas medidas de reflorestamento e variáveis físicas da bacia que poderiam levar a mudanças significativas no fluxo de água.

No Brasil, a escassez de água vem criando conflitos, envolvendo os diversos setores usuários, mesmo com a implementação de uma série de instrumentos específicos para o gerenciamento dos recursos hídricos de uma forma múltipla e integrada. Para a Agência Nacional de Águas – ANA (2004), esses conflitos tendem a acontecer em função de uma série de fatores. Como exemplo, cita-se o crescimento da agricultura irrigada e a necessidade de maior produção de energia elétrica. Este aumento gera, em grande escala, a utilização da água para atendimento das demandas da sociedade, seja como bem de consumo final ou matéria-prima no processo produtivo (FIOREZE et al., 2008).

O desenvolvimento de estudos que visam à representação adequada do processo de formação do escoamento, de forma a fornecer subsídios para a tomada de decisão por parte dos gestores de recursos hídricos, é uma das grandes demandas ambientais atuais (SANTOS et al., 2010).



Mishra e Coulibaly (2009) destacam a importância de se ter informações confiáveis no espaço de uma bacia hidrográfica, uma vez que diversas áreas de estudos usam tais dados em suas pesquisas. Entre elas, citam-se: hidrologia, agronomia, climatologia, hidrogeologia, gestão e planejamento de recursos hídricos e processos decisórios para implementação de políticas públicas e instalações industriais. Para que o uso da água pelos múltiplos interessados não prejudique as necessidades de alguns, torna-se crucial a criação de mecanismos tendentes a sua distribuição ou fornecimento de acordo com as necessidades de cada um. Para responder a essas necessidades, tem-se usado uma técnica que permite estimar a disponibilidade hídrica em outros trechos de hidrografia da região regionalizada, fornecendo informações para o planejamento e gestão dos recursos hídricos e, conseqüentemente, diminuindo a possibilidade de conflitos. Para Pruski et al. (2015), não existe um método ou técnica de regionalização universal para uma determinada região ou bacia hidrográfica. A abordagem comum continua sendo o teste de vários métodos de regionalização para identificar os mais apropriados para a região de interesse (SAMUEL et al., 2011). Esta técnica é acompanhada de análises estatísticas multivariadas que podem auxiliar significativamente na condução de estudos de regionalização hidrológica, reduzindo o espaço e o tempo de processamento de banco de dados e aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos. Para Tucci (2002), a escassez de dados está diretamente ligada à disponibilidade temporal e espacial das informações. Segundo o autor, na disponibilidade temporal, há muitos postos com poucos anos de dados, não retratando, portanto, uma amostra representativa. Já a disponibilidade espacial refere-se a altos custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica.

Sendo assim, os dados hidrológicos coletados de uma bacia conhecida podem ser extrapolados para bacias vizinhas com características físicas similares, utilizando técnicas de regionalização hidrológica. No entanto, o emprego de modelos hidrológicos é essencial para a estimativa dos valores de vazões de bacias hidrográficas que não apresentem dados hidrológicos.

A regionalização hidrológica é uma técnica usada para minimizar o problema da falta de informações hidrológicas em locais com níveis limitados de dados hidrológicos (MALEKINEZHAD et al., 2011). Esta técnica se baseia na similaridade espacial e na homogeneidade entre locais, usando variáveis e parâmetros que possibilitam essa transferência de dados.

A regionalização das vazões em alguns casos torna-se crucial, especialmente quando o custo de implementação da rede hidrométrica para medir dados torna-se difícil. Segundo Silva

et al. (2006), o processo de regionalização melhora as estimativas das variáveis hidrológicas e permite verificar a consistência das séries de dados hidrológicos. Para a aplicação desses modelos de regionalização, é fundamental conhecer informações físicas e climáticas da bacia hidrográfica, tais como: vazão, precipitação, densidade de drenagem, declividade, área e comprimento do rio. Estes parâmetros hidroclimatológicos ajudam a determinar as regiões que apresentam características semelhantes em relação à distribuição da frequência e aos parâmetros do modelo de regressão a ser gerado. Ademais, os modelos de regionalização de vazão poderão contribuir, também, para a minimização dos conflitos pelo uso da água na bacia hidrográfica, sendo uma ferramenta importante no processo de gestão e planejamento de recursos hídricos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal propor modelos matemáticos para a estimativa de vazões na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Identificar as regiões homogêneas de acordo com características fisiográficas da bacia hidrográfica em estudo.
- b) Desenvolver modelos matemáticos capazes de estimar as vazões máximas,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em cada região homogênea.
- c) Comparar os modelos matemáticos desenvolvidos com aqueles preconizados nas publicações Atlas Digital das Águas de Minas e em Deflúvios Superficiais de Minas Gerais.

## 1.2 Justificativa

No Brasil, particularmente no caso da área de estudo da bacia hidrográfica do Baixo do Rio Grande, há uma necessidade de se desenvolver métodos eficientes de regionalização para gerenciamento de recursos hídricos, ou seja, minimizar a deficiência de dados obtidos a partir de medições das variáveis hidrometeorológicas. Não obstante, é preciso fazer esforços no sentido de entender os processos hidrológicos ocorridos no Brasil, para poder criar modelos da forma mais próxima da realidade possível, apesar da alta complexidade dos deles.

Ademais, para a gestão adequada dos recursos hídricos, é vital a utilização de bases de dados corretos que possam nos garantir a viabilidade do estudo. Este caso, concreto com dados escassos, possibilita uma nova visão para o gerenciamento de dados aplicando modelos matemáticos que possam auxiliar no monitoramento do escoamento fluvial, assim como o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica em estudo. Do mesmo modo, para a criação dos modelos, é necessário o conhecimento de séries históricas, que geralmente não estão disponíveis nos locais de interesse, agravando problemas para estudos.

A regionalização pode ser usada para melhorar, explorar as amostras pontuais e melhorar as estimativas das variáveis, dando consistência às séries hidrológicas. A instalação das estações hidrométricas representa um elevado custo, manutenção e demanda de tempo, o que se torna uma fragilidade na obtenção de dados, criando, desta forma, uma insuficiência de dados fluviométricos para cobrir ao longo da bacia hidrográfica, sendo este déficit comum no território do Brasil. Esta inadequada distribuição vem prejudicando a gestão de recursos hídricos. Como forma de minimizar esta indagação e o seu contorno, propõe-se a implementação de técnicas apropriadas, como a de regionalização das vazões, para atender às necessidades dos usuários e que se torna uma alternativa mais eficiente e robusta.

Uma das principais aplicações da regionalização de vazões em estudos voltados para o planejamento e gestão de recursos hídricos se refere à estimativa das vazões de referência e máximas. A vazão de referência é um valor que representa o limite superior de utilização da água em um curso d'água e tem por razão buscar a minimização dos conflitos pelo uso da água entre os diversos usuários. A vazão máxima tem contribuído na Engenharia para dimensionamento das obras hidráulicas e estimativa de cheias e inundações.

Os resultados obtidos serão a base de pesquisas atuais e futuras para avaliar a disponibilidade de águas fluviais na região. Poderá contribuir na tomada de decisão objetiva para os órgãos responsáveis na gestão deste corpo hídrico, avaliações de desastres naturais e

mitigar impactos ambientais, uma vez que a profunda quebra no equilíbrio hidrológico/ecológico provoca alterações irreversíveis ao meio ambiente.

### **1.3 Problema e hipótese de pesquisa.**

O presente trabalho tem como foco dar resposta ao seguinte problema de pesquisa: “Como estimar a vazão em uma bacia hidrográfica com ausência ou pouco monitoramento de vazão?”

Essa pergunta torna-se relevante, pois a grande parte das bacias hidrográficas brasileiras não conta com um número considerável de redes fluviométricas, dificultando, assim, o estudo sobre as vazões em corpos hídricos. Essa condição afeta diretamente o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, mais especificamente a concessão de outorgas de uso da água nessas bacias.

Em relação ao problema postos fluviométricos, este trabalho apresenta a seguinte hipótese de pesquisa: “É possível desenvolver uma equação matemática capaz de estimar a vazão em cursos d’água de uma bacia hidrográfica, bastando, para isso, ter em mãos informações de fácil obtenção, como aquelas relacionadas com as características fisiográficas da bacia”.

No sentido de restringir a abrangência do trabalho, dado que o Brasil possui inúmeras bacias hidrográficas, este estudo será desenvolvido na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Baixo Rio Grande (GD8), no Estado de Minas Gerais. Nesta bacia, há necessidade premente de modelos hidrológicos para a estimativa dos valores de vazões ao longo dos seus cursos d’água, dado a baixa quantidade de pontos de monitoramento hidrológico. Dessa forma, esta pesquisa reveste-se de grande importância, pois os resultados gerados podem dar subsídios para o entendimento dos processos hidrológicos, o que poderá auxiliar na tomada de decisões sobre o uso da água nessa bacia.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 A bacia hidrográfica**

Guerra et al. (1999) definem a bacia hidrográfica como sendo a unidade ideal de análise da superfície terrestre, na qual é possível reconhecer e estudar as inter-relações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua formação, sendo dessa forma a melhor unidade de planejamento de uso de terras, levando vantagens em relação a outras unidades delimitadas segundo outros critérios, como climáticos ou políticos.

Bacias hidrográficas, também chamadas bacias de captação ou de drenagem, são áreas delimitadas espacialmente pelos divisores de água e constituídas por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada seção de controle ou exutório (MELLO; SILVA, 2013).

Os conceitos supracitados mostram a relevância de sua inserção na política de recursos hídricos, instituída pela Lei nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997), a qual incorpora normas e princípios para gestão dos recursos hídricos, adotando a bacia hidrográfica como unidade de estudo de gestão integrada. A bacia hidrográfica pode ser subdividida em unidades menores, as quais são denominadas sub-bacias. Para Faustino (1996), sub-bacias são áreas correspondentes aos tributários do curso de água principal, podendo variar em termos de tamanho.

### **2.2 Vazões máximas e mínimas de referência**

A vazão de um curso de água é um parâmetro relevante no que tange às decisões e ao planejamento de recursos hídricos. Pela definição, a vazão significa o volume de água que passa, por unidade de tempo, em uma determinada seção transversal do corpo hídrico, sendo um parâmetro necessário para a realização de estudos voltados à gestão de recursos hídricos (CUPAK, 2017). A vazão é um bom exemplo de processo base para realização da calibração de um modelo hidrológico, pois é componente do balanço hídrico na fase terrestre (ARNOLD et al., 2012). Do ponto de vista estocástico, as vazões podem ser compreendidas em termos da

sua probabilidade de ocorrência e períodos de retorno, destacando-se as vazões máximas, médias e mínimas (OLIVEIRA, 2008).

A vazão máxima é utilizada em projetos de obras hidráulicas, tais como: vertedores, canais, diques de proteção contra inundações, retificação e dragagem de cursos d'água, sistemas de drenagem, bueiros, galerias pluviais, pontes, entre outras. Euclides et al. (2002) afirmam que a estimativa de vazões máximas associadas a um determinado risco de ocorrência é importante para a determinação de áreas sujeitas à inundação. Além disso, essa variável hidrológica é fundamental na adoção de medidas estruturais e não estruturais para controle ou atenuação do efeito das cheias, fornecendo, também, parâmetros necessários ao entendimento de problemas relacionados à erosão e depósito de material sólido carregado pelas águas.

Ainda nessa linha de raciocínio, Merz et al. (2010) afirmam que a estimativa adequada da magnitude e frequência dos eventos hidrológicos máximos é um fator limitante na viabilidade econômica de projetos de estruturas hidráulicas e gestão de recursos hídricos. A estimativa da vazão máxima torna-se pertinente para o controle de inundação e dimensionamento de obras hidráulicas. A regionalização da vazão máxima envolve a estimativa da curva de probabilidade para local sem dados ou com dados escassos. Para Chow et al. (1988), os projetos de estruturas de controle de água, como bueiros rodoviários, pontes, aeródromos e pequenas represas, podem exigir estimativas de intervalos de inundação correspondentes a períodos de retorno de 50 a 100 anos.

O conhecimento das vazões de referência das bacias hidrográficas é incontornável em estudos de disponibilidade hídrica e preservação ambiental, uma vez que estes se vinculam a períodos críticos de oferta de água pelo curso d'água que condiciona a demanda. Essas vazões de referência caracterizam-se por garantir a água nos mananciais (SANTOS; CUNHA, 2013). Do mesmo modo, Pruski et al. (2015) citam que o conhecimento da disponibilidade hídrica natural, caracterizada pelas vazões mínimas, é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. As vazões mínimas são as vazões que ocorrem nos períodos de estiagem pelo esgotamento de reservas do subsolo que afloram nas fontes e nos talvegues dos cursos d'água. São consideradas como variáveis aleatórias nas quais se aplicam técnicas estatísticas para avaliar sua probabilidade de ocorrência determinada pelo seu valor, duração e probabilidade de ocorrência.

Os indicadores de vazões mínimas, para Pyrce (2004), têm sido amplamente utilizados e são considerados apropriados em relação ao nível de planejamento do desenvolvimento dos recursos hídricos, fornecendo um método conveniente para a avaliação dos limiares de vazão.

Segundo Tucci (2002), o conhecimento das vazões mínimas é importante para projetos de abastecimento de água, irrigação, energia elétrica e outorga de uso da água, entre outros. As vazões mínimas que ocorrem em época de estiagem são utilizadas, nesses estudos, dentro de uma das seguintes finalidades: análise, projeto, previsão ou estimativa, regulamentação legal, operação e planejamento. Ele ainda afirma que a vazão mínima é caracterizada por dois fatores: a sua magnitude e a sua duração. A vazão mínima instantânea apresenta pouco interesse ao usuário, pois esta deve ser próxima da vazão mínima diária. Assim, as vazões com durações maiores, como sete dias ou trinta dias, são mais utilizadas por representarem uma situação desfavorável para a demanda de água ou para as condições de conservação ambiental. Para Almeida e Curri (2016), as vazões mínimas são as mais aplicadas como referência, pois são vazões de elevada permanência no tempo, calculadas de forma estatística a partir de dados históricos de estações fluviométricas, sendo que as mais empregadas são as vazões  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ . Segundo Tucci (2007), para o cálculo da  $Q_{7,10}$ , é necessário ter posse dos dados de vazões diárias e calcular a média móvel de 7 dias consecutivos para cada ano. A partir dos valores da menor média, elas são reordenadas de forma crescente, seguidas de um tratamento probabilístico e ajustes estatísticos.

As vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  representam as vazões em que há valores iguais ou superiores a elas em 90% e 95% do tempo, respectivamente. Em outras palavras, representa uma “garantia” de que um determinado valor de vazão esteja presente em 90% ou 95% do tempo em uma determinada seção do curso d’água. Os índices  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  têm sido utilizados em estudos de avaliação de impactos ambientais e, principalmente, na concessão de outorgas do uso da água.

O conhecimento dos intervalos de confiança das vazões de permanência permite ao planejador equacionar a otimização do uso dos recursos hídricos, facilitando, assim, a tarefa de planejamento (CRUZ, 2001).

### 2.3 Critérios para a concessão de outorga de uso da água em Minas Gerais

A quantidade hídrica natural de uma bacia pode ser avaliada pela análise das vazões mínimas, caracterizadas pela sua duração e frequência de ocorrência, refletindo o potencial natural disponível para o abastecimento de água das populações, indústrias, irrigação, navegação, geração de energia elétrica e lançamento de efluentes. Devem-se considerar vários fatores para a concessão das outorgas, tais como: natureza hídrica, biológica, geológica, física, ambiental, social ou econômica, entre outros. O regime dos rios de uma bacia também deve ser considerado. Para rios perenes, a outorga geralmente é feita com base na vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) ou nas vazões mínimas associadas às permanências de 90% ( $Q_{90}$ ) ou 95% ( $Q_{95}$ ). Somente certo percentual dessas vazões deve ser utilizado, sendo o restante considerado vazão remanescente, a qual deveria ser equivalente à vazão necessária para a manutenção da vazão ecológica. A vazão de referência adotada em todo o Estado de Minas Gerais é a  $Q_{7,10}$ .

É de grande importância para o gerenciamento dos recursos hídricos solucionar conflitos resultantes do uso intenso da água, resultado do crescimento econômico e populacional, assim como certificar que a água, recurso natural, finito e insubstituível à vida, permaneça com oferta apropriada e mantenha as funções ecológicas, químicas e biológicas dos ecossistemas naturais.

De acordo com a Resolução Conjunta número 1548 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), são validados os seguintes artigos para a concessão de outorga para Minas Gerais:

Art. 1: Fica estabelecida a  $Q_{7,10}$  (vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência) como vazão de referência a ser utilizada para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado.

Art.2 – O limite máximo de captações e lançamentos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado, por cada seção considerada em condições naturais, será de 50% (cinquenta por cento) da  $Q_{7,10}$ , ficando garantidos a jusante de cada derivação, fluxos residuais mínimos equivalentes a 50% (cinquenta por cento) da  $Q_{7,10}$ .

§1º - Ressalvado o disposto no caput deste artigo, o limite máximo de captações a serem outorgadas nas bacias hidrográficas dos Rios Jequitaiá, Pacuí, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paraopeba e Velhas, por cada seção considerada em condições naturais, será de 30% (trinta por cento) da  $Q_{7,10}$ , ficando garantidos, a jusante de cada derivação, fluxos residuais mínimos equivalentes a 70% (setenta por cento) da  $Q_{7,10}$ .

§2º - Nas áreas declaradas em conflito pelo direito de uso de recursos hídricos pelo IGAM situadas nas bacias hidrográficas mencionadas no §1º, o percentual outorgável será de 50% da  $Q_{7,10}$  com vistas a mitigar os conflitos existentes. (MINAS GERAIS, 2012).



De acordo com Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM (2010), para usos que alteram a quantidade da água em corpo hídrico após a realização do balanço hídrico na seção, considerada e verificada a possibilidade de extração de água, tendo-se por base a vazão de referência adotada pelo órgão, a  $Q_{7,10}$ , deverão ser verificadas as finalidades a que se destinam as águas captadas, derivadas ou desviadas quanto à racionalidade, avaliada de acordo com procedimentos e critérios definidos para cada finalidade de uso.

#### **2.4 Imagem do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**

Para a delimitação correta das sub-bacias hidrográficas, Imagem do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) é de extrema importância para estudos ligados à modelagem hidrológica e ambiental (RIBEIRO et al., 2008). Pode-se dar por meio do uso de geotecnologias, ou seja, por uso do sistema de informações geográficas (SIG) de forma automática.

Sistema de Informação Geográfica é uma ferramenta tecnológica para desenvolvimento de abordagens críticas para compreender, gerenciar e comunicar os vários aspectos das paisagens naturais e humanas. Os modelos hidrológicos estão sendo acoplados à tecnologia do Sistema de Informação Geográfica (SIG), os quais auxiliam na criação de banco de dados para os modelos, permitindo análises e simulações mais complexas. Para He (2001), modelos de simulação são ferramentas úteis na análise dos processos de bacias hidrográficas e suas interações, assim como para o desenvolvimento e avaliação de cenários de gestão de bacias hidrográficas. Contudo, a implementação destes modelos exige, muitas vezes, a integração de SIG, sensoriamento remoto e vários bancos de dados para o desenvolvimento dos parâmetros de entrada do modelo e para a análise e visualização dos resultados da simulação.

A obtenção das variáveis físicas hidrológicas explicativas no campo, muitas vezes, acarreta alto custo e tempo. Para contornar essa realidade, têm sido usados Modelos Digitais de Elevação (MDE), que agilizam o processo e viabilizam o maior número de estudos com um nível de detalhamento bastante considerável (SILVA et al., 2015). Na mesma ideia, Costa e Reis (2017) afirmam que é uma ferramenta que torna possível integrar e manipular a base de dados, o que viabiliza trabalhos de campo e promove maior eficiência do monitoramento e fiscalização na área ambiental.

Os MDEs correspondem a uma distribuição espacial da altitude, podendo ser obtidos por meio da interpolação de curvas de nível extraídas de cartas topográficas ou imagens de

sensores remotos (ALVES et al., 2010). A imagem de radar SRTM é oriunda da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration). O resultado dessa missão internacional permite a disponibilização de um modelo digital de elevação (MDE) com boa resolução espacial de 30m. Os MDEs foram gerados por interferometria de radar, a qual se utiliza das respostas espectrais na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético, permitindo a aquisição de informações sobre a estrutura tridimensional dos alvos na imagem, no caso do SRTM, o relevo. A utilização de dados SRTM em ambiente SIG permite a caracterização física de bacias hidrográficas, podendo auxiliar na gestão e no gerenciamento dos recursos hídricos, razão por que se mostra uma alternativa prática e viável ao minimizar custos e tempo na execução dos trabalhos (OLIVEIRA et al., 2010).

Segundo Miranda (2005), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desenvolveu uma metodologia para restaurar a base numérica de dados do relevo do Brasil, adquirido pela nave espacial americana na missão conhecida como SRTM. Esse arquivo de base foi tratado matematicamente por intermédio de modelos que visam reconstituir o relevo do país, como nas cartas topográficas, só que de forma homogênea e digital. As análises ambientais e hidrológicas tornaram-se objetos de estudo, sendo a delimitação das bacias hidrográficas um fator primordial e um dos mais comuns procedimentos executados (HASS et al., 2014). A delimitação de bacias hidrográficas tem uma grande importância para a melhoria da dinâmica e gerenciamento dos recursos hídricos, sendo que as características físicas e bióticas de uma bacia hidrográfica exercem uma influência no ciclo hidrológico, afetando diretamente a quantidade e a qualidade de água produzida (FEREIRE; LAGE; CHRISTOFARO, 2013).

## 2.5 Regionalização Hidrológica

Para Tucci (2014), a regionalização consiste num conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes. Consequentemente uma rede hidrométrica dificilmente abrange todos os locais necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Contudo, existirão lacunas temporais e espaciais que deverão ser preenchidas com base em metodologias apropriadas. Observa-se que quando um sistema de gestão não atende mais adequadamente às necessidades da população, é necessário desenvolver um novo sistema ou ajustar o sistema existente, adaptando-o às novas condições (PLATE, 2002).

Para minimizar este fato, é comum o uso dos modelos hidrológicos como ferramenta na gestão dos recursos hídricos (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013; VIOLA et al., 2012), assim como a técnica de regionalização hidrológica. Os métodos de regionalização hidrológica já são conhecidos desde 1960 (CLARKE, 2001).

Para Silva Júnior et. al. (2002), os modelos de regionalização de vazões buscam uma melhor estimativa das vazões em seções que não possuem medições fluviométricas, não sendo recomendada a utilização destes modelos em seções que possuem medições, pois eles não substituem as informações reais.

Como exemplos da técnica de regionalização de vazões, cita-se o trabalho de Lopes, Prado e Alberto (2016). Esses autores regionalizaram as vazões máximas e mínimas para a bacia do Rio Ivaí – PR, ajustando equações de regressão para quatro tipos de modelos: linear, exponencial, potencial e logarítmico. As equações de regressão apresentaram altos coeficientes de determinação  $r^2$ , e, para as vazões máximas, os modelos tiveram melhor adequação quando associados às variáveis de precipitação média anual total e área de drenagem. O melhor ajuste de regressão das vazões mínimas foi verificado quando a variável, independentemente da área de drenagem, foi considerada no ajuste. Essa conclusão também foi obtida por (PRUSKI et al. 2011, 2013).

Ainda nessa linha de pesquisa, Lopes et al. (2017) regionalizaram as vazões máximas e mínimas na bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, Brasil, com uma área de drenagem de 141.483 km<sup>2</sup>, usando o modelo de regressão linear múltipla. As variáveis independentes foram obtidas por meio das características físicas da bacia (área de drenagem e comprimento do rio) e da precipitação total anual. Para avaliar o ajuste do modelo, os autores usaram o coeficiente de determinação, coeficiente de determinação ajustado e significância pelo teste F.

Álvarez et al. (2011) realizaram a regionalização hidrológica na cidade de Mixteca Oaxaqueña no México, numa área de estudo de 17 sub-bacias com variáveis climáticas e fisiográficas potencialmente úteis para a predição de vazões, em que foi determinado que as melhores variáveis explicativas foram a área da bacia e a precipitação média anual.

As citações supracitadas mostram que a importância da regionalização da vazão não se deve somente à sua capacidade de gerar informações hidrológicas, mas também pode identificar as áreas que necessitam de melhoria na rede hidrometeorológica. Dessa forma, é possível instalar ou realocar estações existentes na bacia hidrográfica (VIRÕES, 2013).

### **2.5.1 Identificação de regiões homogêneas**

Uma região é homogênea se existem evidências suficientes de que as diferentes amostras do grupo possuem a mesma distribuição de frequências, ou que possuem similaridade hidrológica. Entre os fatores de similaridade, citam-se: fatores físicos, climáticos, biológicos, geológicos, efeitos antrópicos, entre outros. Bobée e Rasmussen (1995) destacam que a análise regional de frequência e, em particular, a delimitação de regiões homogêneas são construídas com base em premissas difíceis de serem tratadas com rigor matemático. Do mesmo modo, Ilorme e Griffis (2013) consideram a identificação de regiões homogêneas como sendo a etapa da regionalização que possui maior grau de dificuldade, por requerer, muitas vezes, julgamento subjetivo.

