

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**SABRINA BAESSO CADORIN**

**ESTIMATIVA E REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS EM REGIÃO DO  
SUL DO BRASIL**

**CRICIÚMA, SC**

**2021**

**SABRINA BAESSO CADORIN**

**ESTIMATIVA E REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS EM REGIÃO DO  
SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro José Back

**CRICIÚMA, SC**

**2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C125e Cadorin, Sabrina Baesso.

Estimativa e regionalização de vazões mínimas em região do Sul do Brasil / Sabrina Baesso Cadorin. – 2021. 106 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma, 2021.

Orientação: Álvaro José Back.

1. Distribuição (Teoria da probabilidade). 2. Região hidrologicamente homogênea. 3. Vazão ecológica. 4. Estiagem. 5. Equação de regressão. I. Título.

CDD. 22. ed. 333.91

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101  
Biblioteca Central Prof. Eurico Back – UNESC



## PARECER

Os membros da Comissão Examinadora homologada pelo Colegiado de Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais reuniram-se forma remota conforme RESOLUÇÃO N. 02/2020/PPGCA que estabelece procedimento para a Defesa de Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais por meio de videoconferência, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pela candidata **SABRINA BAESSO CADORIN**, sob o título: “**ESTIMATIVA E REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS NO SUL DE SANTA CATARINA E LITORAL NORDESTE DO RIO GRANDE DO SUL**”, para obtenção do grau de **MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS** no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Após haver analisado o referido trabalho e arguida a candidata, os membros são de parecer pela “**APROVAÇÃO**” da Dissertação.

Criciúma/SC, 29 de abril de 2021.

**Profa. Dra. Cláudia Weber Corseuil**  
Primeiro Examinador

**Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan**  
Segundo Examinador

**Prof. Dr. Fernando Carvalho**  
Terceiro Examinador

**Prof. Dr. Álvaro José Back**  
Presidente da Comissão e Orientador

Com imenso carinho, dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, pela vida. À minha família, por todo o apoio ao longo da minha trajetória acadêmica e por estarem sempre comigo. Em especial aos meus pais, Donizete e Silvana, pela educação e pela confiança depositada sobre minhas escolhas. Agradeço àqueles que estiveram ao meu lado em todos os momentos ao longo do mestrado, sendo companheiros e tornando esta trajetória ainda melhor. Obrigada, Gian, Fernanda, Viviane, Ariadne e Danrlei.

Agradeço aos professores, colegas e amigos que estiveram presentes desde a decisão por fazer o mestrado até a conclusão. Ao professor Dr. Álvaro José Back por ter me incentivado a ingressar no PPGCA, por me orientar e compartilhar seus conhecimentos. À banca de qualificação, professor Dr. Kristian Madeira e professor Dr. Fernando Carvalho, pelas contribuições a este trabalho. À banca de defesa, professor Dr. Fernando Carvalho, professor Dr. Fernando Mainardi Fan e professora Dra. Cláudia Weber Corseuil, por aceitarem o convite para colaborar com este estudo.

Agradeço ainda à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - CAPES pela oportunidade de pesquisa e bolsa de estudos para realização do mestrado.

“Só percebemos o valor da água depois que a fonte  
seca.”

Provérbio popular

## RESUMO

Para o planejamento e gestão dos recursos hídricos é necessário avaliar a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica, sendo uma etapa fundamental o estudo das vazões mínimas. Quando a região de interesse carece de dados fluviométricos, a regionalização hidrológica é uma alternativa para estimativa das vazões em locais sem monitoramento. O presente estudo tem como objetivo realizar um rigoroso trabalho de ajuste estatístico e de regionalização hidrológica das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  em quatro bacias hidrográficas das regiões Sul e Extremo Sul Catarinense e Litoral Nordeste do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. O método utilizado para regionalização baseia-se em três etapas: análise de frequência das vazões de cada estação fluviométrica; identificação das regiões hidrológicamente homogêneas (RHH); e ajuste das equações de regressão regionais. Foram testadas as distribuições de probabilidade Gumbel, Log-Normal a dois parâmetros e três parâmetros, Log-Pearson III, Pearson III, Weibull a dois parâmetros e três parâmetros para 23 estações fluviométricas, a fim de verificar a distribuição que melhor ajusta cada série anual de vazões mínimas médias em sete e trinta dias consecutivos ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ , respectivamente). Foram utilizados os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Filliben, o erro quadrático médio (RMSE) e o teste D-index para avaliação da aderência, usando como critério de seleção um ranking com os testes de aderência. Para identificar as regiões hidrológicamente homogêneas, foram utilizadas as vazões  $Q_7$  e  $Q_{30}$  específicas e a análise do ajuste do modelo de regressão múltipla com as séries de vazões e as variáveis físicas e climáticas das bacias. A distribuição que demonstrou melhor aderência às séries de vazões mínimas foi a distribuição de Weibull a três parâmetros. A distribuição de Gumbel (mínimos) foi a que apresentou menor desempenho, sendo aquela com maior rejeição pelos testes de aderência. Para regionalização de vazões definiu-se três regiões hidrológicamente homogêneas, sendo as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Mampituba e Urussanga pertencentes a RHH 01, enquanto bacia do rio Tubarão dividiu-se em RHH 02 e 03. A regionalização das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  se deu pelo ajuste de equações de regressão regionais, sendo obtidos resultados positivos em todas as regiões hidrológicamente homogêneas. As variáveis explicativas utilizadas na análise de regressão foram área de drenagem e comprimento do rio principal. Estas apresentaram alta correlação com as vazões mínimas analisadas e bom ajuste aos modelos de regressão. Os modelos exponencial, linear e potencial foram selecionados para representar as vazões mínimas. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de determinação ajustado ( $R^2_a$ ) foram superiores a 0,90 e o erro padrão fatorial ( $\sigma_F$ ) menores que 0,78, sendo os resultados do estudo satisfatórios. Devido a variabilidade do regime fluviométrico ao longo da área de estudo, a baixa densidade de postos de monitoramento prejudicou a divisão das RHHs, podendo refletir em uma representação deficiente da real disponibilidade hídrica da área de estudo. Recomenda-se para trabalhos futuros aumentar a rede de monitoramento de vazões e incluir estações em bacias menores, buscando estudar o comportamento hidrológico das bacias de diferentes tamanhos.

**Palavras-chave:** Distribuição de probabilidade. Região hidrológicamente homogênea. Vazão ecológica. Estiagem. Equação de regressão.

## ABSTRACT

For the planning and management of water resources it is necessary to evaluate the water availability of the watershed, and a fundamental step is the study of minimum water levels. When the region of interest lacks fluviometric data, the hydrological regionalization is an alternative to estimate the flows in places without monitoring. This objective of this study is to carry out a rigorous work of statistical adjustment and hydrological regionalization of the minimum flows  $Q_{7;10}$  and  $Q_{30;10}$  in four hydrographic basins in the South and Extreme South of Santa Catarina and Northeast Coast of Rio Grande do Sul, southern Brazil. The methodology used for regionalization is based on three steps: frequency analysis of the flows of each fluviometric station; identification of hydrologically homogeneous regions (RHH); and fitting of regional regression equations. The Gumbel, Log-Normal 2-parameter and 3-parameter, Log-Pearson III, Pearson III, Weibull 2-parameter and 3-parameter probability distributions for 23 fluviometric stations were tested, to verify the distribution that best fits each annual series of average minimum flows on seven and thirty consecutive days ( $Q_7$  and  $Q_{30}$ , respectively). The Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling and Filliben tests, the root mean square error (RMSE) and the D-index test were used to evaluate the adherence, using as selection criteria a ranking with the adherence tests. To identify hydrologically homogeneous regions, the specific  $Q_7$  and  $Q_{30}$  flow rates and the analysis of the multiple regression model fit with the flow series and the physical and climatic variables of the basins were used. The distribution that showed the best adherence to the minimum flow series was the Weibull 3-parameter distribution. The Gumbel distribution (minimums) was the one that showed the worst performance, being the most rejected by the adherence tests. For flow regionalization three hydrologically homogeneous regions were defined, being the hydrographic basins of the Araranguá, Mampituba and Urussanga rivers belonging to RHH 01, while the Tubarão river basin was divided into RHH 02 and 03. The regionalization of the minimum flows  $Q_{7;10}$  and  $Q_{30;10}$  was done by the adjustment of regional regression equations, with positive results being obtained in all hydrologically homogeneous regions. The explanatory variables used in the regression analysis were drainage area and length of the main river. These variables showed a high correlation with the minimum flows analyzed and a good fit to the regression models. The exponential, linear and potential models were selected to represent the minimum flows. The coefficients of determination ( $R^2$ ) and adjusted determination ( $R^2a$ ) were greater than 0.90 and the factorial standard error ( $\sigma F$ ) less than 0.78, the results of the study were satisfactory. Due to the variability of the fluviometric regime across the study area, the low density of monitoring posts has affected the division of RHHs, which may reflect a deficient representation of the real water availability of the study area. It is recommended for future work to increase the flow-monitoring network and include stations in smaller basins, seeking to study the hydrological behavior of different sizes of basins.

**Keywords:** Probability distribution. Hydrologically homogeneous region. Ecological flow. Drought. Regression equation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Fluxograma metodológico das etapas realizadas para desenvolvimento do estudo. .....	37
<b>Figura 2</b> - Mapa de localização das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Mampituba, Tubarão e Urussanga, objetos de estudo, bem como distribuição espacial das estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas no presente estudo. ....	38
<b>Figura 3</b> – a) Localização das estações fluviométricas utilizadas no presente estudo para estudo das vazões mínimas e posterior regionalização hidrológica; b) Localização das estações pluviométricas selecionadas para determinação das características climáticas da região de estudo.....	41
<b>Figura 4</b> - Bacias hidrográficas geradas a partir das estações fluviométricas localizadas dentro das bacias hidrográficas do rio Araranguá e do rio Mampituba.....	68
<b>Figura 5</b> - Bacias hidrográficas geradas a partir das estações fluviométricas localizadas dentro das bacias hidrográficas do rio Tubarão. ....	69
<b>Figura 6</b> - Mapas da declividade do relevo e das características climáticas determinadas para a área de estudo. ....	72
<b>Figura 7</b> - Quantidade de distribuições de probabilidade selecionadas para as séries de vazões $Q_7$ e $Q_{30}$ mínimas anuais. ....	84
<b>Figura 8</b> - Áreas testadas para a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas. ....	88
<b>Figura 9</b> - Vazões mínimas médias anuais específicas em sete e trinta dias consecutivos, $Q_{7esp}$ e $Q_{30esp}$ , espectivamente.....	89
<b>Figura 10</b> - Gráficos do ajuste dos modelos de regressão das vazões mínimas $Q_7$ e $Q_{30}$ às vazões observadas para cada região hidrologicamente homogênea.....	91
<b>Figura 10</b> - Gráficos do ajuste dos modelos de regressão das vazões mínimas $Q_7$ e $Q_{30}$ às vazões observadas para cada região hidrologicamente homogênea.....	92
<b>Figura 11</b> - Gráficos do ajuste das vazões mínimas $Q_{7;10}$ e $Q_{30;10}$ estimadas pela equação de regionalização às obtidas pelas distribuições de probabilidade para cada região hidrologicamente homogênea.....	97
<b>Figura 12</b> - Vazões mínimas $Q_{7;10}$ e $Q_{30;10}$ específicas obtidas para as ottobacias nível 5 da área de estudo. ....	99

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Vazões de referência adotadas como critério de outorga para análise da disponibilidade hídrica para captação, diluição de efluentes ou derivação de cursos d'água pelos órgãos outorgantes dos estados brasileiros.....	25
<b>Tabela 2</b> - Dados das 23 estações fluviométricas selecionadas localizadas dentro da área de estudo, contendo as coordenadas geográficas e altitude de cada estação, município onde se encontra, bem como período de dados e respectivo código de identificação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA.....	42
<b>Tabela 3</b> - Código, nome e localização das estações pluviométricas da ANA selecionadas nas bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão, Urussanga e Mampituba. ....	45
<b>Tabela 4</b> - Valores críticos do teste de aderência Kolmogorov-Smirnov para nível de significância $\alpha = 0,05$ para séries de dados de diferentes tamanhos (n).....	60
<b>Tabela 5</b> - Valores críticos do teste de aderência de Anderson-Darling para nível de significância $\alpha = 0,05$ para cada distribuição de probabilidade.....	61
<b>Tabela 6</b> - Valores críticos do teste de aderência de Filliben ( $r_{crit}$ ) para distribuições de probabilidade Log-Normal 2 e 3 parâmetros com posição de plotagem determinada por Blom ( $a = 0,375$ ) e Gumbel e Weibull 2 e 3 parâmetros com posição de plotagem determinada por Cunnane ( $a = 0,44$ ). ....	62
<b>Tabela 7</b> - Características físicas das bacias hidrográficas delimitadas tendo como exutório as estações fluviométricas estudadas. ....	70
<b>Tabela 8</b> - Características climáticas das bacias hidrográficas. ....	74
<b>Tabela 9</b> - Características físicas e climáticas das bacias hidrográficas dos rios Araranguá (BHRA), Mampituba (BHRM), Tubarão (BHRT) e Urussanga (BHRU). ....	75
<b>Tabela 10</b> - Resumo das estatísticas descritivas das vazões médias mínimas anuais em 7 e 30 dias consecutivos, $Q_7$ e $Q_{30}$ , respectivamente, das 23 estações fluviométricas estudadas, sendo apresentados o tamanho da série de dados (N), média, desvio padrão e assimetria (assim.)...	76
<b>Tabela 11</b> - Número de distribuições das séries de $Q_7$ e $Q_{30}$ rejeitadas por cada teste de aderência: KS - Kolmogorov-Smirnov; AD - Anderson-Darling; Rf - Filliben.....	78
<b>Tabela 12</b> - Ranqueamento utilizando os testes e critérios de seleção para escolha das melhores distribuições de probabilidade ajustada as vazões mínimas $Q_7$ de cada estação fluviométrica estudada. ....	80

<b>Tabela 13</b> - Ranqueamento utilizando os testes e critérios de seleção para escolha das melhores distribuições de probabilidade ajustada as vazões mínimas $Q_{30}$ de cada estação fluviométrica estudada. ....	81
<b>Tabela 14</b> – Parâmetros das distribuições de probabilidade selecionada para estimativa da vazão mínima anual $Q_{7;10}$ para cada série de dados das estações fluviométricas e respectivos erros padrões da estimativa (RMSE) e D-index. ....	82
<b>Tabela 15</b> – Parâmetros das distribuições de probabilidade selecionada para estimativa da vazão mínima anual $Q_{30;10}$ para cada série de dados das estações fluviométricas e respectivos erros padrões da estimativa (RMSE) e D-index. ....	83
<b>Tabela 16</b> - Resultados das $Q_{7;10}$ e $Q_{30;10}$ determinadas a partir da distribuição de probabilidade selecionada e respectiva área e comprimento do rio principal. ....	85
<b>Tabela 17</b> - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual $Q_7$ de cada estação e as possíveis variáveis explicativas. ....	86
<b>Tabela 18</b> - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual $Q_{30}$ de cada estação e as possíveis variáveis explicativas. ....	87
<b>Tabela 19</b> - Modelos de regressão das vazões mínimas $Q_7$ associados a cada região homogênea. ....	90
<b>Tabela 20</b> - Modelos de regressão das vazões mínimas $Q_{30}$ associados a cada região homogênea.....	91
<b>Tabela 21</b> - Valores do erro percentual ER (%) entre as vazões mínimas observadas ( $Q_{obs}$ ) e estimadas ( $Q_{est}$ ) pelos modelos de regressão obtidos para cada região hidrologicamente homogênea.....	93
<b>Tabela 22</b> - Equação de regionalização da vazão mínima média em 7 dias com período de retorno de 10 anos ( $Q_{7;10}$ ) e coeficientes de ajuste. ....	94
<b>Tabela 23</b> - Equação de regionalização da vazão mínima média em 30 dias com período de retorno de 10 anos ( $Q_{30;10}$ ) e coeficientes de ajuste. ....	94
<b>Tabela 24</b> - Valores do erro percentual ER (%) entre as vazões mínimas $Q_{7;10}$ e $Q_{30;10}$ obtidas utilizando as distribuições de probabilidade e as estimadas ( $Q_{7;10est}$ e $Q_{30;10est}$ ) pelas equações de regionalização e o coeficiente de Nash-Sutcliffe obtidos para cada região hidrologicamente homogênea.....	96
<b>Tabela 25</b> - Comparação entre as vazões obtidas no presente trabalho às determinadas no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina e nos respectivos planos de bacias hidrográficas. ....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BHRA	Bacia hidrográfica do rio Araranguá
BHRM	Bacia hidrográfica do rio Mampituba
BHRT	Bacia hidrográfica do rio Tubarão
BHRU	Bacia hidrográfica do rio Urussanga
CDF	Função de distribuição acumulativa
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
MDT	Modelo digital do terreno
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PDF	Função de densidade de probabilidade
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RH	Região hidrográfica
RHH	Região hidrologicamente homogênea
SDE	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de drenagem da bacia
AD	Teste de aderência de Anderson-Darling
CNS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
$CNS_{\log}$	Logaritmo do coeficiente de Nash-Sutcliffe
Dd	Densidade de drenagem
Dec	Declividade média da bacia
ER	Erro percentual (ou erro relativo)
$ET_{\text{anual}}$	Evapotranspiração potencial anual
$ET_{\text{jun}}$	Evapotranspiração potencial no mês de junho
KS	Teste de aderência de Kolgomorov-Smirnov
L	Comprimento do rio principal
$P_{\text{anual}}$	Precipitação total anual
$P_{\text{ts}}$	Precipitação total no trimestre mais seco
$P_{\text{mês}}$	Precipitação no mês mais seco (junho)
$Q_{90\%}$	Vazão de permanência em 90% do tempo
$Q_{95\%}$	Vazão de permanência em 95% do tempo
$Q_{98\%}$	Vazão de permanência em 98% do tempo
$Q_{1;10}$	Vazão média mínima de um dia e período de retorno de 10 anos
$Q_7$	Vazão média mínima de sete dias consecutivos
$Q_{7;10}$	Vazão média mínima de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos
$Q_{30}$	Vazão média mínima de trinta dias consecutivos
$Q_{30;10}$	Vazão média mínima de trinta dias consecutivos e período de retorno de 10 anos
$Q_{\text{est}}$	Vazão estimada pela equação
$Q_{\text{mmm}}$	Vazão média das mínimas mensais
$Q_{\text{obs}}$	Vazão observada
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R^2_a$	Coefficiente de determinação ajustado
Rf	Teste de aderência de Filliben
RMSE	Erro quadrático médio (ou erro padrão de estimativa)
S	Declividade do rio principal
$\sigma_F$	Erro padrão fatorial

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	20
2.2 VAZÕES MÍNIMAS.....	21
<b>2.2.1 Vazões de referência</b> .....	23
<b>2.2.2 Análise da frequência das vazões mínimas</b> .....	28
2.3 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	30
<b>2.3.1 Método Tradicional</b> .....	30
<b>2.3.2 Variáveis explicativas utilizadas na regionalização hidrológica</b> .....	31
2.3.2.1 Características físicas .....	31
2.3.2.2 Características climáticas .....	32
<b>2.3.3 Estudos de regionalização na área de estudo</b> .....	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	36
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
3.2 MÉTODOS.....	41
<b>3.2.1 Seleção e análise dos dados básicos</b> .....	41
<b>3.2.2 Definição das variáveis explicativas</b> .....	42
3.2.2.1 Obtenção das características físicas da bacia .....	43
3.2.2.2 Obtenção das características climáticas da bacia .....	44
<b>3.2.3 Seleção da melhor distribuição de probabilidade</b> .....	47
3.2.3.1 Distribuições de probabilidade .....	47
3.2.3.1.1 <i>Gumbel (GB)</i> .....	48
3.2.3.1.2 <i>Log-Normal a dois parâmetros (LN2)</i> .....	48
3.2.3.1.3 <i>Log-Normal a três parâmetros (LN3)</i> .....	49
3.2.3.1.4 <i>Log-Pearson Tipo III (LPIII)</i> .....	49
3.2.3.1.5 <i>Pearson Tipo III (PIII)</i> .....	50
3.2.3.1.6 <i>Weibull a 2 parâmetros (WB2)</i> .....	50
3.2.3.1.7 <i>Weibull de 3 parâmetros (WB3)</i> .....	51
3.2.3.2 Métodos de estimativa de parâmetros .....	51
3.2.3.2.1 <i>Método de Chow (MCH)</i> .....	52

3.2.3.2.2	<i>Método dos Momentos (MM)</i> .....	52
3.2.3.2.3	<i>Método dos Momentos-L (MML)</i> .....	56
3.2.3.2.4	<i>Método da Máxima Verossimilhança (MMV)</i> .....	58
3.2.3.3	Testes de aderência.....	59
3.2.3.3.1	<i>Kolgomorov-Smirnov</i> .....	60
3.2.3.3.2	<i>Anderson-Darling</i> .....	60
3.2.3.3.3	<i>Filliben</i> .....	61
3.2.3.4	Critérios de avaliação do desempenho das distribuições.....	63
3.2.3.4.1	<i>Erro Quadrático Médio - RMSE</i> .....	63
3.2.3.4.2	<i>D-index</i> .....	63
3.2.3.5	Ranking com os Testes de Aderência.....	64
<b>3.2.5</b>	<b>Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas</b> .....	64
<b>3.2.6</b>	<b>Obtenção das equações regionais</b> .....	66
<b>3.2.7</b>	<b>Geração dos mapas de vazões mínimas</b> .....	67
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	68
4.1	VARIÁVEIS EXPLICATIVAS .....	68
4.2	VAZÕES MÉDIAS MÍNIMAS ANUAIS .....	75
4.3	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	77
4.4	REGIÕES HIDROLOGICAMENTE HOMOGÊNEAS.....	86
4.5	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS .....	93
4.6	MAPA DAS VAZÕES MÍNIMAS .....	99
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	102
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	104
	<b>APÊNDICES</b> .....	114
	APÊNDICE A – Matriz de correlação de Pearson de cada região hidrologicamente homogênea.....	115

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado e bem de domínio público, tendo em vista a importância para o consumo humano e para o desenvolvimento de diversas atividades, sua gestão deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, conforme previsto pela Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997). A gestão dos recursos hídricos visa solucionar conflitos causados pelo uso intensivo da água, devido ao crescimento econômico e populacional, e manter as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, bem como garantir a oferta desse recurso (BAZZO *et al.*, 2017). A gestão desse recurso é uma importante ferramenta para o desenvolvimento sustentável do Brasil e do mundo, uma vez que diversas atividades, como a produção agrícola e industrial, e o setor de geração de energia, estão estritamente relacionados a seu uso (OLIVEIRA, 2008).

O conhecimento sobre a dinâmica do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas é fundamental para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos (OLIVEIRA, 2013). Segundo o autor, a compreensão desta dinâmica permite analisar a resposta da bacia às mudanças de uso e ocupação do solo e aos extremos de precipitação, podendo ser avaliada por meio de estudos de vazões máximas, médias e mínimas. O estudo das vazões máximas sempre atraiu mais atenção que das mínimas, isso porque a magnitude dos danos causados por eventos máximos normalmente é maior que aqueles causados por eventos mínimos extremos (GRANEMANN; MINE; KAVISKI, 2018). No entanto, de acordo com Granemann, Mine e Kaviski (2018), o estudo de vazões mínimas (ou vazões de referência) tem se tornado cada vez mais importante devido à sua relação com a conservação de ecossistemas, a sustentabilidade econômica e como alerta às mudanças climáticas.

O conhecimento das vazões mínimas, de sua distribuição temporal e espacial, possui importância no planejamento regional em diversos setores (BAENA, 2002). Entre suas aplicações, Baena (2002) destaca o uso das informações de extremos mínimos em estudos de disponibilidade hídrica, na análise de viabilidade de aproveitamentos hidrelétricos para geração de energia elétrica, em projetos de navegação, em estudos de autodepuração e diluição de efluentes em corpos d'água, e em outorgas de uso dos recursos hídricos, como é o caso do abastecimento urbano, do uso industrial e da irrigação.

As vazões mínimas mais estudadas e usadas no Brasil são as vazões de permanência no tempo, com ênfase à permanência em 90% e 95% do tempo ( $Q_{90\%}$  e  $Q_{95\%}$ , respectivamente) e as vazões médias mínimas com durações de 7 dias, associadas a um período de retorno de 10 anos (como a  $Q_{7;10}$ ) (RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005; MATIAS, 2018; GASQUES *et al.*, 2018).

As vazões médias mínimas em sete e 30 dias consecutivos em determinado período de retorno são bastante utilizadas, pois a vazão mínima diária não é representativa do período crítico de estiagem (GASQUES *et al.*, 2018). De acordo com os autores, a  $Q_{7;10}$  é muito usada como vazão de referência, sendo adotada na avaliação de impacto ambiental de obras hidráulicas, nas licenças ambientais e como critério de outorga em alguns estados.

A duração de sete dias é frequentemente usada para dimensionamento de projetos, já que possibilita que os reservatórios absorvam os impactos das variações de consumo ocorridas durante a semana, incluindo dias úteis e final de semana (MENDES, 2007).

De acordo com Finkler *et al.* (2015), as séries de vazões mínimas estudadas devem passar por análise estatística, buscando criar modelos teóricos que se ajustem às séries de dados. Para a escolha da melhor distribuição de probabilidade, é necessário selecionar um conjunto de modelos indicados para o tipo de dado analisado e, posteriormente, selecionar a distribuição que melhor se adapta às séries históricas (GRANEMANN; MINE; KAVISKI, 2018). Os autores afirmam que, não é possível definir uma distribuição de probabilidade ideal para descrever a frequência de vazões.

Para análise das distribuições de probabilidade de valores mínimos as distribuições de Gumbel e Weibull são frequentemente utilizadas (NAGHETTINI; PORTELA, 2011), porém, existem estudos que mostram a aplicação de outras distribuições, como a Log-Normal dois e três parâmetros, Log-Pearson Tipo III e Pearson Tipo III, obtendo resultados satisfatórios (SILVA *et al.*, 2006; FINKLER *et al.*, 2015; BARROS *et al.*, 2018).

Para a estimativa das vazões de referência são utilizadas séries históricas de vazões mínimas obtidas de estações fluviométricas instaladas em seções de rios, no entanto, a área de abrangência destes postos de monitoramento é restrita ao seu local de instalação, produzindo lacunas temporais e espaciais sem informações hidrológicas (OLIVEIRA, 2008). Uma alternativa para a ausência ou escassez de dados de vazão é a utilização da regionalização hidrológica, a qual permite transferir informações entre locais dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (TUCCI, 2002). O método Tradicional, proposto por Eletrobrás (1985), está entre os métodos mais utilizados de regionalização de vazões (GASQUES *et al.*, 2018). Para aplicação do método é necessário realizar a análise de frequência das vazões de cada posto fluviométrico, identificar as regiões hidrologicamente homogêneas da área de estudo e ajustar as equações de regressão regionais (MOREIRA; SILVA, 2014).

A região sul de Santa Catarina e litoral nordeste do Rio Grande do Sul, composta pelas bacias dos rios Araranguá, Mampituba, Tubarão e Urussanga, apresenta intenso uso dos recursos hídricos. A produção agrícola tem grande influência sobre esses recursos, tanto devido

a contaminação proveniente dela, quanto pela demanda de água exigida para irrigação. Em Santa Catarina, a irrigação é um dos principais usos dos recursos hídricos, fundamentalmente em decorrência da utilização de água empregada na rizicultura (ANTUNES; CONSTANTE, 2016). Na região Sul Catarinense são cultivados 92.273 hectares de lavouras de arroz, sendo produzidos na bacia do rio Tubarão cerca de 13.500 hectares, enquanto nas bacias dos rios Araranguá, Urussanga e Mampituba (afluentes catarinenses) a rizicultura representa um total de 72.471 hectares (IBGE, 2019). Os afluentes gaúchos do rio Mampituba possuem aproximadamente 6.415 hectares de área de cultivo de arroz (IBGE, 2019).

Os dados sobre a extensão das áreas de arrozais são importantes para verificar a demanda de água exigida pela irrigação. Em estudo realizado por Back e Just (2018), sobre o consumo de água pela rizicultura irrigada, constatou-se consumo de  $5.030 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (safra 2008/2009) e  $4.753 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (safra 2009/2010) em área monitorada localizada nos municípios de Forquilha e Nova Veneza. Sendo a demanda hídrica significativa, existem conflitos pelo uso dos recursos hídricos na região, principalmente entre a irrigação das áreas de cultivo do arroz e o abastecimento público, que são agravados nas épocas de estiagens (BACK; JUST, 2018). Na maior parte da região de interesse, a demanda é suprida por captações nos cursos d'água, as quais podem comprometer a qualidade e quantidade do recurso hídrico.

Buscando identificar a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, é fundamental estimar as vazões mínimas, as quais desempenham papel importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos (GASQUES *et al.*, 2018). Visto que, a região de interesse carece de dados fluviométricos consistentes, utilizar de regionalização hidrológica é uma alternativa para estimar as vazões mínimas em locais sem monitoramento. A região de estudo possui uma densidade baixa na rede monitoramento de vazões, em especial nas bacias hidrográficas dos rios Urussanga e Mampituba, que contam com nenhuma e apenas uma estação fluviométrica, respectivamente, com séries de dados consistentes superiores a 10 anos.

Diante do exposto, o presente estudo o objetivo geral do estudo foi realizar um rigoroso trabalho de ajuste estatístico e de regionalização hidrológica das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  em quatro bacias hidrográficas das regiões Sul e Extremo Sul Catarinense e Litoral Nordeste do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. O estudo tem como objetivos específicos:

- a) avaliar o ajuste e aplicação das distribuições de probabilidade às séries históricas de vazões mínimas médias de sete e trinta dias consecutivos;
- b) comparar o ajuste de diferentes modelos matemáticos para a regionalização hidrológica; e
- c) gerar mapas das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  para a região.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A água é um recurso natural fundamental para garantir a saúde humana, a prosperidade e segurança coletiva da população (TUNDISI; TUNDISI, 2015). Os mesmos autores afirmam que, quando ofertada em boa qualidade, possibilita a erradicação da pobreza, segurança alimentar e preservação dos ecossistemas e ciclos biogeoquímicos. Tendo em vista sua importância, é necessário planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos para atender as demandas atuais e futuras, tanto em relação aos usos múltiplos da água da população, quanto às necessidades dos ecossistemas (BRASIL, 1997).

A Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, parte do pressuposto que a água é um bem de domínio público e um recurso natural limitado (BRASIL, 1997). Dotado de valor econômico, a gestão desse recurso deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas (BRASIL, 1997). A mesma lei prevê que para implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, deve-se adotar a bacia hidrográfica como unidade territorial.

O conhecimento da disponibilidade hídrica no âmbito de uma bacia hidrográfica é parte fundamental dos estudos hidrológicos (SILVA; MARQUES; LEMOS, 2009). Segundo os autores, a bacia hidrográfica pode ser compreendida como a unidade onde ocorrem os processos físicos, fundamentais para a gestão dos recursos hídricos e planejamento urbano e regional. A principal grandeza que caracteriza o escoamento é a vazão, que corresponde ao volume de água que passa por determinada seção de um rio em determinado intervalo de tempo. A vazão é uma variável fundamental para a gestão dos recursos hídricos e planejamento, dimensionamento e operação de obras hidráulicas (OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA, 2013). A vazão pode ser estudada em termos de sua probabilidade de ocorrência e de tempo de retorno devido à sua variação natural ao longo do tempo, sendo discriminada em vazão máxima, média e mínima (OLIVEIRA, 2008).

A vazão máxima é a maior vazão que ocorre em uma seção de um rio em determinado período, correspondendo a condição de inundação do local (TUCCI, 2002). A estimativa das vazões máximas é fundamental para planejamento dos custos e segurança de obras hidráulicas e projetos de engenharia, enquanto a vazão média é importante na avaliação da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (OLIVEIRA, 2013). Segundo o autor, a vazão média de longo período é obtida pela média de todas as observações diárias da série histórica e corresponde a máxima vazão possível de ser regularizada.

Em períodos de estiagem, as vazões nos cursos d'água diminuem, resultando nas vazões mínimas ou de estiagem. Essas vazões são caracterizadas pelos os menores valores da série histórica, bem como, por sua magnitude, duração e frequência (OLIVEIRA, 2013). As vazões mínimas são utilizadas para avaliação da disponibilidade hídrica, elaboração de projetos de irrigação e de energia hidrelétrica e como vazão de referência para a concessão de outorgas de uso da água (OLIVEIRA, 2008). Para a gestão de recursos hídricos efetiva é fundamental o conhecimento da fração de água disponível para utilização no interior da bacia (SILVA; MARQUES; LEMOS, 2009).

## 2.2 VAZÕES MÍNIMAS

A vazão mínima é a demanda necessária a ser mantida em um rio de forma a assegurar a manutenção e a conservação dos ecossistemas aquáticos naturais, dos atributos paisagísticos, e de interesses científicos ou culturais (PEREIRA, 2016). As vazões mínimas representam os menores valores dentro de uma série histórica de vazões (OLIVEIRA, 2013). Em períodos de estiagem, as vazões mínimas consistem principalmente de fluxos de águas subterrâneas (SCHREFFLER, 1998).

De acordo com Gasques *et al.* (2018), as vazões mínimas são utilizadas para garantir a preservação dos recursos hídricos, tanto em relação a quantidade, quanto à qualidade. Em termos de quantidade, as vazões mínimas são utilizadas para avaliação dos riscos de estiagem, em projetos de navegação, de geração de energia elétrica e de outorga do uso d'água para diferentes atividades, como irrigação, abastecimento urbano e transposição (OLIVEIRA, 2013; GASQUES *et al.*, 2018). Em termos qualidade, a vazão mínima é utilizada para determinar as condições de descarga de efluentes, a fim de proteger a qualidade da água dos rios (SCHREFFLER, 1998; GASQUES *et al.*, 2018).

As vazões mínimas normalmente são derivadas de séries de vazão de longo prazo, sendo calculada sua frequência de ocorrência (SCHREFFLER, 1998). Segundo o autor, uma estatística normalmente determinada para caracterizar a vazão ecológica é a vazão média mínima de sete dias consecutivos e período de retorno de dez anos ( $Q_{7;10}$ ). A duração de sete dias é tradicionalmente usada em dimensionamento de projetos, porque tem-se intervalo de tempo que abrange as variações de consumo de dias úteis e finais de semana, possibilitando que os reservatórios absorvam os impactos das variações ocorridas durante a semana (MENDES, 2007). O autor explica que o tempo de retorno de 10 anos representa probabilidade de 10% de que a vazão fique abaixo do valor mínimo. Sendo assim, a determinação da  $Q_{7;10}$  é um

importante parâmetro hidrológico com aplicação em estudos de planejamento e gestão do uso dos recursos hídricos (SILVEIRA; MOURA; ANDRADE, 2006).

De acordo com Back, Zambrano e Corseuil (2019), a vazão mínima  $Q_{7;10}$  é a mais utilizada em estudos de disponibilidade hídrica, como critério nos estudos de qualidade da água e nos planos de gestão de recursos hídricos. Estudos realizados por Chiang e Johnson (1976) e Singb, Ramamurtby e Seo (1988) sobre as vazões mínimas em rios dos Estados Unidos, demonstraram a importância da determinação da  $Q_{7;10}$  para o monitoramento dos padrões de qualidade d'água em relação ao despejo de efluentes. Chiang e Johnson (1976) concluíram que, caso o despejo de efluentes fosse inferior à  $Q_{7;10}$ , a qualidade da água do rio era aceitável, sendo que valores superiores poderiam comprometer a qualidade da água do curso d'água.

No Brasil, os estudos de vazões mínimas normalmente se concentram nas vazões de permanência no tempo (como a vazão de permanência em 90% ou 95% do tempo, respectivamente,  $Q_{90\%}$  e  $Q_{95\%}$ ) ou na  $Q_{7;10}$  (BAENA, 2002; BAZZO *et al.*, 2017; CECÍLIO *et al.*, 2018; MACIEL *et al.*, 2019; MOREIRA; SILVA, 2014; OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA, 2013; RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005; SILVA *et al.*, 2006; SILVA; MARQUES; LEMOS, 2009). Buscando determinar as vazões mínimas, trabalhos realizados em vários países estudaram, além da  $Q_{7;10}$ , mínimas de diferentes durações, como as vazões médias mínimas diárias e mensais, a exemplo da  $Q_{1;10}$ , e  $Q_{30;10}$  (SCHREFFLER, 1998; STUCKEY, 2006; MARTIN; FOWLER; ARIHOOD, 2016).

Outra aplicação da vazão  $Q_{7;10}$  é a análise quantitativa da disponibilidade hídrica subterrânea de uma bacia hidrográfica (SDS, 2019). O método proposto pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, em 2009, propõe a determinação da disponibilidade subterrânea proveniente de reservas ativas por meio de uma equação que utiliza do escoamento de base, estimado em função da vazão média de longo período, e a vazão mínima  $Q_{7;10}$  (SDS, 2019).

As vazões com duração de sete dias ou 30 dias representam maior interesse ao usuário, já que a sequência de vazões baixas é a condição mais crítica para a utilização da água e para as condições de conservação ambiental (TUCCI, 2002). Pyrcce (2004) apresentou resumo dos muitos usos da  $Q_{7;10}$ , bem como da  $Q_{30;10}$ , destacando-se: determinação de vazão mínima; regulamentação de qualidade de águas residuárias ou alocações de resíduos para prevenir impactos biológicos e ecológicos; alocação da vida aquática, em projetos que envolvem cálculo de fluxo permanente; determinação de vazão mínima necessária para proteger o habitat durante período de seca; como critério de manutenção ou proteção do habitat aquático; como possível

indicador de mortalidade potencial da vida aquática; como parâmetro de comparação dos impactos das mudanças climáticas e da irrigação em vazões superficiais baixas.

### 2.2.1 Vazões de referência

A estimativa da oferta de água em uma bacia hidrográfica é uma das informações mais importantes para a gestão dos recursos hídricos, sendo utilizada para outorga de uso da água, para cálculo anual de vazões para dimensionar reservatórios e como base para estimativa do balanço hídrico em sistemas de apoio a decisão (CHAVES *et al.*, 2002). Os Planos de Recursos Hídricos e a outorga dos direitos de uso da água são alguns dos instrumentos de gestão estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). De acordo com a PNRH, os Planos de Recursos Hídricos devem prever os usos e demandas da água nas bacias hidrográficas e determinar metas e medidas que busquem a melhoria da qualidade dos recursos hídricos. Outra finalidade dos planos é definir as prioridades para outorga de uso dos recursos hídricos e, em alguns casos, estabelecer os critérios de outorgas (BRASIL, 1997).

A outorga busca assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (BRASIL, 1997). Para a instrução do processo de outorga é necessário a comparação da disponibilidade hídrica e das demandas (DE LIZ, 2016). De acordo com o autor, a demanda pode ser avaliada a partir do cadastro de usuários, dinâmico e contínuo no tempo, e a disponibilidade hídrica varia no tempo e no espaço e é estimada a partir da avaliação do regime hidrológico da bacia hidrográfica. A disponibilidade de água superficial é normalmente estimada por meio de vazões mínimas de referência, que representam as menores vazões das séries históricas (CHAVES *et al.*, 2002).

De acordo com Silva *et al.* (2006), a vazão de referência é o estabelecimento de um valor de vazão que passa a representar o limite superior de utilização do recurso hídrico no curso d'água, sendo utilizada na implementação do sistema de outorga. De acordo com Mendes (2007), a vazão remanescente no curso d'água tem a finalidade de preservar o ecossistema do meio aquático. A definição da vazão de referência a ser utilizada depende da garantia de atendimento que se deseja considerar para os usos a serem instalados em determinada bacia (ANA, 2011). De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2011), as vazões de referência mais utilizadas são as vazões de permanência em 90% e 95% do tempo,  $Q_{90\%}$  e  $Q_{95\%}$ , respectivamente. Se os usos exigem maiores garantias, deve-se optar por vazões mais conservadoras, como a  $Q_{95\%}$  e  $Q_{98\%}$ , ou ainda a  $Q_{7;10}$  (ANA, 2011).

Cabe a ANA outorgar o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, conforme disposto na Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 (BRASIL, 2000).

De acordo com a Resolução nº 1.938, de 30 de out. de 2017, para emissão de outorga preventiva e de direito de uso da água, são avaliados a adequação da demanda ao porte e finalidade do empreendimento e o balanço hídrico quali-quantitativo do corpo hídrico. Para esta avaliação é utilizada a vazão natural com alta permanência no tempo ( $Q_{95\%}$ ) ou vazão definida como referência em estudo técnico específico para o balanço hídrico quantitativo (BRASIL, 2017).

De acordo com a PNRH, estão sujeitos a outorga pelo Poder Público os direitos dos usos de recursos hídricos: derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo; extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo; lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; e outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água (BRASIL, 1997).

No Brasil, cada estado possui seus critérios de determinação das vazões de referência, no entanto, a maior parte deles não apresenta justificativas da adoção desses valores (SILVA *et al.*, 2006). Os critérios adotados pelos estados brasileiros para análise da disponibilidade hídrica para captação, diluição de efluentes ou derivação de cursos d'água de seu domínio divergem bastante (Tabela 1). Alguns deles, como o Amapá, Espírito Santo, Rio Grande do Sul e São Paulo, não definem uma vazão de referência, suas legislações preveem que os critérios serão estabelecidos pelos planos de bacia hidrográfica. A maior parte dos estados, no entanto, possuem legislações que definem qual critério de outorga deve ser adotado em seu território. Os critérios mais utilizados são a  $Q_{95\%}$  e a  $Q_{90\%}$ , como já mencionado por ANA (2011), havendo ainda estados que adotam a  $Q_{98\%}$  e a  $Q_{7:10}$ .

Das 27 unidades federativas, 16 delas adotam exclusivamente a  $Q_{95\%}$  ou a  $Q_{90\%}$  como critério de outorga de direito de uso d'água (Tabela 1). Conforme apresentado na Tabela 1, os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Rio Grande do Norte, Sergipe e Tocantins utilizam a  $Q_{90\%}$  com vazões máximas outorgáveis variando de 75% a 95%, dependendo do estado. Enquanto Amazonas, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Paraná, Rio de Janeiro e Rondônia utilizam a  $Q_{95\%}$  também com diferentes vazões máximas outorgáveis, porém nesse caso variando de 40% a 80%.

**Tabela 1** - Vazões de referência adotadas como critério de outorga para análise da disponibilidade hídrica para captação, diluição de efluentes ou derivação de cursos d'água pelos órgãos outorgantes dos estados brasileiros.

Estado	Órgão outorgante	Legislação	Critério de outorga	Fonte
AC	IMAC	Resolução CEMACT nº 4 de 2010 e Plano Estadual de Recursos Hídricos, 2012	Para os rios federais: 70% da $Q_{95\%}$ . Para as demais águas superficiais, deve-se realizar estudos, tais como, balanço hídrico quantitativo, cálculo da vazão de referência e a vazão máxima outorgável do curso de água na seção de interesse.	ACRE (2010); ACRE (2012)
AL	SEMARH	Decreto nº 006 de 2001, alterado pelo Decreto nº 49419 de 18/07/2016	- 90% da $Q_{90\%}$ , no caso de inexistência de barramentos ou quando houver barramentos em mananciais perenes; - 95% da $Q_{90\%}$ , quando houver barramentos em mananciais intermitentes.	ALAGOAS (2001); ALAGOAS (2016)
AP	SEMA	Resolução Nº 008 de 2017 do CERH	- Determinada pelos planos de RH, ainda não existe um Plano Estadual de Recursos Hídricos.	AMAPÁ (2017)
AM	IPAAM	Resolução CERH-AM nº 01 de 2016.	- Critério: $Q_{95\%}$ (enquanto não forem estabelecidos novos critérios através do Plano Estadual de Recursos Hídricos); - Vazão máxima outorgável: 75% da $Q_{95\%}$ ; - Em situações de estiagem será adotada a $Q_{7;10}$ .	AMAZONAS (2016)
BA	SRH	Decreto nº 6.296 de 21/03/1997	- 80% da $Q_{90\%}$ , quando não houver barramento ou houver lagos naturais ou barramentos em mananciais perenes; - 95% da $Q_{90\%}$ dos lagos naturais ou de barramentos em mananciais intermitentes.	BAHIA (1997)
CE	SRH	Decreto Estadual nº 23.067, de 11/02/1994	90% da $Q_{90\%}$	CEARÁ (1994)
DF	ADASA	Resolução ADASA nº 350/2006	80% da $Q_{7;10}$ , $Q_{90\%}$ , $Q_{95\%}$ ou $Q_{mmm}$	ADASA (2006)
ES	AGERH	Resolução Normativa do Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH nº 005, de 07/07/2005	Cabe aos comitês de bacias hidrográficas propor ao CERH os critérios de outorga.	ESPÍRITO SANTO (2005)
GO	SEMARH	Resolução nº 009, de 04/05/2005	50% da $Q_{95\%}$	GOIÁS (2005)
MA	SEMA	Resolução CONERH nº 057 de 21/05/2019	80% da $Q_{90\%}$	MARANHÃO (2019)
MT	SEMA	Resolução CEHIDRO nº 027, de 09/07/2009	70% da $Q_{95\%}$	MATO GROSSO (2009)
MS	IMASUL	Resolução CERH/MS Nº 025, de 03/03/2015	70% da $Q_{95\%}$	MATO GROSSO DO SUL (2015)

Estado	Órgão outorgante	Legislação	Critério de outorga	Fonte
MG	IGAM	Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29/03/2012	50% da Q <sub>7;10</sub> (em algumas bacias, limite máximo de 30%)	MINAS GERAIS (2012)
PA	SEMA	Resolução CERH nº 010 de 03/09/2010	70% da Q <sub>95%</sub>	PARÁ (2010)
PB	AESA	Decreto Estadual nº 19.260/1997	90% da Q <sub>90%</sub> . Em lagos territoriais, o limite outorgável é reduzido em 33%	PARAÍBA (1997)
PR	IAT	Decreto nº 4646, de 31/08/2001 Manual Técnico de Outorgas SUDERHSA 2006	50% da Q <sub>95%</sub>	PARANÁ (2001); SUDERHSA (2006)
PE	APAC	Resolução APAC nº 002 de 23/11/2012	- Medição de vazão deverá ser realizada em período de estiagem; - Vazão outorgável: 60% da vazão de referência.	PERNAMBUCO (2012)
PI	SEMAR	Resolução nº 004, de 26/04/2005	80% da Q <sub>95%</sub> (rios) e 80% da Q <sub>90%</sub> (reservatórios)	PIAUÍ (2005)
RJ	INEA	Resolução INEA nº 162 de 26/12/2018	40% da Q <sub>95%</sub>	RIO DE JANEIRO (2019)
RN	SERHID	Decreto Estadual nº 13.283, de 22/03/1997	90% da Q <sub>90%</sub>	RIO GRANDE DO NORTE (1997)
RS	SEMA	Decreto nº 37.033/1996	Estabelecidos pelos planos de Bacia Hidrográfica	RIO GRANDE DO SUL (1996)
RO	SEDAM	Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Rondônia, 2017	Depende da situação, critérios menos restritivos 80% da Q <sub>95%</sub> ; padrões 70% da Q <sub>95%</sub> ; e mais restritivo 60% da Q <sub>95%</sub>	RONDÔNIA (2017)
RR	FEMARH	Decreto nº 8.123-e, de 12/07/2007	80% da Q <sub>7;10</sub> ou 80% da Q <sub>90%</sub>	RORAIMA (2007)
SC	SDE	Portarias SDS nº 36/2008 e nº 51/2008	50% da Q <sub>98%</sub>	SANTA CATARINA (2008a; 2008b)
SP	DAEE	(a) Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016 e (b) Instrução Técnica DPO nº 012, de 30/05/2017	(a) Critérios determinados nos planos de bacias hidrográficas; (b) para hidrelétricas 50% da Q <sub>7;10</sub>	SÃO PAULO (2016); SÃO PAULO (2017)
SE	SEPLANTEC	Resolução CONERH nº 001, de 19/04/2001	90% da Q <sub>90%</sub>	SERGIPE (2001)
TO	NATURATINS	Decreto nº 2.432, de 06/06/2005	75% da Q <sub>90%</sub>	TOCANTINS (2005)

Alguns estados definem em legislação seus critérios de outorga, no entanto, apresentam vazões máximas outorgáveis diferentes, ou até mesmo critérios diferentes, para determinadas situações. Alagoas e Bahia, por exemplo, estabelecem que a vazão máxima outorgável para rios sem barramentos, ou rios perenes com barramentos, é de 90% da  $Q_{90\%}$ , enquanto para rios intermitentes com barramentos é 95% (ALAGOAS, 2001; BAHIA, 1997). Piauí, por sua vez, estabelece critérios diferentes para rios e reservatórios, adotando 80% da  $Q_{95\%}$  para captações ou derivações em rios e 80% da  $Q_{90\%}$  para reservatórios. A lei piauiense prevê que estes critérios devem ser adotados até que as vazões de referência sejam estabelecidas com maior precisão nos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas (PIAUI, 2005).

Paraíba adota 90% da  $Q_{90\%}$  como critério de outorga, porém reduz a vazão máxima outorgável a 1/3 quando se trata de lagos territoriais e lagoas (PARAÍBA, 1997). Rondônia é outro estado que estabelece limites diferentes de vazões outorgáveis dependendo da situação de restrição da bacia hidrográfica onde o curso d'água está inserido. No seu Plano Estadual de Recursos Hídricos, a partir da avaliação de fatores técnicos, ecológicos, econômicos e sociais das bacias hidrográficas, o estado foi dividido em três unidades hidrológicas de gestão (RONDÔNIA, 2017). Após este estudo, foi possível identificar as unidades de gestão que apresentam maiores ou menores restrições quanto à fração da disponibilidade hídrica a ser outorgada (RONDÔNIA, 2017). De acordo com o Plano de Recursos hídricos já mencionado, as vazões máximas estabelecidas variam de 80%, em critérios menos restritivos, a 60% da  $Q_{95\%}$ .

Algumas legislações, como do Distrito Federal e de Roraima, não definem qual o critério específico deve ser adotado em seu território, apesar de mencionar qual a vazão máxima outorgável (ADASA, 2006; RORAIMA, 2007). Para o Distrito Federal, o critério estabelecido é 80% das vazões de referência  $Q_{7;10}$ ,  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{95\%}$  ou  $Q_{mmm}$  (média das mínimas mensais), quando não houver barramento. Roraima utiliza 80% da  $Q_{7;10}$  ou  $Q_{90\%}$ , enquanto outros estados não especificam a vazão de referência, indicam que a definição deve ser realizada a partir de estudos, tais como, balanço hídrico quantitativo, cálculo da vazão de referência e a vazão máxima outorgável do curso de água na seção de interesse, como é o caso do Acre e Pernambuco (ACRE, 2012; PERNAMBUCO, 2012). A resolução de Pernambuco ainda prevê que a medição de vazão deve ser realizada em período de estiagem (PERNAMBUCO, 2012).

Critérios mais restritivos, como a  $Q_{7;10}$  e a  $Q_{98\%}$  são utilizados por menos estados. Santa Catarina é o único que adota a  $Q_{98\%}$  como critério de outorga, estabelecendo a vazão máxima outorgável de 50% da vazão de permanência (SANTA CATARINA, 2008a; SANTA CATARINA, 2008b). Já a  $Q_{7;10}$  é utilizada como critério pelos estados de Minas Gerais, São Paulo e Amazonas (AMAZONAS, 2016; MINAS GERAIS, 2012; SÃO PAULO, 2017). São

Paulo utiliza esta vazão para verificação da disponibilidade hídrica superficial na seção de estudo de um curso d'água para aproveitamento hidrelétrico, para as captações a montante do empreendimento e para definição da vazão mínima a ser mantida a jusante SÃO PAULO (2017). Amazonas, embora utilize 75% da  $Q_{95\%}$  como critério, em situações de estiagem adota a  $Q_{7;10}$  por ser mais restritiva (AMAZONAS, 2016).

A nível internacional, as vazões médias mínimas em determinado número de dias consecutivos e período de retorno, como a  $Q_{7;10}$ , são as mais utilizadas (SMAKHTIN, 2001). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA (1991), a vazão  $Q_{7;10}$  é utilizada por muitos estados como critério para diluição de efluentes. Esta vazão mínima é adotada para definir o limite de descarga de poluentes a fim de manter os padrões de qualidade d'água (EPA, 1991). Segundo Smakhtin (2001), o estudo de vazões mínimas na Rússia e na Europa Oriental se concentra nas vazões de um e 30 dias, sendo usadas principalmente no verão e inverno, respectivamente. Já no Reino Unido, o autor afirma que, a vazão média mínima em sete dias e a  $Q_{95\%}$  são amplamente utilizadas para estudo de vazões mínimas em períodos de estiagem.

### **2.2.2 Análise da frequência das vazões mínimas**

A aleatoriedade e imprevisibilidade do processo hidrológico dificultam a previsão da vazão de estiagem, porém, por meio de tratamentos estatísticos, pode ser estabelecido um modelo que melhor represente as variáveis estudadas dentro de uma determinada faixa de erro (FINKLER *et al.*, 2015). Os autores explicam que, a série de dados hidrológicos existente (ou desejada) deve ser submetida à análise estatística para definição de probabilidades. Essa análise deve estar ajustada da melhor maneira possível à série de dados, a fim de que se possam criar modelos teóricos de probabilidades.

Não é possível assumir uma distribuição de probabilidade como ideal para descrever a frequência de eventos hidrológicos, como as vazões (GRANEMANN; MINE; KAVISKI, 2018). Para a escolha da melhor distribuição, os autores afirmam que, é necessário escolher um conjunto de modelos indicados para o tipo de dados analisados e, em seguida, selecionar a distribuição de probabilidade que melhor se adapta às séries históricas de dados estudadas. Segundo Granemann, Mine e Kaviski (2018), entre as funções de distribuição mais frequentemente relacionadas às vazões mínimas na literatura, estão as seguintes: Distribuições assintóticas de extremos, incluindo Tipo I (Distribuição de Gumbel por Mínimos) e Tipo III (Distribuição de Weibull), Tipo III de Pearson e Log-Normal de dois e três parâmetros.

Naghetini e Portela (2011) afirmam que os modelos de Gumbel para mínimos e de Weibull são frequentemente aplicáveis a valores mínimos, por exemplo, de estiagem, como caudais médios diários ou em períodos de sete dias, ambos mínimos anuais. Pereira (2016) realizou estudo na bacia hidrográfica do rio Maior em Urussanga, em Santa Catarina, onde determinou a vazão ambiental ajustando a série de dados por meio da distribuição Gumbel, que apresentou boa aderência. Cadornin (2018) avaliou a disponibilidade hídrica na bacia do rio Manoel Alves, localizada no extremo sul catarinense, e para determinação da vazão  $Q_{7;10}$  comparou as distribuições de probabilidade Gumbel e Weibull, apresentando a distribuição de Weibull como melhor alternativa para ajustar a série de dados.

Outras distribuições de probabilidade que apresentam bons resultados na representação dos dados de vazões mínimas  $Q_{7;10}$  são as distribuições Log-normal dois e três parâmetros, Pearson III e Log-Pearson III (BAENA, 2002; RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005; SILVA *et al.*, 2006; SILVA; MARQUES; LEMOS, 2009; ULIANA *et al.*, 2011; FINKLER *et al.*, 2015; GUEDES, 2018).

A fim de exemplificar, pode-se citar alguns trabalhos que apresentaram diferentes resultados quanto à melhor distribuição ajustada. Silva *et al.* (2006) aplicaram as distribuições de probabilidade Log-Normal três parâmetros, Weibull e Gumbel em estudo das vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, MG, sendo a distribuição Log-Normal três parâmetros selecionada como a mais adequada. Uliana *et al.* (2011) em estudo para determinação da vazão de referência  $Q_{7;10}$  realizado na bacia do Rio São Mateus, ES, demonstraram melhor ajuste dos dados com a distribuição Log-Normal 2 parâmetros em comparação com as distribuições Normal, Weibull, Log-Normal, Gama Incompleta e Gumbel.

O trabalho desenvolvido por Finkler *et al.* (2015) na bacia hidrográfica do Arroio Belo em Caxias do Sul, RS, comparou as distribuições de probabilidade teórica Weibull, Normal, Log-Normal, Gumbel (mínimos), Log-Pearson e Pearson a dados de vazões mínimas de sete dias consecutivos, apresentando a distribuição Pearson III como a que apresentou maior precisão na representação dos dados. Guedes (2018) analisando as distribuições de Weibull, Pearson Tipo III, Log-Normal dois parâmetros, Log-Normal três parâmetros e Log-Pearson Tipo III para estimar a  $Q_{7;10}$  na bacia do rio Boa Esperança, SC, e concluiu que a distribuição que melhor representou as vazões foi a Log-Pearson Tipo III.

Os estudos analisados por Granemann, Mine e Kaviski (2018), bem como os citados anteriormente, demonstram que a distribuição de frequência mais indicada varia conforme a região, não existindo apenas uma distribuição de frequência claramente superior a todas as outras.

## 2.3 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

Para ser efetiva, a estimativa da oferta de água superficial em uma bacia hidrográfica deve ser realizada em toda sua rede de drenagem. Entretanto, os dados de vazões normalmente são escassos em quantidade de postos fluviométricos e em anos de monitoramento. As limitadas séries de dados fluviométricos disponíveis e a necessidade de se conhecer a vazão ao longo da rede hidrográfica dificultam, ou até mesmo impedem, a realização da adequada gestão de recursos hídricos (MOREIRA; SILVA, 2014). Uma das alternativas à baixa escala de monitoramento dos recursos hídricos, é a regionalização hidrológica. De acordo com Tucci (2002), a regionalização hidrológica permite transferir informações de um local para outro, dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante, quando há ausência ou escassez de dados. Este método baseando-se na similaridade espacial de algumas variáveis, funções hidrológicas e parâmetros que permitem essa transferência (TUCCI, 2002).