No século passado a identificação das regiões homogêneas era feita com base em fronteiras geográficas, políticas, administrativas ou fisiográficas. Segundo Rao e Srinivas (2006), estas práticas não asseguram um grau de homogeneidade hidrológica satisfatória. Ainda segundo esses autores, atualmente lança-se mão da técnica de identificação das regiões homogêneas que considera a semelhança entre locais, em um espaço multidimensional dos atributos relacionados às bacias hidrográficas, como características fisiográficas, localização geográfica e estatísticas locais da variável hidrológica.

Em estudos de regionalização de vazões, os parâmetros do modelo de regressão são mais frequentemente associados às características físicas da bacia, uma vez que, devido às diferenças de escala e aos erros que podem advir da modelagem, existem grandes dificuldades na consideração dos processos físicos na obtenção dos parâmetros do modelo (YADAV et al., 2007).

## 2.5.2 Variáveis explicativas na regionalização de vazões

Os modelos de regressão simples relacionam as equações da reta, enquanto as equações multivariadas e as não lineares podem relacionar equações do tipo equação exponencial, geométrica ou potencial, logarítmica, entre outras.

Na regionalização, as variáveis explicativas, usadas nos modelos de regressão, são as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Elas são determinadas para a área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas existentes na bacia hidrográfica. As variáveis explicativas são entendidas como as usadas para estimar o valor da variável hidrológica em função das características fisiográficas da bacia hidrográfica, conforme explicitado na Equação 1.

$$Q_m = f(A, P, D, Dd, L, \dots) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:  $Q_m$  = variável hidrológica, por exemplo, vazão média anual,  $A$  = área de drenagem,  $P$  = precipitação média anual,  $D$  = declividade do rio,  $Dd$  = densidade de drenagem e  $L$  = comprimento do rio.

Quando o modelo matemático não é linear, procura-se, por um artifício matemático, transformar essa equação numa expressão linear, por meio de uma função logarítmica, fazendo-se o uso para qualquer modelo (TUCCI, 2002). Além disso o modelo matemático mais eficiente será aquele que permitir a estimativa dos valores da função estudada com menores erros e incluir o menor número de variáveis explicativas, reduzindo o custo e o tempo de obtenção desses valores no processo de predição.

De acordo com Tucci (2002), existem algumas condições básicas em relação à consolidação das variáveis explicativas:

- a) as variáveis explicativas devem ser facilmente determinadas pelo usuário da regionalização, caso contrário a metodologia dificilmente será utilizada;
- b) deve-se evitar métodos indiretos com muita incerteza para a determinação das variáveis explicativas;
- c) o coeficiente de depleção de uma bacia pode ser utilizado como variável explicativa de uma regionalização, mas, para determinada região, é adotado um valor médio gerando mais incertezas;

- d) muitas variáveis explicativas possuem forte correlação entre si, de tal forma que introduzir uma nova variável provavelmente não haverá aumento de informação;
- e) a regionalização deve prover ao usuário a metodologia de estimativa das variáveis explicativas nas diferentes áreas em que a metodologia poderá ser aplicada;
- f) a regionalização deve fornecer os níveis de incerteza para estimativa da variável dependente.

Razavi e Coulibaly (2013) consideram, efetivamente, que a área de drenagem é a principal variável explicativa em diversos estudos de regionalização de vazões. Contudo, a precipitação é a variável climática mais empregada, sendo que para as vazões máximas as precipitações mais frequentes são a máxima diária anual, mês mais chuvoso, trimestre mais chuvoso e semestre mais chuvoso. A precipitação média de longa duração é usada na regionalização das vazões médias e a precipitação total anual é mais utilizada para as vazões mínimas e média (BAENA et al., 2004).

## 2.6 Correlação, modelo de regressão

A correlação pode ser compreendida como medida da variação conjunta das variáveis ou covariação observada em um diagrama de dispersão e que pode ser realizada numericamente por meio dos coeficientes de correlação que representam o grau de associação entre duas variáveis contínuas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Segundo Ilorme e Griffis (2013), a correlação revela associações lineares entre dois conjuntos de variáveis e a análise de discriminante múltipla identifica as variáveis que são capazes de explicar as diferenças entre um conjunto de grupos predefinidos. Quanto mais fortemente positiva for a análise de correlação entre as variáveis, mais essas são interdependentes (FARHAN; SHAIKH, 2017).

Modelos de regressão são modelos matemáticos que relacionam o comportamento de uma função dependente (vazões máximas, médias, mínimas, de permanência etc.) com uma ou mais variáveis independentes ou explicativas, pois tentam explicar como ocorre a variação desta função (TUCCI, 2002). A função matemática “ $Q_{(x)}$ ”, que relaciona duas variáveis, é denominada modelo de regressão linear simples (Equação 2).

$$y=Q_{(x)}=a+bx$$

(Equação 2)

Em que  $Q_{(x)}$  é a vazão estimada pelo modelo linear e  $a$  e  $b$  são parâmetros de ajuste do modelo.

Quando o modelo matemático  $Q_{(x)}$  é explicado por mais de uma variável explicativa ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), obtém-se um modelo matemático de regressão multivariada. Podendo ser alguma destas as seguintes funções distintas: potencial, exponencial, logarítmico e recíproco (Equações 3, 4, 5 e 6 respectivamente).

$$Q_{\text{pot}} = a \cdot x^b \quad (\text{Equação 3})$$

$$Q_{\text{exp}} = a \cdot e^{bx} \quad (\text{Equação 4})$$

$$Q_{\text{log}} = a + b \ln x \quad (\text{Equação 5})$$

$$Q_{\text{rec}} = (a + bx)^{-1} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:  $Q_{\text{pot}}$  é a vazão estimada pelo modelo potencial;  $Q_{\text{exp}}$  é a vazão estimada pelo modelo exponencial;  $Q_{\text{log}}$  é a vazão estimada pelo modelo logarítmico;  $Q_{\text{rec}}$  é a vazão estimada pelo modelo recíproco;  $a$  e  $b$  são parâmetros de ajuste dos modelos, adimensionais e  $x$  é a variável explicativa.

Para estudos de regionalização de vazões, vários autores, como Silva, Marques e Lemos (2011), Lisboa et al. (2008), Lujano et al. (2017) e Lopes et al. (2017), em seus resultados, obtiveram o melhor ajuste na realização das regressões multivariadas para diferentes níveis de vazão de permanência usando o modelo potencial.

## 2.7 Análise Multivariada- Análise de Aglomerados (Clusters)

A análise estatística multivariada de agrupamento consiste na aglomeração sequencial de indivíduos em grupos cada vez maiores, de acordo com algum critério, de distância ou medida de dissimilaridade (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Hosking e Wallis (1997) empregaram em seus estudos a análise de clusters de regionalização de frequências de precipitação, vazões de referência, vazões de enchentes, entre outras variáveis, com resultado satisfatório. Para esses autores, a análise de clusters é um método mais prático, porém ainda sujeito a subjetividades, para a identificação preliminar de regiões consideradas homogêneas.

Hsu e Huang (2017) consideram que é uma técnica que objetiva identificar padrões ao formar clusters (grupos) homogêneos. O agrupamento com base em respostas hidrológicas ou características de drenagem é o primeiro passo para a regionalização das vazões (SINGH et al., 2016). A técnica de agrupamento, segundo Kumar, Singh e Mishra (2013), busca as relações entre um conjunto de variáveis, uma vez que não faz distinção entre variáveis dependentes e independentes. Para a aplicação de análise de aglomerados, foi aplicado o método de distância euclidiana, que, pela sua definição, é a soma da raiz quadrada da diferença entre dois pontos em suas respectivas dimensões. Esta análise é um dos coeficientes de dissimilaridade mais conhecidos e utilizados (HAIR JR. et al., 2009). Segundo esses autores, necessita-se determinar os coeficientes que melhor se adaptam a determinados tipos de variáveis e situações, sendo, geralmente, os coeficientes de dissimilaridade mais adequados para as variáveis quantitativas e os de similaridade para as variáveis qualitativas.

Farsadnia et al. (2014) concluíram que a análise de cluster teve bons resultados quando empregada para identificar regiões homogêneas na regionalização hidrológica. Yin et al., (2016), estudaram o método de regionalização para caracterizar eventos extremos (precipitação e inundações), na China, região do Delta do Rio Yangtze, por meio de análise de agrupamento.

Hair Jr. et al. (2009) relatam que para o uso da análise de agrupamento pelo método da distância euclidiana é necessário realizar a padronização das variáveis, devido estas apresentarem discrepância entre as unidades de medida, o que pode acarretar uma falsa correlação entre elas. Vários são os estudos que utilizam a distância euclidiana (LUCIO; SILVA, 2014; SINGH et al., 2016; VEZZA et al., 2010; YANG et al., 2010). Para a técnica de aglomerados, existem vários critérios de agrupamento, com destaque para os métodos da Ligação Simples, Ligação Completa, método do Centróide e o método de Ward.

O algoritmo de Ward (WARD, 1963) é uma técnica frequentemente utilizada para estudos de regionalização em hidrologia e climatologia (FARSADNIA et al., 2014; HOSKING; WALLIS, 1997; MALEKINEZHAD et al., 2011). Baseia-se no pressuposto de que se dois núcleos forem fundidos a perda de informação resultante ou a mudança no valor da função objetivo dependerão apenas da relação entre os dois clusters combinados, e não das relações com outros clusters (FARSADNIA et al., 2014; RAO; SRINIVAS, 2008).

O método de Ward emprega a análise de variância para determinar as distâncias entre clusters e, a cada nova interação, reunir de forma a minimizar a soma dos quadrados de quaisquer pares de clusters hipotéticos. De acordo com YANG et al. (2010), esse método é considerado como eficiente e geralmente tende a produzir clusters pouco extensos e de igual



número de elementos. Segundo Ilorme e Griffis (2013), o método calcula a distância entre dois agrupamentos e a soma dos quadrados entre os dois agrupamentos, realizada sobre todas as variáveis (Equação 7). Nesse método, a formação dos grupos se dá pela maximização da homogeneidade dentro dos grupos. Raziei (2017) observou que o algoritmo de Ward em seus estudos apresentou uma classificação mais realística em relação às divisões das regiões. Estes resultados também corroboram a afirmação de Gonçalves et al. (2016) de que o método de Ward supera outras abordagens de agrupamento na classificação de variáveis climatológicas e produz grupos, em que cada um deles, segundo Hair et al. (2009), possui características semelhantes e independência relativamente alta para cada grupo. Além disso, os dendogramas gerados pelo algoritmo de Ward apresentam uma melhor estrutura de grupos quando comparado com os demais algoritmos, formando grupos compactos e bem delimitados (DINIZ; SOARES; CABRAL, 2012).

$$W = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum X_i)^2 \quad (\text{Equação 7})$$

Em que : W = homogeneidade intragrupos e heterogeneidade intergrupos por meio da soma do quadrado dos desvios; n = número de valores analisados e xi = i-ésimo elemento do agrupamento.

## 2.8 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS)

A validação de modelos hidrológicos depende das aplicações pretendidas, mas, para se obter uma medida da eficácia da simulação nos testes, é conveniente que coeficientes estatísticos sejam utilizados (VIOLA et al., 2009). Para Razavi e Coulibaly (2013), o coeficiente de Nash-Sutcliffe é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. Moriasi et al. (2007) descrevem que o  $C_{NS}$  fornece maiores informações sobre os valores obtidos na simulação, sendo a melhor função objetiva no ajuste de modelos hidrológicos.

A análise de sensibilidade também é imprescindível para verificar se o modelo está capturando, de forma correta, o comportamento dos processos hidrológicos predominantes na bacia. Com essa análise, demonstra-se a proximidade do valor calculado em relação ao valor

real do parâmetro hidrológico pesquisado. O coeficiente de Nash-Sutcliffe é considerado uma análise da sensibilidade do modelo.

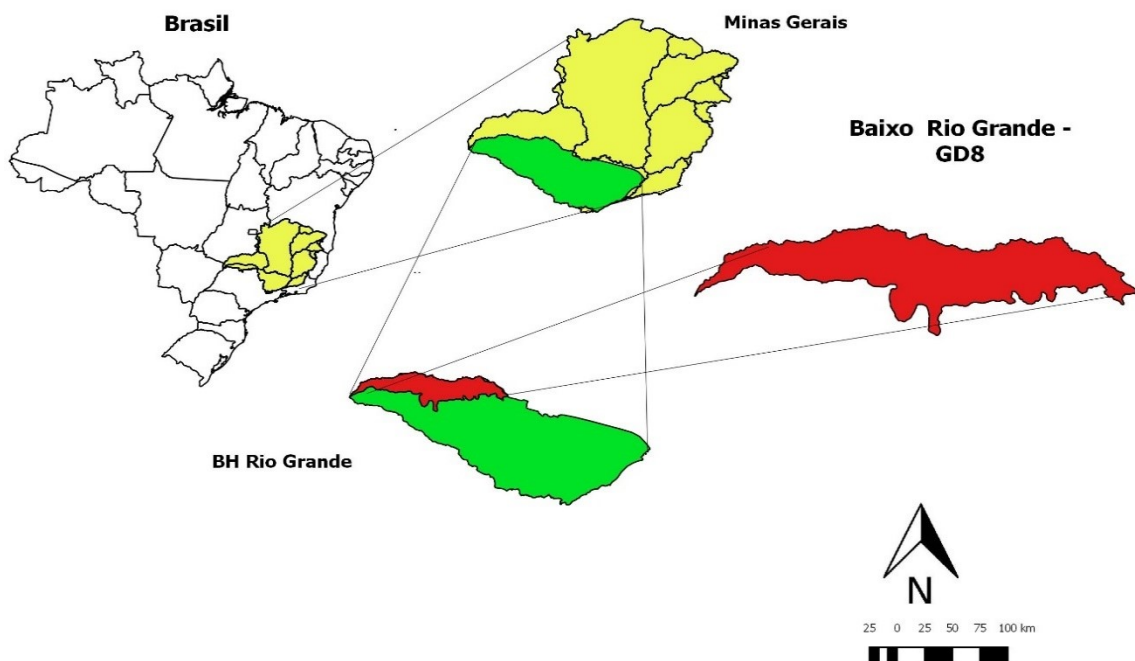
Outro aspecto a ser mencionado é que a análise de sensibilidade é extremamente dependente da estatística de precisão utilizada para quantificar a sensibilidade, ou seja, o  $C_{NS}$  certamente sofrerá mais influência de parâmetros vinculados ao escoamento superficial direto (ANDRADE, 2013).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

Este estudo foi desenvolvido na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Baixo Rio Grande (GD8) (Figura 1), no Estado de Minas Gerais. Essa unidade é parte integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, sub-bacia do Rio Paraná. Ela se localiza na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, entre os paralelos 19° 24' e 22° 56' Sul do Equador e entre os Meridianos 43° 33' e 51° 05' Leste de Greenwich. Sua área de drenagem é de aproximadamente 18.784 km<sup>2</sup>. A classificação climática, segundo Köppen, compreende os tipos Aw - Clima tropical de savana, Cwa - Clima de inverno seco e verão chuvoso e Cwb - verão fresco. A sub-bacia Baixo Rio Grande apresenta um relevo de planalto central e planícies interioranas fluviais e fluvilacustres (MENEZES, 2011).

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande-UPGRH-GD8



Fonte: O autor

A Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) situa-se na Região Sudeste do Brasil, na Região Hidrográfica do Paraná, que, em conjunto com as Regiões Hidrográficas Paraguai e

Uruguai, compõe a Bacia do Prata. A BHRG possui uma área territorial com mais de 143.000 km<sup>2</sup> de área de drenagem, desde a Serra da Mantiqueira, sul de Minas Gerais, até a região do Triângulo Mineiro, a oeste do Estado mineiro. Esta bacia hidrográfica encontra-se localizada entre os paralelos 19° e 23° de latitude Sul e entre os meridianos 44° e 53° de longitude Oeste. A BHRG inclui dois importantes estados brasileiros: Minas Gerais, ao norte, com 60,2% da área de drenagem da bacia, e São Paulo, ao sul, com 39,8% da área de drenagem. Esta se divide em três regiões fisiográficas bem distintas, que são: Alto Rio grande, Médio Rio Grande e Baixo Rio Grande. As maiores unidades de gestão da BHRG são GD8 (Baixo Rio Grande, com 13,08% da área de drenagem da bacia do Rio Grande), GD3 (Entorno do Reservatório de Furnas, com 11,54%), UGRHI 15 (Turvo/Grande, com 11,14%) e a UGRHI 09 (Mogi Guaçu, com 10,48%) (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT, 2008).

### 3.2 Materiais utilizados

As imagens orbitais da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Baixo Rio Grande (GD8) foram obtidas do SRTM (Missão Topográfica Radar Shuttle), disponibilizados gratuitamente no site USGS (United States Geological Survey<<https://earthexplorer.usgs.gov/>>), com resolução espacial de 30 m e elipsoide de referência WGS84. Realizou-se a conversão para o Datum South American Datum SIRGAS 2000, com o auxílio do software Qgis 2.18.14 (software de uso livre, licenciado sob a “GNU General Public License” do projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Essa ação foi necessária a fim de preparar os dados para posterior utilização neste estudo. Com o objetivo de refinar e identificar as menores drenagens, foi usado o Google Earth<sup>®</sup>. Posteriormente, vetorizou-se os canais menores para melhorar a sua visualização.

Os dados das estações fluviométricas, instaladas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande (GD8), foram obtidos no sistema de monitoramento hidrológico denominado HIDROWEB<sup>3</sup>. Esse sistema é administrado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Após a obtenção dos dados, eles foram organizados em planilha eletrônica e no sistema Hidro 1.3, software disponibilizado pela ANA para manipulação dos dados obtidos no Hidroweb.

---

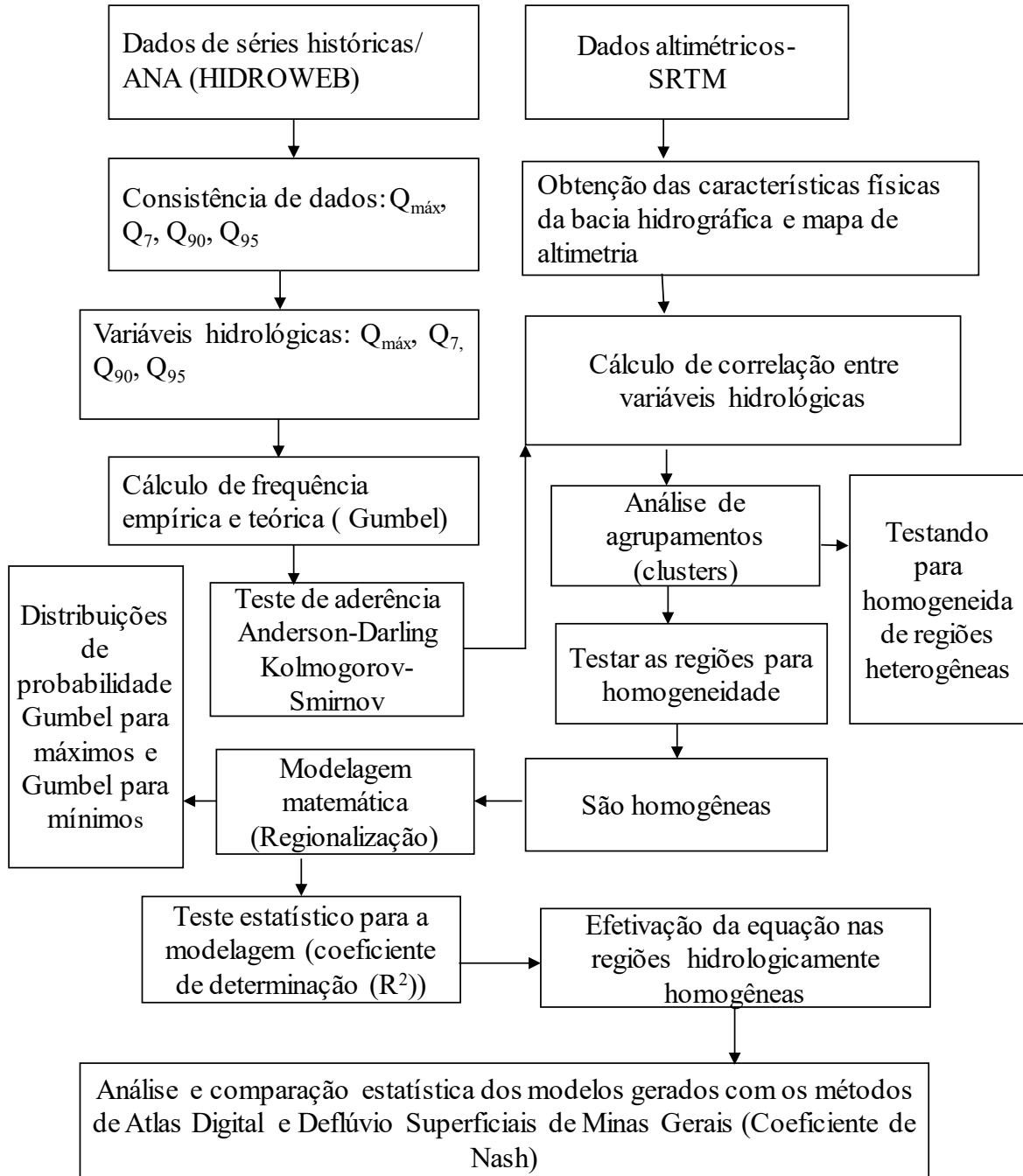
<sup>3</sup>Cf. <http://www.sigrh.sp.gov.br>.

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Fluxograma metodológico da pesquisa

A seguir, prossegue o fluxograma (Figura 2) referente ao processo metodológico e as respectivas ferramentas utilizadas neste trabalho.

Figura 2 - Etapas metodológicas propostas e aplicadas no estudo



Fonte: O autor

Primeiramente foi usado o Modelo Digital de Elevação/SRTM de 30 m de resolução, por meio do qual foi possível extrair a drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica, usando a ferramenta GRASS 7.2.2 no ambiente Qgis 2.18.14. Para a delimitação da bacia hidrográfica da área de estudo e suas sub-bacias, com área de contribuição formada a partir das coordenadas das estações fluviométricas, foi usada a metodologia citada em Dias et al. (2004). Esta metodologia consiste em quatro etapas, subdivididas em: preenchimento de depressões (*fill sinks*), direção do escoamento (*flow direction*), fluxo acumulado (*flow accumulation*) e delimitação de bacias (*watershed*).

Para Luedeling et al. (2007), o MDE que acompanha os dados SRTM contém falhas em certas áreas do globo, originadas principalmente pela ocorrência de corpos hídricos e pelo relevo acidentado. Em relação a este último, a maior frequência de falhas ocorre nas superfícies com inclinação acima de 20°, devido ao sombreamento na imagem do radar. Para suprir estas lacunas, o MDE deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo, assim, a sua consistência hidrológica (BAENA et al., 2004).

Para o preenchimento das depressões, realizaram-se as correções no MDE por meio da função *fill sinks*, que considera as altitudes dos pixels vizinhos, de forma a preencher as depressões ou *sinks* promovendo, assim, a geração do MDE com melhor consistência. Após o preenchimento das depressões, foi feita a delimitação das sub-bacias, processando-se os mapas de direção de fluxo e fluxo acumulado na função *watershed*. Posteriormente à geração de bacias e sub-bacias hidrográficas, estas foram convertidas para o formato vetorial na função *r.to. vect. area* no ambiente SIG.

### 3.3.2 Características físicas da UGRH Baixo Rio Grande (GD8)

O processo de obtenção das caracterizações físicas da bacia hidrográfica estudada foi desenvolvido ainda no ambiente SIG. A delimitação automática das sub-bacias foi feita a montante das estações fluviométricas.

Para a regionalização hidrológica, foram usadas as seguintes características físicas das sub-bacias: área de drenagem (Ad), comprimento do curso de água principal (L), comprimento total da rede de drenagem (Lt), perímetro (Pe) e comprimento axial (Lax). Esses parâmetros foram calculados automaticamente por meio do modelo digital de elevação (MDE), após o posicionamento delas a partir das coordenadas geográficas por meio de uma função geométrica

do SIG. O coeficiente de compacidade ( $K_c$ ) foi calculado por meio do perímetro e da área da bacia hidrográfica. Segundo Mello e Silva (2013), o  $K_c$  é um coeficiente que representa a forma da bacia, que pode ser decisiva quanto à tendência de respostas mais rápidas ou mais lentas do sistema na geração do escoamento (bacias circulares terão a tendência de respostas mais rápidas do que as bacias alongadas). Matematicamente, o  $K_c$  é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de uma circunferência de área igual à da bacia hidrográfica (Equação 8).

$$K_c = 0,28 \frac{P_{BH}}{\sqrt{A_{BH}}} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:  $K_c$  = coeficiente de compacidade, adimensional;  $A_{BH}$  = área da sub-bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ ; e  $P_{BH}$  = perímetro da sub-bacia hidrográfica, em km.

Outra característica física da bacia, usada na regionalização, foi a densidade de drenagem ( $D_d$ ) (Equação 9). Ela foi obtida a partir da estimativa de variáveis de medidas lineares, como a área da sub-bacia ( $A_{BH}$ ) e o comprimento total dos cursos d'água de cada sub-bacia. Para Mello e Silva (2013), maior  $D_d$  significa que a bacia é mais acidentada e tende a gerar maior escoamento superficial direto para um mesmo evento de chuva.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A_{BH}} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:  $D_d$  = densidade de drenagem da sub-bacia, em  $\text{km km}^{-2}$ ;  $L_i$  = comprimento do segmento  $i$ , em km;  $A_{BH}$  = área da sub-bacia, em  $\text{km}^2$ ; e  $n$  = número total de segmentos da bacia.