Wolff, Duarte e Mingoti (2014), agruparam os métodos de regionalização de vazões mais utilizados em duas categorias, sendo elas: a) métodos que se baseiam na utilização de equações de regressão aplicadas a regiões hidrológicamente homogêneas; b) métodos que utilizam técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas. Elesbon *et al.* (2015), Eletrobrás (1985) e Tucci (2002) desenvolveram estudos englobados na primeira categoria. Enquanto Chaves *et al.* (2002) e Pruski *et al.* (2016) desenvolveram trabalhos sobre métodos enquadrados na segunda categoria.

Tucci (2002) alerta sobre o uso generalizado da regionalização, orientando que esta ferramenta não substitui uso de rede adequada de monitoramento hidrológico e não deve ser usada sem pré-análise da qualidade de seus resultados, visto que pode comprometer o processo de tomada de decisão. De acordo com Bazzo *et al.* (2017), por mais que os métodos de regionalização apresentem resultados satisfatórios para a obtenção das vazões em locais sem dados históricos, é importante ressaltar que nenhum método é capaz de substituir dados consistidos provenientes de monitoramento.

### 2.3.1 Método Tradicional

O método Tradicional proposto pela Eletrobrás (1985), baseia-se em três etapas: análise de frequência das vazões de cada estação; identificação de regiões hidrológicamente homogêneas (RHH); e ajuste de equações de regressão regionais (MOREIRA; SILVA, 2014). Tucci (2002) apresentou as etapas de forma mais detalhada, sendo necessário para qualquer tipo de dado hidrológico a ser regionalizado, primeiramente, definir a área de estudo, determinar e

selecionar os dados das variáveis dependente e explicativas, definir as regiões homogêneas e, por fim, obter as relações regionais. Moreira e Silva (2014) explicam que, o ajuste das equações se dá entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea, visando à obtenção de vazões em qualquer posição da rede de drenagem da bacia em estudo.

Entre os métodos de regionalização existentes, o Tradicional é um dos mais difundidos para regionalização de vazões (MOREIRA; SILVA, 2014; MACIEL *et al.*, 2019). Trabalhos comparando diferentes métodos mostram que o método Tradicional se sobressai por apresentar resultados mais precisos (RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005; SILVA; MARQUES; LEMOS, 2009; MOREIRA; SILVA, 2014; CECÍLIO *et al.*, 2018). Além disso, o método Tradicional possui a vantagem de as equações de regressão serem de fácil aplicação e permitirem a obtenção de vazão de referência em qualquer ponto dentro da respectiva região hidrologicamente homogênea com área de drenagem conhecida, ou outra característica física ou climática estabelecida (BAZZO *et al.*, 2017).

### **2.3.2 Variáveis explicativas utilizadas na regionalização hidrológica**

#### **2.3.2.1 Características físicas**

As características da bacia hidrográfica, como tamanho, forma e declividade, influenciam no seu comportamento hidrológico. Desta forma a vazão de pico e o volume, velocidade e tempo escoamento, assim como, a vazão mínima, estão relacionados com as características físicas da bacia (BACK, 2014).

As variáveis relacionadas às características físicas geralmente utilizadas na regionalização são: (i) a área de drenagem da bacia, (ii) o comprimento do rio principal, (iii) a declividade média da bacia, (iv) a densidade de drenagem e a (v) declividade média do rio principal, denominadas como variáveis explicativas (GASQUES *et al.*, 2018). Vale salientar que a área de drenagem da bacia é importante na caracterização de seu regime hidrológico, pois as vazões médias e de estiagem de uma bacia hidrográfica são diretamente proporcionais a sua área de contribuição (BACK, 2014).

O comprimento do rio principal corresponde a extensão do curso d'água que drena a maior área no interior da bacia hidrográfica (ANA, 2004), portando, possui relação direta com a vazão. Já a densidade de drenagem indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, sendo indicativo da eficiência do escoamento natural da bacia (BACK, 2014). O mesmo autor afirma ainda que, a declividade do rio principal e a declividade da bacia hidrográfica interferem

diretamente na velocidade de seu escoamento, sendo assim, quanto maior a declividade, maior é a velocidade do escoamento.

Frequentemente em estudos de regionalização as características físicas se sobressaem em relação as características climáticas, podendo-se destacar estudos realizados por Baena *et al.* (2004), Oliveira (2008), Ferreira (2010), Oliveira (2013) e Aguiar (2020). Alguns trabalhos, como Oliveira (2013), Moreira e Silva (2014), Bazzo *et al.* (2017) e Maciel *et al.* (2019), obtiveram resultados robustos utilizando exclusivamente a área de drenagem como variável explicativa das vazões. De acordo com Tucci (2002), as variáveis físicas normalmente explicaram melhor o comportamento das vazões, já que a inserção de variáveis climáticas, como a precipitação, não resulta em melhora nos modelos de regressão.

#### 2.3.2.2 Características climáticas

As características climáticas, assim como as características físicas, influenciam diretamente no regime hidrológico da bacia hidrográfica, sendo importante para o estudo de regionalização de vazões (BAENA, 2002). A variável climática mais utilizada em estudos de regionalização de vazões é a precipitação (GASQUES *et al.*, 2018). De acordo com Tucci (2002), na região Sul do Brasil a precipitação geralmente é a variável predominante, isto acontece porque a precipitação média anual nesta região geralmente é maior que a evapotranspiração potencial. Tucci (2002) afirma que, além disso, existe maior disponibilidade de dados pluviométricos devido a maior densidade de estações de monitoramento de chuva em funcionamento.

Em estudos de regionalização de vazões realizados por Eletrobrás (1985) e Silva *et al.* (2006), concluiu-se que a precipitação total anual foi a variável climática que melhor explicou o comportamento da vazão mínima. Baena (2002) verificou resultados satisfatórios com a inserção da precipitação no semestre mais seco na equação para estimação de vazões mínimas. Silva, Marques e Lemos (2009) utilizaram a precipitação no trimestre mais seco em conjunto com outras variáveis explicativas para obtenção das equações de regionalização. Em geral, os estudos que utilizaram uma variável climática para explicação da vazão, fazem uso em conjunto com pelo menos uma variável física, normalmente a área de drenagem.

#### 2.3.3 Estudos de regionalização na área de estudo

O método Tradicional é o principal adotado para a regionalização de vazões pelos órgãos gestores de recursos hídricos federal (ANA) e estaduais. Na região de estudo, a primeira bacia hidrográfica a contar com estudo de regionalização a ser utilizado na gestão de seus

recursos hídricos foi a bacia do rio Tubarão (SDM, 2002). Neste trabalho foram regionalizadas a vazão média de longo período, curva de permanência de vazões mensais ( $Q_{50\%}$ ,  $Q_{80\%}$ ,  $Q_{90\%}$  e  $Q_{95\%}$ ) e vazões mínimas com duração de sete dias e tempo de retorno de 10 anos ( $Q_{7;10}$ ) utilizando o método Tradicional. Embora a vazão de referência adotada como critério de outorga em Santa Catarina seja a vazão de permanência em 98% do tempo ( $Q_{98\%}$ ), esta não foi incluída no estudo. Isto aconteceu porque o estudo é anterior a portaria da SDS nº 36, que estabelece os critérios de outorga (SANTA CATARINA, 2008a).

No estudo realizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente - SDM (2002) foi adotada a área de drenagem como variável explicativa para a regionalização das vazões na bacia do rio Tubarão. A escolha se deu devido a sua alta correlação com as vazões de referência e por ser de mais fácil determinação, tornando mais prática sua utilização no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Referente aos resultados obtidos no estudo, verificou-se valores de vazão  $Q_{7;10}$  menores na sub-bacia Formadores do rio Tubarão (referente as cabeceiras do rio Tubarão) e maiores valores na sub-bacia do rio Braço do Norte. Além das sub-bacias mencionadas, a bacia do rio Tubarão é formada pelas sub-bacias do rio Capivari e Baixo Tubarão.

Um estudo detalhado realizado em Santa Catarina, em 2006, também utilizou o método Tradicional para regionalização de vazões, onde foram determinadas equações de regionalização para as vazões médias de longo período, vazões médias mensais, curva de permanência de vazões mensais (com permanência no tempo de 5 a 100%), vazões mínimas médias em sete dias anuais e vazões mínimas de sete dias anuais com período de retorno de 2 a 100 anos. No estudo foram selecionados 82 postos fluviométricos distribuídos pelo estado, os quais foram utilizados para determinação das regiões hidrologicamente homogêneas e posterior modelagem da regionalização de vazões utilizando análise regressão (SADR, 2006). Foram testadas as variáveis: precipitação total anual, área de drenagem, declividade média e comprimento do rio principal, sendo selecionada a área de drenagem como variável explicativa para as vazões mínimas anuais médias de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ). Vale ressaltar que para obtenção das vazões em diferentes períodos de retorno foi utilizada a distribuição de probabilidade de Gumbel mínimos.

O estudo da SADR (2006) serviu de base para estimativa das vazões mínimas  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{95\%}$ ,  $Q_{98\%}$  e  $Q_{7;10}$  do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (SDS, 2017a) e do plano da bacia do rio Araranguá (SDS, 2014). No plano estadual as equações de regionalização foram utilizadas apenas para determinar a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina (SDS, 2017a). Enquanto no plano de recursos

hídricos da bacia do rio Araranguá foi realizada uma análise mais detalhada da metodologia utilizada e verificação da correlação das vazões calculadas com as equações da SADR (2006) e as vazões naturais observadas com a série completa de dados disponíveis (SDS, 2014). Sendo os resultados positivos, foram adotadas as equações de regionalização propostas por SADR (2006).

No plano da bacia do rio Araranguá, constatou-se que foram utilizadas apenas quatro estações fluviométricas para obtenção das equações de regionalização da bacia do rio Araranguá no estudo realizado pela SADR (2006). Na regionalização a bacia, como um todo, foi considerada como região homogênea. Nos resultados referentes as vazões mínimas médias em sete dias consecutivos da bacia do rio Araranguá disponíveis no plano, foi possível verificar que a unidade de gestão no rio Manoel Alves foi a que apresentou menores valores de vazão, enquanto a unidade do rio Araranguá apresentou os maiores valores (SDS, 2014). No plano, a bacia do rio Araranguá é dividida em quatro unidades de gestão, sendo elas: rio Araranguá, rio Itoupava, rio Mãe Luzia e rio Manoel Alves.

A bacia hidrográfica do rio Mampituba é uma bacia transfronteiriça, sendo localizada parte em território de Santa Catarina e parte no Rio Grande do Sul. Dessa forma, a bacia pertence à duas regiões hidrológicas, a porção catarinense pertence à Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense, enquanto a porção gaúcha, à Região Hidrográfica do Litoral (DRHS, 2020). O plano de recursos hídricos da bacia do rio Mampituba está em fase de elaboração, as etapas 1 (diagnóstico) e 2 (prognóstico) foram publicadas pelo Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento - DRHS em 2020. No diagnóstico da disponibilidade hídrica da bacia foi adotado apenas a vazão de referência  $Q_{90\%}$ , normalmente utilizada nos planos de bacia no Rio Grande do Sul (DRHS, 2020). Para determinação da vazão  $Q_{90\%}$ , foi utilizado o estudo de regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais de Santa Catarina (SADR, 2006). Foi considerado como premissa que estas equações determinadas para a porção catarinense também são válidas para a porção gaúcha da bacia (DRHS, 2020).

O Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul baseou-se na definição das vazões características da disponibilidade hídrica, transferindo as informações das estações fluviométricas para a bacia, utilizando o método da relação entre áreas, ou vazão específica (SEMA, 2007). Foram estudadas vazões máximas, médias, mínimas e curva de permanência (de 30% a 99% de permanência no tempo). A disponibilidade hídrica em cada bacia baseou-se na vazão média de longo período e na vazão mínima  $Q_{95\%}$ , visto que esta foi considerada como referência de vazão mínima para disponibilidade hídrica no Plano Nacional de Recursos

Hídricos. No Plano Estadual foram utilizadas as vazões específicas geradas para a bacia do rio Tramandaí para definição da disponibilidade hídrica da bacia do rio Mampituba (SEMA, 2007).

No plano de recursos hídricos do rio Urussanga foi utilizada a regionalização de vazões pelo método Tradicional, para diagnóstico da disponibilidade hídrica na bacia (SDS, 2019). Como não existem dados disponíveis dentro da bacia do rio Urussanga foram selecionadas 14 estações fluviométricas localizadas nas Regiões Hidrográficas do Sul (RH09) e Extremo Sul Catarinense (RH10). As variáveis regionalizadas foram vazão máxima com tempo de retorno de 10 a 100 anos, vazão média de longo período, vazão de permanência no tempo ( $Q_{50\%}$ ,  $Q_{80\%}$ ,  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{95\%}$  e  $Q_{98\%}$ ) e vazão mínima em sete dias e período de retorno de 10 anos. Para explicar as vazões, foi adotada a variável área de drenagem. No estudo das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  foram utilizadas as distribuições de probabilidade Log-Pearson Tipo III e Log-Normal de 2 parâmetros (SDS, 2019). Os resultados deste estudo, referentes a vazão ecológica ( $Q_{7;10}$ ), mostram valores menores para a região norte da bacia (sub-bacias dos rios Maior, Carvão e Caeté).

Além dos planos de gestão dos recursos hídricos, outros estudos de regionalização foram realizados na área de estudo, como os realizados por Germano e Pedrollo (1999), Wolff (2017), e Aguiar (2020). Germano e Pedrollo (1999) realizaram a regionalização das vazões média  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{95\%}$  e  $Q_{7;10}$  para a bacia do rio Tubarão, as quais consideraram a bacia inteira como região hidrologicamente homogênea. As autoras citadas acima testaram a utilização da área de drenagem e precipitação média dos totais anuais como variáveis explicativas, concluindo que a precipitação não melhorou o modelo e que é preferível o uso de uma equação mais simples.

Wolff (2017) usou abordagem geoestatística baseada em modelos e na verossimilhança para regionalizar as curvas de permanência de vazão no estado de Santa Catarina. O autor apresentou mapas contendo uma representação completa e sazonal das curvas de permanência, os quais possibilitam um melhor conhecimento da dinâmica sazonal das vazões de permanência, facilitando assim o processo de gestão dos recursos hídricos.

Aguiar (2020), estudou a vazão mediana ( $Q_{50\%}$ ) e as vazões mínimas de referência ( $Q_{90\%}$ ,  $Q_{95\%}$  e  $Q_{98\%}$ ) das bacias dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga por meio do método Tradicional. A autora identificou duas regiões hidrologicamente homogêneas, uma formada pela bacia do rio Araranguá e outra pelas bacias dos rios Tubarão e Urussanga. Na escolha das variáveis explicativas, a autora testou a área de drenagem, declividade média do rio principal e da bacia, densidade de drenagem e precipitação média anual. No entanto, a área de drenagem se sobressaiu em relação as demais, sendo utilizada em todos os modelos obtidos. Já a precipitação média anual e a declividade média da bacia foram utilizadas, juntamente com a área, em outras equações de regionalização.

### 2.3.4 Contribuições do presente estudo

Frente a revisão bibliográfica apresentada, pode-se verificar a importância dos estudos hidrológicos para a gestão das bacias hidrográficas. No que tange a avaliação da disponibilidade hídrica, é de grande importância realizar o estudo das vazões mínimas, a fim de verificar a condição dos cursos d'água em períodos críticos de estiagem. Este conhecimento tem grande relevância na determinação da quantidade de água disponível nos recursos hídricos para suprir as demandas dos múltiplos usos de uma bacia hidrográfica. A definição das vazões mínimas pode ser realizada utilizando diferentes métodos. No presente estudo, foram determinadas as vazões mínimas médias anuais  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$ . O estudo traz ainda estas vazões regionalizadas por meio de equações de regressão, apresentando análises detalhadas sobre a qualidade dos resultados obtidos (Capítulo 4.4 e 4.5).

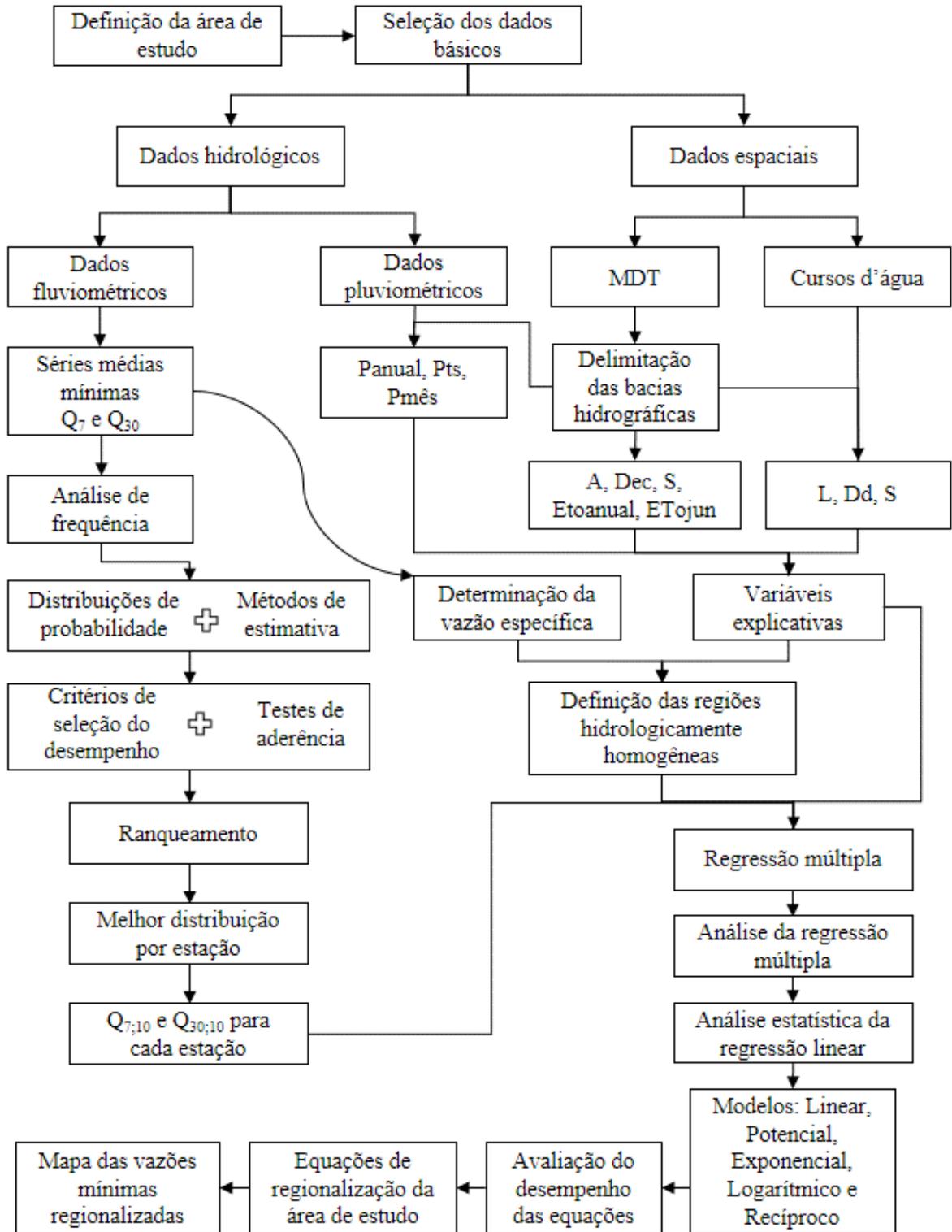
Embora a vazão de referência para a emissão de outorga adotada em Santa Catarina seja 50% da  $Q_{98\%}$ , os Planos de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas costumam possuir valores definidos de  $Q_{7;10}$ . Esta informação é utilizada na gestão da bacia hidrográfica para avaliação da disponibilidade hídrica nos cursos d'água. No entanto, as análises estatísticas realizadas para escolha das distribuições de probabilidade adotadas para determinação da  $Q_{7;10}$  e para definição das equações de regionalização, muitas vezes não ficam claras. A fim de analisar a criticidade destes estudos, foram comparados os resultados e estatísticas dos planos de bacias às do estudo realizado (Capítulo 4.6).

No presente trabalho, buscou-se realizar um rigoroso estudo de ajuste estatístico, comparando 23 distribuições de probabilidade utilizadas em estudos de vazões mínimas, com os parâmetros estimados por diferentes métodos (Capítulo 4.3). A análise detalhada dos resultados obtidos e escolha da melhor distribuição a ser adotada para cada série histórica estudada, traz importante contribuição para a região. Trazendo informações atualizadas sobre os modelos teóricos de probabilidade que melhor se adequam aos dados de vazões mínimas. O trabalho ainda pode embasar estudos em regiões com características semelhantes.

## 3 MATERIAIS E MÉTODO

Os materiais e método utilizados para realização do estudo a fim de alcançar os objetivos definidos são apresentados a seguir. As principais etapas envolvidas na análise estatística e regionalização das vazões mínimas de interesse seguem um fluxograma metodológico (Figura 1) que auxilia na compreensão do método adotado.

**Figura 1** - Fluxograma metodológico das etapas realizadas para desenvolvimento do estudo.

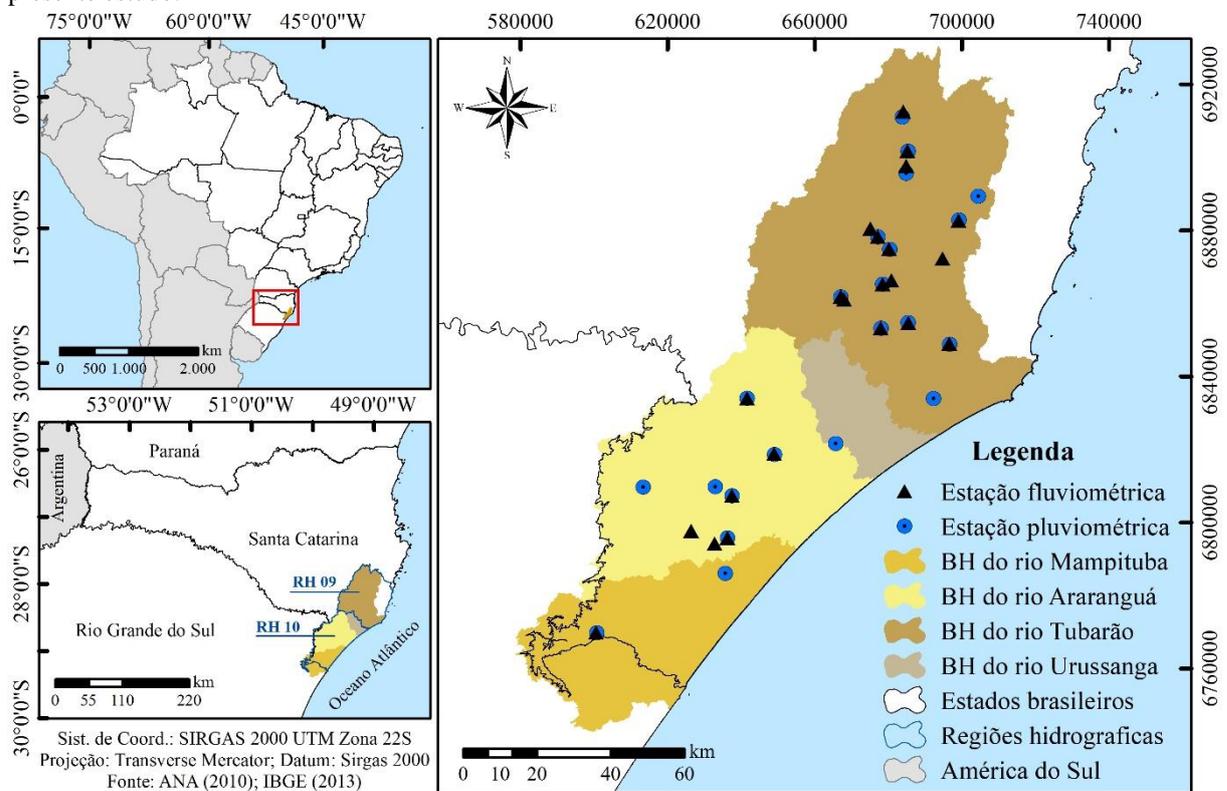


$Q_7$  e  $Q_{30}$  - vazões mínimas médias em sete e 30 dias consecutivos, respectivamente;  $Q_{7,10}$  e  $Q_{30,10}$  - vazões mínimas com sete e 30 dias de duração, respectivamente, e período de retorno de 10 anos; MDT - modelo digital do terreno; Panual - precipitação anual; Pts - precipitação do trimestre mais seco; Pmês - precipitação no mês mais seco; A - área de drenagem; Dec - declividade média da bacia; S - declividade média do rio principal; ETo anual - evapotranspiração anual; ETojun - evapotranspiração em junho; L - comprimento do rio principal; Dd - densidade de drenagem.

### 3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida na região sul de Santa Catarina e litoral nordeste do Rio Grande do Sul (Figura 2). A geomorfologia da região é caracterizada por planícies litorâneas nas zonas baixas e planalto nas zonas altas, sendo a divisão destes ambientes determinada pela Serra Geral (GOTARDO *et al.*, 2018). O relevo da região de estudo é predominantemente plano junto à planície costeira, tornando-se fortemente ondulado e montanhoso próximo as encostas da serra, ultrapassando os 1.000 metros nas áreas de maior altitude (SDS, 2017b; SDS, 2017c).

**Figura 2** - Mapa de localização das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Mampituba, Tubarão e Urussanga, objetos de estudo, bem como distribuição espacial das estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas no presente estudo.



O clima nos locais com menores altitudes, segundo a classificação de Köppen (1948), é predominantemente subtropical úmido com verão quente (Cfa) (ALVARES *et al.*, 2013). Entre suas características, as temperaturas nessas áreas são maiores que 22 °C no verão e a precipitação supera os 30 mm no mês mais seco. Em menores proporções, nas áreas mais altas da área de estudo, há ocorrência de clima temperado úmido com verão ameno (Cfb) (ALVARES *et al.*, 2013). Diferente do clima Cfa, a temperatura média do mês mais quente não chega a 22 °C nas regiões de clima Cfb e as precipitações são distribuídas uniformemente, sem estação seca definida (ALVARES *et al.*, 2013).

A precipitação média anual em Santa Catarina, de acordo com estudo realizado por Gotardo *et al.* (2018) utilizando série histórica de 39 anos (1975-2014), foi de aproximadamente 1.748,5 mm.ano<sup>-1</sup>. Na região do Extremo Sul a média anual foi de 1.955,9 mm, sendo a máxima 3.094,6 mm e a mínima 1.238,9 mm. Já na região Sul a média anual foi de 1.627,8 mm, sendo a mínima e máxima, respectivamente, 1.238,1 mm e 2.237,2 mm. Quanto à precipitação mensal da região Sul, a média é 134,9 mm, com precipitação variando de 3,1 a 809,6 mm.mês<sup>-1</sup> e a região Extremo Sul a média mensal é 167,0 mm, sendo a mínima 1,7 mm e a máxima 1.869,0 mm (GOTARDO *et al.*, 2018).

O Estado é totalmente inserido no bioma Mata Atlântica, predominando na área de estudo a Floresta Ombrófila Densa (ELIAS; PADILHA; SANTOS, 2016). De acordo com os mesmos autores, a área contempla ainda parte de outras regiões fitoecológicas, conforme classificação de Klein (1978), tais como a Vegetação Litorânea e Floresta Nebular nas encostas da serra, com pequenas ocorrências de Floresta Ombrófila Mista.

Para efeito do planejamento, gestão e gerenciamento dos recursos hídricos, o estado de Santa Catarina está dividido em 10 Regiões Hidrográficas (RH), conforme Lei Estadual nº 10.949, de 09 de novembro de 1998, as quais totalizam 23 bacias hidrográficas consideradas principais (SANTA CATARINA, 1998). A área de estudo do presente trabalho engloba a RH 09 e RH 10, correspondentes a Sul Catarinense e Extremo Sul Catarinense, respectivamente (Figura 2). Dentro da área de interesse há quatro bacias hidrográficas, correspondendo a bacia do rio Tubarão (BHRT) no Sul Catarinense e as bacias dos rios Urussanga (BHRU), Araranguá (BHRA) e Mampituba (BHRM) na região do Extremo Sul Catarinense. Embora a Lei Estadual de Santa Catarina nº 10.949/1998 faça menção apenas aos afluentes catarinenses da BH do Mampituba como pertencentes à RH 10, o presente estudo abrange a área total da bacia (SANTA CATARINA, 1998).