O valor de  $D_d$  é muito dependente do recurso utilizado, ou seja, fotografia aérea ou carta topográfica. Segundo Mello e Silva (2013), a  $D_d$  pode variar de  $0,93 \text{ km km}^{-2}$  a  $2,09 \text{ km km}^{-2}$ , quando se utilizam cartas topográficas, e de 5 a 13 quando se utilizam fotografias aéreas. Pode-se classificar uma bacia com base neste índice da seguinte forma: baixa densidade de drenagem:  $<5 \text{ km km}^{-2}$ , média densidade de drenagem:  $5-13 \text{ km km}^{-2}$  e alta densidade de drenagem:  $>13 \text{ km km}^{-2}$ .

Neste trabalho, também foi obtido o índice de conformação ( $I_c$ ) para cada sub-bacia (Equação 10). Ele foi calculado a partir da área da sub-bacia e de seu comprimento axial. Este parâmetro expressa a capacidade da bacia hidrográfica em gerar enchentes. Quanto mais próximo de 1, maior a propensão a enchentes (MELLO; SILVA, 2013).

$$I_c = \frac{A_{BH}}{L_{ax}^2} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que,  $I_c$  = índice de conformação, adimensional;  $A_{BH}$  = área da bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ , e  $L_{ax}$  = comprimento axial da bacia hidrográfica, em km.

### 3.3.3 Análise de dados hidrológicos

Neste trabalho foram identificadas 11 estações fluviométricas na UPGRH Baixo Rio Grande (GD8). Os dados foram obtidos já consistidos. A Lei nº 9.433 de 08/01/1997 (BRASIL, 1997) instituiu o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e atribuiu às entidades participantes do sistema a responsabilidade de reunir, atualizar, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos no Brasil, garantindo o acesso e a informação dos dados a toda sociedade.

Posteriormente, as estações fluviométricas (Tabela 1) foram analisadas e selecionadas de acordo com Tucci (2014), o qual afirma que a disponibilidade de vazões e séries históricas com no mínimo de cinco anos de dados não é suficiente para estudo estatístico, mas pode-se considerar que outros postos com séries de dados mais longas agreguem informações sobre a região. Ressalta-se que foram retirados das séries históricas alguns anos com dados incompletos. Dependendo ainda do objetivo da análise, os dados foram mantidos. Por exemplo: para as vazões mínimas se dava prioridade aos meses da estação seca (maio a outubro) e, para vazões máximas, a prioridade era os meses chuvosos (novembro a abril).



Tabela 1 - Relação das estações fluviométricas encontradas na UPGRH-GD8

Código	Estação	Latitude	Longitude	Série histórica (anos)
61730000	Rifaina	-20°05'00"	-47°23'00"	18
61731080	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	-20°09'12"	-47°16'46"	25
61998080	UHE Água Vermelha Barramento	-19°51'46"	-50°20'51"	24
61760080	UHE Volta Grande Barramento	-20°02'04"	-48°13'20"	24
61796080	UHE Porto Colômbia Barramento	-20°07'37"	-48°34'19"	23
61740080	UHE Igarapava Barramento	-19°59'32"	-47°45'30"	15
61946000	São Francisco de Sales	-19°50'00"	-49°40'00"	9
61794000	Uberaba	-19°43'41"	-47°58'43"	34
61734080	UHE Jaguará Barramento	-20°01'16"	-47°26'09"	22
61941080	UHE Marimondo Barramento	-20°18'04"	-49°11'48"	24
61795000	Conceição das Alagoas	-19°54'34"	-48°23'26"	41

Fonte: O autor

### 3.3.4 Vazões mínimas

Para estimativa da vazão mínima anual de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), calculou-se a média móvel das vazões de sete dias consecutivos em cada ano da série de dados, usando-se o software Hidro 1.3 (ferramenta de apoio para visualização e triagem dos dados), disponibilizado pela Agência Nacional de Águas – ANA. Após a obtenção da série anual das vazões mínimas de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), os dados foram trabalhados em planilha eletrônica, ordenados de forma crescente de valor, com intuito de calcular a frequência empírica (ou frequência observada) por meio da equação de Weibull (Equação 11) (MELLO e SILVA, 2013).

$$P = \frac{m}{N+1} \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:  $p$  = é a frequência empírica, adimensional;  $m$  é a ordem da variável hidrológica (1 para o primeiro e  $N$  para o último  $m$ ),  $l$  refere-se à posição de plotagem (ou ordem)) e  $N$  é o tamanho da série histórica.

Com a ordenação concluída, procedeu-se ao teste de adequacidade ou de aderência do modelo de distribuição de probabilidades (frequência teórica). Neste trabalho, foi usada a

distribuição de probabilidade Assintótica de Valores Extremos do Tipo II, também denominada Gumbel para mínimos. Os parâmetros de escala e posição desse modelo de probabilidades foram estimados pelo método dos momentos. Neste trabalho, para as vazões mínimas, foi utilizado o teste de adequacidade de Kolmogorov-Smirnov (KS), com nível de significância no valor de 5%, em cada série histórica de cada estação fluviométrica. Este teste compara a maior diferença entre as frequências observadas (empíricas) e as frequências teóricas, resultando numa possibilidade de a série de dados ser adequada ou inadequada à distribuição de Gumbel para mínimos.

Os valores de probabilidade  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram obtidos a partir da função "PERCENTIL.INC", presente no software Microsoft Excel<sup>®</sup> 2010, usando os valores da série de vazões médias diárias de cada estação fluviométrica.

### **3.3.5 Vazões máximas**

As vazões diárias máximas de cada ano foram obtidas a partir da série de dados de cada estação fluviométrica. No intuito de aproveitar a série de dados ao máximo, no caso em que a série anual fosse incompleta, priorizava-se o período entre o início e término da época chuvosa, como sendo o fulcro para obtenção da vazão máxima. Após a obtenção dos dados de vazão máxima, eles foram organizados em ordem crescente de valores em uma planilha eletrônica. Feito isso, procedeu-se ao cálculo da frequência empírica (ou frequência observada) por meio da equação de Weibull (Equação 11). Para o cálculo da frequência teórica, foi utilizado o modelo de distribuição de probabilidade Assintótica de Valores Extremos do Tipo I, também denominado Gumbel para máximos. Os parâmetros de forma e posição foram estimados pelo método dos momentos. Para testar a adequacidade desse modelo, foi utilizado o teste de aderência de Anderson-Darling (Anderson-Darling, 1954), com nível de significância de 5%. Segundo Naghettine e Pinto (2007), este teste é não paramétrico, procura ponderar mais fortemente as caudas das distribuições, nas quais as maiores (ou as menores) observações da amostra podem alterar sobremaneira a qualidade do ajuste. De acordo com esses autores, esse teste é especialmente recomendado para teste de modelos de distribuição que procuram estimar valores máximos.

### 3.3.6 Teste de correlação

Após a obtenção das variáveis de resposta ( $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) e das variáveis fisiográficas de cada sub-bacia (área de drenagem (Ad), comprimento do curso de água principal (L), comprimento total da rede de drenagem (Lt), perímetro (Pe), comprimento axial (Lax), coeficiente de compacidade (Kc), índice de conformação (Ic) e densidade de drenagem (Dd)), calculou-se a correlação entre as variáveis, na tentativa de verificar a influência que as variáveis preditoras teriam em relação às variáveis de resposta. Um dos problemas mais comuns encontrados na aplicação de modelos estatísticos multivariados é a dependência das unidades e das escalas nas quais as variáveis foram medidas. Para contornar esse problema, os dados foram padronizados por meio da Equação 12. A correlação foi estimada por meio do coeficiente de Pearson, utilizando o suplemento Action 2.9 do Excel<sup>®</sup> 2016. Esse coeficiente de correlação parcial expressa o grau de dependência linear entre duas variáveis dependentes e independentes, facilitando a tomada de decisão entre incluir ou não a variável no modelo.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{\sigma(X_j)} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que,  $Z_{ij}$  = variável padronizada;  $X_{ij}$  = variável original;  $\bar{X}$  = média da  $j$ -ésima variável original e  $\sigma(X_j)$  = desvio-padrão da variável.

### 3.3.7 Identificação das regiões homogêneas

Para a identificação das regiões homogêneas, foram construídas as matrizes de dissimilaridade empregando as distâncias Euclidianas (utilizando o suplemento Action 2.9 do Excel<sup>®</sup> 2016), conforme explicitado na Equação 13 (HARRIS, 1955), juntamente com os algoritmos de agrupamento de Ward (WARD, 1963). Ward é designado como sendo um método de agrupamento hierárquico baseado na minimização da distância euclidiana no local ou espaço característico dentro de cada grupo. O algoritmo de Ward supera outros algoritmos em termos de separação na obtenção de cluster (grupos), relativamente densos e com pequena variância dentro do grupo (ZHANG; HALL, 2015; HANNAH et al. 2005; KOPLIN et al., 2012).

$$d_{iz} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (Z_{ij} - Z_{zj})^2} \quad (\text{Equação 13})$$

Em que,  $d_{iz}$  = distância euclidiana entre  $Z_{ij}$  e  $Z_{zj}$  sobre a disposição dos pontos de dados e  $Z_{ij}$  e  $Z_{zj}$  = observações das estações de aferição  $i$ -ésima e  $z$ -ésima ( $i = 1, 2, \dots, n$  e  $z = 1, 2, \dots, n$ ), com referência a  $j$ -ésima variável ( $j = 1, 2, \dots, p$ )

Este método baseia-se no pressuposto de que dois grupos de fusão, resultando em perda de informações ou alterações no valor da função objetivo, dependem apenas da relação entre os dois combinados, não tendo relações com outros grupos.

Segundo Naghettine e Pinto (2007), os princípios da análise regional de frequência há muito são conhecidos e empregados em diversas metodologias de uso corrente em hidrologia. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Dalrymple (1960), Nerc (1975), Eletrobrás (1985) e Tucci (2002). Esses autores utilizaram métodos que regionalizam os quantis associados a um risco previamente especificado, métodos que regionalizam os parâmetros das distribuições de probabilidades e métodos que regionalizam uma curva de quantis adimensionais, geralmente denominados métodos da cheia-índice ou métodos index-flood. Para este trabalho em particular, usaram-se os métodos que regionalizam os parâmetros das distribuições de probabilidades. Este método é aplicado como pressuposto de que uma mesma função de distribuição de probabilidades seja válida para todas as estações de coleta de dados, localizadas em uma região considerada homogênea, do ponto de vista da variável a ser regionalizada.

### 3.3.8 Ajuste das equações regionais

Após a identificação das regiões homogêneas, aplicou-se, aos dados de vazão mínima com sete dias de duração ( $Q_7$ ) de cada estação fluviométrica, para cada região, o modelo de distribuição de probabilidades de Gumbel para mínimos, conforme explicitado em Mello e Silva (2013). A função inversa da função acumulada de probabilidade (FAP), para valores mínimos, está explicitada na Equação 14. Nesse modelo de distribuição foi adotado como sendo fixo o período de retorno de 10 anos, obtendo-se, assim, a  $Q_{7,10}$ . De acordo com Beijo (2002), a distribuição de probabilidade de Gumbel tem amplo destaque na literatura.

$$X_{TR} = \frac{\text{LN}(-\text{LN}(1 - \frac{1}{TR}))}{\sigma} + \mu \quad (\text{Equação 14})$$

Em que,  $X_{TR}$  é a magnitude hidrológica, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; TR refere-se ao período de retorno, 10 anos e  $\sigma$  e  $\mu$  são parâmetros de forma e escala, respectivamente, estimados por meio das Equações 15 e 16, utilizando o método dos momentos.

$$\sigma = \frac{1,2826}{S} \quad (\text{Equação 15})$$

$$\mu = \bar{X} + 0,45.S \quad (\text{Equação 16})$$

Em que:  $\sigma$  = parâmetro de forma da distribuição Gumbel, adimensional;  $\mu$  = parâmetro de escala da distribuição Gumbel para mínimos em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $\bar{X}$  = valor médio da vazão, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  e  $S$  = desvio-padrão amostral, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

As vazões de referência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram obtidas a partir de dados diários, depois e organizados no gerenciador de planilha de pacote Office. Na Tabela 2, é possível visualizar as séries históricas, que foram excluídas, e alguns anos selecionados para criação das equações de regressão e validação para estimativa das vazões de referência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ).

Adotaram-se, para o processo da modelagem, as vazões de referência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) em destaque, com maior parte no ajuste de equações de regressão. Sendo dois terços ( $2/3$ ) das séries de dados de cada estação para o ajuste e um terço ( $1/3$ ) para a validação com intuito de obter as equações de regionalização. Conforme indicado por Moriasi et al. (2007), na etapa de modelagem hidrológica é importante que se tenha de 3 a 5 anos de dados (ou mais) e, para a fase de validação do modelo, pode-se considerar o período de 3 anos no mínimo.

Tabela2 - Períodos em anos das séries históricas das estações fluviométricas excluídos e utilizados na fase de modelagem e validação

Código	Período da série	Anos excluídos	Série histórica utilizada	
			Modelagem	Validação
61730000	1930-1955	1932;1933;1936;1941;1942;1943;1944	1930-1940 e 1950-1955	1942-1949
61731080	1990-2014	2015	1990-2000 e 2007-2014	2001-2006
61998080	1990-2016	2015;2016	1990-2000 e 2007-2014	2001-2006
61760080	1991-2015	2015	1991-2000 e 2007-2014	2001-2006
61796080	1990-2015	2015	1990-2000 e 2007-2014	2001-2006
61740080	1999-2015	2015	1999-2002 e 2009-2014	2003-2008
61946000	1963-1978	1968-1971	1963-1966 e 1973-1978	1967-1972
61794000	1977-2015	1982;2015	1977-1995 e 2002-2014	1996-2001
61734080	1992-2015	2015	1992-2000 e 2007-2014	2001-2006
61941080	1990-2015	2015	1990-2000 e 2007-2014	2001-2016
61795000	1973-2015	2011-2015	1973-1991 e 1998-2010	1992-1997

Fonte: O autor

Assim como para vazões mínimas as vazões máximas também foram ajustadas pela distribuição de probabilidades de Gumbel. A função inversa da função acumulada de probabilidade (FAP), para valores máximos, está compilada na Equação 17 (MELLO e SILVA, 2013). Para esta vazão, foi usado um risco associado a períodos de retorno (TR) de 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

$$X_{TR} = \frac{-\text{LN}\left(-\text{LN}\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right)}{\sigma} + \mu \quad (\text{Equação 17})$$

Em que:  $X_{TR}$  = magnitude hidrológica, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; TR = período de retorno, em anos e  $\sigma$  e  $\mu$  são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, estimados por meio das Equações 18 e 19, utilizando o método dos momentos.

$$\sigma = \frac{1,2826}{S} \quad (\text{Equação 18})$$

$$\mu = \bar{x} - 0,45.S \quad (\text{Equação 19})$$

Em que:  $\sigma$  = parâmetro de forma da distribuição Gumbel para máximos, adimensional;  $\mu$  = parâmetro de escala da distribuição Gumbel para máximos, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $\bar{x}$  = valor médio da vazão, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , e S = desvio-padrão amostral, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Com os dados de vazões máximas e mínimas de sete dias com as características fisiográficas das sub-bacias (A, L, Dd, Lax, Kc e Ic), foi realizado o teste de correlação, em

cada região homogênea, para identificar as melhores variáveis explicativas em relação s variáveis dependentes. Foram avaliados os modelos lineares, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco para cada região hidrologicamente homogênea.

Para a escolha do modelo em cada região hidrologicamente homogênea, dada pela análise de cluster, foram seguidas as recomendações de Elesbon et al. (2015). Esses autores preceituam as seguintes observações para a escolha do modelo: a equação deve ser representativa do evento estudado, apresentar alto valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), apresentar o menor número possível de variáveis independentes de acordo com a significância, apresentar altos valores do coeficiente de determinação ajustado, apresentar valores baixos de erro padrão da estimativa e alcançar resultados significativos pelo teste F da regressão. Deste modo para este trabalho foram ajustadas as equações de regressão nas regiões consideradas homogêneas usando o software estatístico Sigmaplot<sup>®</sup> 12.0. Com este aplicativo computacional, ajustaram-se os melhores modelos de estimativa de vazões com as estatísticas conceituadas na literatura, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão da estimativa (EPE), teste t de Student para os parâmetros da equação, teste F da regressão e, por fim, análise das amostras de dados com a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. As estatísticas supracitadas foram efetivadas considerando o nível de significância de 5% de probabilidade.

### **3.4 Estimativa de vazões de referência ( $Q_{7,10}$ , $Q_{90}$ , $Q_{95}$ ) e máximas por meio do Atlas Digital das Águas de Minas**

O Atlas Digital das Águas de Minas é um software que apresenta um mapeamento completo e atualizado sobre os recursos hídricos superficiais do Estado de Minas Gerais. Ele se encontra alicerçado na tecnologia dos sistemas de informações geográficas. Os modelos matemáticos indicados pelo Atlas Digital das Águas de Minas, para a estimativa da  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ , encontram-se compilados nas Equações 20, 21 e 22, respectivamente. O modelo matemático para a estimativa da vazão máxima está representado na Equação 23. O Atlas Digital não faz distinção entre os modelos matemáticos para a estimativa da vazão máxima, considerando tempos de retorno (TR) de 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

$$Q_{7,10}=0,0037.A^{0,9379} \quad (\text{Equação 20})$$

$$Q_{90}=0,0068.A^{0,9616} \quad (\text{Equação 21})$$

$$Q_{95}=0,0061.A^{0,9441} \quad (\text{Equação 22})$$

$$Q_{\text{máx}} = 0,5570.A^{0,8373} \quad (\text{Equação 23})$$

Em que: A = área de drenagem da sub-bacia, medida a partir da estação fluviométrica, em km<sup>2</sup>; Q<sub>7,10</sub> = menor vazão média consecutiva de 7 dias, com tempo de retorno de 10 anos, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>; Q<sub>90</sub> = vazão garantida em 90% do tempo, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>; Q<sub>95</sub> = vazão garantida em 95% do tempo, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, e Q<sub>máx.</sub> = vazões máximas com diferentes períodos de retorno, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

### 3.5 Estimativa de Q<sub>7,10</sub> por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais

No Estado de Minas Gerais é frequente o uso da publicação “Deflúvios Superficiais no estado de Minas Gerais”, elaborado por Souza (1993), para a estimativa da vazão mínima de sete dias de duração e tempo de retorno de dez anos (Q<sub>7,10</sub>). Para tanto, são especificados os mapas temáticos de regiões hidrologicamente homogêneas, os rendimentos específicos médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência, assim como o rendimento específico médio de longo termo.

Seguindo as orientações descritas em Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, a Q<sub>7,10</sub> pode ser obtida por meio das Equações 24 e 25.

$$Q_{7,10} = F_{10,7} \cdot Q_{10M} \quad (\text{Equação 24})$$

$$F_{10,7} = \alpha + \beta \cdot \gamma^D \cdot (\text{Log } T)^{-(r \cdot \text{Log } T + s)} \cdot D^{(m+n \cdot \text{Log } T)} \quad (\text{Equação 25})$$

Em que :F<sub>10,7</sub>= função de inferência, adimensional;α, β, γ, r, s, m, n = parâmetros da função de inferência, variáveis de acordo com a Tipologia Homogênea e Rendimento Específico, adimensional;D = número de dias que compõem a média consecutiva, em dias;T = tempo de retorno, em anos;Q<sub>M,10</sub> = vazão mínima de duração mensal e tempo de retorno de 10 anos, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> e Re = rendimento específico, em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>

$$Q_{10M} = Re \cdot A \quad (\text{Equação 26})$$

Devido ao tempo de retorno ser de 10 anos, a Equação (25) se reduz, ficando conforme explicitado na Equação 27.

$$F_{10,7} = \alpha + \beta \cdot \gamma^D \quad (\text{Equação 27})$$



### 3.6 Avaliação dos modelos matemáticos para estimativa da vazão

Neste trabalho, a análise estatística dos modelos matemáticos gerados para vazões máximas,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , se dará por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), teste F do modelo de regressão. Além disso, os resultados dessas equações, bem como daquelas usadas na estimativa da  $Q_{7,10}$ , em cada região homogênea, serão confrontados com dados de vazão medidas em cada sub-bacia, oriundo da série de dados de validação, por meio do coeficiente estatístico de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) (Equação 28). Os resultados dos modelos de estimativa da vazão máxima,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , de cada região homogênea, serão comparados com aqueles estimados por meio das equações citadas em Atlas Digital das Águas de Minas, usando, para tanto, o coeficiente  $C_{NS}$ . Também por meio do  $C_{NS}$ , serão verificados os ajustes dos modelos de estimativa da  $Q_{7,10}$  das estações fluviométricas de cada região homogênea, frente aos resultados apresentados por Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, em cada região homogênea.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBSi} - Q_{SIMi})^2}{(Q_{OBSi} - \overline{Q_{OBS}})^2} \quad (\text{Equação 28})$$

Em que:  $Q_{OBSi}$  = vazão observada na  $i$ -ésima estação fluviométrica, em  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_{SIMi}$  = vazão simulada na  $i$ -ésima estação fluviométrica, em  $m^3 s^{-1}$ ;  $\overline{Q_{OBS}}$  = vazão observada média e  $n$  = número de eventos.

O coeficiente estatístico  $C_{NS}$  traduz a eficiência do modelo matemático gerado, na previsão das vazões estudadas neste trabalho. O resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe foi interpretado a partir da classificação contida na Tabela 3.

Tabela 3 - Faixa de valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e sua respectiva classificação

Resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ )	Classificação do modelo matemático
$0,75 < C_{NS} \leq 1,0$	Muito bom
$0,65 < C_{NS} < 0,75$	Bom
$0,50 < C_{NS} < 0,65$	Satisfatório
$C_{NS} < 0,50$	Não satisfatório

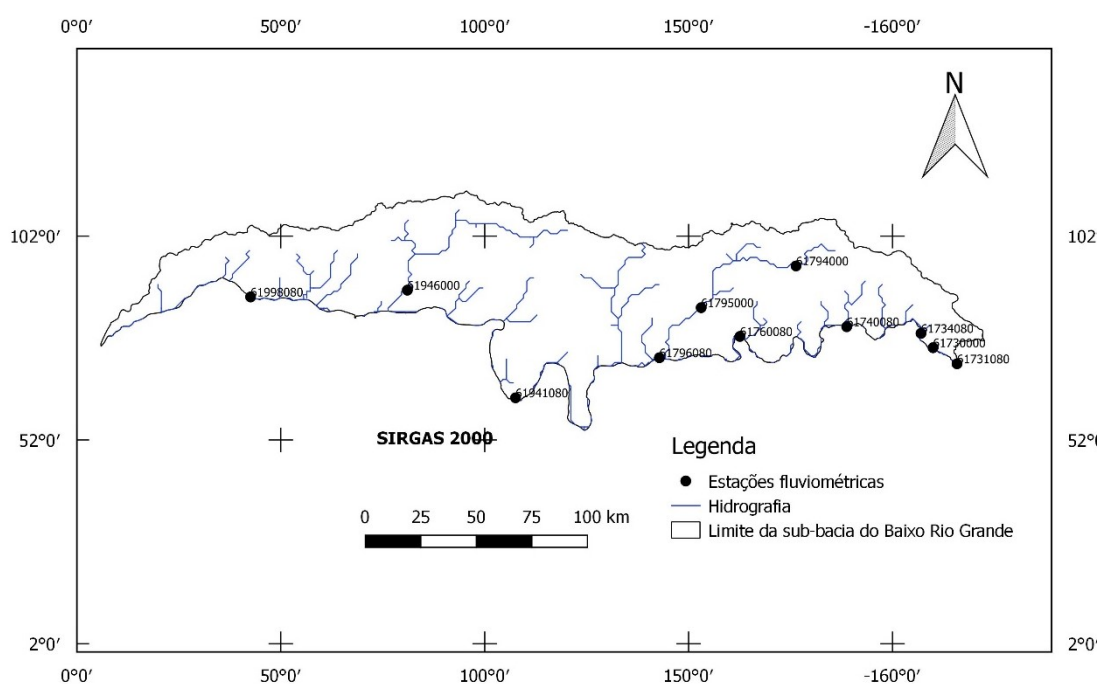
Fonte: Moriasi et al. (2007).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estações fluviométricas usadas para delimitação das sub-bacias

A distribuição espacial das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho está plotada na Figura 3. Ao todo, foram usadas na modelagem matemática das regiões consideradas homogêneas 11 estações fluviométricas. As estações fluviométricas foram aceitas de acordo com o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (vazões mínimas) e Anderson Darling (vazões máximas), com nível de 5% de significância, a qual permitiu a escolha da distribuição de probabilidade teórica (Tabelas 1A e 1B no Apêndice deste trabalho). A distribuição de probabilidade que melhor se ajustou foi a de Gumbel para mínimos para vazões mínimas e Gumbel para máximos para vazões máximas, resultados estes que corroboram estudos efetivados por Lopes et al. (2016), nos quais a distribuição de Gumbel permitiu um bom ajuste para as vazões mínimas e máximas.

Figura 3 - Localização espacial das estações fluviométricas situadas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande

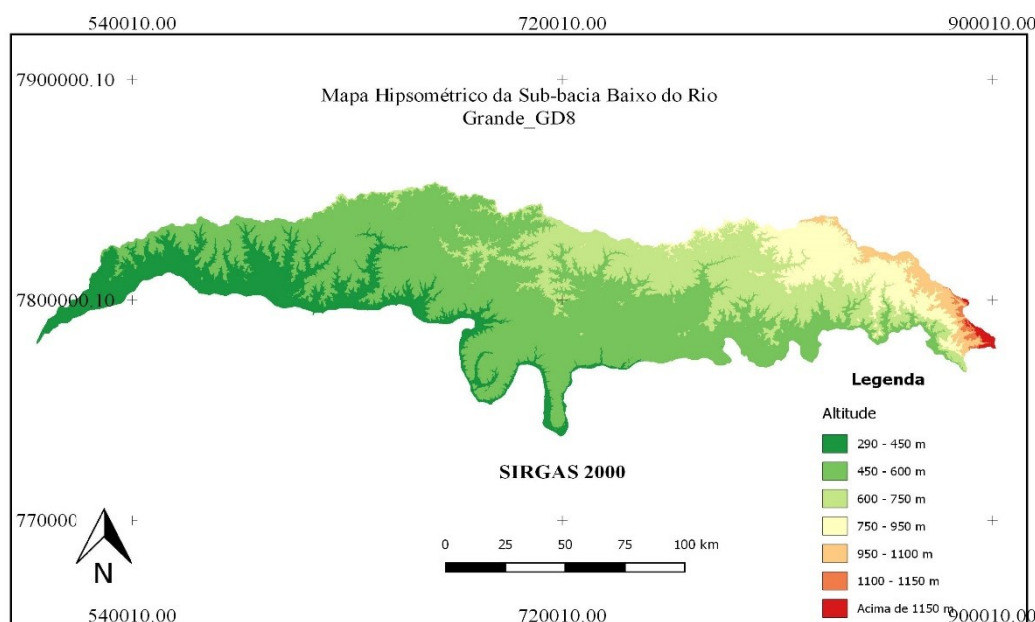


Fonte: O autor

Observa-se, pela Figura 3, que a porção oeste da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande apresenta pouca densidade de estações fluviométricas. Tais estações se concentram mais a leste e ao longo do Rio Grande. Deste modo, demonstra-se a necessidade de uso da técnica de regionalização da bacia hidrográfica, para suprir a deficiência e atenuar os possíveis conflitos dos recursos hídricos e de gestão em trechos desprovidos de monitoramento, bem como para auxiliar na tomada de decisões sobre a concessão de outorgas de uso da água na região.

O mapa com a hipsometria ou classes de altitude da UPGRH-GD8 (Figura 4) foi gerado a partir do MDE. A cota mais baixa é de 290 m e se localiza na porção oeste da bacia. Por outro lado, as cotas mais altas, acima de 1.150m, localizam-se na porção leste da área de estudo. Ademais a região aponta que a maior parte da área de superfície encontra-se acima dos 400 m de altitude. As grandes altitudes encontram-se a leste diminuído para oeste. Contudo as classes foram agrupadas em intervalos e foram geradas sete classes hipsométricas.

Figura 4 – Mapa hipsométrico da UPGRH-GD8

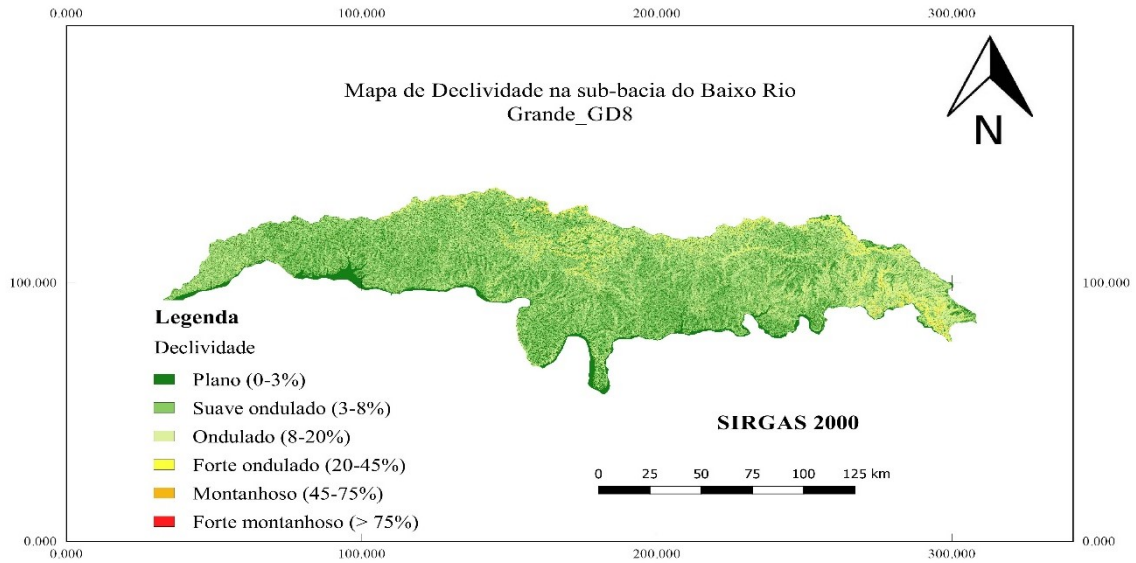


Fonte: O autor

Por meio da manipulação MDE, obteve-se o mapa de classes de declividades (Figura 5), visto a pertinência em estudos ambientais e por exercer uma grande influência sobre o escoamento fluvial. A imagem resultante desta interpolação foi talhada em seis classes de declividades, definidas segundo os intervalos sugeridos pela EMPRAPA (2005), devidamente adaptados às características da área de estudo. Pode-se notar que a região apresenta duas classes expressivas de declividades, 0- 3% e 3- 8%, o que revela uma declividade média da região. Esta

região apresenta valores com maiores declividades em porcentagem nas classes montanhoso e forte montanhoso.

Figura5 - Mapa de Declividade da UPGRH-GD8.



Fonte: O autor

A partir da delimitação das sub-bacias no ambiente SIG foram calculadas as características físicas, a área de drenagem (A), o comprimento do curso d'água principal (L), o comprimento total dos cursos de água (Lt), o perímetro (Pe), a densidade de drenagem (Dd), o coeficiente de compacidade (Kc), o comprimento axial da bacia ( $L_{ax}$ ) e o índice de conformação (Ic), conforme a Tabela 4. Verifica-se que as áreas de drenagem das regiões em estudo variam entre 630,11 km<sup>2</sup>, pertencente à estação de Uberaba, e 138.643,30 km<sup>2</sup>, da estação UHE Água Vermelha Barramento. Estas sub-bacias foram delimitadas de acordo com as regras de delimitação de bacias hidrográficas, usando o exutório como o ponto de localização de cada estação com área de contribuição, não pelo critério de UPGRH, mas usando-se as divisões política e administrativa. De acordo com os valores do coeficiente de compacidade (kc) e o índice de conformação (Ic) das sub-bacias hidrográficas, a região em estudo, em geral, apresenta menor propensão a grandes enchentes, com valores de kc maiores que 1,5, com exceção da estação de Uberaba, com tendência mediana a grandes enchentes e Ic menores e distantes de 1.

Tabela 4 - Características físicas das sub-bacias hidrográficas da UPGRH-GD8

Estações fluviométricas/sub-bacias hidrográficas		Área (km <sup>2</sup> )	L (km)	L <sub>t</sub> (km)	Pe (km)	D <sub>d</sub> (kmkm <sup>-2</sup> )	K <sub>c</sub>	L <sub>ax</sub> (km)	I <sub>c</sub>
Código ANA	Nome								
61730000	Rifaina	61.325,89	456,63	3601,58	1641,37	0,0587	1,86	396,95	0,3892
61731080	UHE L.C.B.D.C. Barramento <sup>1</sup>	60.667,71	443,08	3585,01	1607,01	0,0591	1,83	383,22	0,4131
61998080	UHE Á.V. Barramento <sup>2</sup>	138.643,30	939,08	8175,82	2278,39	0,0589	1,71	695,94	0,2862
61760080	UHE V.G. Barramento <sup>3</sup>	68.135,59	593,05	3961,29	1856,75	0,0581	1,99	485,94	0,2885
61796080	UHE P.C. Barramento <sup>4</sup>	76.711,05	633,39	4529,11	1957,31	0,0590	1,97	520,72	0,2829
61740080	UHE I. Barramento <sup>5</sup>	63.226,41	518,92	3709,81	1756,43	0,0587	1,96	436,79	0,3314
61946000	São Francisco de Sales	2.819,58	108,77	150,15	325,08	0,0533	1,71	103,00	0,2657
61794000	Uberaba	630,11	28,04	28,04	124,44	0,0445	1,39	38,89	0,4165
61734080	UHE J. Barramento <sup>6</sup>	61.420,23	469,56	3612,36	1647,42	0,0588	1,86	410,79	0,3639
61941080	UHE M. Barramento <sup>7</sup>	117.934,15	761,02	7004,61	2026,84	0,0594	1,65	589,04	0,3399
61795000	Conceição das Alagoas	2.105,28	90,89	90,89	252,96	0,0432	1,54	87,90	0,2724

Fonte: O autor

<sup>1</sup>Usina hidrelétrica Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento; <sup>2</sup>Usina hidrelétrica Água Vermelha Barramento; <sup>3</sup>Usina hidrelétrica Volta Grande Barramento; <sup>4</sup>Usina hidrelétrica Porto Colômbia Barramento; <sup>5</sup>Usina hidrelétrica Igarapava Barramento; <sup>6</sup>Usina hidrelétrica Jaguará Barramento e <sup>7</sup>Usina hidrelétrica Marimbondo Barramento

## 4.2 Matriz de correlação

Nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, estão apresentados os resultados da correlação linear de Pearson (R), entre as variáveis de resposta e as preditoras padronizadas. Segundo Álvarez, et al. (2011), é preciso padronizar as variáveis para corrigir problemas de escala e unidades. Esta matriz de correlação contribui para a avaliação e relevância de cada variável e promove a eliminação dos parâmetros que pouco influenciam a variável dependente (ELESBON et al., 2015).

Tabela 5 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima de sete dias de duração (Q<sub>7</sub>) anuais de cada estação e as possíveis variáveis preditoras

Matriz de correlação de Pearson											
	Q <sub>7</sub>	A	L	Lt	pe	Dd	Kc	Lax	Ic	σ	μ
Q <sub>7</sub>	1										
A	0,98	1									
L	0,98	0,99	1								
Lt	0,98	0,99	0,99	1							
pe	0,94	0,93	0,96	0,93	1						
Dd	0,79	0,77	0,81	0,77	0,90	1					
Kc	0,45	0,39	0,52	0,39	0,69	0,79	1				
Lax	0,98	0,98	0,99	0,97	0,98	0,85	0,58	1			
Ic	-0,08	-0,08	-0,16	-0,07	-0,03	0,03	-0,19	-0,13	1		
σ	-0,63	-0,62	-0,68	-0,62	-0,75	-0,81	-0,79	-0,72	0,34	1	
μ	1,00	0,98	0,98	0,98	0,94	0,79	0,44	0,98	-0,08	-0,63	1

Fonte: O autor

Ao se analisar as Tabelas 5, 6, 7 e 8, nota-se que as variáveis físicas da bacia, como a área de drenagem, o comprimento do curso d'água principal, comprimento total dos cursos de água, perímetro e comprimento axial, são fortemente correlacionadas entre si, por isso não foram utilizadas conjuntamente nos modelos, no intuito de se evitar a multicolinearidade. A variável morfométrica densidade de drenagem possui correlação moderada com as demais variáveis analisadas. Ao se analisar o índice de conformação e o coeficiente de compacidade (Tabelas 5, 6, 7 e 8), nota-se que eles apresentaram uma correlação muito baixa com as variáveis

de resposta ( $Q_7$ ,  $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ). Em função disso, essas variáveis não foram utilizadas nos modelos hidrológicos propostos neste trabalho, corroborando Elesbon (2015), que desenvolveu uma metodologia baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais, visando à identificação da variável mais representativa na regionalização de vazões da bacia hidrográfica do Rio Doce. Esta técnica de avaliação das variáveis preditoras que influenciam as variáveis de resposta permite minimizar a redundância e a multicolinearidade entre os índices utilizados na análise (OLDEN e POFF, 2003). Ao se analisar especificamente as Tabelas 5 e 6, verifica-se que os parâmetros de escala e posição ( $\sigma$  e  $\mu$ , respectivamente) apresentam de moderada a forte correlação com as demais variáveis morfométricas com exceção do coeficiente de compacidade e do índice de conformação.

Tabela6 - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão máxima diária ( $Q_{\text{máx}}$ ) anuais de cada estação e as possíveis variáveis preditoras.

Matriz de correlação de Pearson											
	$Q_{\text{máx}}$	A	L	Lt	pe	Dd	Kc	Lax	Ic	$\sigma$	$\mu$
$Q_{\text{máx}}$	1										
A	0,97	1									
L	0,96	0,98	1								
Lt	0,97	0,99	0,98	1							
pe	0,95	0,92	0,96	0,92	1						
Dd	0,81	0,77	0,80	0,77	0,90	1					
Kc	0,47	0,39	0,51	0,39	0,69	0,79	1				
Lax	0,96	0,98	0,99	0,97	0,98	0,85	0,58	1			
Ic	-0,01	-0,07	-0,16	-0,07	-0,03	0,03	-0,19	-0,13	1		
$\sigma$	-0,85	-0,81	-0,85	-0,81	-0,94	-0,81	-0,71	-0,89	-0,05	1	
$\mu$	0,99	0,95	0,94	0,95	0,93	0,80	0,47	0,94	0,01	-0,84	1

Fonte: O autor

Nada obstante, nota-se, para todas as variáveis de resposta, uma forte correlação com a área da bacia hidrográfica. Devido à facilidade de obtenção desse parâmetro, principalmente por meio de imagens orbitais, a área da bacia hidrográfica foi usada como variável resposta para todos os modelos hidrológicos propostos. Dessa mesma forma Lopes et al. (2017) também procederam, excluindo as demais variáveis, ficando apenas com a área da bacia hidrográfica.

Tabela 7- Matriz de correlação de Pearson entre a vazão mínima garantida em 90% do tempo (Q<sub>90</sub>) e as possíveis variáveis preditoras

Matriz de correlação de Pearson									
	Q <sub>90</sub>	A	L	Lt	PE	Dd	Kc	Lax	Ic
Q <sub>90</sub>	1								
A	0,99	1							
L	0,98	0,99	1						
Lt	0,99	1,00	0,99	1					
pe	0,92	0,93	0,96	0,93	1				
Dd	0,76	0,77	0,81	0,77	0,90	1			
Kc	0,38	0,40	0,52	0,39	0,69	0,79	1		
Lax	0,97	0,98	1,00	0,97	0,98	0,85	0,58	1	
Ic	-0,08	-0,08	-0,16	-0,07	-0,03	0,03	-0,19	-0,13	1

Fonte: O autor



Tabela 8 -Matriz de correlação de Pearson entre a vazão mínima garantida em 95% do tempo (Q<sub>95</sub>) e as possíveis variáveis preditoras

Matriz de Correlação de Pearson									
	Q <sub>95</sub>	A	L	Lt	pe	Dd	Kc	Lax	Ic
Q <sub>95</sub>	1								
A	0,98	1							
L	0,96	0,99	1						
Lt	0,98	1,00	0,99	1					
Pe	0,90	0,93	0,96	0,93	1				
Dd	0,74	0,77	0,81	0,77	0,90	1			
Kc	0,35	0,40	0,52	0,39	0,69	0,79	1		
Lax	0,95	0,98	1,00	0,97	0,98	0,85	0,58	1	
Ic	-0,08	-0,08	-0,16	-0,07	-0,03	0,03	-0,19	-0,13	1

Fonte: O autor

### 4.3 Identificação e delimitação de regiões homogêneas

Empregando o agrupamento (*clusters*) para a medida de dissimilaridade (distância euclidiana), para definir clusters semelhantes, considerando-se as vazões Q<sub>7</sub>, Q<sub>máx</sub>, Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub>, resultaram dois grupos hidrológicamente homogêneos de estações fluviométricas. Ressalta-se que, neste trabalho, foram testadas as respostas para um, dois e três grupos homogêneos. Contudo, o melhor resultado foi obtido para dois grupos, pois, com três grupos, verificou-se a presença de grupos com uma estação fluviométrica, o que inviabiliza a geração do modelo matemático.

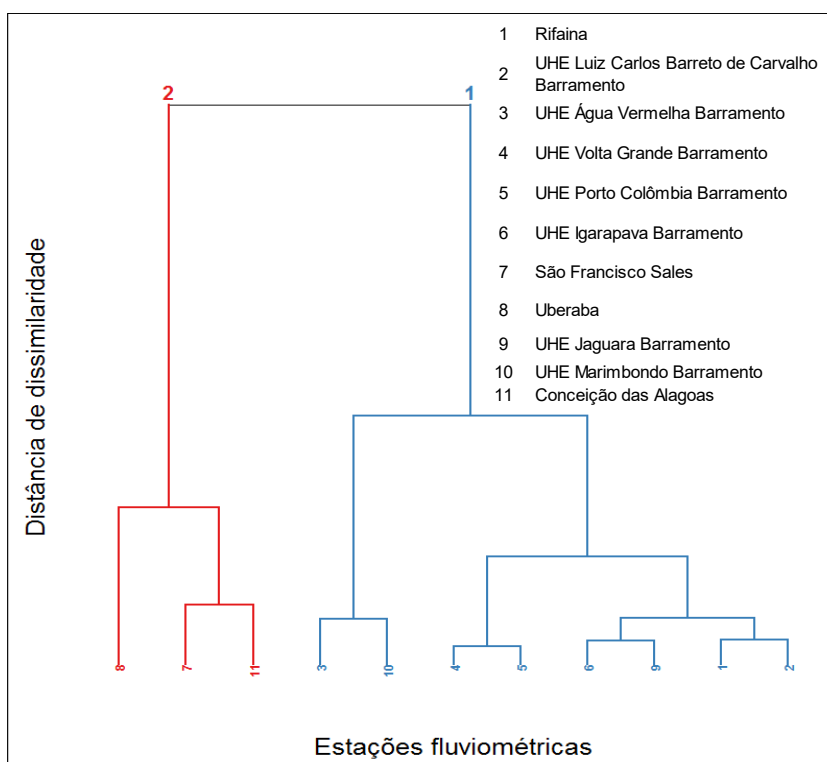
Os resultados do teste de agrupamentos para Q<sub>7</sub>, Q<sub>máx</sub>, Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub> estão dispostos, respectivamente, nas Figuras 6, 7, 8 e 9. Ao analisá-las, nota-se a presença de dois agrupamentos. O primeiro reuniu as sub-bacias delimitadas a partir das estações fluviométricas Rifaina (1), UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento (2), UHE Água Vermelha Barramento (3), UHE Volta Grande Barramento (4), UHE Porto Colômbia Barramento (5), UHE Igarapava Barramento (6), UHE Jaguará Barramento (9) e UHE Marimbondo Barramento

(10). No segundo agrupamento, ficaram reunidas as sub-bacias delimitadas a partir das estações São Francisco de Sales (7), Uberaba (8) e Conceição das Alagoas (11).

Quando se compara as áreas das sub-bacias hidrográficas (Tabela 5) com os agrupamentos obtidos, nota-se a forte influência nas vazões estudadas neste trabalho. Sub-bacias com áreas maiores do que 60.667,71 km<sup>2</sup> foram dispostas no grupo 1 e menores do que 2.819,58 km<sup>2</sup> no grupo 2.

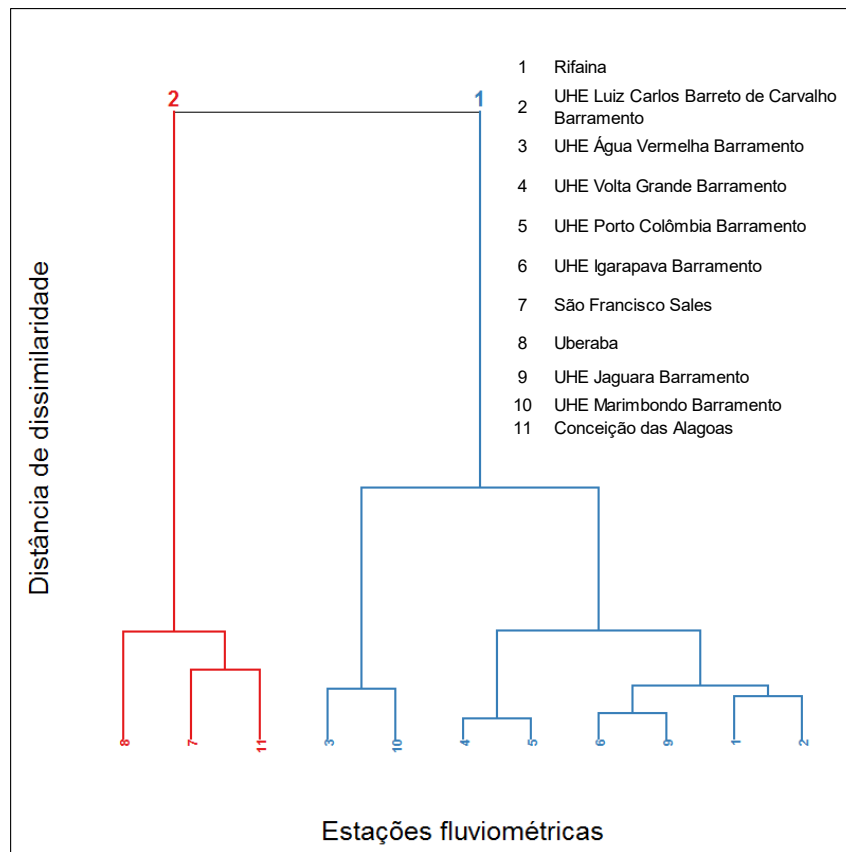
Utilizando a mesma linha de raciocínio adotada neste trabalho, Rodriguez et al. (2016), ao empregarem o método de Ward com a distância euclidiana, no intuito de investigar o potencial dessa teoria em identificar regiões homogêneas para as condições semiáridas do nordeste do Brasil, encontrou com resultados satisfatórios sete regiões homogêneas. Rao e Srinivas (2006) observaram em seu estudo que o algoritmo de Ward apresentou os grupos de forma mais distinta. De acordo com Naghattine e Pinto (2007) e Yang et al. (2010), o algoritmo de Ward é considerado como eficiente e, em geral, tende a produzir clusters pouco extensos e de igual número de indivíduos, o que, de certa forma, corrobora os resultados obtidos neste trabalho, visto que foi o algoritmo que possibilitou o maior número de grupos, entre os algoritmos analisados. Hassan e Ping (2012) também constataram que o algoritmo de Ward forneceu os melhores resultados, quando comparado com outros algoritmos de classificação.