Na bacia hidrográfica do rio Tubarão o relevo é classificado como ondulado a fortemente ondulado, com declividades variando entre 20% e 45% (SDS, 2017b). É a maior bacia em extensão territorial e número de municípios. A bacia possui 4.735 km<sup>2</sup> e engloba 22 municípios: Lauro Müller, Orleans, São Ludgero, Braço do Norte, Grão-Pará, Rio Fortuna, Santa Rosa de Lima, Anitápolis, São Bonifácio, São Martinho, Armazém, Gravatal, Capivari de Baixo, Tubarão, Pedras Grandes, Treze de Maio, Jaguaruna e Sangão e partes dos municípios de Imaruí, Laguna, Pescaria Brava e Urussanga (SDS, 2017b).

A bacia hidrográfica do rio Urussanga é a de menor área, possuindo 680 km<sup>2</sup> de extensão territorial e drena parte ou área total de 10 municípios: Balneário Rincão, Cocal do Sul,

Criciúma, Içara, Jaguaruna, Morro da Fumaça, Pedras Grandes, Sangão, Treze de Maio e Urussanga (SDS, 2017c). O relevo da bacia é em grande parte plano (SDS, 2017c).

A bacia hidrográfica do rio Araranguá possui 3.089 km<sup>2</sup> de área e é composta por 16 municípios: Maracajá, Meleiro, Morro Grande, Nova Veneza, Siderópolis, Timbé do Sul, Treviso, Turvo, Ermo e Forquilha e parte dos municípios Araranguá, Balneário Arroio do Silva, Balneário Rincão, Criciúma, Içara e Jacinto Machado (SDS, 2017c). O relevo é principalmente plano (SDS, 2017c).

A bacia hidrográfica do rio Mampituba possui 1.920 km<sup>2</sup>, sendo 64% da sua área localizada em Santa Catarina e 36% no Rio Grande do Sul (DRHS, 2020). Os afluentes catarinenses drenam total ou parcialmente 10 municípios, são eles: Passo de Torres, Praia Grande, São João do Sul, Santa Rosa do Sul, Sombrio, Balneário Gaivota, Balneário Arroio do Silva, Araranguá, Ermo e Jacinto Machado (DRHS, 2020). Enquanto os afluentes gaúchos drenam oito municípios, sendo eles: Torres, Dom Pedro de Alcântara, Três Cachoeiras, Morrinhos do Sul, Três Forquilhas, Mampituba, São Francisco de Paula e Cambará do Sul (DRHS, 2020). O relevo é plano a ondulado (SDS, 2017c; DRHS, 2020).

Quanto ao uso e cobertura do solo, de acordo com Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (SDS, 2017c), as áreas antropizadas ocupam maior parte das bacias em questão, correspondendo a mais de 70% da área total. São incluídas como antropizadas, áreas de pastagem, uso agrícola, reflorestamento com espécies exóticas, áreas de mineração, e outros usos associados à atividade humana. A vegetação nativa somada a restinga ocupam aproximadamente 25% da área de estudo. O restante da região é ocupado por áreas urbanas e lâminas d'água (SDS, 2017c).

De acordo com a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável – SDE, antiga SDS (2017b), a bacia do rio Tubarão é uma das mais comprometidas do Estado de Santa Catarina, destacando-se os processos de extração, beneficiamento, transporte e estocagem do rejeito da mineração de carvão, unidades produtoras de coque, usina-termoelétrica, cerâmicas, fecularias e setor agroindustrial. Vale mencionar que a bacia do rio Tubarão possui usos para aproveitamento hidrelétrico, possuindo Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) em seu território. Nas bacias dos rios Araranguá e Urussanga a condição das águas superficiais não é muito diferente, a contaminação causada por agrotóxicos, esgotos urbanos e industriais, criação de suínos e, principalmente, por resíduos da extração de carvão comprometem a qualidade dos recursos hídricos (SDS, 2017c). Ainda, a bacia do rio Araranguá tem como agravante o fato dessa área drenar extensas zonas de cultivo de arroz irrigado. Frente ao quadro regional a bacia do rio Mampituba, na divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande

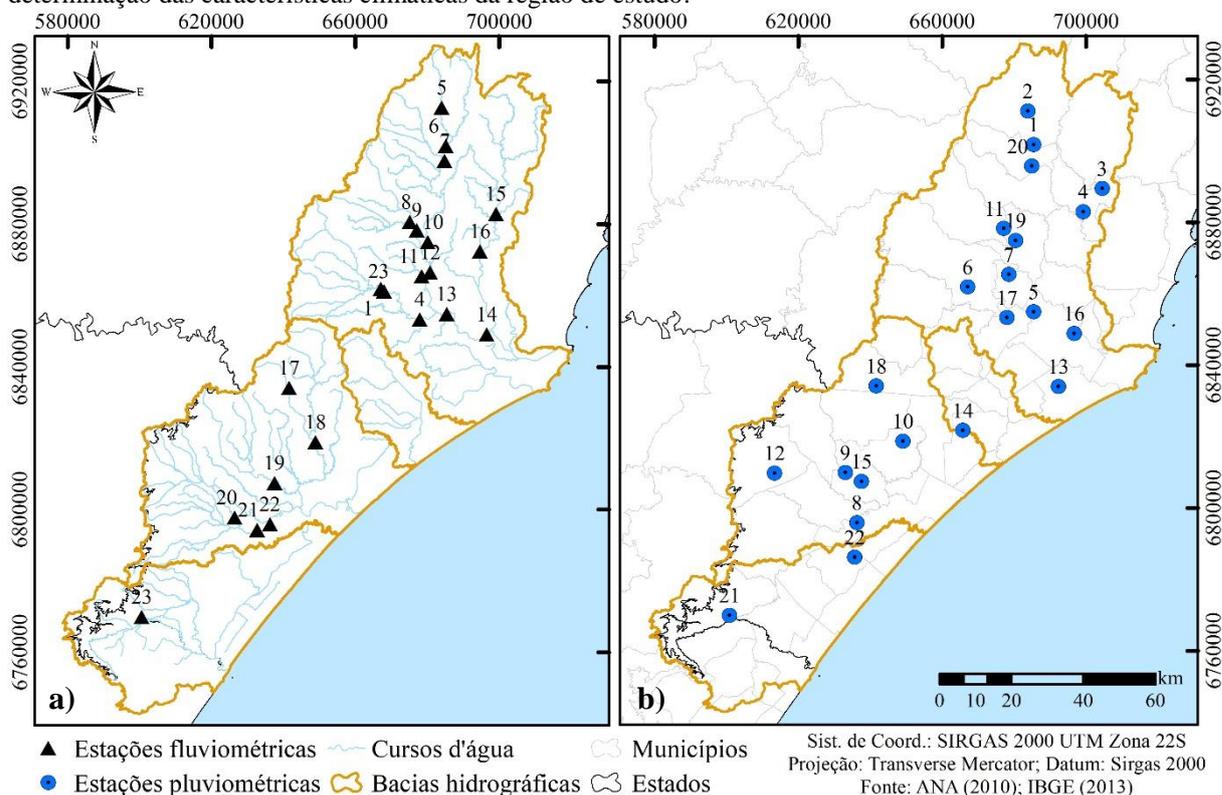
do Sul, encontra-se em melhores condições, apresentando pequena poluição por agrotóxicos (ANTUNES; CONSTANTE, 2016).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Seleção e análise dos dados básicos

Para o estudo foram utilizadas as estações fluviométricas da Rede Hidrometeorológica Nacional da ANA, localizadas dentro da área das quatro bacias hidrográficas analisadas. Destas estações foram excluídas aquelas que apresentaram séries de dados fluviométricos diários inferiores a 10 anos de dados ou muitas falhas nos registros. Inicialmente foram selecionadas 26 estações fluviométricas com série histórica superior a 10 anos, sendo três descartadas devido ao excesso de falhas. Os anos com pelo menos um mês sem dados foram excluídos, dado que estas falhas tenham ocorrido no segmento de vazões mínimas que determinava a vazão média mínima anual em 7 ou 30 dias consecutivos,  $Q_7$  ou  $Q_{30}$ , respectivamente. Ao final deste filtro, 23 estações apresentaram informações possíveis de serem analisadas (Tabela 2) distribuídas na área de estudo conforme Figura 3a.

**Figura 3** – a) Localização das estações fluviométricas utilizadas no presente estudo para estudo das vazões mínimas e posterior regionalização hidrológica; b) Localização das estações pluviométricas selecionadas para determinação das características climáticas da região de estudo.



**Tabela 2** - Dados das 23 estações fluviométricas selecionadas localizadas dentro da área de estudo, contendo as coordenadas geográficas e altitude de cada estação, município onde se encontra, bem como período de dados e respectivo código de identificação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA.

Nº	Código	Município	Latitude (S)	Longitude (O)	Altitude (m)	Ano inicial	Ano final
1	84249998	Orleans	28°21'31"	49°17'42"	100	1983	2019
2	84250000	Orleans	28°21'56"	49°17'09"	90	1950	1981
3	84250008	Orleans	28°21'56"	49°17'09"	90	1939	1954
4	84300000	Pedras Grandes	28°26'05"	49°10'59"	40	1985	2019
5	84500000	Anitápolis	27°53'56"	49°07'47"	400	1942	1967
6	84520000	Anitápolis	27°59'44"	49°06'58"	300	1944	2019
7	84520010	Santa Rosa de Lima	28°01'59"	49°07'09"	234	1986	2019
8	84541000	Grão Pará	28°11'20"	49°12'55"	90	1945	1967
9	84551000	Grão Pará	28°12'34"	49°11'42"	85	1942	2019
10	84559800	Braço do Norte	28°14'20"	49°09'47"	68	1986	2019
11	84560000	São Ludgero	28°19'33"	49°10'45"	40	1939	2019
12	84560002	São Ludgero	28°18'58"	49°09'20"	40	1946	2016
13	84580000	Tubarão	28°25'14"	49°06'23"	23	1939	2019
14	84580500	Tubarão	28°28'12"	48°59'30"	14	1986	2014
15	84598002	São Martinho	28°9'56"	48°58'18"	31	1981	2019
16	84600000	Armazém	28°15'38"	49°00'53"	28	1942	2019
17	84800000	Siderópolis	28°36'45"	49°33'05"	114	1985	2019
18	84820000	Forquilha	28°44'57"	49°28'28"	40	1942	2018
19	84853000	Meleiro	28°51'13"	49°35'23"	10	1977	2019
20	84949000	Turvo	28°56'32"	49°42'09"	30	1976	2019
21	84949800	Ermo	28°58'21"	49°38'14"	12	1978	2016
22	84950000	Araranguá	28°57'30"	49°36'05"	10	1943	2011
23	84970000	Praia Grande	29°11'43"	49°57'54"	52	1986	2019

### 3.2.2 Definição das variáveis explicativas

A determinação das características físicas e climáticas pode ser realizada por meio de um sistema de informações geográficas (SIG). O uso de modelos digitais do terreno em SIG possibilita a delimitação automática das variáveis físicas das bacias, tornando o processo mais fácil e rápido (BAENA, 2002). Muitos estudos têm utilizado de sistemas de informações geográficas para automatização do processo de estimação das variáveis explicativas, com inserção do MDT para obter as características físicas das bacias (BAENA, 2002; BAENA *et al.*, 2004; FERREIRA, 2010; BAZZO *et al.*, 2017; MACIEL *et al.*, 2018; AGUIAR, 2020) e usando técnicas de interpolação para obtenção das características climáticas, como

precipitação, nas áreas sem monitoramento e afim de especializar o comportamento da variável (WOLFF, 2017; AGUIAR, 2020).

### 3.2.2.1 Obtenção das características físicas da bacia

As características físicas das bacias utilizadas nesse estudo foram as seguintes: (a) área de drenagem da bacia, (b) o comprimento do rio principal, (c) a declividade média da bacia, (d) a densidade de drenagem e (e) a declividade do rio principal, as quais foram obtidas por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizando a o software ArcGIS 10.6, os mapas topográficos (escala 1:50.000) da ANA (ANA, 2019) e modelos digitais do terreno da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável - SDE.

A bacia hidrográfica foi gerada a partir do modelo digital do terreno (MDT) da SDE, antiga SDS (2013) com resolução espacial de um metro. Como o MDT mencionado abrange somente Santa Catarina, para gerar a bacia de drenagem da estação localizada em um afluente do rio Mampituba, foi utilizado o MDT produzido pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da NASA (2015) com resolução espacial de 30 metros.

A área de drenagem da bacia (A), em km<sup>2</sup>, foi determinada a partir da ferramenta ArcHydro no ArcGIS 10.6, conjunto de ferramentas para análises hidrológicas disponível gratuitamente no Sistema de Informações Geográficas da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Foram realizados os seguintes processamentos para obtenção das áreas de drenagem das 23 estações fluviométricas estudadas (Tabela 2):

- 1- *Fill Sinks*;
- 2- *Flow Direction*;
- 3- *Flow Accumulation*;
- 4- *Stream Definition*;
- 5- *Stream Segmentation*;
- 6- *Catchment Grid Delineation*;
- 7- *Catchment Polygon Processing*;
- 8- *Drainage Line Processing*;
- 9- *Adjoint Catchment Processing*;
- 10- *Drainage Point Processing*;
- 11- *Batch Point Generation*;
- 12- *Watershed Delineation*.

A ferramenta *Fill Sinks* foi utilizada para corrigir pixels do MDT com valores de altitudes considerados errados por estarem superiores ou inferiores aos vizinhos. Em seguida,

objetivando identificar os locais mais propensos a formarem rios, obteve-se a direção de fluxo de cada pixel e o fluxo acumulado a partir do somatório de pixels que drenam para o mesmo local, utilizando as ferramentas *Flow Direction* e *Flow Accumulation*.

Com o intuito de definir os cursos d'água que drenam a área de interesse, definiu-se como área mínima de drenagem 1.000 m<sup>2</sup>, utilizando a ferramenta *Stream Definition*. A área de drenagem foi definida usando a ferramenta *Watershed Delineation*, a partir dos dados de direção de fluxo e fluxo acumulado. As bacias de drenagem foram delimitadas usando como referência a localização (latitude e longitude) das estações fluviométricas selecionadas. O restante das ferramentas citadas se trata de etapas intermediárias que geram informação necessárias para as etapas posteriores.

O comprimento do rio principal ( $L$ ), em quilômetros (km), foi determinado por meio da base de dados vetoriais da ANA, disponível no site SIGSC da SDE. Foi realizada a extração do rio principal de cada bacia hidrográfica delimitada a partir da base de cursos d'água de Santa Catarina. A escolha por uma base de dados gratuita se deu pela facilidade do acesso aos dados para serem utilizados nas equações de regionalização de vazões, objetivo deste trabalho.

A declividade média da bacia ( $Dec$ ), em porcentagem (%), foi determinada utilizando a o ArcGIS 10.6 e posteriormente calculou-se a média tendo como parâmetro área de cada uma das 23 bacias hidrográficas delimitadas na área de estudo.

A densidade de drenagem ( $Dd$ ), em km.km<sup>-2</sup>, foi calculada conforme Equação 1 (BACK, 2014). Os cursos d'água relativos a cada bacia hidrográfica também foram obtidos da base de dados vetoriais da ANA.

$$Dd = \frac{L_T}{A} \quad (1)$$

Onde:  $L_T$  é o comprimento total dos cursos d'água (km),  $A$  a área de drenagem (km<sup>2</sup>)

A declividade do rio principal ( $S$ ) pode ser obtida de diferentes formas (BACK, 2014) e é expressa em m.m<sup>-1</sup>. No presente trabalho foi determinada por:

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

Onde:  $\Delta H$  é a diferença de cota do ponto mais alto ao ponto mais baixo do canal principal (m) e  $L$  o comprimento do canal principal (m).

### 3.2.2.2 Obtenção das características climáticas da bacia

As variáveis climáticas escolhidas foram a precipitação total anual ( $P_a$ ), do trimestre mais seco ( $P_{ts}$ ) e do mês mais seco ( $P_{mês}$ ); a evapotranspiração anual ( $ET_{oanual}$ ) e do mês de junho ( $ET_{ojun}$ ). Os dados de precipitação foram obtidos da base de dados da ANA (ANA, 2019),

sendo selecionadas 22 estações pluviométricas (Tabela 3), distribuídas conforme mostrado a Figura 3b. As séries de dados utilizadas são compreendidas entre 1989 e 2019, admitindo até 33% de falha (10 anos).

**Tabela 3** - Código, nome e localização das estações pluviométricas da ANA selecionadas nas bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão, Urussanga e Mampituba.

Nº	Código	Nome Da Estação	Município	Altitude (m)	Latitude (° S)	Longitude (° W)
1	2749012	Divisa de Anitápolis	Anitápolis	320	27°59'45"	49°06'56"
2	2749027	Anitápolis	Anitápolis	419	27°54'35"	49°07'47"
3	2848006	Vargem do Cedro	São Martinho	166	28°06'13"	48°55'10"
4	2848009	São Martinho - Jusante	São Martinho	41	28°09'56"	48°58'16"
5	2849000	Rio do Pouso	Tubarão	22	28°25'11"	49°06'25"
6	2849001	Orleans - montante	Orleans	90	28°21'32"	49°17'42"
7	2849002	São Ludgero	São Ludgero	40	28°19'33"	49°10'45"
8	2849004	Taquaruçu	Araranguá	10	28°57'30"	49°36'05"
9	2849005	Meleiro	Meleiro	80	28°49'56"	49°38'12"
10	2849006	Forquilha	Forquilha	40	28°45'02"	49°28'23"
11	2849008	Rio Pequeno	Grão Pará	93	28°12'34"	49°11'42"
12	2849019	Timbé do Sul	Timbé do Sul	115	28°50'06"	49°50'16"
13	2849020	Jaguaruna	Jaguaruna	10	28°36'24"	49°01'59"
14	2849022	Içara	Içara	50	28°43'18"	49°18'12"
15	2849024	Foz do Manuel Alves	Meleiro	15	28°51'13"	49°35'23"
16	2849027	Tubarão	Tubarão	7	28°28'20"	48°59'28"
17	2849028	Pedras Grandes	Pedras Grandes	40	28°26'04"	49°10'57"
18	2849029	Serrinha	Siderópolis	125	28°36'44"	49°33'04"
19	2849030	Braço do Norte - montante	Braço do Norte	68	28°14'20"	49°09'46"
20	2849031	Santa Rosa de Lima	Sta. Terezinha	248	28°01'56"	49°07'07"
21	2949001	Praia Grande	Praia Grande	60	29°11'45"	49°57'48"
22	2949003	Sombrio	Sombrio	18	29°02'45"	49°36'24"

A determinação de cada um dos índices de caracterização climática foi realizada da seguinte forma:

- Precipitação total anual ( $P_{\text{anual}}$ ): obtida a partir do acumulado de chuva ao longo de todo o ano, em milímetros (mm).
- Precipitação do trimestre mais seco ( $P_{\text{ts}}$ ): determinada por meio da soma da precipitação média mensal dos meses de junho, julho e agosto, em milímetros (mm), correspondentes aos meses com menores ocorrências de chuvas na região.

- c) Precipitação do mês mais seco ( $P_{\text{mês}}$ ): obtida por meio da mínima precipitação média mensal, determinada pela série histórica de dados, em milímetros (mm). Em 95,5% das estações pluviométricas, o mês mais seco foi junho, apenas na estação de código 02849005 o mês mais seco foi correspondente a julho.
- d) Evapotranspiração anual ( $ET_{\text{anual}}$ ): em milímetros (mm), foi calculada pela Equação 3, determinada por Massignam e Pandolfo (2006) para o estado de Santa Catarina, que utilizaram o método de Thornthwaite em função das coordenadas geográficas ( $Lon$  e  $Lat$ ) e altitude ( $Alt$ ). Nesse método os valores dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , para evapotranspiração anual são: 834,40; -0,2255; 15,90 e -24,28, respectivamente.

$$ET_o = a + b * Alt + c * Lon + d * Lat \quad (3)$$

- e) Evapotranspiração do mês de junho ( $ET_{\text{jun}}$ ): a evapotranspiração do mês de junho, em milímetros (mm), assim como a anual, foi estimada pela Equação 3, tendo como valores de 126,27; -0,0064; -1,07; e -1,22 para os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , respectivamente.

Com os índices definidos para cada estação pluviométrica, estes foram espacializados a fim de estimar as características climáticas para toda a extensão da área de estudo. O método escolhido foi krigagem, método de regressão usado em geoestatística para interpolar dados, obtida por meio da ferramenta de interpolação *Kriging* do ArcGIS 10.6. Este método é considerado excelente interpolador para dados de precipitação, quando comparado com outros métodos de estimação (LUNDGREN; SOUZA; LUNDGREN, 2017).

Mello *et al.* (2003), em um estudo realizado em São Paulo comparando dois métodos de interpolação, concluíram que a krigagem produziu estimativas de chuvas com menor erro quando comparada à estimativa realizada utilizando o método do inverso do quadrado da distância. Segundo Vieira (2000), devido à sua dependência espacial, a krigagem simples é amplamente usada na espacialização de dados, principalmente os relacionados aos fenômenos naturais, como geologia, precipitação e solo.

Após a obtenção das vazões médias mínimas anuais  $Q_7$  e  $Q_{30}$  e das variáveis explicativas, com o intuito de verificar a influência que as mesmas têm em relação à variável de resposta, calculou-se a correlação de Pearson (MATIAS, 2018). O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, com valores variando de -1 a 1 (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Quanto mais absoluto o valor, mais forte é a relação entre as variáveis. Coeficientes positivos indicam correlação positiva, enquanto negativos correlação negativa.

Asuero, Sayago e González (2006) propuseram classificação do coeficiente de Pearson, sendo a correlação classificada como muito baixa (para valores entre 0,00 e 0,29), baixa (0,30 a 0,49), moderada (0,50 a 0,69), alta (0,70 a 0,89) e muito alta (0,90 a 1,00). Apenas foram incluídas nos modelos de regionalização as variáveis explicativas que apresentaram alta ou muito alta correlação com a vazão mínima ( $0,70 \leq r \leq 1,00$ ). A determinação do coeficiente de correlação de Pearson foi realizada utilizando o software IBM SPSS Statistics 20.

### 3.2.3 Seleção da melhor distribuição de probabilidade

Após a seleção e análise de dados básicos, as séries anuais de vazões mínimas com sete e trinta dias de duração, para cada estação fluviométrica, foram submetidas à análise estatística, para identificação do modelo probabilístico que melhor se ajusta-se aos dados. Para determinar a curva teórica das vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$  foram utilizadas as distribuições de probabilidade Gumbel, Log-Normal a 2 parâmetros, Log-Normal a 3 parâmetros, Log-Pearson III, Pearson III, Weibull a 2 parâmetros e Weibull a 3 parâmetros, com os parâmetros estimados pelos Métodos dos Momentos, da Máxima Verossimilhança, dos Momentos-L e Chow. Foram utilizados os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Filliben e o erro quadrático médio (RMSE) e o teste D-index, para avaliar as distribuições teóricas mais adequadas às distribuições de vazões observadas.

Para representar graficamente uma distribuição empírica, a fim de compará-la com a distribuição teórica, é necessário ordenar a série de dados e estimar a probabilidade de excedência de cada valor (TUCCI, 2002). Para a determinação da  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  construiu-se a curva empírica para as  $Q_7$  e  $Q_{30}$  mínimas anuais, respectivamente. Para realização deste procedimento, utilizou-se a equação de posição de plotagem ou de locação de Cunnane (Equação 4).

$$q_i = \frac{i-0,40}{N+0,2} \quad (4)$$

Onde:  $i$  é a posição da amostra ordenada de forma crescente e  $N$  é o número de dados da série analisada.

#### 3.2.3.1 Distribuições de probabilidade

Os modelos estatísticos podem ajudar a descrever o comportamento das variáveis hidrológicas (CLARKE, 2014). De acordo com o mesmo autor, normalmente estes modelos são compostos por duas partes: a sistemática e a aleatória. A primeira dependente do tempo e usualmente contém alguns valores fixos, estes valores são denominados como parâmetros,

sendo necessário obtê-los com base nos dados disponíveis (CLARKE, 2014). O mesmo autor descreve que a parte aleatória representa a flutuação com relação à componente sistemática e, também, varia com o tempo.

Para realizar a análise da frequência das séries de vazões  $Q_7$  e  $Q_{30}$  mínimas anuais foram testadas diferentes distribuições teóricas. As funções de densidade de probabilidade (PDF),  $f(x)$ , e as funções de distribuição acumulativa (CDF),  $F(x)$ , das distribuições Gumbel, Log-Normal de 2 parâmetros, Log-Normal de 3 parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III, Weibull de 2 parâmetros e Weibull de 3 parâmetros, são representadas pelas expressões descritas a seguir.

### 3.2.3.1.1 Gumbel (GB)

De acordo com Finkler *et al.* (2015), a distribuição de Gumbel (mínimos), denominada também como extremo tipo I, é uma distribuição extrema bastante utilizada na análise de eventos hidrológicos mínimos anuais. As funções PDF e CDF são definidas em Naghettini e Pinto (2007), respectivamente, como:

$$f(x) = \alpha^{-1} \exp \left[ \frac{x-\beta}{\alpha} - \exp \left( \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (5)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \exp \left( \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (6)$$

em que  $\alpha$  é o parâmetro de escala e  $\beta$  o parâmetro de posição.

A função de Log-Verossimilhança para a distribuição de Gumbel é definida por Mello e Silva (2005) como:

$$l(\mu, \alpha) = -N \cdot \log(\alpha) - \alpha \cdot \sum_{t=1}^n (x_t - \mu) - \sum_{t=1}^n \exp(-\alpha(x_t - \mu)) \quad (7)$$

### 3.2.3.1.2 Log-Normal a dois parâmetros (LN2)

Granemann, Mine e Kaviski (2018) afirmam que distribuição do LN2 é recomendada na literatura para vazão máxima anual devido à sua assimetria sempre positiva, mas também para vazões mínimas anuais, considerando que se limita inferiormente às variáveis aleatórias positivas, no caso de vazões diárias mínimas médias anuais. A PDF e CDF são definidas em Baena (2002):

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_Y\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \quad (8)$$

em que:  $\sigma_Y^2$  é o parâmetro de escala,  $\mu_Y$  o parâmetro de posição,  $X$  é a variável aleatória e  $Y$  é o  $\ln(X)$ .

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \left\{ \frac{1}{x\sigma_Y\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \right\} dx \quad (9)$$

A função de verossimilhança da distribuição LN2, segundo Clarke (1994) é descrita como:

$$l(\mu, \sigma^2) = -N \ln \sigma - \left(\frac{1}{2}\right) \ln(2\pi) - \sum_{t=1}^n \ln y_t - \sum_{t=1}^n \frac{(\ln y_t - \mu)^2}{(2\sigma^2)} \quad (10)$$

Em que:  $y_t = \ln(x_t)$ .

### 3.2.3.1.3 Log-Normal a três parâmetros (LN3)

A distribuição LN3 difere da distribuição LN2 pela introdução de um parâmetro de posição  $\beta$ , tal que  $Y = \ln(x - \beta)$ . Segundo Baena (2002), a PDF e CDF são definidas como:

$$f(x) = \frac{1}{(x-\beta)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-\beta)-\mu_y]^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (11)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{(x-\beta)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-\beta)-\mu_y]^2}{2\sigma_y^2}\right\} dx \quad (12)$$

Clarke (1994) define a função de verossimilhança da distribuição LN3 como:

$$l(\hat{\mu}_0, \hat{\sigma}_0^2, a_0) = -N \ln \hat{\sigma}_0 - N \ln \frac{2\pi}{2} - \sum_{t=1}^n \ln y_t^* - \sum_{t=1}^n \frac{(\ln y_t^* - \hat{\mu}_0)^2}{2\hat{\sigma}_0^2} \quad (13)$$

Onde:  $y_t = \ln(x_t)$ .

### 3.2.3.1.4 Log-Pearson Tipo III (LPIII)

As distribuições Pearson Tipo III, pertencentes a família Gama, possuem grande número de aplicações na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com destaque para vazões e precipitações máximas anuais (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Neste trabalho serão utilizadas a distribuição Log-Pearson Tipo III e Pearson Tipo III.

As funções da distribuição LPIII possuem grande variedade de formas. No entanto, a PDF e CDF mais utilizadas na análise de eventos hidrológicos são descritas abaixo, conforme Das e Simonovic (2011):

$$f(x) = \frac{1}{\alpha x \Gamma(\kappa)} \left(\frac{\ln x - \xi}{\alpha}\right)^{\kappa-1} \exp\left(-\frac{\ln x - \xi}{\alpha}\right) \quad (14)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{\alpha x \Gamma(\kappa)} \left(\frac{\ln x - \xi}{\alpha}\right)^{\kappa-1} \exp\left\{-\frac{\ln x - \xi}{\alpha}\right\} dx \quad (15)$$

Se  $\gamma \neq 0$ :

$$\alpha = \frac{4}{\gamma^2} \quad (16)$$

$$\xi = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma} \quad (17)$$

Se  $\gamma > 0$ :

$$F(x) = G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{(x-\xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (19)$$

Se  $\gamma < 0$ :

$$F(x) = 1 - G\left(\alpha, \frac{\xi-x}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (20)$$

$$f(x) = \frac{(\xi-x)^{\alpha-1} e^{-(\xi-x)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (21)$$

Se  $\gamma = 0$ , a distribuição é Normal e:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (22)$$

$$f(x) = \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (23)$$

em que:  $\alpha$  é o parâmetro de escala,  $\kappa$  parâmetro de forma,  $\xi$  parâmetro de posição e  $\Gamma(\cdot)$  função Gama.