Figura 6 – Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão média mínima de sete dias de duração (Q<sub>7</sub>)



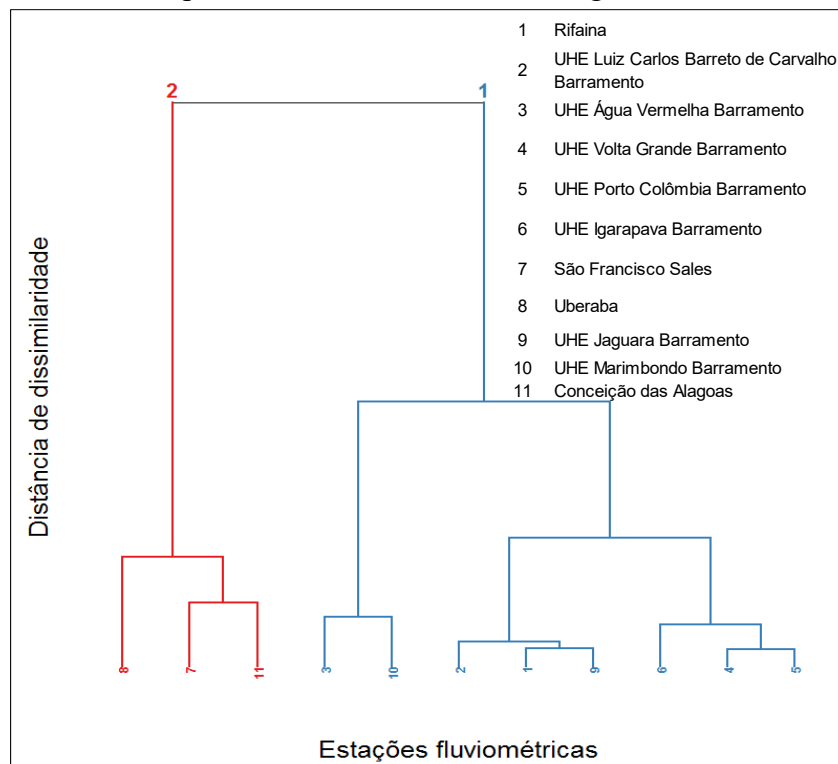
Fonte: O autor

Figura 7 - Dendograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão máxima diária (Q<sub>máx.</sub>)



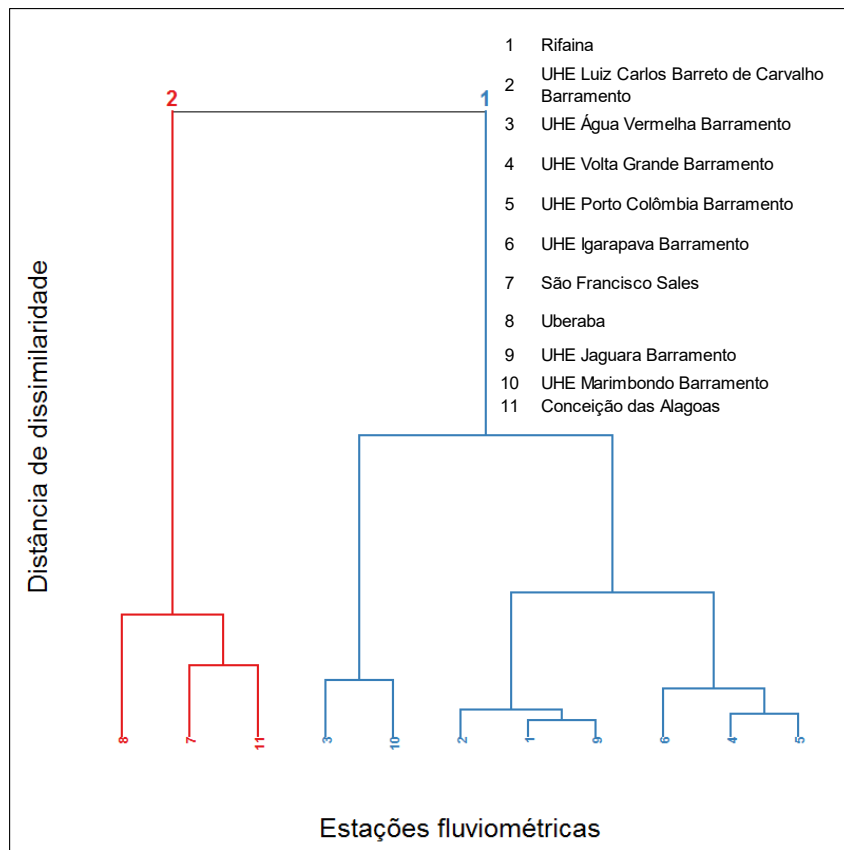
Fonte: O autor

Figura 8 - Dendrograma pelos métodos de distância Euclidiana (Dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão mínima garantida em 90% do tempo (Q<sub>90</sub>)



Fonte: O autor

Figura 9 - Dendrograma pelos métodos de distância Euclidiana (dissimilaridade) e algoritmo de Ward com dados padronizados da vazão mínima garantida em 95% do tempo (Q<sub>95</sub>)

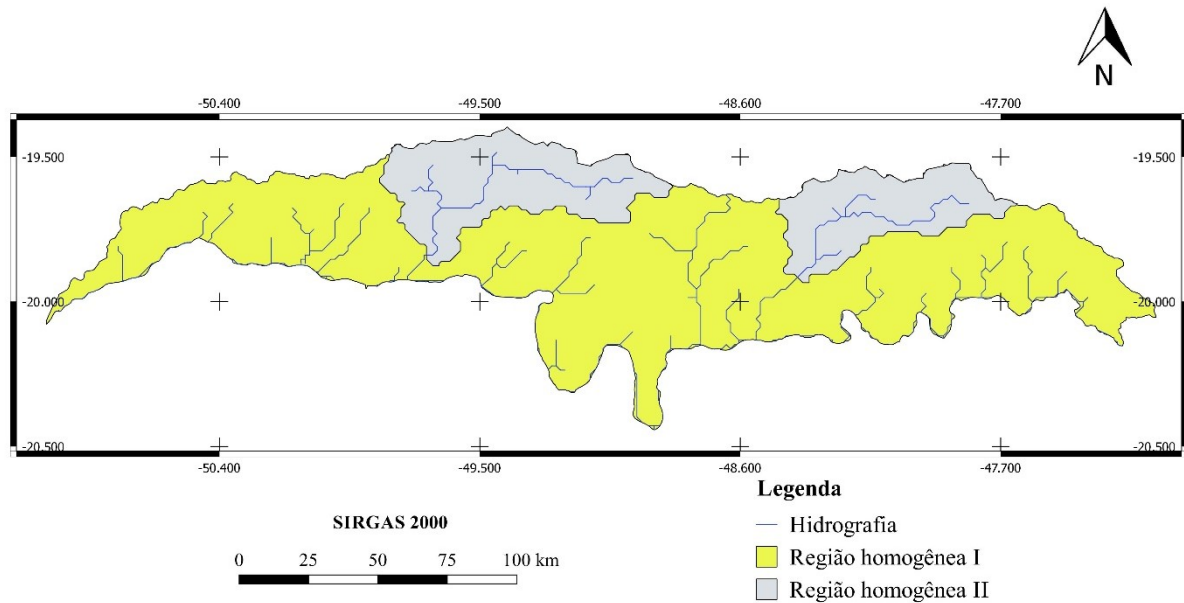


Fonte: O autor

A Figura 10 ilustra a delimitação física das duas regiões consideradas homogêneas para as vazões ( $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ). Essa delimitação foi feita a partir das áreas delimitadas pelos divisores de água que compõem cada sub-bacia, traçados a partir das estações fluviométricas ou exutórios das sub-bacias hidrográficas.

O fato de terem ficado definidas apenas duas regiões hidrologicamente homogêneas deve-se ao fato de que, após várias tentativas de análise de número de cluster, estatisticamente foram obtidas duas regiões com consistência e em concordância. A divisão das regiões homogêneas mostrou um bom ajuste de diferentes modelos de regressão multivariada entre as variáveis preditoras e as de resposta a serem regionalizadas. Ressalta-se que os resultados considerados em diferentes grupos foram insatisfatórios com coeficiente de determinação abaixo de 0,80 e sem valores significativos para teste de eficiência de Nash-Sutcliffe, (LOPES et al. 2017).

Figura 10 - Regiões hidrologicamente homogêneas para vazões ( $Q_{m\acute{a}x}$ ,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) obtidas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande (UPGRH-GD8), em Minas Gerais



Fonte: O autor

Ao se analisar a Figura 10, a qual ilustra a Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, nota-se que a região homogênea I abrange maior área sobre a região homogênea II. A primeira é constituída por dados de vazão de oito sub-bacias, com áreas de drenagem variando de 60.667,71 a 138.643,30 km<sup>2</sup>, enquanto a segunda região é composta por sub-bacias menores, com áreas de drenagem que variam entre 630,11 a 2.819,58 km<sup>2</sup>. Ainda em relação à Figura 10, verifica-se também que a diferença das áreas de drenagem entre as regiões I e II pode ter influenciado diretamente os valores de vazão, fazendo com que áreas maiores produzissem mais água do que as menores.

Ademais, pode-se deprender dessa figura também que será preciso ampliar consideravelmente a rede de monitoramento fluviométrico em bacias de menor porte, especialmente aquelas com áreas de drenagem abaixo de 2.819,58 km<sup>2</sup>, pois, somente assim, será possível alcançar maior precisão no processo de regionalização.

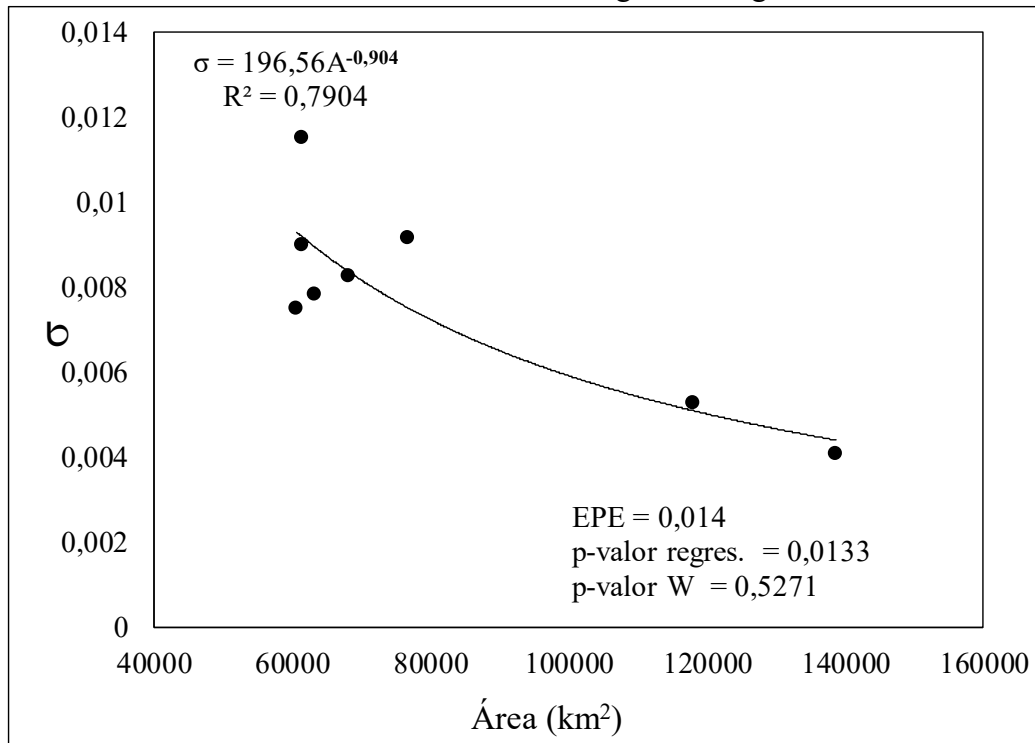
#### 4.4 Equações de regionalização da $Q_{7,10}$

Nas Figuras 11,12,13 e 14 estão reunidos os resultados das regressões matemáticas obtidas a partir da área das sub-bacias *versus* os parâmetros da distribuição de Gumbel ( $\mu$  e  $\sigma$ ), em cada região homogênea. Ressalta-se que, neste trabalho, foram avaliados os modelos linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco para cada região hidrologicamente homogênea. Na escolha do modelo, foram seguidas as recomendações de Elesbon et al. (2015), os quais recomendam que, entre outros fatores, a equação deve apresentar o menor número possível de variáveis independentes de acordo com a significância e apresentar altos valores do coeficiente de determinação. Analisando as Figuras 11 e 13, nota-se que o modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados de área das sub-bacias foi o potencial para o parâmetro  $\sigma$  e linear simples para o parâmetro  $\mu$ , independentemente da região homogênea. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variaram de 0,79 a 0,98. Segundo Elesbon et al. (2015), valores de coeficiente de determinação acima de 0,70 são um bom indicativo de homogeneidade entre grupos. Valores semelhantes aos aqui obtidos foram encontrados por Baena (2002) e Lopes et. Al.(2016), que verificaram valores de 0,84 a 0,99 de coeficiente de determinação em pesquisa de regionalização de vazões máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e regionalização de vazões máximas e mínimas para bacia do rio Ivaí-PR, respectivamente.

Especificamente em relação às Figuras 13 e 14, nota-se que as regressões foram construídas com três de pontos somente. Analisando do ponto de vista matemático, verifica-se incipiente robustez no modelo gerado. Contudo, devido às limitações impostas pelo pequeno número de sub-bacias agrupadas na região homogênea II, foi decidido aceitar esse resultado, o qual é parcial, e, posteriormente, verificar o desempenho do modelo matemático de regionalização dessa região por meio do teste de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ).

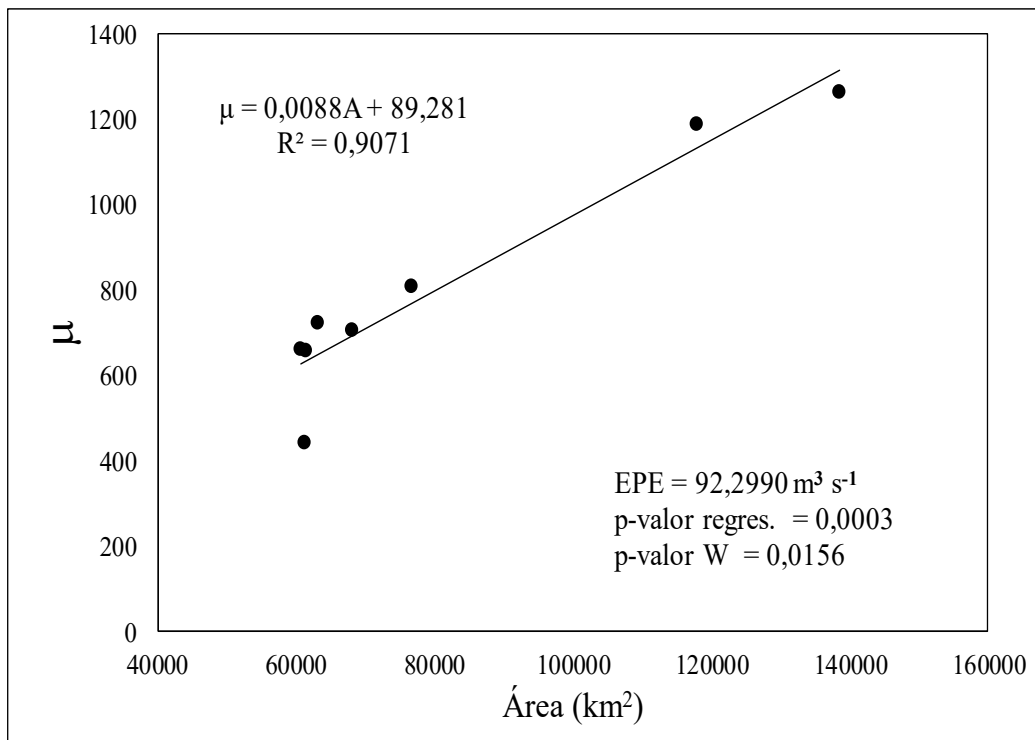
Avaliando as Figuras 11, 12, 13 e 14, nota-se um bom ajuste de modelo de regressão para os parâmetros de escala e de posição da distribuição teórica de Gumbel, com o p-valor de regressão abaixo de 0,05 de significância, baixos valores de erro padrão de estimativa (EPE) e testes de Shapiro-Wilk (W) a indicar que as amostras de dados têm uma distribuição normal e que todos os testes estatísticos foram aprovados, exceptuando a Figura 14, em que o p-valor de regressão esta acima de 0,05 de nível de significância.

Figura 11 – Regressão matemática do parâmetro  $\sigma$  da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I



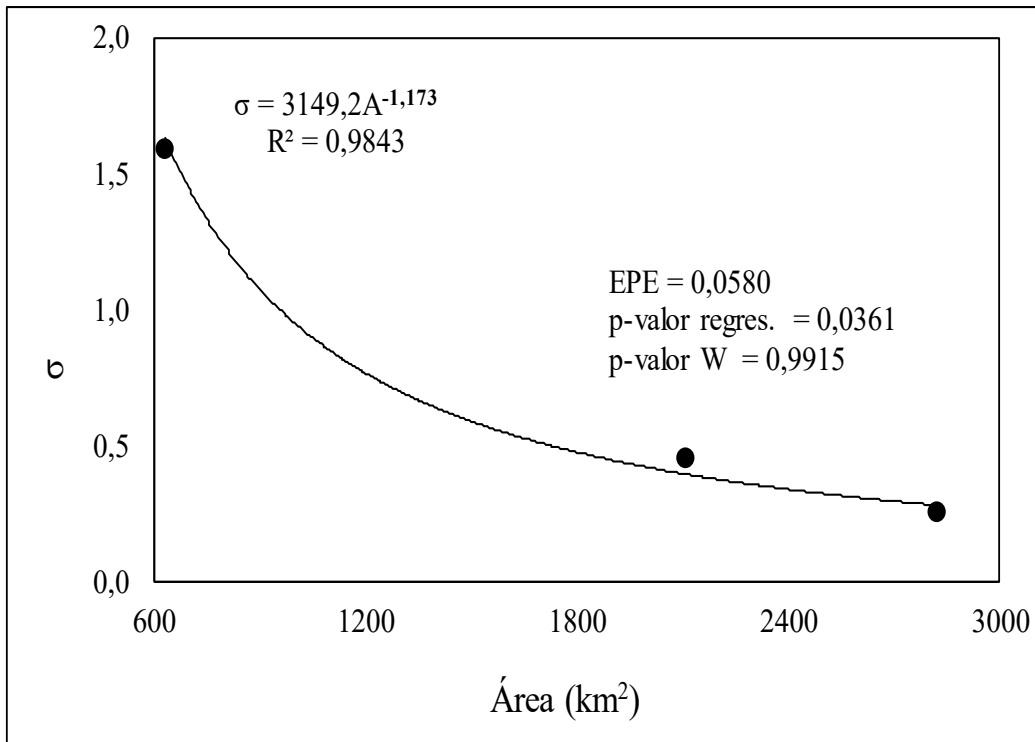
Fonte: O autor

Figura 12 - Regressão matemática do parâmetro  $\mu$  da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), versus as áreas das sub-baciasda região homogênea I



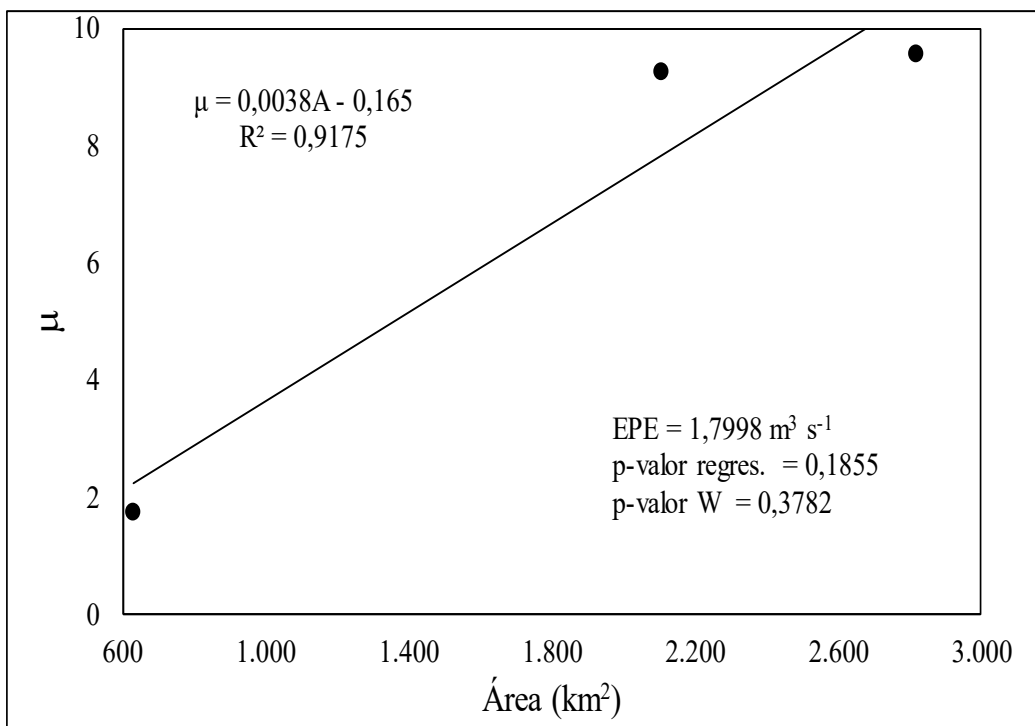
Fonte: O autor

Figura 13 - Regressão matemática do parâmetro  $\sigma$  da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



Fonte: O autor

Figura 14 - Regressão matemática do parâmetro  $\mu$  da distribuição Gumbel para mínimos, obtidas a partir dos dados das vazões mínimas anuais de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ), versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



Fonte: O autor



Uma vez obtidas as equações para estimativa dos parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  da distribuição Gumbel para mínimos, na região homogênea I (Figuras 11 e 12, respectivamente), elas foram inseridas na Equação 14, em substituição aos parâmetros de escala e posição dados pelo método dos momentos (Equações 15 e 16). Essa mesma ação foi realizada para a região homogênea II, a partir das equações contidas nas Figuras 13 e 14. Ao realizar as manipulações matemáticas cabíveis e considerar que a  $Q_{7,10}$  possui fixo o tempo de retorno como sendo 10 anos, originaram-se as equações contidas na Tabela 9, as quais são indicadas para a estimativa da  $Q_{7,10}$ , bastando, para isso, somente a informação da área da bacia hidrográfica.

A área da bacia hidrográfica foi a variável que melhor explicou o comportamento da  $Q_{7,10}$ , excluindo-se as demais características fisiográficas (L, Dd, Lax, Kc e Ic). Os resultados encontrados neste trabalho estão em consonância com o obtido por Da Silva et al. (2003) e Euclides et al. (2001), que também verificaram que a área da bacia hidrográfica foi a variável que melhor explicou as vazões mínimas da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, em Minas Gerais, e bacia do Alto São Francisco à Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais, respectivamente. Resultado semelhante também foi encontrado por LUJANO et al. (2017) na bacia hidrográfica Titicaca, Peru.

Além disso, também está compilado na Tabela 9 o resultado do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ), por meio do qual foi possível avaliar a eficiência do modelo proposto quanto a estimar a  $Q_{7,10}$ . Os dois modelos propostos apresentaram  $C_{NS}$  acima de 0,8, o que de acordo, com Moriasi et al. (2007) (Tabela 3), indica que os modelos apresentam uma eficiência muito boa na estimativa da  $Q_{7,10}$  na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, UPGRH-GD8. O teste de Nash-Sutcliffe permitiu comparar a vazão estimada (modelo) com a observada, sendo esta calculada por meio da distribuição Gumbel para mínimos com os parâmetros de escala e posição estimados pelo método dos momentos.

Analisando os resultados contidos na Tabela 9, pode-se verificar, para as duas regiões, que as equações possuem uma parte potencial e outra linear. Todavia o valor do expoente do modelo potencial é próximo da unidade, mostrando que as vazões apresentam um comportamento semelhante ao linear. Desta forma pode-se afirmar que existe um aumento aproximadamente constante das vazões com o crescimento da área de drenagem. Resultado semelhante foi obtido por Lisboa et al. (2008) e Novaes (2005), que regionalizaram as vazões  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paracatu, em Minas Gerais, onde consideraram a área de drenagem como a única característica física nos modelos.

Ademais, as equações contidas na Tabela 9 permitem a estimativa da  $Q_{7,10}$  em locais que não possuem medida sistemática de cota ou vazão, bastando, para esse fim, apenas as áreas

de drenagem. Essa condição tende a facilitar enormemente os procedimentos na liberação de outorga de uso dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, devido à facilidade de uso dos modelos aqui propostos. Os resultados das vazões estimadas pelo modelo proposto encontram-se no apêndice B deste trabalho (Tabela 1 B).

Tabela 9 - Modelos de regressão ajustados para estimativa da  $Q_{7,10}$  em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, em Minas Gerais

Reg. <sup>1</sup>	Equação proposta <sup>2</sup>	$C_{NS}$ <sup>3</sup>	Intervalo de validade <sup>4</sup>
I	$Q_{7,10} = - 0,01145 \cdot A^{0,904} + 0,0088 \cdot A + 89,281$	0,88	$60.667 \text{ km}^2 < A < 138.643 \text{ km}^2$
II	$Q_{7,10} = - 0,0007 \cdot A^{1,173} + 0,0038 \cdot A - 0,165$	0,84	$630 \text{ km}^2 < A < 2.819 \text{ km}^2$

Fonte: O autor

<sup>1</sup>Refere-se à região homogênea em que a equação é indicada; <sup>2</sup> $Q_{7,10}$  em  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$  e a área da bacia hidrográfica (A) em  $\text{km}^2$ . <sup>3</sup>Refere-se ao resultado do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ). <sup>4</sup>Refere-se ao limite da área das sub-bacias hidrográficas em que a equação foi gerada.

#### 4.5 Equações de regionalização da $Q_{\text{máx}}$

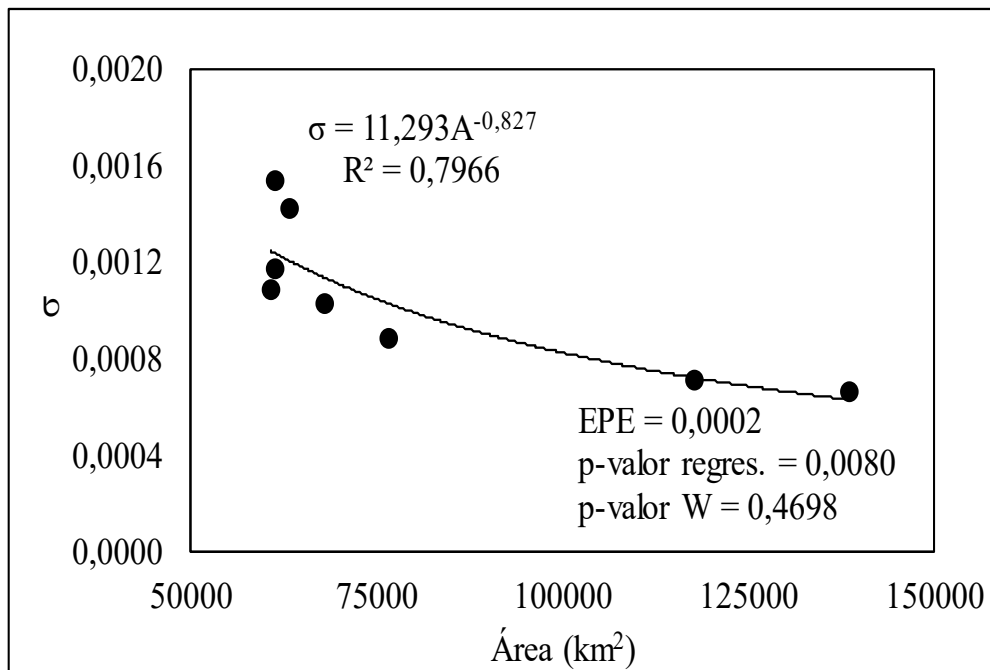
Em relação à  $Q_{\text{máx}}$ , nas Figuras 15, 16, 17 e 18, estão compiladas as equações de regressão obtidas a partir da área das sub-bacias *versus* os parâmetros da distribuição de Gumbel ( $\mu$  e  $\sigma$ ), em cada região homogênea. Para o parâmetro  $\sigma$ , o melhor ajuste foi por meio do modelo potencial e, para  $\mu$ , o modelo linear. Para a região homogênea I, o ajuste foi satisfatório, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70.

Nas Figuras 15, 16, 17 e 18 encontram-se dispostas as equações de regressão que melhor ajustaram os valores de  $\sigma$  e  $\mu$  em função dos dados das áreas de drenagem. Além disso, nessas figuras também estão compilados os resultados estatísticos desses modelos, como coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão de estimativa (EPE) e teste F da equação de regressão (p-valor regres.). Destaca-se que o p-valor da regressão é menor do que 0,05 para todos os modelos, exceto para as Figuras 17 e 18 com valores acima de nível de significância. De forma análoga, no teste de normalidade, dos resíduos (Shapiro-Wilk com  $\alpha = 0,05$ ), das amostras de dados para as figuras nos modelos de regressão, ele foi aceito. Os resultados estatísticos nos remetem a afirmar que os modelos de regressão para as estações fluviométricas apresentaram

bons ajustes aos dados observados e também nos fornecem segurança no uso de qualquer uma das equações geradas.

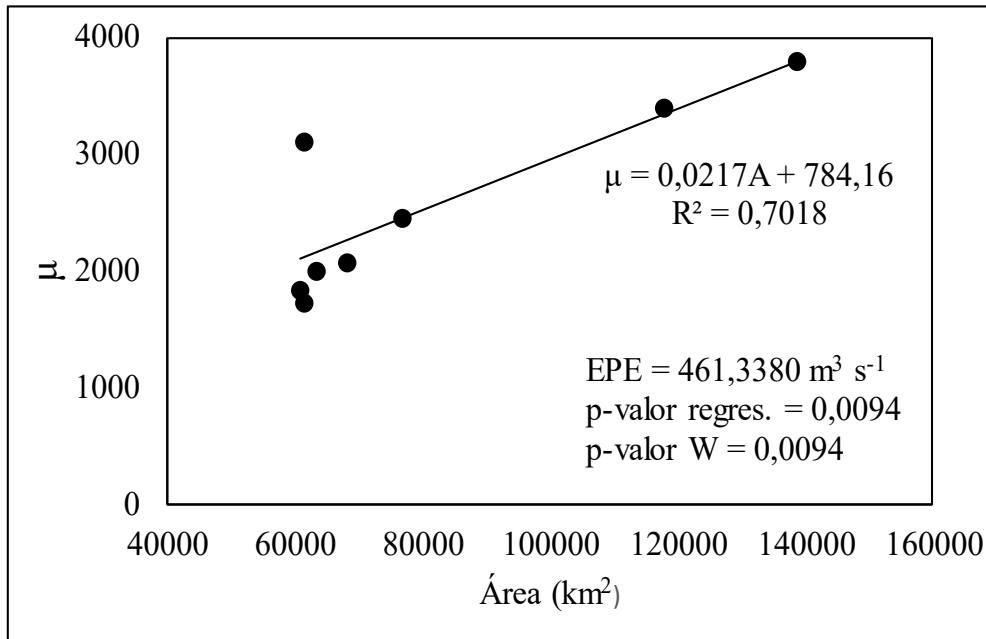
Contudo, para a região II, o ajuste foi insatisfatório para o parâmetro escala ( $\sigma$ ), com coeficientes de determinação de 0,10. Esse resultado insatisfatório é atribuído ao pequeno número de sub-bacias hidrográficas agrupadas na região hidrológica II (somente três), o que é reflexo direto do baixo número de sub-bacias com área de drenagem abaixo de 2.819 km<sup>2</sup> na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande (BHBRG). Ribeiro et al. (2005) consideram o número mínimo de seis estações fluviométricas para cada região, para que o ajuste seja satisfatório. Essa condição demonstra que é preciso implantar uma rede de estações fluviométricas mais densa na UPGRH-GD8. Assim sendo, poder-se-á melhorar a precisão e a qualidade dos modelos hidrológicos gerados, o que refletirá na melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos nessa bacia hidrográfica.

Figura 15 - Regressão matemática do parâmetro  $\sigma$  da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da  $Q_{\text{máx}}$ , versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I



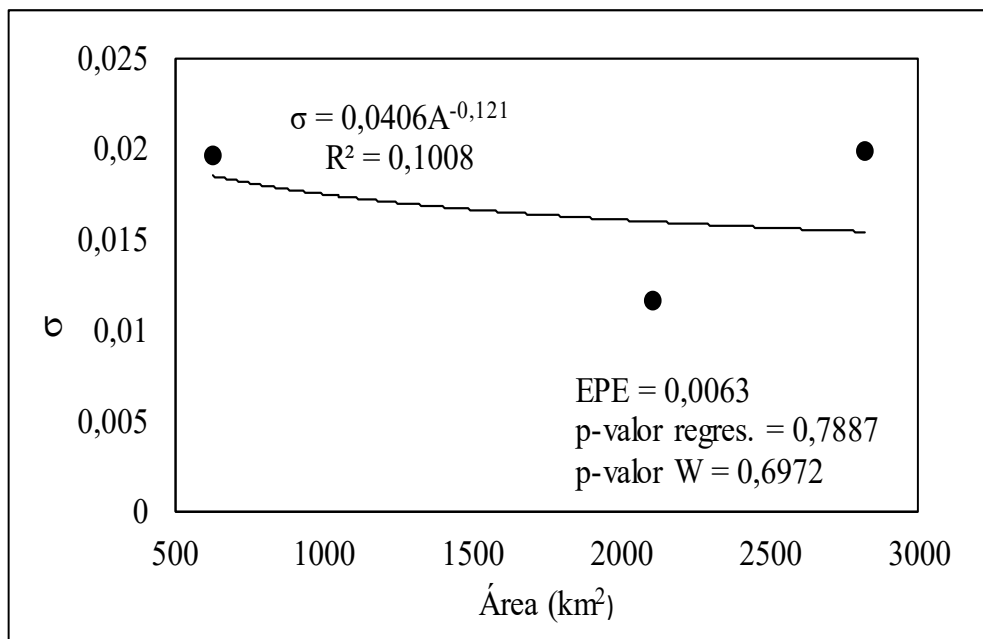
Fonte: O autor

Figura 16 - Regressão matemática do parâmetro  $\mu$  da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da  $Q_{\text{máx}}$ , versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I



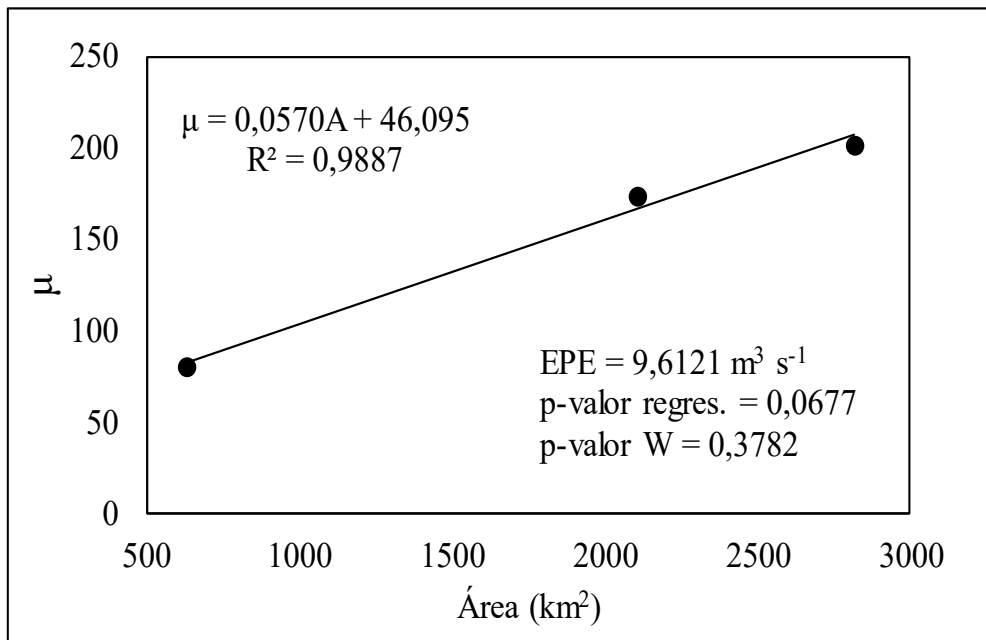
Fonte: O autor

Figura 17 - Regressão matemática do parâmetro  $\sigma$  da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da  $Q_{\text{máx}}$ , versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



Fonte: O Autor

Figura 18 - Regressão matemática do parâmetro  $\mu$  da distribuição Gumbel para máximos, obtidas a partir dos dados da  $Q_{\text{máx}}$ , versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



Fonte: O autor

A Tabela 10 permite a estimativa de vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno, em locais da região homogênea que não possuem coleta sistemática de informações, apenas a partir de suas respectivas áreas de drenagem dentro da região homogênea. Vale ressaltar que, para diferentes tempos de recorrência, foram estimadas as vazões máximas conforme ilustra o apêndice B (Tabelas 2B, 3B, 4B, 5B e 6B). Com estes resultados, pode-se melhorar projetos de uma determinada estrutura hidráulica e as demais com tempos de retorno.

Uma vez obtidas as equações para estimativa dos parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  da distribuição Gumbel para máximos, na região homogênea I (FIGURAS 15 e 16, respectivamente), elas foram inseridas na Equação 17, em substituição aos parâmetros de escala e posição dados pelo método dos momentos (Equações 18 e 19). Essa mesma ação foi realizada para a região homogênea II, a partir das equações contidas nas FIGURAS 17 e 18. Ao realizar as adequações matemáticas pertinentes, originaram-se as equações contidas na Tabela 10, as quais são indicadas para a estimativa da  $Q_{\text{máx}}$ , bastando, para isso, a informação da área da bacia hidrográfica e o tempo de retorno (TR).

Tabela 10 - Modelos de regressão ajustados para estimativa da  $Q_{\text{máx}}$  em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, em Minas Gerais

Reg. <sup>1</sup>	Equação proposta <sup>2</sup>	Intervalo de validade <sup>3</sup>
I	$Q_{\text{máx}} = -11,293 \cdot A^{0,827} \left[ \text{LN} \left( -\text{LN} \left( 1 - \frac{1}{\text{TR}} \right) \right) \right] + 0,022 \cdot A + 784,16$	$60.667 \text{ km}^2 < A < 138.643 \text{ km}^2$
II	$Q_{\text{máx}} = -0,0406 \cdot A^{0,121} \left[ \text{LN} \left( -\text{LN} \left( 1 - \frac{1}{\text{TR}} \right) \right) \right] + 0,057 \cdot A + 46,095$	$630 \text{ km}^2 < A < 2.819 \text{ km}^2$

Fonte: O autor

<sup>1</sup>Refere-se à região homogênea em que a equação é indicada; <sup>2</sup> $Q_{\text{máx}}$  refere-se à vazão máxima diária, em  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ , estimada em função da área da bacia hidrográfica (A), em  $\text{km}^2$ , e do tempo de retorno (TR), em anos. <sup>3</sup>Refere-se ao limite da área das sub-bacias hidrográficas em que a equação foi gerada.

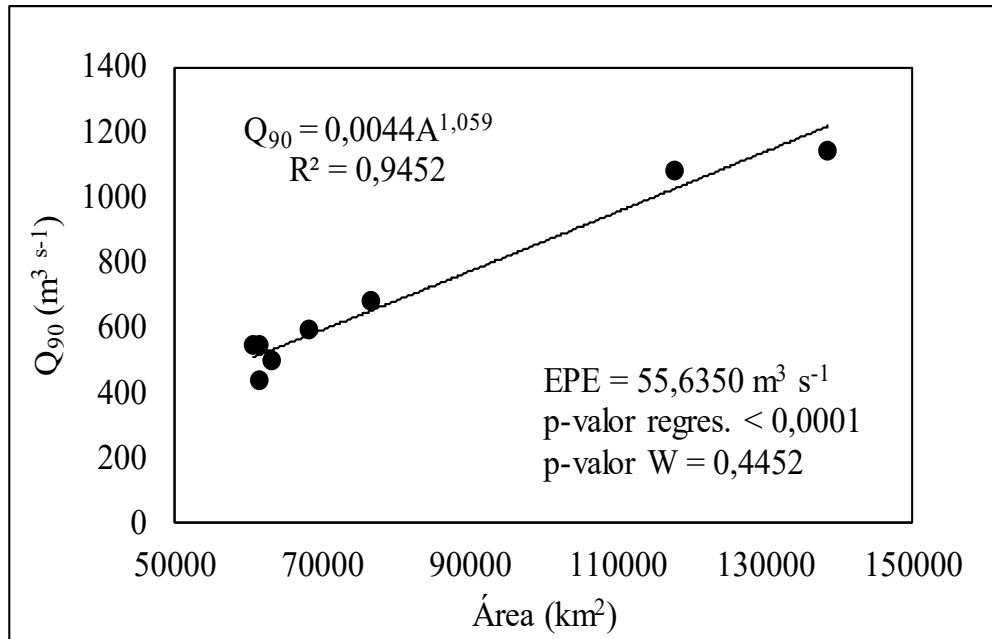
#### 4.6 Equações de regionalização das vazões $Q_{90}$ e $Q_{95}$

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22, encontram-se dispostos os modelos de regressão que melhor estimaram os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em função da área de drenagem das sub-bacias e em cada região homogênea encontrada neste trabalho. Verifica-se que os modelos de regressão expostos apresentaram bom ajuste aos dados observados, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,90 e aprovação no teste F da regressão (p-valor regres.) e teste de normalidade de Shapiro – Wilk (p-valor W, com nível de 5% de significância). Ressalta-se que, neste trabalho, foram avaliados os modelos linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco para cada região hidrologicamente homogênea. Contudo, o melhor ajuste ( $R^2$ , teste F e teste de normalidade dos resíduos) foi alcançado com o modelo potencial com dois parâmetros.

Stedinger e Thomas (1985) recomendam que as equações de regressão resultem de valores de coeficiente de determinação acima de 0,70. A partir dos resultados estatísticos dos modelos, optou-se por utilizar somente a área de drenagem como variável explicativa. Bescow et al. (2016), no trabalho sobre as técnicas de inteligência artificial aliadas à medida da sazonalidade para a regionalização hidrológica de  $Q_{90}$  sob condições brasileiras, concluíram que a função potencial representou adequadamente a relação entre  $Q_{90}$  e a área de drenagem. Bazzo et al. (2017) estimaram as vazões mínimas com 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) obtidas na bacia do rio Taquari-Antas, no Rio Grande do Sul. Os autores obtiveram resultados satisfatórios nas duas formas de geração dos modelos, mas com a área de drenagem sendo a

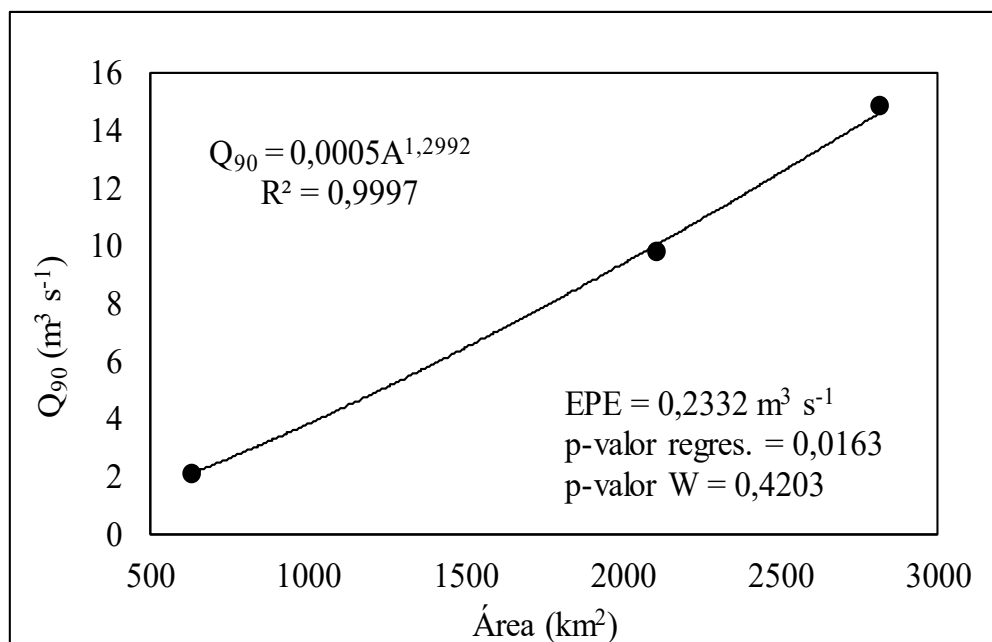
variável explicativa deles. Ademais, resultados semelhantes foram encontrados, também, nos trabalhos de Moreira e Silva (2014) e Beskow et al. (2016), os quais utilizaram somente a área de drenagem como variável explicativa.

Figura 19 - Regressão matemática do parâmetro da  $Q_{90}$  versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I



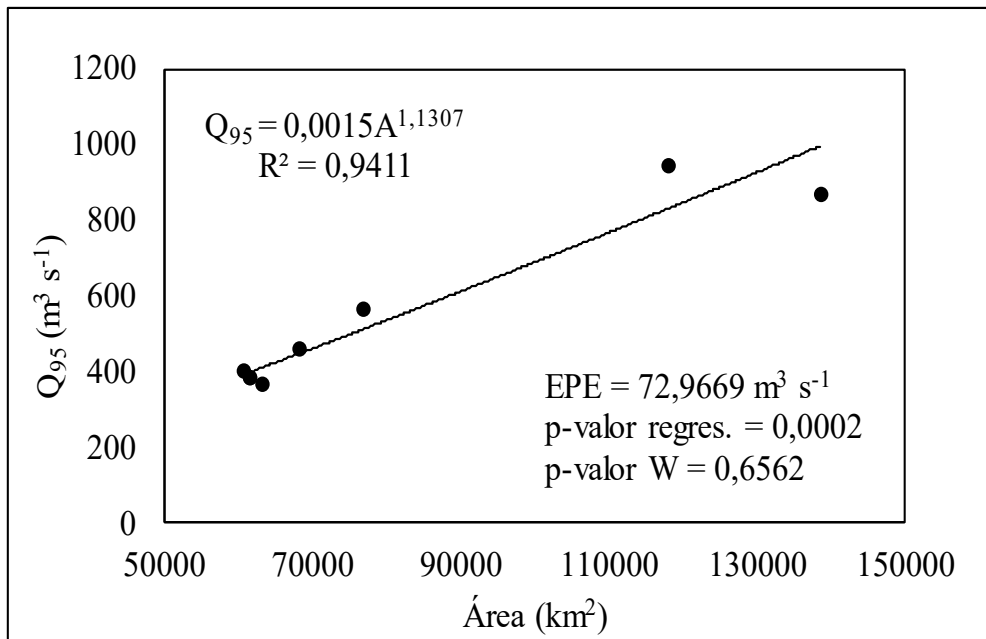
Fonte: O autor

Figura 20 - Regressão matemática do parâmetro da  $Q_{90}$  versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



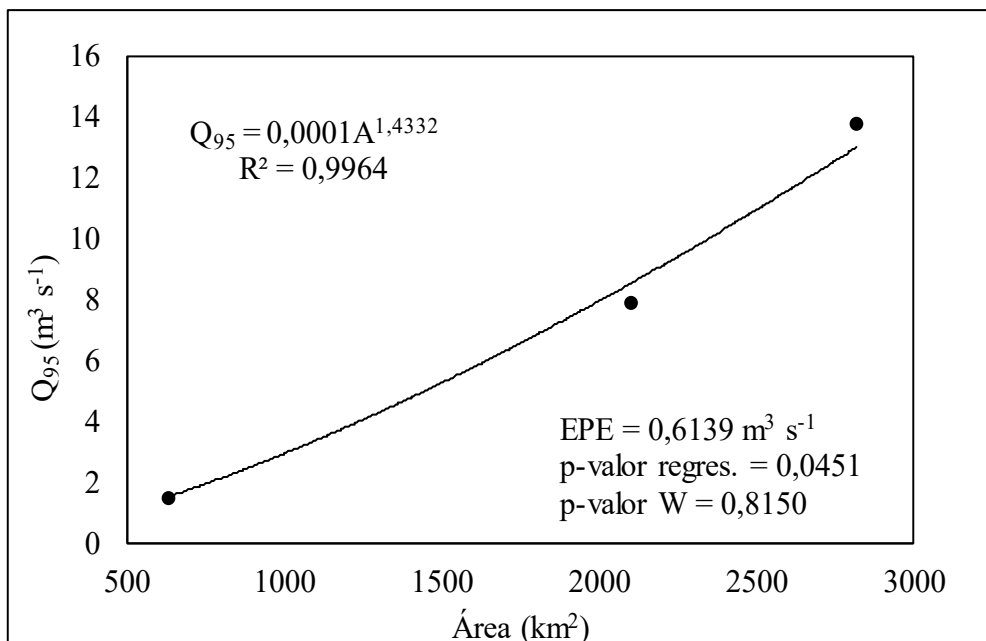
Fonte: O autor

Figura 21 - Regressão matemática do parâmetro da  $Q_{95}$  versus as áreas das sub-bacias da região homogênea I



Fonte: O Autor

Figura 22 - Regressão matemática do parâmetro da  $Q_{95}$  versus as áreas das sub-bacias da região homogênea II



Fonte: O autor

Na Tabela 11 estão reunidas as equações para a estimativa da  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  encontradas neste trabalho, bem como o resultado do teste de Nash-Sutcliffe em relação a elas e o limite de validade dessas equações. Pruski et al. (2015) afirmam que a extrapolação das equações de



regressão para além dos limites dos dados da amostra, utilizados para se estimar os parâmetros do modelo de regressão, não é recomendada. Os valores de coeficientes de Nash-Sutcliffe estão acima de 0,75, o que, por meio da classificação proposta por Moriasi et al. (2007), indica que as equações geradas neste trabalho possuem muito boa eficiência na estimativa das vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ . Ademais podem se verificar, a partir do apêndice B (Tabelas 1C e 2C), os resultados estimados pelos modelos propostos.

Resultados semelhantes a estes foram obtidos por Baena et al. (2004), que evidenciaram que o melhor modelo de regressão para as vazões mínimas de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) foi o potencial e somente a variável área de drenagem foi suficiente para explicar o comportamento delas.

Tabela 11 - Modelos de regressão ajustados para estimativa da  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em duas regiões homogêneas da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, em Minas Gerais

Reg. <sup>1</sup>	Equação proposta <sup>2</sup>	$C_{NS}$ <sup>3</sup>	Intervalo de validade <sup>4</sup>
I	$Q_{90} = 0,0044 \cdot A^{1,059}$	0,90	$60.667 \text{ km}^2 < A < 138.643 \text{ km}^2$
	$Q_{95} = 0,0015 \cdot A^{1,1307}$	0,76	
II	$Q_{90} = 0,0005 \cdot A^{1,2992}$	0,96	$630 \text{ km}^2 < A < 2.819 \text{ km}^2$
	$Q_{95} = 0,00001 \cdot A^{1,4332}$	0,89	

Fonte: O autor

<sup>1</sup>Refere-se à região homogênea em que a equação é indicada; <sup>2</sup> $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$  e a área da bacia hidrográfica (A) em  $\text{km}^2$ . <sup>3</sup>Refere-se ao resultado do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ). <sup>4</sup>Refere-se ao limite da área das sub-bacias hidrográficas em que a equação foi gerada.

#### 4.7 Comparação dos valores de $Q_{7,10}$ estimados pelo modelo obtido neste trabalho com aqueles estimados pelo Atlas Digital das Águas de Minas e Deflúvios Superficiais de Minas Gerais

Um dos objetivos deste trabalho é a comparação do modelo de regionalização da  $Q_{7,10}$  obtido neste trabalho e aqueles já amplamente utilizados no Estado de Minas Gerais para a estimativa dessa vazão. Entre eles, está o Deflúvios Superficiais de Minas Gerais e o Atlas Digital das Águas de Minas. O primeiro, para ser utilizado, necessita, como dados de entrada, somente da localização do ponto da captação da água por parte do usuário e da área da bacia

hidrográfica delimitada a partir desse ponto. Neste trabalho, foram obtidas as  $Q_{7,10}$  por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, na seção de controle de cada estação fluviométrica da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande. Uma vez estipulado o local da captação e conhecendo-se a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica, foi possível determinar o rendimento específico médio mensal, a tipologia regional homogênea e a  $Q_{7,10}$  em cada ponto (Tabela 12). Ressalta-se que a determinação do rendimento específico médio mensal foi realizada, na maioria dos casos, por meio de interpolação linear entre as duas isoietas mais próximas do ponto de interesse.

Em relação ao Atlas Digital das Águas de Minas, a regionalização proposta nessa publicação se ancora em uma única equação potencial (Equação 20) para a estimativa da  $Q_{7,10}$  em toda a Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande. Para o seu uso, essa equação exige como variável independente somente a área da bacia hidrográfica, delimitada a partir do ponto de interesse.