A função de verossimilhança da distribuição de LPIII é descrita por Kite (1978) como:

$$\ln L = - \sum_{t=1}^n \ln x - n \ln \Gamma(\beta) - \frac{\sum_{t=1}^n (\ln x_t - \gamma)}{\alpha} + (\beta - 1) \sum_{t=1}^n \ln(\ln x_t - \gamma) - n\beta \ln \alpha \quad (24)$$

### 3.2.3.1.5 Pearson Tipo III (PIII)

A distribuição de Pearson Tipo III, também chamada de Gama de três parâmetros, possui PDF e CDF descritas conforme Naghettini e Pinto (2007):

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\alpha}\right) \quad (25)$$

$$F_x(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^{\infty} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\alpha}\right) dx \quad (26)$$

Segundo Kite (1978) a função de verossimilhança da distribuição Pearson Tipo III é definida como:

$$\ln L = - n \ln \Gamma(\beta) - \frac{1}{\alpha} \sum_{t=1}^n (x_t - \gamma) + (\beta - 1) \sum_{t=1}^n \ln(x_t - \gamma) - n\beta \ln \alpha \quad (27)$$

### 3.2.3.1.6 Weibull a 2 parâmetros (WB2)

A distribuição de Weibull pertence à mesma família que a distribuição de Gumbel e é conhecida também como distribuição de extremo tipo III. De acordo com Finkler *et al.* (2015), em um cenário extremo as vazões que escoam por uma seção fluvial são forçosamente limitadas

inferiormente pelo valor zero, a distribuição de Weibull (mínimos) torna-se uma ótima opção para modelagem de eventos hidrológicos mínimos anuais.

As funções PDF e CDF da distribuição Weibull a 2 parâmetros são definidas em Naghettini e Pinto (2007) como:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (28)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] dx \quad (29)$$

em que:  $\alpha$  e  $\beta$  são, respectivamente, parâmetros de forma e escala.

A função de verossimilhança da distribuição de Weibull a 2 parâmetros é descrita como:

$$\log L(\alpha, \beta) = n \log(\beta) - n\beta \log(\alpha) + (\beta - 1) \sum_{t=1}^n \log(x_t) - \frac{1}{\alpha\beta} \sum_{t=1}^n x_t^2 \quad (30)$$

### 3.2.3.1.7 Weibull de 3 parâmetros (WB3)

Segundo Naghettini e Pinto (2007), se o limite inferior de  $X$  é positivo e diferente de zero, a distribuição torna-se a Weibull de três parâmetros pela inclusão do terceiro parâmetro  $\xi$ .

$$f(x) = \alpha \left(\frac{x-\xi}{\beta-\xi}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\xi}{\beta-\xi}\right)^\alpha\right] \quad (31)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\xi}{\beta-\xi}\right)^\alpha\right] dx \quad (32)$$

em que  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\xi$  são parâmetro de forma, escala e posição, respectivamente.

Kite (1978) descreve que a função de verossimilhança da distribuição de Weibull a 3 parâmetros é descrita como:

$$\ln L = n \ln(\alpha) - n \ln(\beta - \gamma) + (\alpha - 1) \sum_{t=1}^n \ln(x_t - \gamma) - n(\alpha - 1) \ln(\beta - \gamma) - (\beta - \gamma)^{-\alpha} \sum_{t=1}^n (x_t - \gamma)^\alpha \quad (33)$$

### 3.2.3.2 Métodos de estimativa de parâmetros

As equações para estimativa dos parâmetros por meio dos métodos a serem utilizados na realização do estudo são apresentadas a seguir, tais como, Método dos Momentos (MM), dos Momentos-L (ML), Máxima Verossimilhança (MV) e Chow (CH).

### 3.2.3.2.1 Método de Chow (MCH)

#### i. Gumbel

A distribuição Gumbel ajustada pelo método de Chow é conhecida como Gumbel-Chow, sendo a determinação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são feitas conforme sugerido por Chow (1964) e descrito por Back, Wildner e Garcez (2019).

$$\alpha = \frac{\sigma}{S_n} \quad (34)$$

$$\beta = \mu - \alpha Y_n \quad (35)$$

Em que:  $\sigma$  é o desvio padrão e  $\mu$  é a média da série de vazões mínimas anuais,  $S_n$  e  $Y_n$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da variável reduzida tabelados ou calculados em função do tamanho da série (BACK; WILDNER; GARCEZ, 2019).

### 3.2.3.2.2 Método dos Momentos (MM)

O MM consiste em igualar os momentos amostrais aos populacionais, possibilitando desta forma estimar os parâmetros da distribuição da probabilidade de interesse (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Segundo Naghettini e Pinto (2007), este é o método de estimação mais simples, porém seus estimadores são, normalmente, de qualidade inferior e menos eficientes do que outros métodos de estimativa, principalmente para distribuições de três ou mais parâmetros. No entanto, quando se trata de pequenas amostras, frequentes em estudos hidrológicos, os estimadores pelo MM podem ter qualidade e eficiência comparáveis ou até superiores a outros estimadores (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

As equações dos parâmetros estimados pelo método dos momentos para as distribuições de probabilidade Gumbel, Log-Normal com dois e três parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III e Weibull com dois e três parâmetros são expressas nas equações abaixo conforme descritas por Kite (1978), Garcia (1981) e Naghettini e Pinto (2007).

#### i. Gumbel

$$\hat{\alpha} = 0,7797s_x \quad (36)$$

$$\hat{\beta} = \hat{x} + 0,45s_x \quad (37)$$

#### ii. Log-Normal com 2 parâmetros

$$\mu_\gamma = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2}\sigma_\gamma^2 \quad (38)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_y^2}{\mu_x^2}\right)} \quad (39)$$

iii. *Log-Normal com 3 parâmetros*

$$a = \mu \left(1 - \frac{z_1}{z_2}\right) = \mu - \frac{\sigma}{z_2} \quad (40)$$

$$\sigma_y = [\ln(z_2^2 + 1)]^{1/2} \quad (41)$$

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\sigma}{z_2}\right) - \frac{1}{2}\ln(z_2^2 + 1) \quad (42)$$

iv. *Log-Pearson Tipo III*

Existem duas maneiras para estimar os parâmetros de distribuição Log-Pearson Tipo III pelo método dos momentos, são elas: a) ajustar os parâmetros de distribuição dos dados; b) ajustar a distribuição aos logaritmos dos eventos.

No caso I pode ser usar o método dos momentos ou da máxima verossimilhança. No caso II, como o método da máxima verossimilhança dá o mesmo resultado que o primeiro caso, somente o método dos momentos dá resultados diferentes.

a) Método 1: Aplicação direta:

Considerando as funções dos momentos tem-se:

$$B = \frac{\ln \hat{v}_3 - 3 \ln \hat{v}_1}{\ln \hat{v}_2 - 2 \ln \hat{v}_1} \quad (43)$$

$$C = 1/(B - 3) \quad (44)$$

para  $3,5 < B \leq 6,0$  tem-se:

$$A = -0,23019 + 1,65265C + 0,20911C^2 - 0,04557C^3 \quad (45)$$

para  $3,0 < B \leq 3,5$ :

$$A = -0,47157 + 1,99955C \quad (46)$$

Sendo os parâmetros estimados pelas Equações 44, 45 e 46.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{A+3} \quad (47)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\ln \hat{v}_2 - 2 \ln \hat{v}_1}{\ln(1-\hat{\alpha}) - \ln(1-2\hat{\alpha})} \quad (48)$$

$$\hat{\gamma} = \ln \hat{v}_1 + \hat{\beta} \ln(1 - \hat{\alpha}) \quad (49)$$

- b) Método 2: Aplicação de Pearson Tipo III nos logaritmos de x. Calcula-se a média ( $\mu_y$ ), o desvio padrão ( $\sigma_y$ ) e o coeficiente de assimetria ( $\gamma_y$ ) a dos logaritmos de xi.

$$\mu_y = \sum \frac{\ln x_i}{N} \quad (50)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum \frac{(\ln x_i - \mu_y)^2}{N}} \quad (51)$$

$$\gamma_y = \frac{\sum (\ln x_i - \mu_y)^3}{\sigma_y^3} \quad (52)$$

$$\gamma_y = \gamma_i \sqrt{\frac{N(N-1)}{N-2}} \left( \frac{1+8.5}{N} \right) \quad (53)$$

$$\beta = \left( \frac{2}{\gamma^1} \right)^2 \quad (54)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\beta}} \quad (55)$$

$$\gamma = \mu_y - \sigma \sqrt{\beta} \quad (56)$$

- v. *Pearson Tipo III*

$$\hat{\beta} = \left( \frac{2}{g_x} \right)^2 \quad (57)$$

$$\hat{\alpha} = \sqrt{\frac{s_x^2}{\hat{\beta}}} \quad (58)$$

$$\hat{\gamma} = \bar{x} - \sqrt{s_x^2 \hat{\beta}} \quad (59)$$

- vi. *Weibull com 2 parâmetros*

Existem duas formas para estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull a dois parâmetros pelo método dos momentos, as quais são detalhadas a seguir:

- a) Método 1:

Com a assimetria populacional  $\gamma$  resolve-se as equações abaixo:

$$\beta = 0,277561 + 0,3219\gamma + 0,061566\gamma^2 - 0,017376\gamma^3 - 0,00771\gamma^4 + 0,00398\gamma^5 - 0,00051\gamma^6 \quad (60)$$

$$\alpha = [\Gamma(1 + 1/\beta)/\mu]^\beta \quad (61)$$

- b) Método 2: Coeficiente de Variação

Com o valor do coeficiente de variação Z calculado por:

$$Z = \frac{s}{\bar{x}} \quad (62)$$

Pode-se obter a estimativa do parâmetro  $1/\beta$ :

$$1/\beta = Z[1 + (1 - z)^2 \sum_{i=0}^5 k_i Z^i] \quad (63)$$

Em que:  $Z$  é o coeficiente de variação adimensional;  $K_0 = -0,220040320$ ;  $K_1 = -0,001433169$ ;  $K_2 = 0,150613381$ ;  $K_3 = -0,078275996$ ;  $K_4 = -0,004305716$ ;  $K_5 = 0,008804944$ .

$$\alpha = [\Gamma(1 + 1/\beta)/\mu]^\beta \quad (64)$$

vii. *Weibull com 3 parâmetros*

Existem duas formas para estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull a três parâmetros pelo método dos momentos, as quais são detalhadas a seguir:

a) Método 1:

Como a assimetria populacional depende apenas do parâmetro  $\alpha$ , pode-se obter uma estimativa de  $\alpha$  pela estimativa do valor de  $A[X]$  dado pelo coeficiente de assimetria. Para facilitar Kite (1978) apresenta uma relação entre  $\alpha$  e a assimetria da pela função:

$$\frac{1}{\alpha} = C_0 + C_1\gamma_1 + C_2\gamma_1^2 + C_3\gamma_1^3 + C_4\gamma_1^4 \quad (65)$$

sendo:  $\gamma_1$  é a estimativa amostral da assimetria que deverá estar entre  $-1,02$  e  $2$  para uso desta equação;  $C_0 = 0,2777757913$ ;  $C_1 = 0,3132617714$ ;  $C_2 = 0,0575670910$ ;  $C_3 = -0,0013038566$ ;  $C_4 = -0,0081523408$ .

Kite (1978) define duas novas variáveis  $A_\alpha$ ,  $B_\alpha$ , sendo  $A_\alpha$  a diferença padronizada entre o valor característico e a média e  $B_\alpha$  é a diferença característica entre o limite inferior e o valor característico.

$$A_\alpha = \frac{\beta - \mu}{\sigma} \quad (66)$$

$$B_\alpha = \frac{\beta - \gamma}{\sigma} \quad (67)$$

$$\text{Sendo: } B_\alpha = \{\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)\}^{-1/2} \quad (68)$$

$$A_\alpha = \{1 - \Gamma(+1/\alpha)\}B_\alpha \quad (69)$$

Desta forma pode se estimar os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  conforme:

$$\beta = \mu + A_\alpha\sqrt{\sigma^2} \quad (70)$$

$$\gamma = \beta - B_\alpha\sqrt{\sigma^2} \quad (71)$$

b) Método 2:

Com coeficiente de assimetria  $C_s$  estima-se  $\beta$  por método numérico:

$$C_s = \frac{\Gamma(3/b+1) - 3\Gamma(\frac{3}{b}+1)\Gamma(\frac{2}{b}+1) + 2\Gamma^2(1/b+1)}{[\Gamma(2/b+1) - \Gamma^2(1/b+1)]^{1,5}} \quad (72)$$

Os outros parâmetros são:

$$\alpha = \frac{\sqrt{m_2}}{\sqrt{\Gamma(1+2/b) - \Gamma^2(1+1/b)}} \quad (73)$$

$$\gamma = m_1 - a\Gamma(1 + 1/b) \quad (74)$$

Observação: ( $m_1$  = média;  $m_2$  = variância).

### 3.2.3.2.3 Método dos Momentos-L (MML)

O método dos momentos-L (MML) normalmente produz estimadores mais eficazes que o método dos momentos convencional (HOSKING, 1990). Ainda é possível afirmar que os parâmetros estimados por esse método são de qualidade comparável àqueles produzidas pelo método da máxima verossimilhança (MMV), com a vantagem de exigirem um menor esforço computacional para a solução de sistemas de equações menos complexas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Naghettini e Pinto (2007), afirmam também que para amostras pequenas, os estimadores pelo MML são, frequentemente, mais acurados do que os de MMV.

A seguir são apresentadas as equações, de acordo com Kite (1978) e Naghettini e Pinto (2007), para estimativa dos parâmetros pelo método dos momentos-L das distribuições Gumbel, Log-Normal com dois e três parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III e Weibull com dois e três parâmetros.

#### i. *Gumbel*

$$\hat{\alpha} = \frac{l_2}{\ln 2} \quad (75)$$

$$\hat{\beta} = l_1 + 0,5772\hat{\alpha} \quad (76)$$

#### ii. *Log-Normal com 2 parâmetros*

$$\hat{\sigma}_\gamma = 2erf^{-1}(t) \quad (77)$$

$$\hat{\mu}_\gamma = \ln l_1 - \frac{\hat{\sigma}_\gamma^2}{2} \quad (78)$$

em que:  $erf(w) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-u^2} du$ . A inversa  $erf^{-1}(t)$  é igual a  $u/\sqrt{2}$ , com  $u$  representando a variável Normal padrão correspondente  $\phi[(t + 1)/2]$ .

iii. *Log-Normal com 3 parâmetros*

O parâmetro  $\kappa$  é função somente de  $\tau_3$ . Nenhuma solução é possível, mas a seguinte aproximação tem acurácia melhor que  $2,5 \times 10^{-6}$  para  $|\tau_3| \leq 0,94$ , correspondendo a  $|\kappa| \leq 3$ .

$$\kappa \approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6} \quad (79)$$

Os outros parâmetros são dados por:

$$\alpha = \frac{\lambda_2 \kappa e^{-\kappa^2/2}}{1 - 2\phi(-\kappa/\sqrt{2})} \quad (80)$$

$$\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{\kappa} (1 - e^{-\kappa^2/2}) \quad (81)$$

iv. *Log-Pearson Tipo III*

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \kappa \quad (82)$$

$$\lambda_2 = \frac{|\alpha| \Gamma(\kappa + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \Gamma(\kappa)} \quad (83)$$

$$\tau_3 = \begin{cases} 6I_{1/3}(\kappa, 2\kappa) - 3, & \alpha > 0 \\ -6I_{1/3}(\kappa, 2\kappa) + 3, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (84)$$

v. *Pearson Tipo III*

$$\text{Para } t_3 \geq \frac{1}{3} \text{ e com } t_m = 1 - t_3, \hat{\beta} = \frac{0,36067t_m - 0,5967t_m^2 + 0,25361t_m^3}{1 - 2,78861t_m + 2,56096t_m^2 - 0,77045t_m^3} \quad (85)$$

$$\text{Para } t_3 < \frac{1}{3} \text{ e com } t_m = 3\pi t_3^2, \hat{\beta} = \frac{1 + 0,2906t_m}{t_m + 0,1882t_m^2 - 0,0442t_m^3} \quad (86)$$

$$\hat{\alpha} = \sqrt{\pi} l_2 \frac{\Gamma(\hat{\beta})}{\Gamma(\hat{\beta} + 0,5)} \quad (87)$$

$$\hat{\gamma} = l_1 - \hat{\alpha} \hat{\beta} \quad (88)$$

vi. *Weibull com dois parâmetros*

$$\beta = \frac{\ln(2)}{\ln\{(\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_1\}} \quad (89)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\Gamma(1 + 1/\beta)} \quad (90)$$

vii. *Weibull com três parâmetros*

$$t = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (91)$$

$$t_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (92)$$

$$C = \frac{2}{3-t_3} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \quad (93)$$

$$\alpha = \frac{1}{7,8590X + 2,9554C^2} \quad (94)$$

$$\beta = \frac{L_2}{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})(1-)} \quad (95)$$

#### 3.2.3.2.4 Método da Máxima Verossimilhança (MMV)

O método da máxima verossimilhança (MMV) é considerado o método de estimação mais eficiente porque produz os estimadores de menor variância (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Porém, de acordo com os autores, sua aplicação a amostras de pequenas pode produzir estimadores de qualidade comparável ou até inferior a outros métodos de estimativa. Uma desvantagem do MMV é o fato de exigir maior esforço computacional, já que envolve soluções numéricas de sistemas de equações, frequentemente, não lineares e implícitas (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

As equações a seguir são utilizadas para estimativa dos parâmetros das distribuições Log-Normal com dois e três parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III e Weibull com 2 parâmetros pelo método da máxima verossimilhança, segundo descrito por Kite (1978) e Naghettini e Pinto (2007).

##### i. *Log-Normal com dois parâmetros*

$$\hat{\mu}_y = \bar{y} \quad (96)$$

$$\hat{\sigma}_y = s_y \quad (97)$$

##### ii. *Log-Normal com três parâmetros*

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{(x_i - a)} \ln(x_i - a) \right] \quad (98)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[\ln(x_i - a) - \mu_y]^2}{n} \quad (99)$$

$$\mu_y = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i - a)}{n} \quad (100)$$

iii. *Log-Pearson Tipo III*

$$\sum_{i=1}^N (\ln x_i - \gamma) = N\alpha\beta \quad (101)$$

$$N\Psi(\beta) = \sum_{i=1}^N \ln \left[ \frac{(\ln x_i - \gamma)}{\alpha} \right] \quad (102)$$

$$N = \alpha(\beta - 1) \sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln x_i - \gamma} \quad (103)$$

onde  $\Psi(\beta) = \frac{\Gamma'(\beta)}{\Gamma(\beta)}$  pode ser aproximada por:

$$\Psi(\beta) \cong \ln \beta - \frac{1}{2\beta} - \frac{1}{12\beta^2} + \frac{1}{120\beta^4} - \frac{1}{252\beta^6} + \frac{1}{240\beta^8} - \frac{1}{132\beta^{10}} \quad (104)$$

iv. *Pearson Tipo III*

$\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\gamma}$  são as soluções (método de Newton-Raphson) do seguinte sistema:

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \gamma) = N\alpha\beta \quad (105)$$

$$N\Psi(\beta) = \sum_{i=1}^N \ln \left[ \frac{(\ln x_i - \gamma)}{\alpha} \right] \quad (106)$$

$$N = \alpha(\beta - 1) \sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln x_i - \gamma} \quad (107)$$

onde  $\Psi(\beta) = \frac{\Gamma'(\beta)}{\Gamma(\beta)}$  é dado pela Equação 104.

v. *Weibull com dois parâmetros*

$\hat{\alpha}$  e  $\hat{\beta}$  são as soluções (método de Newton-Raphson) do seguinte sistema de equações:

$$\beta^{-\alpha} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_i^\alpha} \quad (108)$$

$$\alpha = \frac{N}{\beta^{-\alpha} \sum_{i=1}^N x_i^\alpha \ln(x_i) - \sum_{i=1}^N \ln(x_i)} \quad (109)$$

## 3.2.3.3 Testes de aderência

Para verificar a adequação das distribuições de probabilidade aos dados de vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$ , serão utilizados os testes de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) e Filliben (Rf) descritos a seguir, todas com nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

### 3.2.3.3.1 Kolmogorov-Smirnov

O teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), segundo Finkler *et al.* (2015), é um teste não paramétrico, cuja estatística tem como base a diferença máxima ( $D_{\text{máx}}$ ) entre as funções de probabilidades acumuladas – empírica e teórica – de variáveis aleatórias contínuas.

Para o teste de KS foram calculadas as diferenças  $D^+$  e  $D^-$  dadas por:

$$D^+ = \text{Max}|F_n(x) - F(x)| \quad (110)$$

$$D^- = \text{Max}|F(x) - F_n(x)| \quad (111)$$

A estatística do teste é dada pelo maior valor de  $D^+$  e  $D^-$ , que foi comparado com o valor crítico ( $D_{\text{crít}}$ ) ao nível de significância de 5%. Se o valor  $D_{\text{máx}}$  for menor do que o valor  $D_{\text{crít}}$  tabelado (Tabela 4), o teste KS aceitou a distribuição.

**Tabela 4** - Valores críticos do teste de aderência Kolmogorov-Smirnov para nível de significância  $\alpha = 0,05$  para séries de dados de diferentes tamanhos (n).

n	5%										
20	0,2941	30	0,2417	40	0,2101	50	0,1884	60	0,1723	70	0,1597
21	0,2872	31	0,2379	41	0,2076	51	0,1866	61	0,1709	71	0,1586
22	0,2809	32	0,2342	42	0,2052	52	0,1848	62	0,1696	72	0,1576
23	0,2749	33	0,2308	43	0,2028	53	0,1831	63	0,1682	73	0,1565
24	0,2693	34	0,2274	44	0,2006	54	0,1814	64	0,1669	74	0,1554
25	0,2640	35	0,2242	45	0,1984	55	0,1798	65	0,1657	75	0,1544
26	0,2591	36	0,2212	46	0,1963	56	0,1782	66	0,1644	76	0,1534
27	0,2544	37	0,2183	47	0,1942	57	0,1767	67	0,1632	77	0,1524
28	0,2499	38	0,2154	48	0,1922	58	0,1752	68	0,1620	78	0,1515
29	0,2457	39	0,2127	49	0,1903	59	0,1737	69	0,1609	79	0,1505

### 3.2.3.3.2 Anderson-Darling

O teste de aderência de Anderson-Darling (AD), assim como o KS, é um teste não-paramétrico e baseia-se na diferença entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas. Sua vantagem em relação ao teste KS, é que o AD procura ponderar mais fortemente as caudas das distribuições, nas quais, as maiores (ou as menores) observações da amostra podem alterar a qualidade do ajuste (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Finkler *et al.* (2015) afirmam que o teste de Anderson-Darling se apresenta como uma boa alternativa à estudos de vazões mínimas, pois busca atribuir maior significância aos extremos das distribuições, nos quais as maiores (ou menores) observações podem alterar a

qualidade do ajuste. O teste, tal como o de KS, baseia-se na diferença entre as funções de probabilidades acumuladas empírica e teórica. Sua estatística  $A^2$  é descrita como:

$$A^2 = -N - \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)\{\ln F_x(x_{(i)}) + \ln[1 - F_x(x_{(N-i+1)})]\}}{N} \quad (112)$$

em que,  $\{x(1), x(2), \dots, x(m), \dots, x(n)\}$  representam as observações ordenadas em modo crescente, e  $F_{N(x)}$  e  $F_{X(x)}$ , as distribuições empírica e teórica, respectivamente.

Para as distribuições de Gumbel, Weibull com 2 parâmetros e com 3 parâmetros, o  $A^2$ , calculada pela Equação 112, é corrigido multiplicando pelo fator de correção dado pela Equação 113.

$$ADc = 1 + \frac{0,2}{\sqrt{N}} \quad (113)$$

Para as distribuições Normal, Log-Normal com dois parâmetros e com três parâmetros o  $A^2$  é corrigido pelo fator de correção dado pela Equação 114.

$$ADc = 1 + \frac{0,75}{N} + \frac{2,25}{N^2} \quad (114)$$

Assim como no KS, a estatística do teste ( $A^2$ ) é comparada a um valor crítico ( $A^2_{\text{crít}}$ ) a nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), se  $A^2$  for menor do que o valor  $A^2_{\text{crít}}$  tabelado (Tabela 5), o teste AD aceitou a distribuição.

**Tabela 5** - Valores críticos do teste de aderência de Anderson-Darling para nível de significância  $\alpha = 0,05$  para cada distribuição de probabilidade.

Distribuições	5%	Distribuições	5%
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gumbel</li> <li>• Weibull 2 parâmetros</li> <li>• Weibull 3 parâmetros</li> </ul>	0,757	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Log-Normal a dois parâmetros</li> <li>• Log-Normal a três parâmetros</li> <li>• Pearson Tipo III</li> <li>• Log-Pearson Tipo III</li> </ul>	0,752

Fonte: Naghettini e Pinto (2007) adaptada de D'Agostino e Stephens (1986).

Uma restrição do teste de Anderson-Darling é quanto à estatística de valor crítico, a qual é conhecida apenas para algumas distribuições de probabilidade (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Para as distribuições que não possuem valor crítico tabelado (Pearson Tipo III e Log-Pearson Tipo III) foi adotado o valor crítico estabelecido para a distribuição Log-Normal.

### 3.2.3.3.3 Filliben

O teste de aderência de Filliben foi introduzido por Filliben (1975) para verificação do ajuste de uma amostra a distribuição Normal, sendo posteriormente adaptado para outras distribuições de probabilidade (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A estatística do teste baseia-se

no coeficiente de correlação linear Rf (Equação 115), entre as observações ordenadas em modo crescente e os quantis teóricos, calculados pela Equação 118.

$$Rf = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}} \quad (115)$$

$$\text{Onde: } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{(i)}}{N} \quad (116)$$

$$\text{e } \bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N} \quad (117)$$

Sendo os quantis teóricos calculados por:

$$w_i = F_x^{-1}(1 - q_i) \quad (118)$$

Onde:  $q_i$  é a probabilidade empírica correspondente a ordem de classificação  $i$ , sendo:

$$q_i = \frac{i - a}{N + 1 - 2a} \quad (119)$$

Em que  $N$  é o tamanho da série e  $a = 0,4$  conforme a fórmula de posição de plotagem sugerida por Cunnane (1973).

Para verificar se a distribuição foi aceita pelo teste de Filliben, o valor de Rf calculado é comparado com o valor crítico ( $R_{crit}$ ) (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Os  $R_{crit}$  para as distribuições Log-Normal de dois e três parâmetros, Gumbel, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III, Weibull de dois e três parâmetros foram obtidos por meio de interpolação dos valores propostas por Stedinger *et al.* (1993) com nível de significância de 5% (Tabela 6). Como o teste de Filliben não possui valores críticos determinados para todas as distribuições, para a Log-Pearson Tipo III e Pearson Tipo III foram adotados os valores críticos determinados para a distribuição de Gumbel e Weibull.

**Tabela 6** - Valores críticos do teste de aderência de Filliben ( $r_{crit}$ ) para distribuições de probabilidade Log-Normal 2 e 3 parâmetros com posição de plotagem determinada por Blom ( $a = 0,375$ ) e Gumbel e Weibull 2 e 3 parâmetros com posição de plotagem determinada por Cunnane ( $a = 0,44$ ).

Distribuições de probabilidade Log-Normal com $a = 0,375$		Distribuições de probabilidade Gumbel e Weibull com $a = 0,44$	
N	$\alpha = 0,05$	N	$\alpha = 0,05$
10	0,9180	10	0,9084
15	0,9383	20	0,9390
20	0,9503	30	0,9526
30	0,9639	40	0,9594
40	0,9715	50	0,9646
50	0,9764	60	0,9685
60	0,9799	70	0,9720
75	0,9835	80	0,9747
100	0,9870	100	0,9779

**Fonte:** Naghettini e Pinto (2007) adaptada de Stedinger *et al.* (1993).

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a ideia essencial do teste de Filliben é que, se existe forte associação linear entre  $x_{(i)}$  e  $w_i$ , as observações podem ser expressas por distribuição de probabilidade  $F_x(x)$ . O teste tem a vantagem de não apresentar limitações quanto ao número de pontos da amostra, sendo um teste adequado e confiável no caso de amostras pequenas (GAGG, 2008).

#### 3.2.3.4 Critérios de avaliação do desempenho das distribuições

Para avaliação do desempenho das distribuições de probabilidade foram utilizados o erro quadrático médio (RMSE) e o teste D-index.