O desempenho dos modelos propostos neste trabalho para a estimativa da  $Q_{7,10}$ , em comparação com as metodologias propostas no Deflúvios Superficiais de Minas Gerais e no Atlas Digital das Águas de Minas, pode ser visualizado nas Figuras 23 e 24. Nas duas figuras, os dados da  $Q_{7,10}$  estimados pelos três modelos estão sendo confrontados com os valores dessa vazão, calculados por meio do modelo de distribuição de probabilidades Gumbel para mínimos, com os parâmetros de escala e posição estimados pelo método dos momentos. Nessas figuras, a reta 1:1 se refere ao ajuste perfeito.

Ao se analisar a Figura 23, a qual reúne os resultados da  $Q_{7,10}$  para a região homogênea I, nota-se que o modelo proposto neste trabalho (Tabela 9) alcançou um resultado muito superior ao do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais e ao do Atlas Digital das Águas de Minas. Esse melhor desempenho é aferido tanto pela reta 1:1 como também pelo resultado do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ). Em relação a esse teste, valores próximos da unidade e positivos indicam melhor eficiência do modelo hidrológico. Por outro lado, quando se analisa os resultados na região homogênea II, contidos na Figura 24, nota-se uma melhora em todos os modelos aqui estudados, porém com superioridade em relação ao modelo do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, seguido do proposto neste trabalho (equação contida na Tabela 9).

O Atlas Digital das Águas de Minas apresentou o pior desempenho entre os três modelos, independentemente da região homogênea. Isso se deve ao fato de ele utilizar uma única equação para a estimativa da  $Q_{7,10}$  em toda a Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, com procedimentos de regionalização muito incipientes.

Tabela 12 - Resultados da estimativa da  $Q_{7,10}$ , por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, em cada sub-bacia hidrográfica agrupada nas regiões homogêneas I e II e delimitadas a partir das suas respectivas estações fluviométricas

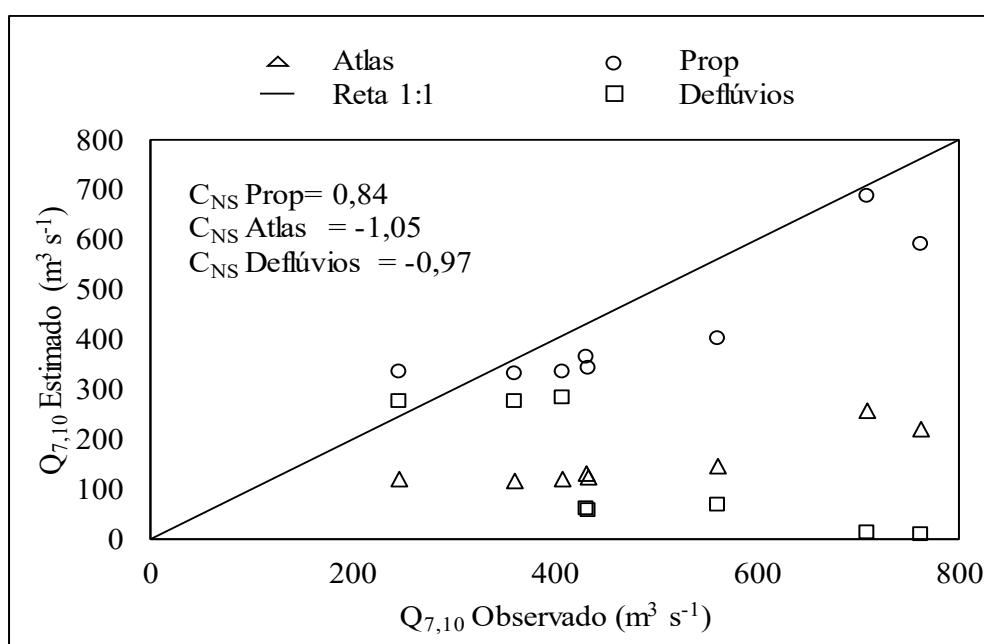
Reg. <sup>a</sup>	Código <sup>b</sup>	Logitude	Latitude	A (km <sup>2</sup> ) <sup>c</sup>	Parâmetros do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais <sup>d</sup>							$Q_{7,10}$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
					Tipologia	Re (L (s km <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	F <sub>10,7</sub>	Q <sub>10,M</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	
I	61730000	-47,4	-20,1	61.325,90	332	5,00	0,483	0,398	1,054	0,903	306,63	276,90
	61731080	-47,3	-20,2	60.667,71	231	6,50	0,492	0,404	1,046	0,914	394,34	360,39
	61998080	-50,3	-19,9	138.643,30	332	0,33	0,483	0,398	1,054	0,903	45,06	40,69
	61760080	-48,2	-20,0	68.135,60	231	2,30	0,492	0,404	1,046	0,914	156,71	143,22
	61796080	-48,6	-20,1	76.711,05	231	0,91	0,492	0,404	1,046	0,914	69,81	63,80
	61740080	-47,8	-20,0	63.226,41	331	3,00	0,492	0,404	1,046	0,914	189,68	173,35
	61734080	-47,4	-20,0	61.420,23	332	5,00	0,489	0,414	1,042	0,920	307,10	282,62
	61941080	-49,2	-20,3	117.934,20	332	0,92	0,481	0,398	1,054	0,901	108,50	97,79
II	61946000	-49,7	-19,8	2.819,58	331	0,50	0,483	0,415	1,042	0,915	1,41	1,29
	61794000	-48,0	-19,7	630,11	231	3,00	0,492	0,404	1,046	0,914	1,89	1,73
	61795000	-48,4	-19,9	2.105,28	231	2,60	0,492	0,404	1,046	0,914	5,47	5,00

Fonte: O autor

<sup>a</sup>Refere-se à região homogênea em que a estação está inserida; <sup>b</sup>Código da estação fluviométrica no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA); <sup>c</sup>Área da bacia hidrográfica delimitada a partir da estação fluviométrica; <sup>d</sup>Parâmetros obtidos na publicação Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, em função da localização de cada uma das estações fluviométricas, necessários nas Equações 24, 25, 26 e 27.

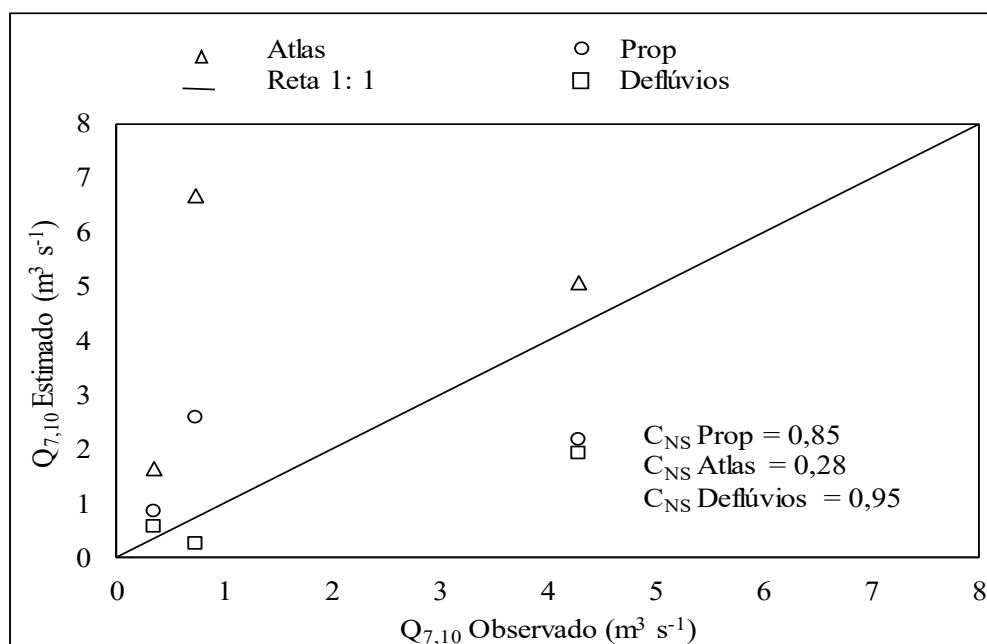
Pode se considerar, ainda, que os modelos de regionalização da  $Q_{7,10}$ , propostos neste trabalho, podem servir como uma ferramenta promissora na estimativa dessa vazão, em locais com ausência de estações fluviométricas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande (BHBRG). Contudo, é importante que os órgãos gestores de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais, assim como os comitês de bacia hidrográfica envolvidos na BHBRG, envidem esforços para aumentar o número de estações fluviométricas nessa bacia, principalmente em bacias com áreas menores do que 2.819 km<sup>2</sup>.

Figura 23 - Comparação dos resultados da  $Q_{7,10}$  para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), pelo Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe.



Fonte: O autor

Figura 24 - Comparação dos resultados da  $Q_{7,10}$  para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), pelo Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe.



Fonte: O autor

#### 4.8 Eficiência dos modelos hidrológicos obtidos neste trabalho *versus* Atlas Digital das Águas de Minas, na estimativa de $Q_{máx}$ .

O resultado do teste de eficiência, dado pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ), entre os modelos hidrológicos gerados neste trabalho e o aquele preconizado no Atlas Digital das Águas de Minas, para a Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, está compilado na Tabela 13. Neste trabalho, esses modelos hidrológicos foram comparados com os valores de  $Q_{máx}$  calculados pelo método Gumbel para máximos, com os parâmetros de escala e posição estimados pelo método dos momentos.

Analisando a Tabela 13, observa-se que, independentemente do período de retorno e da região homogênea (I ou II), os modelos hidrológicos propostos neste trabalho apresentam valores de  $C_{NS}$  muito superiores aos alcançados pelo Atlas Digital das Águas de Minas. Por outro lado, considerando a classificação proposta por Moriasi et al. (2007) para interpretação dos resultados do teste  $C_{NS}$ , os modelos propostos neste trabalho para a região homogênea II, considerando tempos de retorno de 50, 100 e 500 anos, não devem ser utilizados, pois possuem

desempenho insatisfatório. Quanto mais próximo da unidade e positivo for o coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido, mais eficiente é o modelo hidrológico na estimativa da vazão.

Os dados contidos na Tabela 13 refletem, também, a ineficiência do modelo hidrológico proposto no Atlas Digital das Águas de Minas (Equação 23) para a estimativa da vazão média máxima diária na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande, em Minas Gerais.

Tabela 13 - Comparação da eficiência na estimativa da  $Q_{\text{máx.}}$ , dado pelo teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ), entre os modelos hidrológicos obtidos neste trabalho e aquele preconizado no Atlas Digital das Águas de Minas, nas duas regiões homogêneas

TR (anos)	Resultado do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ )	
	Modelo proposto	Atlas Digital das Águas de Minas
Região homogênea I		
10	0,93	-1,35
20	0,94	-1,33
50	0,95	-1,29
100	0,95	-1,27
500	0,94	-1,22
Região homogênea II		
10	0,67	-0,05
20	0,58	-0,32
50	0,48	-0,60
100	0,43	-0,76
500	0,33	-1,02

Fonte: O autor

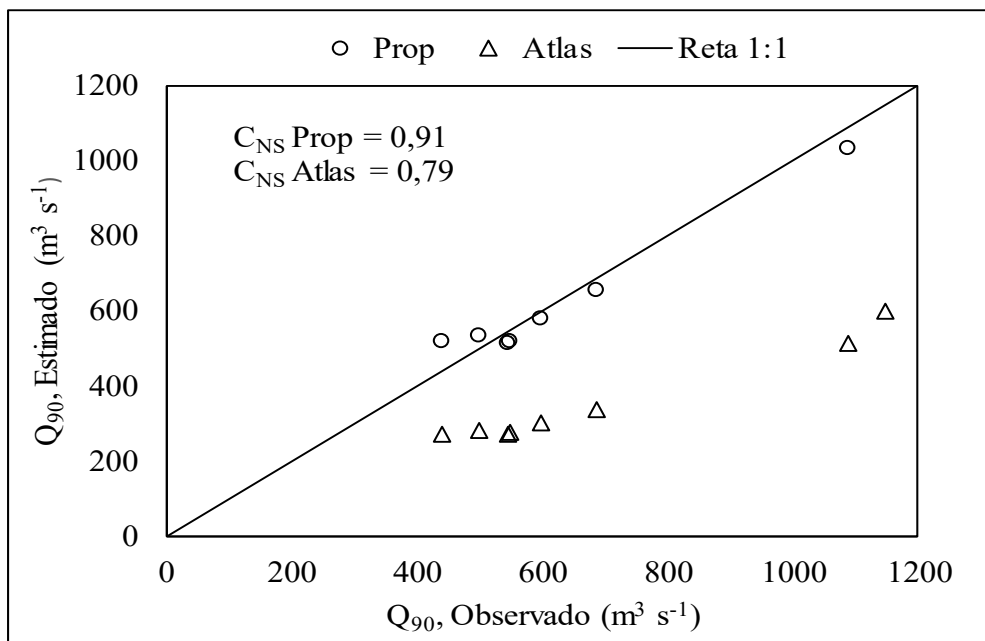
#### 4.9 Eficiência dos modelos hidrológicos obtidos neste trabalho *versus* Atlas Digital das Águas de Minas, na estimativa de $Q_{90}$ e $Q_{95}$

Por meio das Figuras 25, 26, 27 e 28, é possível comparar a eficiência, dada pelo teste de Nash-Sutcliffe e da reta 1:1, dos modelos hidrológicos propostos neste trabalho e aqueles preconizados na publicação Atlas Digital das Águas de Minas. A reta 1:1 representa os dados de  $Q_{90}$  ou  $Q_{95}$  observados, ou seja, obtidos diretamente na série histórica de vazão da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande. Portanto, quanto mais próximo dessa reta a vazão estimada pelo modelo hidrológico se situar, mais preciso ele será. Ademais, nas referidas figuras, estão expostos os resultados do teste de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ), por meio do qual é possível avaliar a eficiência do modelo. Quanto mais próximo da unidade e positivo for o coeficiente  $C_{NS}$ , mais eficiente é o modelo hidrológico na estimativa da vazão.

Em relação à  $Q_{90}$ , os modelos hidrológicos propostos neste trabalho, tanto para a região homogênea I (Figura 25) quanto para a II (Figura 26), apresentaram desempenho superior ao modelo preconizado no Atlas Digital das Águas de Minas, com coeficiente  $C_{NS}$  muito próximo da unidade. Contudo, de acordo com a classificação proposta por Moriasi et al. (2007), ambas as metodologias podem ser classificadas como de muito boa eficiência na estimativa da  $Q_{90}$  na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande.

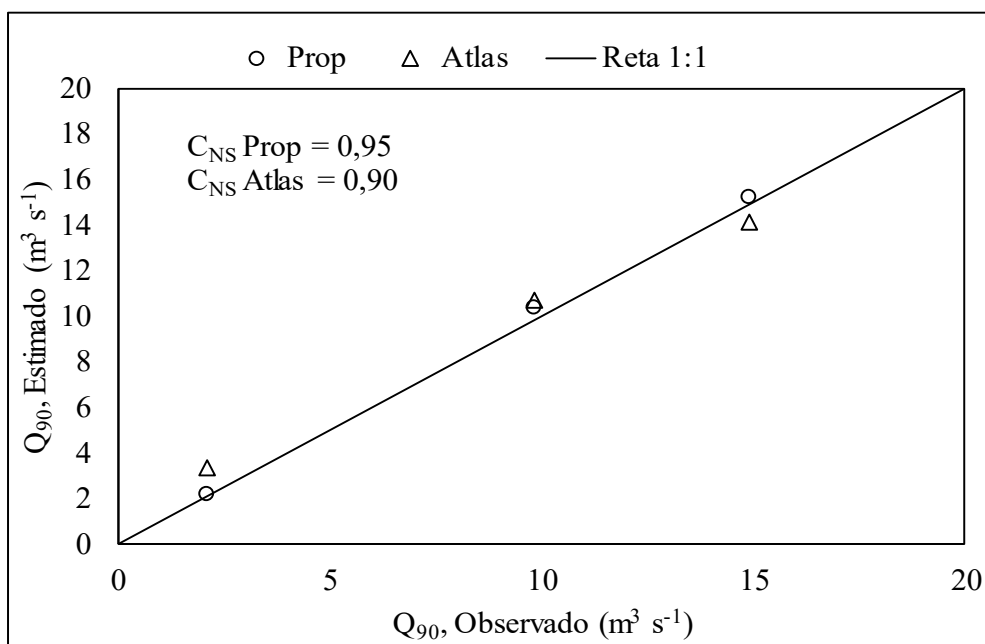
No que diz respeito ao  $Q_{95}$ , os modelos hidrológicos propostos neste trabalho também apresentaram desempenho superior, tanto para a região homogênea I (Figura 27) quanto para a II (Figura 28), quando comparado com o modelo disponível no Atlas Digital das Águas de Minas. Este resultado permite a utilização dos modelos aqui propostos com confiança, dentro da região considerada homogênea. Ademais verifica-se que o valor de  $C_{NS}$  permite classificar a eficiência dos modelos de regressão aqui obtidos em muito bom, conforme Moriasi et al. (2007).

Figura 25 - Comparação dos resultados da  $Q_{90}$  para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe



Fonte: O autor

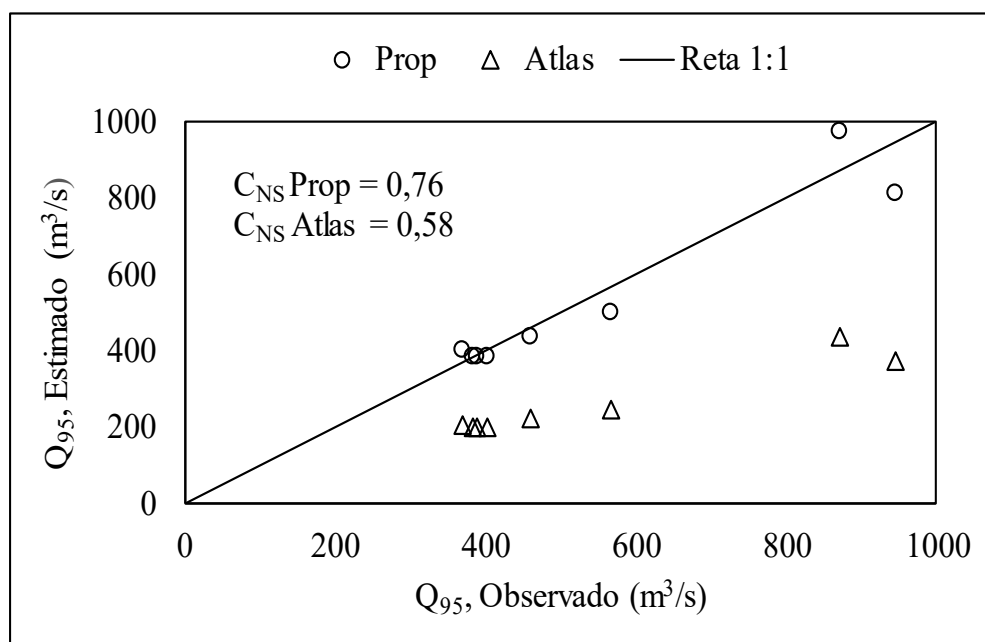
Figura 26 -Comparação dos resultados da  $Q_{90}$  para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe



Fonte: O autor

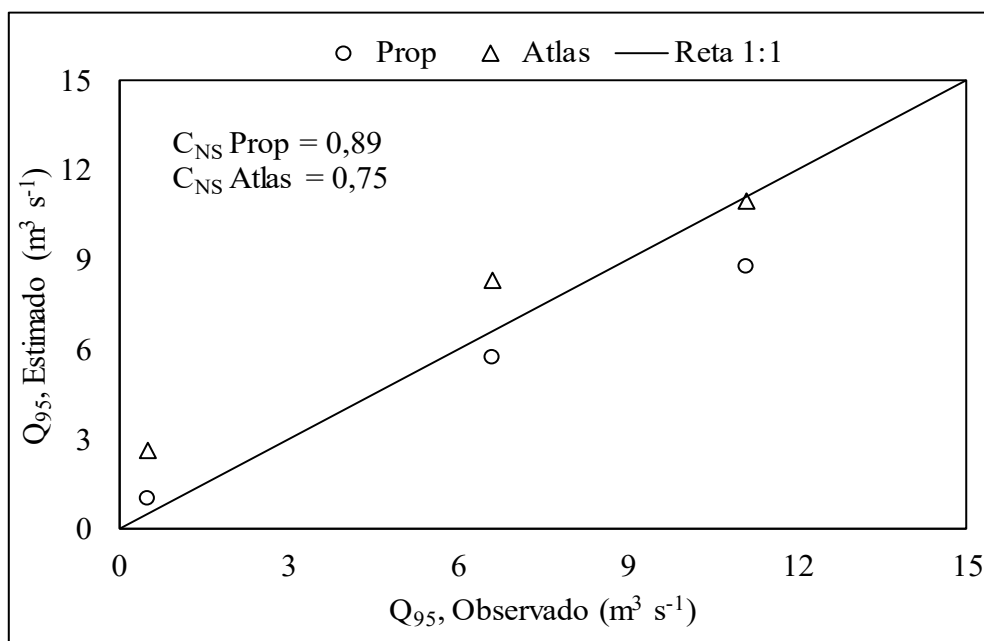


Figura 27 -Comparação dos resultados da  $Q_{95}$  para a região homogênea I, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe



Fonte: O autor

Figura 28 -Comparação dos resultados da  $Q_{95}$  para a região homogênea II, obtidos diretamente nas sub-bacias (Reta 1:1), por meio do modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e por meio do Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas).  $C_{NS}$  significa coeficiente de Nash-Sutcliffe



Fonte: O autor

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, pôde-se concluir que, apesar do pequeno número de sub-bacias com monitoramento de vazão, foi possível, por meio da análise de *cluster* e usando o algoritmo de Ward, encontrar duas regiões homogêneas na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Grande.

A característica fisiográfica que mais se destacou foi a área da bacia hidrográfica, sendo usada como variável de entrada nos modelos hidrológicos gerados.

Os modelos potencial e linear simples apresentaram os melhores ajustes para estimativas de vazões máximas e mínimas, enquanto para as vazões de permanência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  a potencial destacou-se como a melhor no ajuste das equações de regressão para as duas regiões consideradas homogêneas da bacia em estudo.

Os modelos hidrológicos obtidos neste trabalho, indicados para a estimativa da  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{máx.}$ , apresentaram muito boa eficiência na estimativa dessas vazões, com exceção da estimativa da  $Q_{máx.}$  para tempos de retorno de 20, 50, 100 e 500 anos, na região homogênea II.

Os modelos hidrológicos obtidos neste trabalho apresentaram-se mais eficientes na estimativa da  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{máx.}$  que os modelos indicados no Atlas Digital das Águas de Minas.

Quando a vazão  $Q_{7,10}$ , estimada por meio do Deflúvios Superficiais de Minas Gerais, foi comparada com a obtida pelos modelos desenvolvidos neste trabalho, verificou-se maior eficiência destes na região homogênea I e eficiência equivalente na região II.

As estimativas das vazões de referência e máximas na bacia hidrográfica do Baixo Rio Grande\_UPGRH-GD8, por meio de regionalização hidrológica, forneceram subsídios para a tomada de decisão no processo de gestão de recursos hídricos, bem como para minimizar os possíveis conflitos e contribuir para atender à demanda deste bem hídrico.

No geral os modelos matemáticos propostos neste trabalho apresentaram um desempenho favorável, mesmo tendo apenas a área como variável explicativa, o que pode ser justificado com as estatísticas supracitadas, com exceção e menos precisão para o segundo grupo das regiões consideradas hidrológicamente homogêneas, o que ofereceu poucas estações fluviométricas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Hidroweb**: sistemas de informações hidrológicas. Brasília, 2014. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2018.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, Boston, v. 48, p. 765-769, 1954. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1954.10501232>
- ALMEIDA M. A.; CURI W. F. Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança. **Revista Ambiente e Água**, Tabuaté, v. 11, n. 4, p. 989-1005, 2016.
- ÁLVAREZ. Olgúin.G. et al. Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. **México Ingeniería Investigación y Tecnología**, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 277-284, 2011.
- ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; AYRES, F.M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p.46-57, 2010.
- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. **Large area hydrologic modeling and assessment** Part I: model development. *Journal of the American water resources association*. v. 34, n. 1, p. 73 - 89. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- BEIJO, L. A. Distribuição de Gumbel: estudo de métodos de estimação dos parâmetros e ajuste aos dados de precipitação máxima de Lavras, MG. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agrônômica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- BAENA, L. G. N. Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2002.
- BAENA, L. G. N.; SILVA D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, set./dez. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>
- BAZZO, K. R. et al. Regionalização da vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 12, n. 5, p. 855, 23 ago. 2017.
- BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, Oxford, v.27, n. 2, p.341-363, Jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.046>

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; VARGAS, M. M.; CORRÊA, L. L.; CALDEIRA, T. L.; DURÃES, M. S. F.; AGUIAR, M. S. Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 541, p. 1406-1419, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.046>

BOBÉE, B; RASMUSSEN, P. Recent advances in flood frequency analysis. U.S. National Report to IUGG, 1991-1994. **Reviews of Geophysics**, Washington, D.C, v. 33, July 1995. Supplement. Disponível em: <<http://earth.agu.org/revgeophys/bobee01/bobee01.htm>>. Acesso em: 8 dz. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/95RG00287>

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Coleção de Leis do Brasil**, Brasília, v. 1, p. 18, 8 jan. 1997. Seção 1.