##### 3.2.3.4.1 Erro Quadrático Médio - RMSE

O erro quadrático médio - RMSE (*Root Mean Square Error*), também conhecido como erro padrão de estimativa, foi utilizado para avaliar o desempenho das distribuições. O RMSE mede a magnitude média dos erros estimados, resultando em valores sempre positivos (AGUIAR, 2020). Quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados. A equação do RMSE é descrita por Aiyelokun *et al.* (2017) como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ei})^2}{n}} \quad (120)$$

em que: *RMSE* é o erro quadrático médio para uma dada distribuição de probabilidade;  $X_i$  é a vazão mínima anual registrada em sete ou 30 dias ( $Q_7$  ou  $Q_{30}$ , respectivamente) de ordem  $i$ ;  $X_{ei}$  é a vazão mínima estimada pela distribuição teórica de probabilidade; e  $n$  é o número de elementos na série de mínimas anuais.

##### 3.2.3.4.2 D-index

Por se tratar de vazões mínimas, optou-se por adotar o teste D-index que possibilita avaliar a diferença entre as vazões observada e a estimada pela distribuição de probabilidade na cauda inferior (6 menores vazões). O teste D-index é definido por Vivekanandan (2015b) como:

$$D \text{ index} = (1/\bar{x}) \sum_{i=1}^6 |x_i - x_i^*| \quad (121)$$

em que:  $\bar{x}$  é a média da  $Q_7$  ou  $Q_{30}$  registrada,  $x_i$  ( $i = 1$  a  $6$ ) é a  $i$ -ésima amostra dos seis primeiros valores mais baixos da série de dados de vazões mínimas anuais e  $x_i^*$  é o valor estimado pela distribuição de probabilidade. A distribuição com o menor D-index é considerada a distribuição mais adequada para a estimativa das vazões  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  (VIVEKANANDAN, 2015b).

### 3.2.3.5 Ranking com os Testes de Aderência

Para determinação da melhor distribuição de probabilidade para cada série de dados estudada foi construído um ranking global com base na pontuação total obtida nos três testes de aderência (KS, AD e Filliben) junto com os outros critérios de seleção (RMSE e D-index). Para cada teste foi atribuído um valor de um a 23 para as distribuições de probabilidade, sendo que a melhor distribuição recebeu o menor valor. Posteriormente realizou-se a soma dos valores atribuídos a todos os testes para cada distribuição, a pontuação final variou de cinco a 115 e a melhor distribuição foi selecionada pela menor pontuação geral de cada série.

Em caso de duas ou mais distribuições de probabilidade receberem a mesma pontuação e, desta forma, serem classificadas como melhor distribuição, utilizou-se o teste D-index como critério de desempate para seleção da distribuição de probabilidade utilizada para estimativa da vazão mínima anual  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$ . Foi utilizado este teste devido a sua aplicação para a seleção da distribuição de probabilidade adequada para estimativa de eventos extremos, como vazão, precipitação, temperatura e velocidade do vento (VIVEKANANDAN, 2015a; VIVEKANANDAN, 2015b; AIYELOKUN *et al.*, 2017).

### 3.2.5 Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas

As regiões que subdividem uma área podem ser escolhidas, com base na homogeneidade das características hidrológicas (BAENA, 2002). A região é hidrologicamente homogênea quando as respostas das funções regionais são semelhantes (OLIVEIRA, 2008). A divisão das regiões seguiu os critérios definidos por Oliveira (2008), sendo eles: variabilidade da precipitação e do relevo ao longo das bacias; similaridade nos valores das vazões específicas; bom ajuste à equação de regressão; e número mínimo de cinco estações por região homogênea para aumentar a confiabilidade das estimativas.

A identificação das regiões homogêneas ocorreu por meio da análise das características físicas e climáticas e verificação da similaridade das vazões mínimas nas bacias estudadas. Para isso, foi calculada a vazão específica que consiste em dividir a vazão obtida, no caso as vazões médias mínimas em sete e trinta dias consecutivos ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ ), pela área da bacia de drenagem na respectiva estação fluviométrica. Com as vazões específicas definidas para cada estação, os dados foram espacializados com o intuito de analisar o comportamento da vazão ao longo da área de estudo. O método escolhido para a interpolação foi krigagem simples, por meio da ferramenta de interpolação *Kriging* do ArcGIS 10.6.

Para identificar se as regiões definidas eram homogêneas, foi realizada a análise do ajuste do modelo de regressão múltipla, conforme descrito por Baena (2002). O método consiste em estabelecer regressões múltiplas entre as séries de vazões mínimas e as características físicas – área de drenagem da bacia (A), comprimento do rio principal (L), declividade média da bacia (Dec), densidade de drenagem (Dd) e declividade do rio principal (S) e climáticas das bacias – precipitação (P) e evapotranspiração (ETo), com base na seguinte função:

$$Q = f(A, L, Dec, Dd, S, P, ETo) \quad (122)$$

As regiões hidrologicamente homogêneas foram definidas por meio da combinação de estações que apresentaram o melhor ajuste nos modelos de regressão múltipla. A verificação da homogeneidade foi realizada com base nos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2a$ ) e nos valores do erro padrão fatorial ( $\sigma F$ ). Sendo utilizado como parâmetros os coeficientes  $R^2$  e  $R^2a$  maiores que 0,90 (BAZZO *et al.*, 2017) e valores do  $\sigma F$  menores que 1,0 (MACIEL *et al.*, 2019). As análises de regressão múltipla se deram utilizando o software IBM SPSS Statistics 20.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é sempre positivo e varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de um, melhor é o modelo ajustado. O  $R^2$  é estimado por:

$$R^2 = b^2 \frac{s_x^2}{s_y^2} \quad (123)$$

em que:  $s_x^2$  é a variância amostral de X (variáveis explicativas);  $s_y^2$  é a variância amostral de Y (variáveis dependentes);  $b$  é o coeficiente angular da reta de regressão.

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2a$ ) é útil quando o ajuste do modelo de regressão é realizado com a inserção de um número maior de variáveis independentes (AGUIAR, 2020). O  $R^2a$  é calculado da seguinte forma:

$$R^2a = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p-1)} (1 - R^2) \quad (124)$$

onde:  $n$  é o número de valores observados;  $p$  é o número de variáveis independentes; e  $R^2$  é coeficiente de determinação (Equação 123).

O erro padrão fatorial ( $\sigma F$ ) quantifica a dispersão dos valores observados da variável independente em torno da função ajustada (AGUIAR, 2020; NAGHETTINI, PINTO, 2007). Quanto menor o erro padrão, melhor é o ajuste do modelo, já que indica a confiabilidade da média amostral (NAGHETTINI, PINTO, 2007). O  $\sigma F$  é calculado por:

$$\sigma F = e^s \quad (125)$$

em que:  $s$  é o desvio padrão e;  $e$  é a base do logaritmo Neperiano.

A fim de comparar os valores de vazões mínimas observadas, foram calculadas as vazões estimadas pelos modelos de regressão selecionados e em seguida determinado o erro percentual ou erro relativo (ER). Segundo Maciel *et al.* (2019), mesmo que a regressão apresente resultados estatísticos satisfatórios, as vazões calculadas pelas equações podem ser superestimadas ou subestimadas, sendo, portanto, necessário avaliar a adequação do ajuste da equação de regressão aos dados observados. O ER (%) é estimado por:

$$ER = 100 \cdot \left| \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right| \quad (126)$$

sendo:  $Q_{obs}$  é a vazão obtida a partir da análise da série histórica da estação fluviométrica em ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $Q_{est}$  é a vazão estimada pela equação de regressão ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ). Conforme descrito por Aguiar (2020), erros relativos menores que 30% são considerados aceitáveis.

Outro parâmetro usado para verificar a adequação do ajuste da função matemática aos dados observados é o coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) (MACIEL *et al.*, 2019). Como é tradicionalmente utilizado para avaliar ajustes de modelos hidrológicos, dando maior peso às vazões máximas, adotou-se o logaritmo de CNS ( $CNS_{log}$ ) que valoriza o ajuste das vazões mínimas (SOUZA; SANTOS, 2013). Quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste entre as vazões observadas e calculadas. O  $CNS_{log}$  é calculado por:

$$CNS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{est}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs}) - \overline{\log(Q_{obs})})^2} \quad (127)$$

onde:  $Q_{obs}$  é a vazão observada nas estações fluviométricas ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $Q_{est}$  é a vazão estimada pelo modelo de regressão ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ); e  $\overline{\log(Q_{obs})}$  é a média das vazões observadas ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ). De acordo com Moriasi *et al.* (2007), coeficientes de Nash-Sutcliffe maiores que 0,75 indicam um ajuste muito bom;  $0,65 < CNS \leq 0,75$ , bom;  $0,50 < CNS \leq 0,65$ , satisfatório; menores ou iguais a 0,50, insatisfatórios.

### 3.2.6 Obtenção das equações regionais

Com a distribuição de probabilidade e respectivo método de estimativa dos parâmetros definidos para os dados de cada estação fluviométrica, determinou-se as vazões mínimas com sete e 30 dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$ ). Posteriormente, com os dados de vazões mínimas e características físicas (A, L, Dec, Dd, S) e climáticas ( $P_{med}$ ,  $P_{ts}$ ,  $P_{mês}$ ,  $P_a$ ,  $ETO_{anual}$ ,  $ETO_{jun}$ ) das diferentes bacias de drenagem da área de estudo foi aplicada a regressão múltipla para ajuste das equações, conforme descrito por Baena (2002), utilizando as seguintes modelos de equações:

$$\text{Linear: } Q = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dec + \beta_4 Dd + \beta_5 S + \beta_6 P + \beta_7 ET_o \quad (128)$$

$$\text{Potencial: } Q = \beta_0 A^{\beta_1} L^{\beta_2} Dec^{\beta_3} Dd^{\beta_4} S^{\beta_5} P^{\beta_6} ET_o^{\beta_7} \quad (129)$$

$$\text{Exponencial: } Q = \beta_0 e^{(\beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dec + \beta_4 Dd + \beta_5 S + \beta_6 P + \beta_7 ET_o)} \quad (130)$$

$$\text{Logarítmico: } Q = \beta_0 + \beta_1 \ln A + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln Dec + \beta_4 \ln Dd + \beta_5 \ln S + \beta_6 \ln P + \beta_7 \ln ET_o \quad (131)$$

$$\text{Recíproco: } Q = \beta_0 + \beta_1 A^{-1} + \beta_2 L^{-1} + \beta_3 Dec^{-1} + \beta_4 Dd^{-1} + \beta_5 S^{-1} + \beta_6 P^{-1} + \beta_7 ET_o^{-1} \quad (132)$$

Os melhores modelos resultantes da aplicação da regressão múltipla foram selecionados observando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 123) e de determinação ajustado ( $R^2_a$ ) (Equação 124), o erro padrão fatorial ( $\sigma F$ ) (Equação 125) e o número de variáveis independentes. A escolha do melhor modelo para caracterizar a regionalização das vazões mínimas se deu analisando os seguintes critérios coeficientes  $R^2$  e  $R^2_a$  maiores que 0,90 (BAZZO *et al.*, 2017) e valores do  $\sigma F$  menores que 1,0 (MACIEL *et al.*, 2019). As análises de regressão múltipla se deram utilizando o software IBM SPSS Statistics 20. Buscando comparar os valores de vazões mínimas observadas e estimadas pelos modelos determinou-se os erros percentuais (ER) (Equação 126) e os coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $CNS_{\log}$ ) (Equação 127).

### 3.2.7 Geração dos mapas de vazões mínimas

Para gerar os mapas das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  calculadas a partir das equações de regionalização, utilizou-se de base de dados da ANA (ANA, 2017). Foram adotadas as bacias hidrográficas ottocodificadas (ottobacias) nível cinco para apresentação das vazões mínimas calculadas na área de estudo, sendo utilizado o ArcGIS 10.6 para produção dos mapas. A escolha das ottobacias se deu devido à facilidade de integração com sistemas de informações geográficas.

Quanto à escala de detalhamento, estão disponíveis no site de metadados da ANA, ottobacias do nível um ao sete (ANA, 2017). Para apresentação dos resultados de vazões regionalizadas optou-se pelo nível cinco, visto que nos níveis seis e sete as bacias são pequenas, que acabam refletindo em super ou subestimação das vazões calculadas. Já no nível quatro ou inferiores, as bacias são muito grandes, não sendo possível separar as bacias localizadas em regiões hidrologicamente homogêneas diferentes.

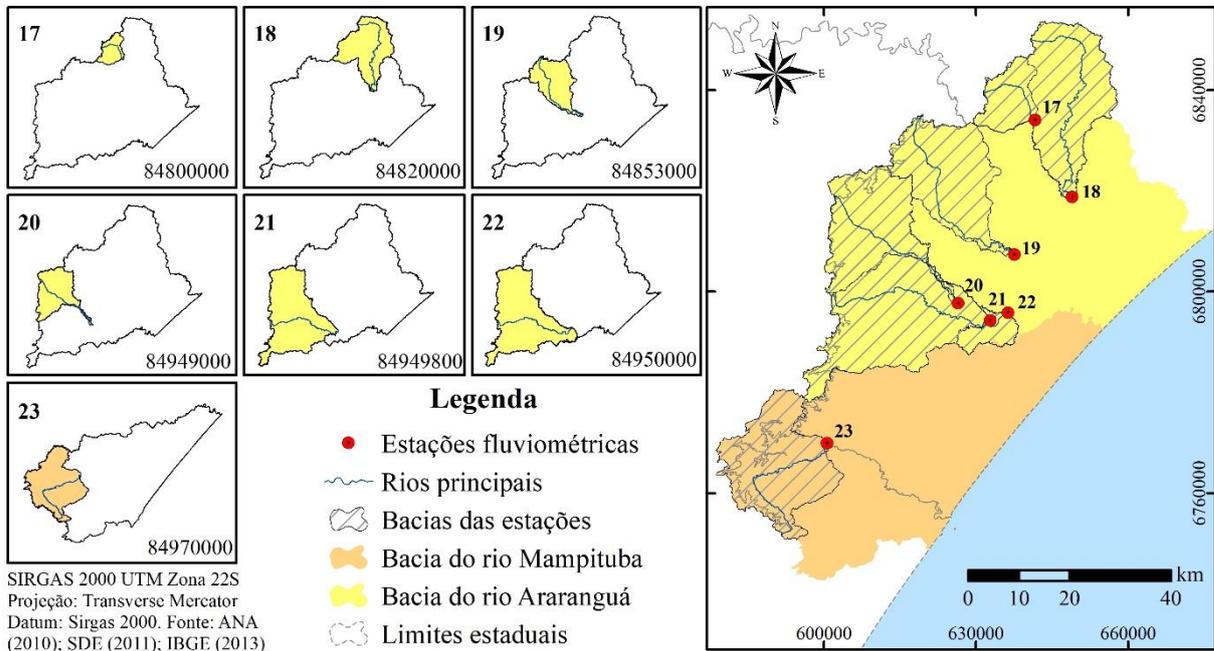
Com os resultados obtidos de vazões  $Q_{7;10}$  na área de estudo, comparou-se às informações disponíveis nos Planos de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas. O objetivo foi, além de comparar os valores obtidos, analisar o rigor dos estudos realizados para obtenção das equações de regressão em cada plano de bacia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

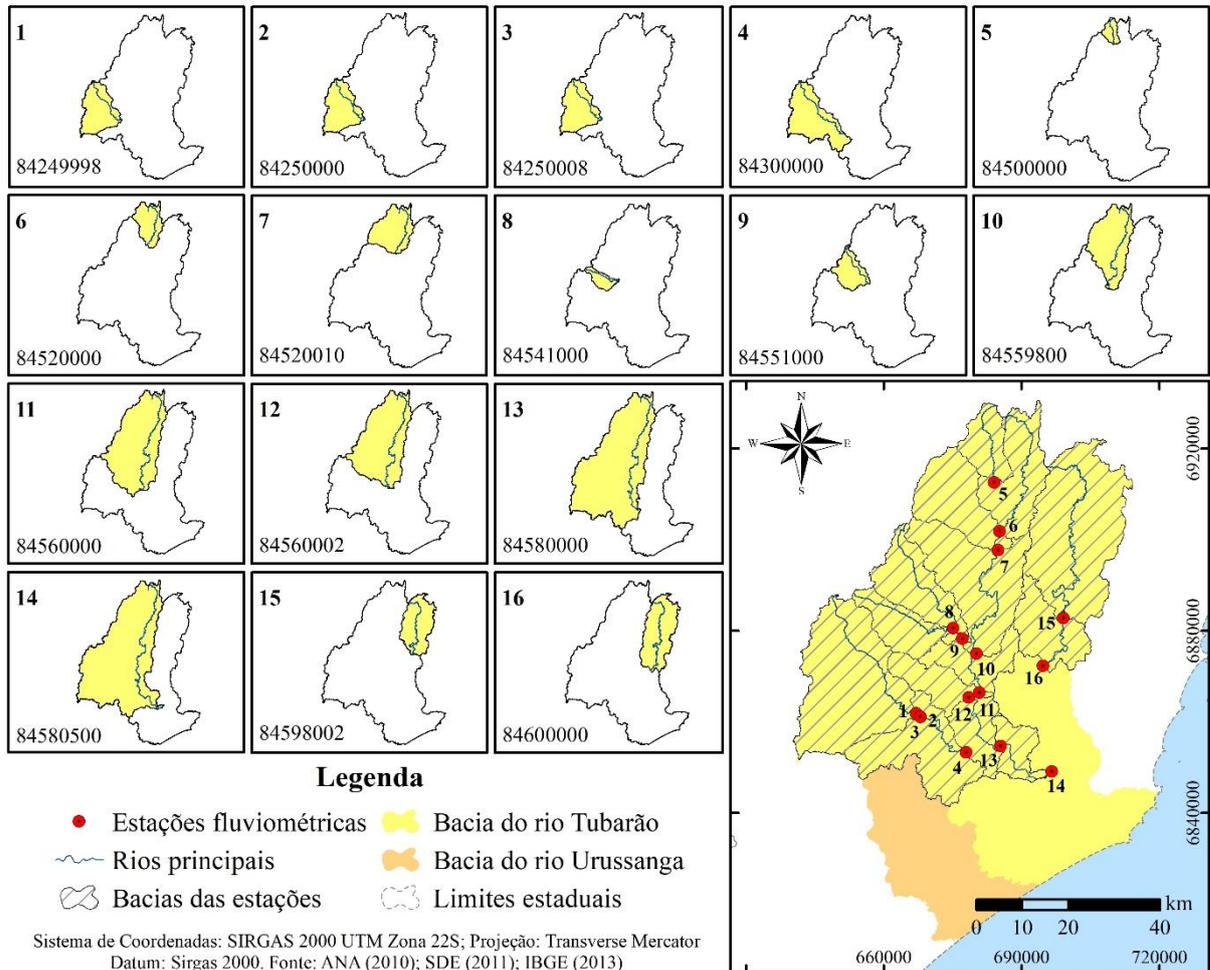
### 4.1 VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

As áreas de drenagem das bacias hidrográficas geradas para as estações fluviométricas estudadas variam de 117,75 km<sup>2</sup>, na estação Serrinha, localizada no rio São Bento, em Siderópolis (código 84800000) a 2.836,86 km<sup>2</sup>, na estação Tubarão, situada no rio Tubarão, no município de mesmo nome (código 84580500) (Tabela 7). Como pode ser observado nas Figuras 4 e 5, a estação Serrinha está localizada nas cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Araranguá, enquanto a estação Tubarão está localizada próxima a foz do rio Tubarão, o que justifica o fato de serem a menor e maior bacia hidrográfica da área de estudo. Na bacia do rio Tubarão, a estação Povoamento, localizada em Anitápolis (código 84500000), é a bacia de menor área de drenagem pelo mesmo motivo da estação Serrinha, essa se encontra próxima as cabeceiras da bacia hidrográfica.

**Figura 4** - Bacias hidrográficas geradas a partir das estações fluviométricas localizadas dentro das bacias hidrográficas do rio Araranguá e do rio Mampituba.



**Figura 5** - Bacias hidrográficas geradas a partir das estações fluviométricas localizadas dentro das bacias hidrográficas do rio Tubarão.



Em consequência de seu tamanho, as bacias hidrográficas 84580500 e 84800000, respectivamente, possuem o maior (154,38 km) e menor rio principal (16,68 km). Os resultados mostram que a área de drenagem e o comprimento do rio principal são diretamente relacionados. A média das áreas de drenagem das estações fluviométricas estudadas foi de 830,82 km<sup>2</sup>, com desvio padrão de 735,27 km<sup>2</sup>, indicando que as bacias hidrográficas variam bastante em tamanho. O mesmo comportamento é observado no comprimento do rio principal, em que a média é 64,88 km e desvio padrão 36,54 km.

As áreas de drenagem delimitadas para cada estação fluviométrica foram comparadas às disponibilizadas no site da ANA. Observou-se variações entre as duas estimativas. Esta diferença ocorre devido a resolução do MDT utilizado no estudo.

**Tabela 7** - Características físicas das bacias hidrográficas delimitadas tendo como exutório as estações fluviométricas estudadas.

<b>Bacia</b>	<b>Código</b>	<b>A (km<sup>2</sup>)</b>	<b>L (km)</b>	<b>Dec (%)</b>	<b>Dd (km/km<sup>2</sup>)</b>	<b>S (m/m)</b>
BHRT	84249998	596,87	43,79	32,80	2,408	38,50
	84250000	597,77	45,42	32,78	2,407	37,21
	84250008	597,77	45,42	32,78	2,407	37,21
	84300000	912,52	66,79	27,96	2,412	26,10
	84500000	123,19	24,77	29,88	3,243	27,34
	84520000	374,89	48,25	30,38	3,364	19,79
	84520010	624,53	53,84	29,82	3,469	19,22
	84541000	152,29	33,16	22,33	2,729	40,93
	84551000	379,72	39,67	24,75	3,014	38,11
	84559800	1.042,39	97,55	26,66	3,587	12,28
	84560000	1.690,58	115,28	24,82	3,326	10,60
	84560002	1.561,76	110,73	25,34	3,371	11,02
	84580000	2.736,97	135,73	25,79	2,990	9,25
	84580500	2.836,86	154,38	25,66	2,980	8,21
	84598002	619,66	78,91	27,66	3,799	11,11
84600000	811,34	97,77	26,37	3,656	9,17	
BHRA	84800000	117,75	16,68	55,90	1,866	75,42
	84820000	509,03	60,10	27,39	2,084	21,96
	84853000	353,34	47,84	32,29	2,353	27,57
	84949000	332,08	39,25	36,68	2,396	31,67
	84949800	843,89	46,09	26,01	2,070	24,19
	84950000	902,98	52,30	24,55	1,975	21,43
BHRM	84970000	390,59	38,62	31,29	1,467	24,31
<b>Média</b>		830,82	64,88	29,56	2,755	25,33
<b>Desvio Padrão</b>		735,27	36,54	6,74	0,652	15,26

A - área de drenagem; L - comprimento do rio principal; Dec - declividade média da bacia; Dd - densidade de drenagem; S - declividade do rio principal.

A densidade de drenagem variou de 1,467 a 3,799 km.km<sup>-2</sup>, sendo os menores valores encontrados na rede hidrográfica das estações fluviométricas das bacias dos rios Araranguá e Mampituba (1,467 a 2,396 km.km<sup>-2</sup>) e os maiores nas estações da bacia do rio Tubarão (2,407 a 3,799 km.km<sup>-2</sup>). Beltrame (1994) propôs uma classificação quanto aos valores de densidade de drenagem, a qual varia de baixa (valores menores que 0,5 km.km<sup>-2</sup>) a muito alta (valores maiores que 3,5 km.km<sup>-2</sup>). De acordo com a classificação desse autor, a densidade de drenagem das bacias hidrográficas localizadas na bacia do rio Tubarão é alta a muito alta, enquanto as situadas nas bacias dos rios Araranguá e Mampituba possuem densidade de drenagem mediana

a alta. De acordo com Back (2014), a densidade de drenagem é um indicativo do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem e está relacionada, principalmente, com as características climáticas, solo e litologia da bacia hidrográfica.

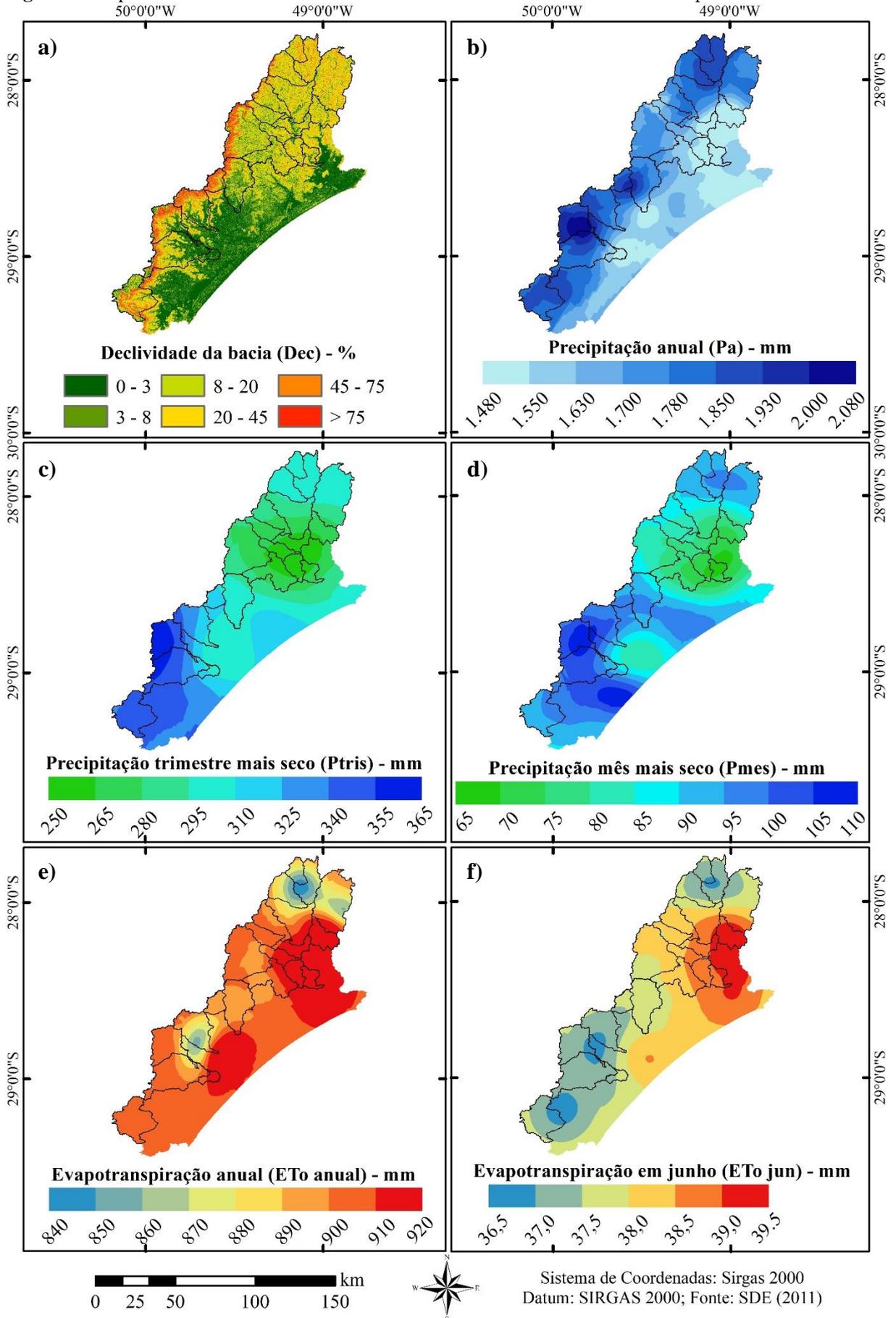
A declividade média da bacia e a declividade do rio principal são grandezas relacionadas com o relevo da bacia hidrográfica. Na Figura 6a é possível observar como é a declividade do terreno ao longo da área de estudo. Considerando a classificação proposta pela Embrapa (1979), nota-se que as bacias dos rios Araranguá, Mampituba e Urussanga possuem maior percentual de áreas planas a suavemente onduladas (0 a 8%) em relação a área total de cada bacia. Ainda é possível observar que as cabeceiras das bacias dos rios Araranguá e Mampituba e sudoeste da bacia do rio Tubarão, apresentam declividades mais acentuadas (20 a >75%) próximo as escarpas da Serra Geral, sendo o terreno classificado como fortemente ondulado a montanhoso (EMBRAPA, 1979). A bacia do rio Tubarão apresenta, segundo a classificação da Embrapa (1979), terreno de ondulado a montanhoso na maior parte da bacia (8 a 75%), sendo, portanto, mais declivoso que o restante da área de estudo.

A declividade média das bacias variou de 22,33% a 55,90%. Com exceção da bacia da estação Serrinha, a declividade média das bacias foi inferior a 37%. Quanto à declividade do rio principal, os valores variaram de 8,21 m.m<sup>-1</sup> a 75,42 m.m<sup>-1</sup>, sendo o maior valor também obtido na estação Serrinha. A maior declividade nesta bacia é devido a sua localização próxima as cabeceiras e a grande diferença de altitude entre a estação (114 m) e as nascentes (1.380 m).

Tão importante quanto as características físicas das bacias na descrição da área de estudo e, posteriormente, como parâmetro para determinação das áreas hidrologicamente homogêneas e para a regionalização de vazões, são as características climáticas (Figuras 6b a 6f). A precipitação média anual nas bacias hidrográficas varia de 1.669,4 mm, na estação Pedras Grandes (código 84300000) a 1.966,68 mm, na estação Turvo (código 84949000) (Tabela 8). A média geral das estações estudadas é de 1.791,5 mm, com desvio padrão de 86,3 mm. Gotardo *et al.* (2018) obteve resultados semelhante em estudo sobre os índices de precipitação em Santa Catarina, identificando maior precipitação na região do Extremo Sul (média de 1.955,9 mm) e menor índice de precipitação mensal na região Sul (média de 1.627,8 mm).

Como pode-se observar na Figura 6b, a precipitação ainda varia de acordo com as características do relevo e localização espacial, a precipitação média anual é maior nas áreas próximas as encostas da Serra Geral e diminui à medida que se aproxima do litoral. Gotardo *et al.* (2018) explicam que os altos índices pluviométricos das regiões litorâneas estão relacionados às condições geomorfológicas, as quais favorecem a ocorrência de chuvas orográficas.

**Figura 6** - Mapas da declividade do relevo e das características climáticas determinadas para a área de estudo.



O trimestre mais seco na região de estudo ocorre nos meses de junho, julho e agosto, que coincidem com o final do outono e inverno na região. A média geral da precipitação no trimestre foi de 302,0 mm e desvio padrão de 26,0 mm. A região onde estão situados os afluentes do rio Tubarão, como pode ser observado na Figura 6c, apresentam menores valores de precipitação no trimestre mais seco, com exceção da região norte da bacia, onde os índices de precipitação são maiores (Figuras 6b a 6d).

Os resultados das estações fluviométricas (Tabela 8) mostram valores variando de 305,21 a 356,34 mm nas bacias localizadas nos afluentes dos rios Araranguá e Mampituba, enquanto os menores valores foram identificados na bacia do rio Tubarão, variando de 274,37 a 304,46 mm. As bacias das estações Povoamento (84500000) e Divisa de Anitápolis (84520000) foram as únicas da bacia do rio Tubarão que apresentaram precipitação no trimestre mais seco superior ao intervalo mencionado (306,70 e 306,85 mm, respectivamente).

O mês mais seco foi junho em praticamente todas as estações pluviométricas selecionadas, sendo o menor valor de precipitação média identificado neste mês em 21 das 22 estações. A única estação pluviométrica em que junho não foi o mais seco foi a estação Meleiro (código 02849005). Nesta estação o mês mais seco foi julho, variando em 3 mm do mês de junho. A média geral no mês mais seco foi 90,2 mm, com desvio padrão de 6,95 mm. Assim como na precipitação no trimestre mais seco, os menores valores foram identificados na bacia do rio Tubarão, variando de 80,7 a 93,9 mm, enquanto os maiores valores foram identificados nas bacias localizadas nos afluentes dos rios Araranguá e Mampituba, variando de 94,9 a 104,1 mm. As estações Forquilha e Praia Grande foram as únicas da bacia do rio Araranguá e rio Mampituba que apresentaram valores inferior ao intervalo mencionado, com precipitação no mês mais seco de 92,8 mm e 93,9 mm, respectivamente.

Quanto aos resultados de evapotranspiração, pode-se observar nas Figuras 6e e 6f que tanto evapotranspiração anual quanto no mês de junho é maior nas áreas próximas ao oceano e menor nas áreas próximas a Serra Geral. Comportamento semelhante ao observado na precipitação anual. A evapotranspiração anual variou de 866,4 mm na estação localizada em Anitápolis (código 84520000) a 903,6 mm em Praia Grande (código 84970000), sendo a média geral das bacias 892,42 mm e desvio padrão 11,8 mm. Já para a evapotranspiração no mês mais seco (junho) variou pouco (37,20 a 38,27 mm) ao longo da área de estudo, como pode ser observado na figura 6f, sendo a média geral 37,73 mm e desvio padrão 0,40 mm.

**Tabela 8** - Características climáticas das bacias hidrográficas.

<b>Bacia</b>	<b>Código</b>	<b>P<sub>anual</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>P<sub>ts</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>P<sub>mês</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>Eto<sub>anual</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>Eto<sub>jun</sub></b> <b>(mm)</b>
BHRT	84249998	1.700,0	278,5	83,1	901,5	38,0
	84250000	1.699,8	278,4	83,1	901,5	38,0
	84250008	1.699,8	278,4	83,1	901,5	38,0
	84300000	1.669,4	275,9	80,7	903,1	38,1
	84500000	1.889,5	306,7	93,0	868,9	37,2
	84520000	1.893,9	306,8	93,9	866,4	37,2
	84520010	1.873,2	304,5	93,1	868,3	37,3
	84541000	1.698,9	274,4	82,9	901,9	38,2
	84551000	1.727,6	278,1	84,3	901,3	38,2
	84559800	1.825,5	295,8	89,3	880,1	37,7
	84560000	1.764,0	286,4	86,3	890,3	38,0
	84560002	1.777,2	288,6	87,0	888,4	37,9
	84580000	1.720,2	281,5	83,8	895,9	38,1
	84580500	1.713,7	281,0	83,3	896,8	38,1
	84598002	1.754,8	297,9	91,0	885,2	37,9
84600000	1.694,2	291,5	87,2	893,8	38,3	
BHRA	84800000	1.881,6	314,2	94,9	897,4	37,6
	84820000	1.807,2	305,2	92,8	899,4	37,7
	84853000	1.833,6	326,2	99,1	882,2	37,2
	84949000	1.966,7	356,3	104,1	899,1	37,3
	84949800	1.891,0	348,6	102,0	899,1	37,2
	84950000	1.867,0	346,0	101,3	900,0	37,2
BHRM	84970000	1.854,8	345,5	93,9	903,6	37,3
<b>Média</b>		1.791,5	302,0	90,2	892,4	37,7
<b>Desvio Padrão</b>		86,3	26,0	7,0	11,8	0,4

P<sub>anual</sub> - precipitação anual; P<sub>ts</sub> - precipitação do trimestre mais seco; P<sub>mês</sub> - precipitação no mês mais seco; ETo<sub>anual</sub> - evapotranspiração anual; ETo<sub>jun</sub> evapotranspiração em junho.

Como foi observado nos resultados das estações fluviométricas apresentados anteriormente, a área da bacia e comprimento e declividade do rio principal estão mais relacionados com a distância entre a nascente e a estação. Enquanto a evapotranspiração e a precipitação anual estão relacionadas à localização espacial, em que varia de acordo com sua proximidade em relação ao oceano ou à região montanhosa. Desta forma, estes parâmetros não possibilitam a definição das regiões potencialmente homogêneas. Por outro lado, a precipitação no trimestre e mês mais seco, a densidade de drenagem e a declividade da bacia foram os parâmetros que apresentaram um padrão de distribuição geográfica, alterando de uma bacia hidrográfica para outra.

Com o intuito de facilitar a definição das regiões hidrologicamente homogêneas foram determinados os índices físicos e climáticos das quatro bacias hidrográficas do sul de Santa Catarina e litoral nordeste do Rio Grande do Sul (Tabela 9). A necessidade surgiu pelo fato da bacia do rio Urussanga não possuir estações fluviométricas para servir de parâmetro na definição da região homogênea a qual pertence.

**Tabela 9** - Características físicas e climáticas das bacias hidrográficas dos rios Araranguá (BHRA), Mampituba (BHRM), Tubarão (BHRT) e Urussanga (BHRU).

<b>Bacia</b>	<b>A</b> <b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>L</b> <b>(km)</b>	<b>Dec</b> <b>(%)</b>	<b>Dd</b> <b>(km/km<sup>2</sup>)</b>	<b>S</b> <b>(m/m)</b>	<b>P<sub>anual</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>P<sub>ts</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>P<sub>mês</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>ET<sub>o</sub>anual</b> <b>(mm)</b>	<b>ET<sub>o</sub>jun</b> <b>(mm)</b>
BHRA	3.089	126,8	18,3	1,738	10,62	1.751,20	320,95	95,23	900,54	37,60
BHRM	1.920	100,5	14,0	1,042	9,83	1.726,46	337,49	93,90	903,58	37,27
BHRT	4.735	152,0	22,4	2,786	6,05	1.668,69	283,91	97,10	904,86	37,41
BHRU	680	60,2	9,3	1,671	8,31	1.610,47	304,53	83,11	901,49	38,03

Comparando os resultados de Dd da bacia nas Tabelas 7 e 9, pode-se observar que a bacia do rio Urussanga apresenta comportamento semelhante às bacias dos rios Araranguá e Mampituba. As três bacias possuem Dd mediana a alta, enquanto na bacia do rio Tubarão é classificada como alta a muito alta. Quanto à declividade da bacia, conforme já mencionado, a BHRU, assim como as bacias dos rios Araranguá e Mampituba, possuem maior percentual da área total com terrenos planos a suavemente ondulados em comparação a bacia do rio Tubarão.

Ao analisar as características precipitação no trimestre e mês mais secos, nota-se que os resultados obtidos para a bacia do rio Urussanga se encontram próximos aos maiores valores da bacia do rio Tubarão e aos menores valores das bacias dos rios Araranguá e Mampituba. Observando as Figuras 6c e 6d, pode-se perceber que os maiores índices de precipitação foram obtidos na região norte da BHRU, que faz divisa com a bacia da estação Pedras Grandes (código 84300000), localizada na BHRT, enquanto o restante da bacia se assemelha com a BHRA.

#### 4.2 VAZÕES MÉDIAS MÍNIMAS ANUAIS

As séries históricas variaram de 13 a 77 anos, sendo a maior parte das séries inferiores a 50 anos (74%). Pode-se observar que as vazões mínimas anuais em sete e 30 dias na área de estudo variam bastante. A menor  $Q_7$  observada é igual a  $0,496 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na estação Foz do Manuel Alves (código 84853000) e a maior  $41,187 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na estação Tubarão (código 84580500). O desvio padrão médio da  $Q_7$  foi de  $2,425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , variando de  $0,294$  a  $9,860 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Quanto a  $Q_{30}$ , a vazão média variou de  $0,960 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na estação Serrinha (código 84800000) a  $51,473 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na

estação Tubarão (código 84580500). O desvio padrão médio da  $Q_{30}$  foi  $3,127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , indo de  $0,547$  a  $12,789 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  nos postos fluviométricos estudados (Tabela 10).

Os coeficientes de assimetria das séries  $Q_7$  variaram de  $-0,046$  na estação Tubarão (84580500) a  $2,402$  na estação Foz do Manuel Alves (84853000), enquanto na série  $Q_{30}$  variaram de  $0,075$  na estação São Ludgero II (84560002) a  $1,871$  na estação Serrinha - Casan (848000000). De acordo com Petrucci e Oliveira (2017), a assimetria é considerada fraca quando:  $0 < |AS| < 0,15$ ; moderada:  $0,15 < |AS| < 1$ ; e forte se:  $|AS| > 1$ . Como pode-se observar na Tabela 10, ambas as séries de vazão ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ ) apresentam apenas uma série com assimetria fraca. A maior parte (65% das  $Q_7$  e 61% das  $Q_{30}$ ) apresentam assimetria moderada.

**Tabela 10** - Resumo das estatísticas descritivas das vazões médias mínimas anuais em 7 e 30 dias consecutivos,  $Q_7$  e  $Q_{30}$ , respectivamente, das 23 estações fluviométricas estudadas, sendo apresentados o tamanho da série de dados (N), média, desvio padrão e assimetria (assim.).

Código	Nome da Estação	Série de $Q_7$				Série de $Q_{30}$			
		N	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio padrão	Assim.	N	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio padrão	Assim.
84249998	Orleans - montante	36	3,681	1,128	0,683	36	4,701	1,570	1,076
84250000	Orleans II	29	2,837	1,524	1,880	28	3,757	1,758	1,248
84250008	Orleans I	13	1,916	1,430	1,312	13	2,938	1,635	1,165
84300000	Pedras Grandes	33	5,659	1,545	0,391	33	7,382	2,259	0,271
84500000	Povoamento	24	1,757	0,766	0,967	24	2,148	0,886	0,908
84520000	Divisa de Anitápolis	72	4,828	1,413	0,783	73	5,657	1,666	0,782
84520010	Sta. Rosa de Lima	32	7,675	2,295	0,974	32	9,380	2,834	0,529
84541000	Grão Pará	21	1,097	0,460	0,458	21	1,397	0,547	0,337
84551000	Rio Pequeno	75	2,908	1,606	1,084	76	3,807	2,066	1,248
84559800	Braço do Norte	32	12,016	3,261	0,164	32	14,787	4,309	0,806
84560000	São Ludgero I	44	13,686	5,647	0,245	44	17,242	7,127	0,358
84560002	São Ludgero II	32	12,010	3,270	0,155	30	12,251	3,219	0,075
84580000	Rio do Pouso	77	20,445	8,789	0,704	77	25,240	10,320	0,706
84580500	Tubarão	22	41,187	9,860	-0,046	22	51,473	12,789	0,309
84598002	São Martinho	37	8,205	2,392	0,407	37	9,531	3,067	0,740
84600000	Armazém Capivari	74	9,345	3,401	0,579	75	10,945	4,063	0,855
84800000	Serrinha - Casan	28	0,586	0,294	0,282	28	0,960	0,632	1,871
84820000	Forquilha	55	1,747	0,978	0,767	56	1,716	0,997	0,707
84853000	F. Manuel Alves	36	0,496	0,609	2,402	36	1,582	1,457	1,597
84949000	Turvo	33	0,765	0,625	1,068	31	1,869	1,151	1,265
84949800	Ermo	35	2,763	1,500	1,597	34	4,768	2,319	0,896
84950000	Taquaruçu	63	3,389	2,232	1,067	63	6,049	3,859	0,905
84970000	Praia Grande	22	1,305	0,739	0,936	22	2,137	1,401	1,488

Pode-se observar que a  $Q_7$  da estação Tubarão foi a única que apresentou assimetria negativa (assimetria à direita). Quando a assimetria é negativa, há maiores ocorrências de valores acima da média. Todas as demais séries de vazões possuem assimetria positiva. Quando a assimetria é positiva (ou à esquerda), há maior ocorrência de valores abaixo da média. Os valores acima da média, no caso das distribuições com assimetria positiva, (ou abaixo, no caso de assimetria negativa) são de pouca ocorrência, mas influenciam diretamente no valor da média da distribuição e por isso deve ser dada atenção a esses valores (PETRUCCI; OLIVEIRA, 2017).

#### 4.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Em posse das vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$ , ajustou-se as distribuições de probabilidade Gumbel, Log-Normal de dois parâmetros e três parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III e Weibull de dois parâmetros e de três parâmetros com seus respectivos métodos de estimativa de parâmetros. Obteve-se total de 23 distribuições ajustadas, considerando que foram selecionadas para estudo 23 estações fluviométricas, totalizaram 529 distribuições de probabilidade testadas para cada vazão ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ ).

Constatou-se que o teste de Anderson-Darling foi o mais restritivo ao ajuste das distribuições, rejeitando 184 distribuições  $Q_7$  e 166 distribuições  $Q_{30}$ , representando em média 33% do total testado (Tabela 11). O teste de Filliben rejeitou aproximadamente 25% das distribuições e o Kolgomorov-Smirnov rejeitou cerca de 16%, sendo, portanto, o menos rigoroso. Estudos realizados por Abreu *et al.* (2018) e Finkler *et al.* (2015) apresentam resultados semelhantes, mostrando os testes AD e Rf como mais restritivos em relação ao KS.

As distribuições Log-Normal três parâmetros pelo MM, MML e MMV, Log-Pearson Tipo III pelo MM e MMV e Weibull três parâmetros pelo MM e MML que obtiveram menos de 10% de rejeições por teste de aderência nas duas séries de vazões ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ ). As distribuições Log-Normal 3 parâmetros - MML e Weibull três parâmetros - MML foram as únicas distribuições que não foram rejeitadas por nenhum teste de aderência.

Vale mencionar que, estatisticamente, não foi possível ajustar os parâmetros de 52 séries de vazões  $Q_7$  e 40 séries de  $Q_{30}$ . Estas distribuições foram incluídas nas rejeições dos testes de aderência, sendo apresentadas como rejeitadas por todos os testes. As distribuições que, em alguns casos, não foi possível obter os parâmetros foram todas distribuições que possuem três parâmetros. A distribuição que apresentou maior número de problemas no ajuste dos parâmetros foi a Log-Pearson Tipo III - MMV, com 20 e 17 séries  $Q_7$  e  $Q_{30}$  não ajustadas, respectivamente.

Na Tabela 11 ainda é possível verificar que a distribuição de Gumbel (mínimos), apresentou as piores estatísticas nos testes de AD e Rf, sendo rejeitada em praticamente todas as séries de vazões (19 a 22 rejeições de um total de 23 séries). Outros estudos também concluíram que a distribuição de Gumbel não foi adequada para ajuste teórico das vazões mínimas (FINKLER *et al.*, 2015; BARROS *et al.*, 2018; BACK; ZAMBRANO; CORSEUIL, 2019). No estudo de regionalização de vazões de Santa Catarina (SADR, 2006), as vazões  $Q_{7;10}$  foram estimadas com a distribuição de Gumbel. Entretanto, como pode-se verificar nesse estudo, esta distribuição não se mostrou adequada para a região sul de Santa Catarina.

**Tabela 11** - Número de distribuições das séries de  $Q_7$  e  $Q_{30}$  rejeitadas por cada teste de aderência: KS - Kolmogorov-Smirnov; AD - Anderson-Darling; Rf - Filliben.

Distribuição	Série de $Q_7$			Série de $Q_{30}$		
	KS	AD	Rf	KS	AD	Rf
Gumbel Mínimos - MM (GB-MM)	4	22	19	6	22	20
Gumbel Mínimos - MML (GB-MML)	4	20	19	6	22	20
Gumbel Mínimos - Chow (GB-MCH)	5	20	19	4	20	20
Log-Normal 2 parâmetros - MM (LN2-MM)	1	4	6	1	2	4
Log-Normal 2 parâmetros - MMV (LN2-MMV)	1	4	6	1	2	2
Log-Normal 2 parâmetros - MML (LN2-MML)	1	5	3	0	3	2
Log-Normal 3 parâmetros - MM (LN3-MM)	1	1	1	2	2	2
Log-Normal 3 parâmetros - MMV (LN3-MMV)	0	0	0	1	1	1
Log-Normal 3 parâmetros - MML (LN3-MML)	0	3	0	0	1	0
Log-Pearson Tipo III - MM (LPIII-MM)	2	3	4	0	0	1
Log-Pearson Tipo III - MM2 (LPIII-MM2)	1	1	4	0	0	1
Log-Pearson Tipo III - MMV (LPIII-MMV)	20	20	20	17	18	17
Log-Pearson Tipo III - MML (LPIII-MML)	10	12	10	7	8	7
Pearson Tipo III - MM (PIII-MM)	5	9	7	7	7	6
Pearson Tipo III - MMV (PIII-MMV)	1	1	0	1	3	0
Pearson Tipo III - MML (PIII-MML)	2	3	4	1	1	3
Weibull 2 parâmetros - MM (WB2-MM)	0	2	1	0	5	2
Weibull 2 parâmetros - MM2 (WB2-MM2)	4	13	0	6	17	0
Weibull 2 parâmetros - MMV (WB2-MMV)	1	3	2	0	5	1
Weibull 2 parâmetros - MML (WB2-MML)	0	3	1	0	5	2
Weibull 3 parâmetros - MM (WB3-MM)	6	7	6	3	3	3
Weibull 3 parâmetros - MM2 (WB3-MM2)	19	20	6	12	15	3
Weibull 3 parâmetros - MML (WB3-MML)	8	8	8	4	4	4
Total	96	184	146	79	166	121

Nos ranqueamentos das distribuições (Tabelas 12 e 13) pode-se observar as distribuições classificadas de primeira a quinta colocada como melhor ajuste aos dados de vazões estão destacadas em cores diferentes. Para as três primeiras colocadas encontra-se gradiente de verde (mais escuro é a melhor) e em amarelo as quartas e quintas colocadas. Embora foi selecionada apenas a melhor distribuição para ajuste das vazões mínimas com período de retorno de 10 anos, é importante ressaltar que outras distribuições aceitas pelos testes de aderência também podem ser utilizadas na estimativa de vazões mínimas teóricas.

É possível notar na Tabela 12, que as distribuições Gumbel pelos três métodos de estimativa e Log-Pearson Tipo III pelo MMV são as únicas que não foram classificadas em nenhuma estação como uma das cinco primeiras colocadas no ajuste das vazões  $Q_7$ . Enquanto para as vazões  $Q_{30}$  as únicas foram as distribuições Gumbel pelos três métodos de estimativa e Weibull pelo MM2 (Tabela 13). Nota-se ainda que a distribuição que melhor se ajustou variou bastante entre as estações e entre as duas vazões mínimas. Sendo, porém, visível a maior adesão das séries de dados as distribuições Weibull com 3 parâmetros - MM e MML. Séries de dados com forte assimetria ( $AS > 1,0$ ) se ajustaram melhor a distribuição Weibull a 3 parâmetros.

**Tabela 12** - Ranqueamento utilizando os testes e critérios de seleção para escolha das melhores distribuições de probabilidade ajustada as vazões mínimas  $Q_7$  de cada estação fluviométrica estudada.

Distribuição \ Código	84249998	84250000	84250008	84300000	84500000	84520000	84520010	84541000	84551000	84559800	84560000	84560002	84580000	84580500	84598002	84600000	84800000	84820000	84853000	84949000	84949800	84950000	84970000
GB-MCH	23	20	23	22	23	22	24	21	20	19	22	20	22	16	21	23	15	23	21	17	19	21	21
GB-MML	22	18	22	21	22	21	23	21	19	21	22	21	21	14	21	22	17	22	19	15	16	20	20
GB-MM	21	19	21	20	21	20	22	20	18	23	21	23	20	15	20	21	14	21	20	14	18	19	19
LN2-MML	5	1	7	9	4	1	8	11	6	15	20	15	11	13	4	11	17	16	11	21	9	15	10
LN2-MM	6	4	1	9	8	4	9	4	9	15	18	15	9	11	7	12	19	17	16	18	4	17	5
LN2-MMV	10	10	5	12	9	9	13	6	7	17	18	17	10	12	11	12	20	18	15	16	8	18	9
LN3-MML	4	2	6	4	6	7	4	8	2	4	11	4	4	20	6	2	4	13	6	3	4	2	4
LN3-MM	11	3	18	6	14	12	6	16	10	7	12	7	8	20	8	8	6	15	13	5	3	5	12
LN3-MMV	14	5	4	7	11	3	3	2	1	8	14	9	3	20	13	6	7	11	7	20	6	4	7
LPIII-MML	24	21	3	23	2	23	7	15	12	18	17	18	16	18	23	17	21	19	22	22	7	22	22
LPIII-MM	9	6	11	13	10	5	12	18	11	11	8	11	12	9	12	10	21	12	22	12	2	13	14
LPIII-MM2	8	8	1	11	5	2	9	10	7	14	6	14	6	9	8	9	13	10	12	22	1	14	8
LPIII-MMV	12	22	24	24	24	6	13	23	21	24	24	24	23	20	24	24	21	24	22	22	20	22	23
PIII-MML	3	6	9	3	1	11	2	4	4	3	9	3	2	17	3	1	3	8	8	2	10	1	1
PIII-MM	7	11	15	5	12	10	1	12	5	5	10	5	6	7	5	5	5	13	9	5	14	3	6
PIII-MMV	13	15	19	8	13	8	5	23	3	13	16	13	1	20	10	3	21	7	17	10	20	22	23
WB2-MML	18	12	16	16	17	16	19	9	14	6	2	6	14	3	15	16	10	5	1	9	11	10	11
WB2-MM	17	14	14	17	15	14	17	13	13	9	1	8	13	4	18	14	9	6	3	4	12	8	12
WB2-MM2	19	17	16	18	18	19	21	7	16	20	7	19	18	8	16	18	12	4	5	8	17	6	15
WB2-MMV	15	13	13	15	16	14	18	14	15	12	4	12	14	6	16	15	11	9	1	18	12	8	17
WB3-MML	1	9	7	1	3	24	9	1	21	1	3	1	23	1	1	7	1	1	4	1	20	11	2
WB3-MM	2	22	12	2	6	13	15	2	21	2	4	2	4	1	2	3	2	2	10	7	20	6	3
WB3-MM2	20	22	10	19	19	18	20	17	21	22	15	22	17	19	19	19	16	3	14	11	20	12	16

**Tabela 13** - Ranqueamento utilizando os testes e critérios de seleção para escolha das melhores distribuições de probabilidade ajustada as vazões mínimas  $Q_{30}$  de cada estação fluviométrica estudada.

Distribuição \ Código	84249998	84250000	84250008	84300000	84500000	84520000	84520010	84541000	84551000	84559800	84560000	84560002	84580000	84580500	84598002	84600000	84800000	84820000	84853000	84949000	84949800	84950000	84970000
GB-MCH	21	21	22	23	21	20	23	21	20	23	23	20	20	21	22	21	19	20	20	19	21	22	21
GB-MML	20	19	21	22	21	19	22	23	18	22	22	21	22	23	24	20	17	19	18	18	21	20	19
GB-MM	19	18	22	21	20	18	21	22	19	21	21	22	21	22	22	19	18	19	17	20	20	20	20
LN2-MML	13	10	4	10	5	2	10	17	7	11	20	18	10	8	9	5	9	16	15	6	7	19	1
LN2-MM	10	8	4	7	6	1	10	10	11	4	19	13	12	11	10	6	5	22	16	8	4	17	3
LN2-MMV	12	8	4	13	10	4	13	16	7	12	18	15	11	13	12	3	7	21	13	8	6	17	9
LN3-MML	2	6	8	5	4	8	4	4	2	2	10	3	4	4	7	11	6	6	7	2	3	9	5
LN3-MM	7	4	13	11	11	9	7	13	10	5	13	8	7	6	15	8	3	10	13	8	12	10	12
LN3-MMV	1	3	1	4	13	6	5	6	1	2	14	5	3	7	10	2	4	23	10	1	13	13	7
LPIII-MML	3	13	3	12	23	21	14	20	12	8	17	19	14	15	5	22	8	14	21	11	23	23	22
LPIII-MM	9	2	7	16	7	6	12	18	6	7	12	10	9	8	14	12	2	11	21	5	10	14	4
LPIII-MM2	6	1	2	7	9	2	9	13	7	1	10	14	8	8	4	9	1	8	8	6	8	15	1
LPIII-MMV	11	22	20	24	24	4	24	24	21	24	24	17	23	24	8	22	20	24	21	20	11	23	23
PIII-MML	7	7	10	3	3	12	3	3	5	6	8	24	2	3	1	7	10	3	1	4	2	7	6
PIII-MM	5	11	12	7	8	10	6	9	3	8	9	6	6	5	13	3	11	7	11	3	8	8	11
PIII-MMV	4	12	9	6	12	11	7	10	4	8	16	12	1	14	5	1	20	17	21	20	24	11	23
WB2-MML	14	14	15	14	15	15	17	5	13	18	3	4	16	16	19	13	11	4	5	13	15	2	13
WB2-MM	14	16	14	15	14	16	18	7	15	17	5	7	13	18	18	14	14	4	3	13	14	1	14
WB2-MM2	18	19	18	19	17	17	19	10	16	20	4	15	17	19	19	17	15	9	6	15	17	3	17
WB2-MMV	16	15	16	17	15	13	16	8	14	16	6	10	14	17	17	14	13	13	4	12	16	3	15
WB3-MML	22	5	24	1	1	22	2	1	21	13	1	1	23	1	2	22	20	1	2	20	1	6	10
WB3-MM	22	22	11	2	2	22	1	2	21	14	2	2	5	2	3	9	20	2	9	20	4	5	8
WB3-MM2	22	22	17	20	18	22	20	15	21	19	7	23	18	20	16	16	20	12	12	20	18	11	16

Os parâmetros das distribuições de probabilidade selecionadas pelo método do ranqueamento para a estimativa das vazões  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  para cada estação fluviométrica estudada são apresentados nas Tabelas 14 e 15.

**Tabela 14** – Parâmetros das distribuições de probabilidade selecionada para estimativa da vazão mínima anual  $Q_{7;10}$  para cada série de dados das estações fluviométricas e respectivos erros padrões da estimativa (RMSE) e D-index.