BRASIL. Resolução Conjunta SEMAD e IGAM nº 2237 de 05 de dezembro de 2014 Estabelece procedimentos a serem observados pelos usuários de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais visando ao envio dos dados de monitoramento pluviométrico, limnimétrico e fluviométrico associados a reservatórios para aproveitamento hidrelétrico e para abastecimento público, e dá outras providências. **SEMAD**. Belo Horizonte, MG. 05 dez. 2014. Disponível em <[http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2015\\_ARQUIVOS/MONITORA\\_RESERVATORIO/RESOLU%C3%87%C3%83O\\_CONJUNTA\\_SEMAD\\_E\\_IGAM\\_N%C2%BA\\_2237\\_Versao\\_Final.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2015_ARQUIVOS/MONITORA_RESERVATORIO/RESOLU%C3%87%C3%83O_CONJUNTA_SEMAD_E_IGAM_N%C2%BA_2237_Versao_Final.pdf)> Acesso em: 10 de jan. de 2018.

COSTA, A. M.; REIS, R. S. Análise de conflitos no uso do solo em APPs: O uso de sensoriamento remoto no entorno de um sistema estuarino lagunar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v.10, n.3, p. 775-788, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n3p775-788>

CUPAK A. Initial results of nonhierarchical cluster methods use for low flow grouping. **Journal of ecological Engineering**, Poland, v. 18, n. 2, p. 44–50, 2017.

CLARKE, R. T. Separation of year and site effects by generalized linear models in regionalization of annual floods. **Water Resources Research**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 979-986, Apr. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR900370>

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DALRYMPLE, T. Flood-frequency analyses: manual of hydrology: part3: flood-flow techniques. **Geological Survey Water Supply Paper** 1543-A. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1960. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/wsp/1543a/report.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

DIAS, L. S.O.; ROCHA, G.A.; BARROS, E.U.A.; MAIA, P.H.P. Utilização do radar interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Bahia Análise e Dados**, Salvador, v. 4, n. 2, p. 265-271, 2004.

DINIZ, R.; SOARES, V.; CABRAL, L. Uso de técnicas de mineração de dados na identificação de áreas hidrologicamente homogêneas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 65–75, 2012. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n1.p65-75>

DU, J.; RUI, H.; ZUO, T.; LI, Q.; ZHENG, D.; CHEN, A.; XU, Y.; XU, C. Y. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use change. **Water Resources Management**, Oxford, v. 27, p. 2823-2838, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0317-0>

ELESBON, A. A. et al. Multivariate statistical analysis to support the minimum Streamflow regionalization. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, Jaboticabal, v.35, n.5, p.838-851, set./out. 2015.

ELETROBRÁS. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985. v. 1.

EUCLYDES, H.P.; FERREIRA, P.A.; OG ARAO, V.R.; MEDEIROS, D.R. Regionalização Hidrológica na Bacia do Alto São Francisco à Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 81-105, 2001. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n2.p81-105>

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. V.; SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do alto São Francisco à Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.6, n.2, p.81-105, 2002. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n2.p81-105>

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996.

FARHAN, Y.; AL-SHAIKH, N. Quantitative Regionalization of W. Mujib-Wala SubWatersheds (Southern Jordan) Using GIS and Multivariate Statistical Techniques. **Open Journal of Modern Hydrology**, [S.l.], v. 7, n. 2, p.165-199, 2017. 10.4236/ojmh.2017.72010

FARSADNIA, F.; KAMROOD, M. R.; NIA, A. M.; MODARRES, R. BRAY, M. T. HAN, D.; SADATINEJAD, J. Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 509, p. 387-397, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.050>

FEREIRE, A. J.; LAGE, G. B.; CRIISTÓFARO, C. Comparação entre parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas gerados por dados SRTM e ASTER GDEM: estudo de caso para bacias do Vale do Jequitinhonha-MG. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5443-5450.

FIOREZE, A. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; FRANCO, A. P. B. Avaliação do Desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás,

Brasil. **Ambiente e Água**: an interdisciplinary journal of applied Science, Taubaté, v. 3, n. 2, 2008.

MAN, G.; CHEN, X.; LIU, J.; ZHANG, Z. Regionalization of annual runoff characteristics and its indication of co-dependence among hydro-climate-landscape factors in Jinghe River Basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Berlin, v. 32, n. 6, p. 1613-1630, June 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1494-9>

GONÇALVES, M. F.; BLANCO, C. J. C.; SANTOS, V. C.; OLIVEIRA, L. L. S.; PESSOA, F. C. L. Identification of rainfall homogenous regions taking into account El Niño and La Niña and Rainfall Decrease in the state of Pará, Brazilian Amazon. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 38, n. 2, p. 209-216, 2016. 10.4025/actascitechnol.v28i2.26534

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1999.

HAIR JR., J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HANNAH, D. M.; KANSAKARA, S. R.; GERRARDA, A.J.; REES, G. Flow regimes of Himalayan rivers of Nepal: Nature and spatial patterns. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 308, p. 18–32, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.018>

HASS, A.; CONCEIÇÃO, HENRICHSEN, S. R.; J. L.; CHINAZZO, I. B.; RITTER, L. G.; RENZ, V. D. Análise e caracterização da bacia hidrográfica do córrego Fátima localizado no município de Frederico Westphalen-RS. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 187-195, abr. 2014.

HASSAN, B. G. H.; PING, F. Formation of homogenous regions for Luanhe basin – by using l-moments and cluster techniques. **International Journal of Environmental Science and Development**, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 205-210, 2012.

HARRIS, C. W. Characteristics of two measures of profile similarity. **Psychometrika**, Richmond, v.20, p. 289–297, 1955. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02289035>

HE, C. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v.18, p.809–813, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00080-X)

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. Cambridge: Cambridge University, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>

HSU, N.-S.; HUANG, C.-J. Estimation of flow duration curve at ungauged locations in Taiwan. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, 2017.

ILORME, F., GRIFFIS, V.W., A novel procedure for delineation of hydrologically homogeneous regions and the classification of ungauged sites for design flood estimation, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.492, p. 151-162, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.045>

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/outorga/manual/manual-de-outorga.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG: Relatório Síntese – R3**. São Paulo, 2008.

KUMAR, S.; SINGH, S.K.; MISHRA, P. Multivariate Analysis: An Overview. **Journal of Dentofacial Sciences**, v. 2, n.3, p. 19-26, 2013.

KOPLIN, N.; SCHÄDLER, B.; VIVIROLI, D.; WEINGARTNER, R. Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 16, n.7, p. 2267–2283, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-2267-2012>

LISBOA, L.; SILVA, D. D.; MOREIRA, M. C.; PRUSKI, F. F. Estimativa e regionalização das vazões mínimas e média na bacia do Rio Paracatu. **Engenharia na Agricultura: REVENG**, Viçosa, v. 4, n. 16, p. 471-479, out. 2008.

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; PRADO, G.; PAULINO, J.; ALMEIDA, F. T. Regionalization of Maximum and Minimum flow in the Teles Pires Basin, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 37, n. 1, p. 54–63, fev. 2017.

LOPES, T. R.; PRADO, G. D.; ALBERTO, C. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a Bacia do rio Ivai - pr. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 1, p. 14, 2016.

LUJANO, A. L.; ARAGÓN, J. P. Q.; LAURA, E. L. Regionalizacion de Caudales Mensuales en la Región Hidrográfica del Titicaca, Perú. **Revista de Investigaciones Altoandinas**, Puno, v. 19, n. 2, p.219 – 230, 2017.

LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, New York, v.62, n.4, p.283-294, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.05.004>

MALEKINEZHAD, H.; NACHTNEBEL, H. P.; KLIK, A. Comparing the index-flood and multiple regression methods using L-moments. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 36, p. 5460, 2011.

MELLO C. R; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article “assessment of economic flood damage”. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S.l.], v. 10, n. 8, p. 1697-1724, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>

MENEZES, S. J. M. C. **Metodologia para partilha da compensação financeira pelo uso de recursos hídricos em usinas hidrelétricas sequenciais: o caso da bacia do Rio Grande.** 2011. 228 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

MIRANDA, J. I **Fundamentos de sistemas de informações geográficas.** Brasília, DF: Brasília, 2005.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n.380, p.420-437, 2009

MOREIRA, J.L. B. **Estudo da distribuição espacial das chuvas em Belo Horizonte e em seu entorno.** 2002. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. Análise de métodos para estimativa das vazões da bacia do Rio Paraopeba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n.2, p. 313–324, 2014.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part I – a discussion of principles. **Journal of Hydrologic**, Amsterdam, v. 10, p.282–290, 1970.[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NERC. **Flood Studies Report.** London: National Environmental Research Council, 1975. v. 1.

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu.** 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p51-61>

NOVAES, L. F. et al. Avaliação de desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.12, n.2, p.51-61, 2007.

OLDEN, J.D.; POFF, N.L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. **River Research and Applications**, [S.l.], v. 19, p. 101–121, 2003.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010.DOI:<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800005>

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da Bacia do Rio Grande.** 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.



OLIVEIRA, P. T. S. et al. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800005>

PAIVA, J. B. B.; PAIVA, E. M. C. D. (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**, abr., 2003.

PLATE, E. J. Flood risk and flood management. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 267, p. 2-11, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00135-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00135-X)

PRUSKI, F.F. et al. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 476, p. 52-71, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.005>

PRUSKI, F.F. et al. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural para a gestão dos recursos hídricos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n.1, p. 67-77, 2011.

PRUSKI, F. F. et al. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 808–816, out. 2015.

PYRCE, R. S. **Hydrological low flow indices and their uses**. Peterborough: Trent University, 2004.

RAZAVI, T; COULIBALY, P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v.18, n.8, p. 958-975, 2013. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)

RAZIEI, T. A precipitation regionalization and regime for Iran based on multivariate analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, Feb. 2017.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V.V. Regionalization of watersheds by hybrid cluster analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 318, p. 37-56, 2006.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of Watersheds An Approach Based on Cluster Analysis. **Water Science and Technology Library**, [S.l.], v. 58, 248p. 2008.

RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES F. A.; SILVAD. D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce. **Engenharia na agricultura**. Viçosa, v.13, n.2, p.103-107, 2005.

RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; SANTOS, R. M.; SOARES, C. P. B. Estruturação topológica de grandes bases de dados de bacias hidrográficas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 687-696, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622008000400010>

RODRIGUEZ, R. D.G.; SINGH, V.P.; PRUSKI, F.F.; CALEGARIO, A.T. Using entropy theory to improve the definition of homogeneous regions in the semi-arid region of Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, Abingdon, v. 61, n. 11, p. 2096-2109, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1083651>

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. **Atmospheric Science Letters**, [S.l.], v. 16, p. 1985-192, 2014.

SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.8, p. 826-834, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800006>

SANTOS P. V. C. J.; CUNHA A. C.; Outorga de recursos hídricos e vazão ambiental no Brasil: Perspectivas metodológicas frente ao desenvolvimento do setor hidrelétrico na Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n.3, p. 81-95, 2013. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p81-95>

SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v.16, n.5, p. 447-459, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000338)

SANTHI, C. et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>

SILVA JÚNIOR, O.B.; BUENO, E.O.; TUCCI, C.E.M.; CASTRO, N.M.R. Extrapolação espacial na regionalização de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 21-37, Jan./Mar. 2002.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p.374-380, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200019>

SILVA, D. D.; MARQUES, F. A.; LEMOS, A. F. Flexibilidade das vazões mínimas de referência com a adoção do período trimestral. **Engenharia na Agricultura: Reveng, Viçosa**, v. 3, n. 19, p.244-254, may 2011.

SILVA, C. R. P.; DEMARQUI, E. N.; ALMEIDA, F. T.; MINGOTI, R.; SOUZA, A. P. Diferentes modelos digitais de elevação na caracterização física da bacia hidrográfica do Rio Nandico, MT, Brasil. **Scientia Plena**, [S.l.], v. 11, n. 5, 11p. 2015.

SILVA JÚNIOR, O.B.; BUENO, E. O.; TUCCI, E.M.; CASTRO, N.M.R.Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 21-37, jan./mar. 2003.DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p21-37>

SINGH S. K.; MCMILLAN H.; BÁRDOSSY A.; CHEBANA F. Non-parametric catchment clustering using the data depth function, **Hydrological Sciences Journal**, Abingdon, v. 61, n. 15, p. 2649-2667, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1168927>

SOUZA, S. M. T. **Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1993.

- STEDINGER, J. R.; THOMAS, W. O. **Low flow frequency estimation using base-flow measurements**. Reston: U. S. Geological Survey, 1985.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. *In*: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- VEZZA, P.; COMOGLIO, C.; ROSSO, M.; VIGLIONE, A. Low flows regionalization in North-Western Italy. **Water Resources Management**, Oxford, v.24, p.4049-4074, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9647-3>
- YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Adv. Water Resources Management*, Oxford, v.30, p. 1756–1774, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>
- YANG, T.; SHAO, Q.; HAO, Z-C.; CHEN, X. ZHANG, Z.; XU, C-Y.; SUN, L. Regional frequency analysis and spatiotemporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.380, p. 386–405, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.013>
- YEN, H.; JEONG, J.; FENG, Q. Y.; DEB, D. Assessment of input uncertainty in SWAT using latent variables. **Water Resources Management**, Oxford, v. 29, p. 1137-1153, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0865-y>
- YIN, Y.; CHEN, H.; XU, C.-Y.; XU, W.; CHEN, C.; SUN, S. Spatio-temporal characteristics of the extreme precipitation by L-moment-based index-flood method in the Yangtze River Delta region, China. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 124, n. 3–4, p. 1005–1022, may 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1478-y>
- VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; DARRELL, N. L. Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande river basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, Dec. 2012 .DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000735)
- VIOLA, M.R.; MELLO, C.R.; ACERBI, F.W. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.581–590, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500011>
- VIROES, M. V. **Regionalização de vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50 – Bacias dos rios Itapicuru**. [S.l.: s.n.], 2013.
- WARD JÚNIOR, H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v.58, n.301, p.236- 244, 1963. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

ZHANG, Q.; QI, T.; SINGH, V. P.; CHEN, Y. D.; XIAO, M. Regional Frequency Analysis of Droughts in China: a multivariate perspective. **Water Resources Management**, Oxford, 2015.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A - RESULTADO DOS TESTES DE ADERÊNCIA PARA DISTRIBUIÇÃO  
TEÓRICA DE PROBABILIDADE**

Tabela 1A- Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado aos dados de vazão anual mínima de sete dias de duração (Q<sub>7</sub>).

Código	Estação	N <sup>4</sup>	$\Delta f$ tabelado <sup>5</sup> ( $\alpha =$ 0,05)	Distribuição de probabilidade <sup>6</sup>	$\Delta f_{\text{máximo}}$ <sup>7</sup>	Conclusão <sup>8</sup>
61730000	Rifaina	18	0,29	Gumbel	0,16	Aceita
61731080	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	25	0,29	Gumbel	0,11	Aceita
61998080	UHE Água Vermelha Barramento	24	0,29	Gumbel	0,10	Aceita
61760080	UHE Volta Grande Barramento	24	0,29	Gumbel	0,12	Aceita
61796080	UHE Porto Colômbia Barramento	23	0,29	Gumbel	0,09	Aceita
61740080	UHE Igarapava Barramento	15	0,34	Gumbel	0,12	Aceita
61946000	São Francisco de Sales	9	0,4	Gumbel	0,28	Aceita
61794000	Uberaba	34	0,24	Gumbel	0,16	Aceita
61734080	UHE Jaguará Barramento	22	0,29	Gumbel	0,11	Aceita
61941080	UHE Marimbondo Barramento	24	0,29	Gumbel	0,13	Aceita
61795000	Conceição das Alagoas	41	0,29	Gumbel	0,17	Aceita

<sup>4</sup>tamanho da amostra<sup>5</sup>valor crítico para a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (tabelado)<sup>6</sup>distribuição de probabilidade de Gumbel para mínimos<sup>7</sup>módulo da maior diferença entre as frequências empíricas e teóricas<sup>8</sup>resultado qualitativo da amostra de dados a uma distribuição de probabilidade teórica

Tabela 2A- Resultado do teste de Anderson-Darling aplicado aos dados de vazão média máxima anual ( $Q_{\text{máx}}$ ).

Código	Estação	N <sup>9</sup>	$\Delta f$ tabelado <sup>10</sup> ( $\alpha = 0,05$ )	Distribuição <sup>11</sup> de probabilidade	$\Delta f$ <sup>12</sup> <sub>máximo</sub>	Conclusão <sup>13</sup>
61730000	Rifaina	18	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61731080	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	25	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61998080	UHE Água Vermelha Barramento	24	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61760080	UHE Volta Grande Barramento	24	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61796080	UHE Porto Colômbia Barramento	23	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61740080	UHE Igarapava Barramento	15	0,76	Gumbel	0,80	Aceita
61946000	São Francisco de Sales	9	0,76	Gumbel	0,81	Aceita
61794000	Uberaba	34	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61734080	UHE Jaguará Barramento	22	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61941080	UHE Marimbondo Barramento	24	0,76	Gumbel	0,79	Aceita
61795000	Conceição das Alagoas	41	0,76	Gumbel	0,78	Aceita

<sup>9</sup>tamanho da amostra<sup>10</sup>valor crítico para a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (tabelado)<sup>11</sup>distribuição de probabilidade de Gumbel para máximas<sup>12</sup>módulo da maior diferença entre as frequências empíricas e teóricas<sup>13</sup>resultado qualitativo da amostra de dados a uma distribuição de probabilidade teórica



**APÊNDICE B - RESULTADOS DE VAZÕES OBSERVADOS, MODELO DE REGIONALIZAÇÃO PROPOSTA (PROP), ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS (ATLAS) E DEFLÚVIOS SUPERFICIAIS DE MINAS GERAIS (DEFLÚVIOS)**

Tabela 1B - Resultados de vazões  $Q_{7,10}$  observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas) e Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios), em  $m^3 s^{-1}$ .

Região Homogêneas	Estação	$Q_{7,10}$ obs	$Q_{7,10}$ Prop	$Q_{7,10}$ Atlas	$Q_{7,10}$ Deflúvios
I	Rifaina	245,78	336,23	119,69	276,90
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	361,50	333,33	118,48	277,22
	UHE Água Vermelha Barramento	710,13	689,06	257,22	12,52
	UHE Volta Grande Barramento	432,39	366,37	132,11	62,27
	UHE Porto Colômbia Barramento	562,13	404,66	147,65	70,11
	UHE Igarapava Barramento	434,85	344,61	123,16	57,78
	UHE Jaguará Barramento	407,33	336,64	119,86	282,62
	UHE Marimbondo Barramento	762,57	592,69	221,00	10,63
	II	São Francisco De Sales	0,72	2,59	6,66
Uberaba		0,35	0,86	1,63	0,58
Conceição das Alagoas		4,29	2,18	5,07	1,92

Tabela 2B - Resultados de vazões máximas com período de recorrência de 10 anos observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Região				
Homogênea	Estação	$Q_{\text{máx obs}}$	$Q_{\text{máx Prop}}$	$Q_{\text{máx Atlas}}$
I	Rifaina	4.567,24	3.929,72	5.262,69
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	3.893,32	3.899,31	5.215,07
	UHE Água Vermelha Barramento	7.162,83	7.355,54	10.463,28
	UHE Volta Grande Barramento	4.248,15	4.242,61	5.750,90
	UHE Porto Colômbia Barramento	4.993,95	4.632,63	6.354,93
	UHE Igarapava Barramento	3.579,84	4.017,35	5.399,77
	UHE Jaguará Barramento	3.626,10	3.934,07	5.269,51
	UHE Marimbondo Barramento	6.544,66	6.460,00	9.130,08
II	São Francisco de Sales	314,76	351,75	393,01
	Uberaba	193,68	202,92	111,21
	Conceição das Alagoas	366,16	306,01	307,26

Tabela 3B - Resultados de vazões máximas com período de recorrência de 20 anos observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Região Homogênea	Estação	$Q_{\text{máx obs}}$	$Q_{\text{máx Prop}}$	$Q_{\text{máx Atlas}}$
I	Rifaina	5.034,75	4.510,22	6056,80
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	4.552,64	4.474,65	6.001,98
	UHE Água Vermelha Barramento	8.243,00	8.495,19	12.042,12
	UHE Volta Grande Barramento	4.944,33	4.875,92	6.618,67
	UHE Porto Colômbia Barramento	5.806,06	5.331,18	7.313,85
	UHE Igarapava Barramento	4.085,18	4.612,68	6.214,56
	UHE Jaguará Barramento	4.237,06	4.515,31	6.064,65
	UHE Marimbondo Barramento	7.555,60	7.456,93	10.507,74
II	São Francisco de Sales	350,94	398,12	452,31
	Uberaba	230,20	241,59	127,99
	Conceição das Alagoas	427,69	350,76	353,62

Tabela 4B - Resultados de vazões máximas com período de recorrência de 50 anos observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Região Homogênea	Estação	$Q_{\text{máx obs}}$	$Q_{\text{máx Prop}}$	$Q_{\text{máx Atlas}}$
I	Rifaina	5.639,90	5.261,61	7083,19
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	5.406,07	5.219,37	7.019,09
	UHE Água Vermelha Barramento	9.641,17	9.970,34	14.082,79
	UHE Volta Grande Barramento	5.845,46	5.695,68	7.740,28
	UHE Porto Colômbia Barramento	6.857,25	6.235,38	8.553,26
	UHE Igarapava Barramento	4.739,29	5.383,29	7.267,68
	UHE Jaguara Barramento	5.027,89	5.267,66	7.092,37
	UHE Marimbondo Barramento	8.864,16	8.747,35	12.288,40
II	São Francisco de Sales	397,76	458,13	528,96
	Uberaba	277,47	291,66	149,67
	Conceição das Alagoas	507,33	408,69	413,55

Tabela 5B - Resultados de vazões máximas com período de recorrência de 100 anos observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Região Homogênea	Estação	$Q_{\text{máx obs}}$	$Q_{\text{máx Prop}}$	$Q_{\text{máx Atlas}}$
I	Rifaina	6.093,38	5.824,68	7.853,53
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	6.045,60	5.777,44	7.782,45
	UHE Água Vermelha Barramento	10.688,90	11.075,76	15.614,37
	UHE Volta Grande Barramento	6.520,73	6.309,98	8.582,08
	UHE Porto Colômbia Barramento	7.644,98	6.912,95	9.483,47
	UHE Igarapava Barramento	5.229,46	5.960,74	8.058,08
	UHE Jaguara Barramento	5.620,50	5.831,44	7.863,70
	UHE Marimbondo Barramento	9.844,74	9.714,34	13.624,83
II	São Francisco de Sales	432,85	503,10	586,48
	Uberaba	312,89	329,17	165,95
	Conceição das Alagoas	567,01	452,10	458,53

Tabela 6B - Resultados de vazões máximas com período de recorrência de 500 anos observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Região Homogênea	Estação	$Q_{\text{máx obs}}$	$Q_{\text{máx Prop}}$	$Q_{\text{máx Atlas}}$
I	Rifaina	7.141,29	7.125,83	9.630,81
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	7.523,45	7.067,03	9.543,65
	UHE Água Vermelha Barramento	13.110,05	13.630,22	19.147,96
	UHE Volta Grande Barramento	8.081,19	7.729,52	10.524,23
	UHE Porto Colômbia Barramento	9.465,28	8.478,72	11.629,62
	UHE Igarapava Barramento	6.362,16	7.295,16	9881,65
	UHE Jaguará Barramento	6.989,94	7.134,26	9643,28
	UHE Marimbondo Barramento	12.110,70	11.948,92	16.708,17
II	São Francisco de Sales	513,94	607,02	719,20
	Uberaba	394,75	415,86	203,51
	Conceição das Alagoas	704,92	552,41	562,29

Tabela 1C - Resultados de vazões mínimas de referência (Q<sub>90</sub>) observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop) e Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas), em m<sup>3</sup>/s.

Região Homogênea	Estação	Q <sub>90</sub> obs	Q <sub>90</sub> Prop	Q <sub>90</sub> Atlas
I	Rifaina	439,00	517,09	273,09
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho Barramento	545,00	511,22	270,27
	UHE Água Vermelha Barramento	1.146,00	1.226,66	598,35
	UHE Volta Grande Barramento	595,36	578,09	302,19
	UHE Porto Colômbia Barramento	685,00	655,42	338,68
	UHE Igarapava Barramento	499,00	534,08	281,22
	UHE Jaguará Barramento	548,00	517,93	273,49
	UHE Marimbondo Barramento	1.086,00	1.033,52	512,15
II	São Francisco de Sales	14,9	15,19	14,13
	Uberaba	2,1	2,17	3,35
	Conceição das Alagoas	9,82	10,39	10,67



Tabela 2C - Resultados de vazões mínimas de referência (Q<sub>95</sub>) observados, modelo de regionalização proposto neste trabalho (Prop), Atlas Digital das Águas de Minas (Atlas) e Deflúvios Superficiais de Minas Gerais (Deflúvios), em m<sup>3</sup>/s,

Região Homogênea	Estação	Q <sub>95</sub> obs	Q <sub>95</sub> Prop	Q <sub>95</sub> Atlas
	Rifaina	387,10	388,58	202,00
	UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	401,50	383,87	199,95
	Barramento			
	UHE Água Vermelha Barramento	871,40	977,32	436,31
I	UHE Volta Grande Barramento	459,40	437,71	223,11
	UHE Porto Colômbia Barramento	565,00	500,50	249,53
	UHE Igarapava Barramento	369,00	402,22	207,90
	UHE Jaguará Barramento	383,35	389,26	202,29
	UHE Marimbondo Barramento	944,00	813,94	374,51
	São Francisco de Sales	13,80	8,81	11,03
II	Uberaba	1,54	1,03	2,68
	Conceição das Alagoas	7,94	5,79	8,37