<b>Código</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Parâmetro Forma</b>	<b>Parâmetro Escala</b>	<b>Parâmetro Posição</b>	<b>RMSE</b>	<b>D-index</b>
84249998	WB3 - MML	1,7993	2,2483	1,6814	0,1102	0,0591
84250000	LN2 - MML	-	0,9163	0,5028	0,3868	0,1825
84250008	LPIII - MM2	175,5325	0,0544	-9,1431	0,2165	0,2165
84300000	WB3 - MML	2,1503	3,6362	2,4385	0,2523	0,1067
84500000	PIII - MML	2,0207	0,5638	0,6174	0,1171	0,1558
84520000	LN2 - MML	-	1,5323	0,2903	0,1417	0,0983
84520010	PIII - MM	4,2192	1,1174	2,9608	0,3393	0,0780
84541000	WB3 - MML	1,9001	0,9739	0,2328	0,0997	0,2259
84551000	LN3 - MMV	-0,4339	1,0983	0,4713	0,1500	0,1175
84559800	WB3 - MML	2,8419	9,8548	3,2359	0,3352	0,2246
84560000	WB2 - MM	15,4081	2,6038	-	0,5955	0,3756
84560002	WB3 - MML	2,8808	9,9993	3,0959	0,3337	0,2246
84580000	PIII - MMV	4,7982	4,0257	1,1292	0,7642	0,1709
84580500	WB3 - MML	4,248	41,7714	3,1944	1,2784	0,1508
84598002	WB3 - MML	2,0212	5,3357	3,4770	0,4168	0,1161
84600000	PIII - MML	6,7388	1,3344	0,3532	0,3456	0,1355
84800000	WB3 - MML	2,6414	0,8243	-0,1469	0,0369	0,3265
84820000	WB3 - MML	1,6735	1,8157	0,1249	0,0962	0,2548
84853000	WB2 - MMV	0,4413	0,8058	-	0,1115	0,1363
84949000	PIII - MML	6,8687	0,2337	-0,8408	0,1525	0,8815
84949800	LN2 - MM	-	0,8837	0,5325	0,2482	0,2032
84950000	PIII - MML	3,2782	1,2338	-0,6559	0,3053	0,1863
84970000	PIII - MML	1,8434	0,5743	0,2461	0,1280	0,1627

Para ambas as vazões, o RMSE foi superior a  $1,0 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  apenas na estação Tubarão (código 84580500). As demais variaram de  $0,0369 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (estação Serrinha) a  $0,7642 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (estação Rio do Pouso) para as distribuições ajustadas às séries  $Q_7$ , e de  $0,0738 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (estação Turvo) a  $0,8647 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (estação São Ludgero I) para as distribuições das vazões  $Q_{30}$ . Quanto aos D-index, para as distribuições  $Q_7$  os valores foram inferiores a  $0,90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , enquanto as distribuições  $Q_{30}$  apresentaram valores menores que  $0,40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Estes resultados indicam bom desempenho dos modelos de distribuição selecionados para cada estação.

**Tabela 15** – Parâmetros das distribuições de probabilidade selecionada para estimativa da vazão mínima anual  $Q_{30;10}$  para cada série de dados das estações fluviométricas e respectivos erros padrões da estimativa (RMSE) e D-index.

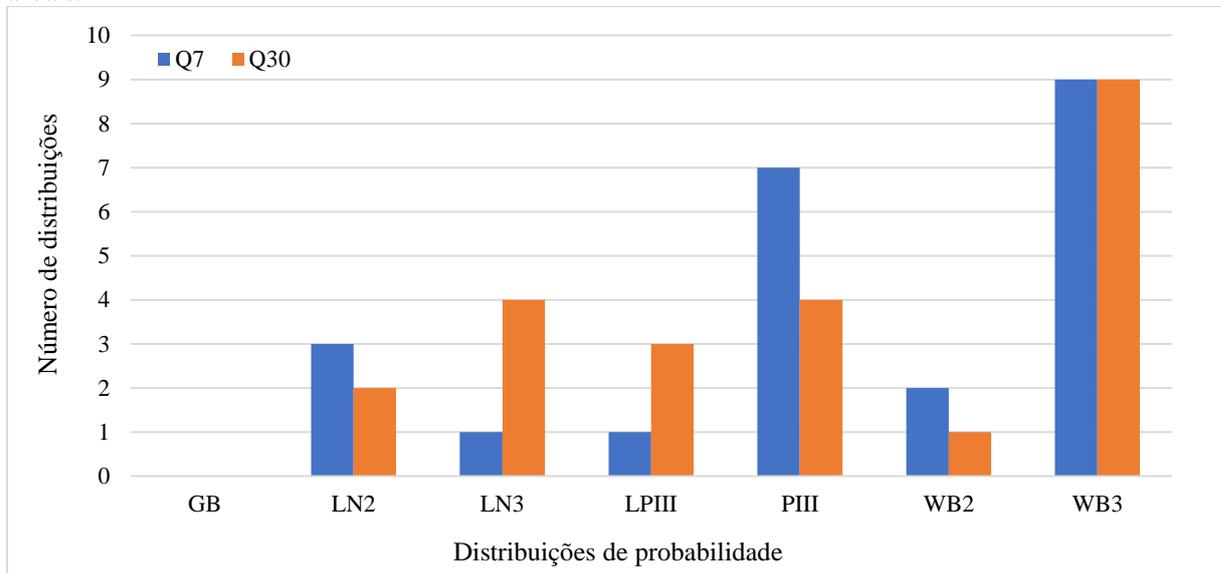
<b>Código</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Parâmetro Forma</b>	<b>Parâmetro Escala</b>	<b>Parâmetro Posição</b>	<b>RMSE</b>	<b>D-index</b>
84249998	LN3 - MMV	0,9581	1,2385	0,4103	0,1993	0,1250
84250000	LPIII - MM2	85,4484	-0,051	5,5789	0,3778	0,2122
84250008	LN3 - MMV	0,4392	0,7297	0,6402	0,4018	0,3958
84300000	WB3 - MML	2,3050	5,6854	2,3452	0,3558	0,1037
84500000	WB3 - MML	1,4971	1,4701	0,8202	0,1760	0,1397
84520000	LN2 - MM	-	1,6913	0,2911	0,1854	0,1623
84520010	WB3 - MM	2,1649	6,5734	3,5585	0,3605	0,0608
84541000	WB3 - MML	2,0945	1,2747	0,2679	0,0881	0,2194
84551000	LN3 - MMV	-0,5793	1,3768	0,4550	0,1390	0,1225
84559800	LPIII - MM2	280,8871	-0,0173	7,5193	0,6529	0,1946
84560000	WB3 - MML	2,4600	18,7737	0,5907	0,8647	0,3243
84560002	WB3 - MML	3,2593	10,9341	2,4489	0,2912	0,1748
84580000	PIII - MMV	4,9999	4,6407	2,0368	0,8264	0,1369
84580500	WB3 - MML	2,4482	33,9323	21,3805	1,6937	0,1826
84598002	PIII - MML	2,7904	1,9141	4,1893	0,5077	0,1054
84600000	PIII - MMV	4,2084	1,9803	2,6113	0,4511	0,1493
84800000	LPIII - MM2	29,6449	-0,1175	3,2561	0,1456	0,1576
84820000	WB3 - MML	1,7640	1,9413	-0,0126	0,0969	0,3324
84853000	PIII - MML	1,0369	1,4807	0,0466	0,1895	0,1717
84949000	LN3 - MMV	-0,3786	0,6913	0,4978	0,0738	0,2097
84949800	WB3 - MML	1,4018	3,6413	1,4500	0,2976	0,0988
84950000	WB2 - MM	6,7485	1,6052	-	0,3971	0,1354
84970000	LN2 - MML	-	0,5523	0,6432	0,2128	0,1345

Vale ressaltar que a distribuição de probabilidade selecionada por meio do ranqueamento para  $Q_7$  da estação fluviométrica Turvo (código 84949000) foi a Weibull estimada pelo MML. No entanto, ao avaliar o erro padrão de estimativa, observou-se valor elevado em relação aos demais ( $9,4312 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), podendo, portanto, prejudicar a qualidade do ajuste da equação. Ao estimar a vazão  $Q_{7;10}$  utilizando esta distribuição, obteve-se uma vazão negativa. Sendo assim, optou-se por adotar a distribuição de probabilidade que ficou em segundo lugar no ranqueamento, sendo esta, a Pearson Tipo III - MML.

Como pode-se observar, os resultados obtidos evidenciaram melhor ajuste dos dados à distribuição de Weibull com três parâmetros, sendo a melhor distribuição escolhida para nove das 23 estações fluviométricas estudadas (39%) (Figura 7). A distribuição de Weibull

normalmente apresenta boa aderência aos dados de vazões mínimas, no entanto, normalmente utiliza-se a distribuição Weibull com dois parâmetros devido a maior facilidade para determinação de seus parâmetros (CLARKE, 2014; BARROS *et al.*, 2018; BACK; ZAMBRANO; CORSEUIL, 2019). No presente estudo, a distribuição de Weibull a dois parâmetros ajustada a vazão  $Q_7$  não se mostrou a melhor alternativa para a área de estudo, ficando atrás das distribuições Weibull a três parâmetros, Pearson Tipo III e Log-Normal a dois parâmetros. Já para a vazão  $Q_{30}$ , a distribuição Weibull com dois parâmetros foi selecionada para apenas uma estação.

**Figura 7** - Quantidade de distribuições de probabilidade selecionadas para as séries de vazões  $Q_7$  e  $Q_{30}$  mínimas anuais.



Observa-se que as vazões  $Q_{7;10}$  variam de  $0,027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $27,787 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e as  $Q_{30;10}$  variam de  $0,213 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $34,914 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para ambas as vazões o menor valor foi obtido para a estação Foz do Manuel Alves (84853000) e a maior para a estação Tubarão (84580500) (Tabela 16). Esses valores se devem a dois fatores, primeiramente a diferença da área de drenagem de cada bacia. A bacia da estação 84853000 possui  $353,34 \text{ km}^2$ , enquanto a 84580500 tem área de  $2.836,86 \text{ km}^2$ . A estação Tubarão é a estação estudada de maior área, porém a estação Foz do Manuel Alves não é a menor, indicando então um segundo fator. A estação fluviométrica 84853000 possui aproximadamente 45% da série histórica de vazões  $Q_7$  inferiores a  $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e 30% das vazões  $Q_{30}$  menores que  $0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A grande ocorrência de vazões mínimas indica a ocorrência frequente de vazões de estiagem nesta bacia, dadas por fatores climáticos e/ou pelo excesso de captações.

**Tabela 16** - Resultados das  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  determinadas a partir da distribuição de probabilidade selecionada e respectiva área e comprimento do rio principal.

Bacia	Código	A (km <sup>2</sup> )	L (km)	$Q_{7;10}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{30;10}$ (m <sup>3</sup> /s)
BHRT	84249998	596,87	43,79	2,325	2,998
	84250000	597,77	45,42	1,313	1,857
	84250008	597,77	45,42	0,597	1,352
	84300000	912,52	66,79	3,715	4,487
	84500000	123,19	24,77	0,923	1,147
	84520000	374,89	48,25	3,191	3,737
	84520010	624,53	53,84	5,077	5,883
	84541000	152,29	33,16	0,531	0,703
	84551000	379,72	39,67	1,205	1,632
	84559800	1.042,39	97,55	7,7	9,865
	84560000	1.690,58	115,28	6,492	8,112
	84560002	1.561,76	110,73	7,674	7,931
	84580000	2.736,97	135,73	10,361	13,336
	84580500	2.836,86	154,38	27,787	34,914
	84598002	619,66	78,91	5,229	6,057
84600000	811,34	97,77	5,292	6,348	
BHRA	84800000	117,75	16,68	0,205	0,352
	84820000	509,03	60,1	0,598	0,529
	84853000	353,34	47,84	0,027	0,213
	84949000	332,08	39,25	0,047	0,676
	84949800	843,89	46,09	1,223	2,181
BHRM	84950000	902,98	52,3	0,919	1,661
	84970000	390,59	38,62	0,505	0,762
	<b>Média</b>	830,82	64,88	4,039	5,075
	<b>Desvio Padrão</b>	735,27	36,54	5,965	7,397

A bacia do rio Araranguá apresenta vazões específicas da  $Q_{7;10}$  entre 0,08 L.s<sup>-1</sup> e 1,74 L.s<sup>-1</sup> (Tabela 16). As estações Foz do Manuel Alves (84853000) e Turvo (84949000) são as estações com menor vazão  $Q_{7;10}$  específica 0,08 e 0,14 L.s<sup>-1</sup>, respectivamente. As  $Q_{30;10}$  específicas variam de 0,60 L.s<sup>-1</sup> a 2,99 L.s<sup>-1</sup>, sendo as estações Foz do Manuel Alves e Forquilha (84820000) as de menor vazão específicas, respectivamente, 0,60 e 1,04 L.s<sup>-1</sup>. Na bacia do rio Tubarão, as  $Q_{7;10}$  específicas variaram de 1,00 L.s<sup>-1</sup> a 9,76 L.s<sup>-1</sup>, enquanto as vazões específicas  $Q_{30;10}$  variam de 2,26 L.s<sup>-1</sup> a 12,31 L.s<sup>-1</sup>. Ambas sendo o menor valor referente a estação Orleans I (84250008).

Nota-se que em todas as estações, a vazão  $Q_{30;10}$  foi superior a vazão  $Q_{7;10}$ , com exceção da estação Forquilha (código 84820000). Este resultado indica a maior ocorrência de estiagens no período de uma semana, em relação a estiagens ocorridas no período de um mês. Vale mencionar que as vazões médias mínimas em sete e 30 dias consecutivos desempenham

papel importante na representação de situações desfavoráveis para a demanda ou conservação ambiental (TUCCI, 2002; SDM, 2002; PYRCE, 2004).

#### 4.4 REGIÕES HIDROLOGICAMENTE HOMOGENEAS

As matrizes de correlação de Pearson contribuem para a análise da relação entre as vazões médias mínimas e características físicas e climáticas das bacias, e, portanto, na definição dos parâmetros a serem eliminados ou utilizados na definição das regiões hidrologicamente homogêneas e regionalização, dependendo de sua influência na variável dependente (ELESBON *et al.*, 2015). Pode-se observar que em ambas as matrizes a evapotranspiração anual e precipitação anual apresentam muito baixa correlação com as vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$ , enquanto as variáveis declividade média da bacia, densidade de drenagem, evapotranspiração no mês de junho e precipitação no trimestre e do mês mais seco apresentaram correlação baixa. A declividade do rio principal apresenta uma correlação moderada com a vazão mínima (Tabelas 17 e 18).

**Tabela 17** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_7$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas.

	$Q_7$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_7$	1,00										
A	<b>0,90</b>	1,00									
L	<b>0,89</b>	<b>0,93</b>	1,00								
Dec	-0,33	-0,39	-0,47	1,00							
Dd	0,41	0,27	0,50	-0,40	1,00						
S	-0,57	-0,60	-0,75	0,76	-0,56	1,00					
$P_{\text{anual}}$	-0,33	-0,35	-0,40	0,36	-0,20	0,11	1,00				
$P_{\text{ts}}$	-0,36	-0,31	-0,37	0,24	-0,47	0,06	0,85	1,00			
$P_{\text{mês}}$	-0,38	-0,36	-0,39	0,27	-0,31	0,07	0,91	0,95	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	-0,05	0,10	-0,03	0,03	-0,63	0,32	-0,43	-0,05	-0,24	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	0,38	0,38	0,46	-0,26	0,31	-0,07	-0,93	-0,86	-0,88	0,45	1,00

Na análise geral da área de estudo, apenas o comprimento do rio principal e a área de drenagem apresentam correlação alta a muito alta, respectivamente, com as vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$ . Sendo essa correlação positiva, isso significa que, quanto maior a área da bacia ou o comprimento do rio, maior serão as vazões. No entanto, é importante ressaltar que, por estas variáveis serem fortemente correlacionadas entre si ( $r = 0,93$ ), não serão utilizadas conjuntamente nos modelos, a fim de evitar multicolinearidade (MATIAS, 2018).

**Tabela 18** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_{30}$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas.

	$Q_{30}$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_{30}$	1,00										
A	<b>0,90</b>	1,00									
L	<b>0,88</b>	<b>0,93</b>	1,00								
Dec	-0,32	-0,39	-0,47	1,00							
Dd	0,37	0,27	0,50	-0,40	1,00						
S	-0,55	-0,60	-0,75	0,76	-0,56	1,00					
$P_{\text{anual}}$	-0,31	-0,35	-0,40	0,36	-0,20	0,11	1,00				
$P_{\text{ts}}$	-0,33	-0,31	-0,37	0,24	-0,47	0,06	0,85	1,00			
$P_{\text{mês}}$	-0,35	-0,36	-0,39	0,27	-0,31	0,07	0,91	0,95	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	-0,03	0,10	-0,03	0,03	-0,63	0,32	-0,43	-0,05	-0,24	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	0,35	0,38	0,46	-0,26	0,31	-0,07	-0,93	-0,86	-0,88	0,45	1,00

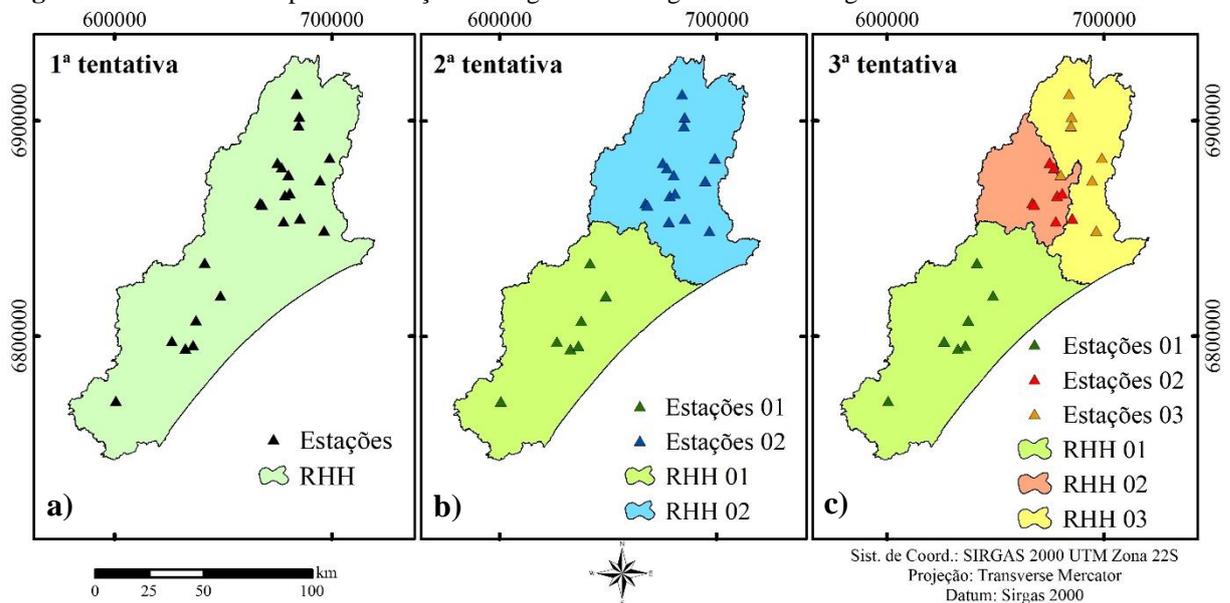
Os parâmetros relacionados a precipitação e evapotranspiração, além da declividade média da bacia e a densidade de drenagem, apresentaram muito baixa a baixa correlação com as variáveis resposta ( $Q_7$  e  $Q_{30}$ ). A análise prévia das variáveis explicativas e dependentes possibilita reduzir a redundância e multicolinearidade entre os índices a serem usados nos modelos e identificar as variáveis mais representativas na regionalização de vazões (ELESBON *et al.*, 2015; MATIAS, 2018).

Em posse das vazões médias mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$  e das características físicas e climáticas, realizou-se uma análise de regressão, a fim de identificar as áreas que apresentem comportamento hidrológico semelhante. Para definição das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH), primeiramente realizou-se uma tentativa de considerar toda a área de estudo como uma região homogênea (Figura 8a). Porém, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de determinação ajustado ( $R^2a$ ) inferiores a 0,82 e erro padrão fatorial ( $\sigma F$ ) superiores a 1,0, inviabilizaram a uso do modelo.

Para obtenção das regiões que melhor representam as vazões mínimas, foi necessário subdividir a área de estudo. Na segunda tentativa dividiu-se a área em duas regiões homogêneas com base nas características físicas e climáticas. Como pode ser observado nas Figuras 6a, 6c e 6d, bem como nas variáveis densidade de drenagem e declividade da bacia, as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Mampituba e Urussanga apresentam características semelhantes. Desta forma, essas três bacias podem então compor uma região homogênea, enquanto a bacia do rio Tubarão outra. Sendo assim, dividiu-se a área de estudo conforme as regiões hidrográficas de Santa Catarina, RH09 e RH10 (Figura 8b). Os resultados para mostraram para a região referente a RH10,  $R^2$  e  $R^2a$  superiores a 0,90 e  $\sigma F$  menores que 1,0. No

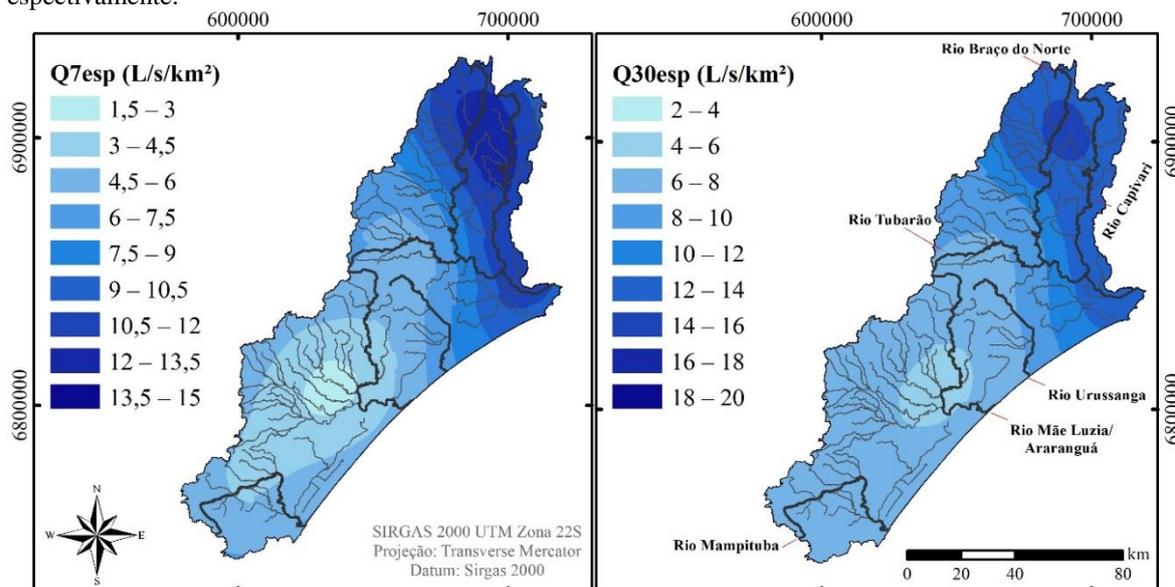
entanto, os resultados para a RH09 apresentaram  $R^2$  e  $R^2a$  inferiores a 0,89 e  $\sigma F$  superando o limite 1,0.

**Figura 8** - Áreas testadas para a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas.



Tendo alcançado resultados satisfatórios na análise de regressão da RH10, nomeada como RHH 01, esta região foi mantida. A RHH 02 (Figura 8b), referente a bacia do rio Tubarão, foi subdividida em duas regiões. Existem 16 estações fluviométricas dentro dos limites dessa bacia, as estações foram reunidas em dois grupos, adotando-se como critério a proximidade entre elas e as vazões médias mínimas consecutivas  $Q_7$  e  $Q_{30}$  específicas (Figura 9). Como pode-se observar, a vazão específica é maior nas regiões norte e leste da bacia do rio Tubarão. Dessa forma, a BHRT foi dividida conforme a Figura 8c, sendo a região localizada no interior da bacia nomeada como RHH 02 e o restante da bacia, como RHH 03. Estas novas RHH apresentaram bom desempenho ao analisar o  $R^2$ ,  $R^2a$  e  $\sigma F$ , obtendo valores maiores que o limite determinado na metodologia ( $R^2$  e  $R^2a > 0,90$  e  $\sigma F < 1,0$ ), sendo, portanto, aprovadas.

**Figura 9** - Vazões mínimas médias anuais específicas em sete e trinta dias consecutivos,  $Q_{7esp}$  e  $Q_{30esp}$ , respectivamente.



Desta forma, a área de estudo foi dividida em três regiões hidrologicamente homogêneas, sendo definidas da seguinte forma:

- RHH 01: compreende os rios Araranguá, Mampituba e Urussanga e todos os seus afluentes. Abrange uma área de 5.689 km<sup>2</sup>, englobando as estações fluviométricas Serrinha - Casan, Forquilha, Foz do Manuel Alves, Turvo, Ermo, Taquaruçu e Praia Grande;

- RHH 02: compreende parte dos rios Tubarão e Braço do Norte e seus afluentes, que consiste em cerca de um quarto do rio Braço do Norte (da estação Braço do Norte, código 84559800, até a confluência com o rio Tubarão) e aproximadamente 65% do rio Tubarão (da nascente até a estação Tubarão, código 84580500). Abrange 1.663 km<sup>2</sup>, englobando as estações fluviométricas Orleans – montante, Orleans II, Orleans I, Pedras Grandes, Grão Pará, Rio Pequeno, São Ludgero I, São Ludgero II e Rio do Pouso;

- RHH 03: compreende os rios Capivari, aproximadamente três quartos do rio Braço do Norte (da nascente até a estação Braço do Norte, código 84559800) e cerca de 35% do rio Tubarão (da estação Tubarão, código 84580500 até a foz). Abrange 3.069 km<sup>2</sup>, englobando as estações fluviométricas Povoamento, Divisa de Anitápolis, Sta. Rosa de Lima, Braço do Norte, Tubarão, São Martinho e Armazém Capivari.

Os resultados obtidos nas correlações de Pearson de cada região hidrologicamente mostram que outras variáveis hidrológicas, além da área de drenagem e comprimento do rio principal, apresentam alta ou muito alta correlação com as vazões médias mínimas (Apêndice A). No entanto, ao analisar as regressões múltiplas, as variáveis área de e comprimento do rio

principal continuaram sendo as melhores opções para explicar a vazão mínima na área de estudo.

A variável independente área de drenagem explicou todas as vazões mínimas das RHH definidas, com exceção da  $Q_7$  da RHH 02 que obteve melhor resultado com a variável comprimento do rio principal (Tabelas 19 e 20). Ao realizar as regressões múltiplas foi constatado que nenhuma das outras variáveis, além da área de drenagem e comprimento do rio principal, melhorou os modelos. Desta forma, foi adotado apenas A e L para explicar as vazões mínimas estudadas. Outros trabalhos também apresentaram melhores resultados usando a área como variável independente, algumas vezes utilizando exclusivamente a área (OLIVEIRA, 2013; MOREIRA; SILVA, 2014; BAZZO *et al.*, 2017; MACIEL *et al.*, 2019) e em outros estudos contemplando outras variáveis (BAENA *et al.*, 2004, RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005; MACIEL *et al.*, 2019; AGUIAR, 2020).

A maior parte das áreas de drenagem, neste trabalho, foram determinadas a partir de um MDT compatível com a escala 1:10.000 (resolução espacial de 1,0 m), sendo a delimitação feita automaticamente. Porém, as áreas de drenagem, assim como outras variáveis obtidas por meio do MDT, são altamente influenciáveis pela resolução do MDT utilizado (BAENA *et al.*, 2004). Dessa forma, é importante considerar a escala de detalhamento no momento da determinação das áreas de drenagem, buscando minimizar possíveis diferenças nas áreas obtida por diferentes métodos.

O modelo potencial foi selecionado para quatro dos seis modelos ajustados, o exponencial foi escolhido como modelo de regressão das duas vazões mínimas da RHH 01 (Tabelas 19 e 20). Os coeficientes de ajuste ( $R^2$  e  $R^2a > 0,90$  e  $\sigma F < 1,0$ ), apresentaram resultados satisfatórios.

**Tabela 19** - Modelos de regressão das vazões mínimas  $Q_7$  associados a cada região homogênea.

Região homogênea	Nº de estações	Modelo	Equação de regressão	$R^2$	$R^2a$	$\sigma F$
RHH 01	6	Exponencial	$Q_7 = 0,465 e^{0,002A}$	0,945	0,932	0,181
RHH 02	8	Potencial	$Q_7 = 0,004L^{1,732}$	0,948	0,939	0,242
RHH 03	7	Potencial	$Q_7 = 0,014A^{0,987}$	0,991	0,989	0,101

Apenas na RHH 03 todas as estações foram utilizadas na análise de regressão múltipla. Na RHH 01 excluiu-se a estação Foz do Manuel Alves (84853000) pois esta apresentou vazão específica inferior às demais prejudicando o ajuste do modelo. Essas vazões abaixo da média, podem estar relacionadas à problemas no ajuste da curva-chave ou pelo excesso de captação

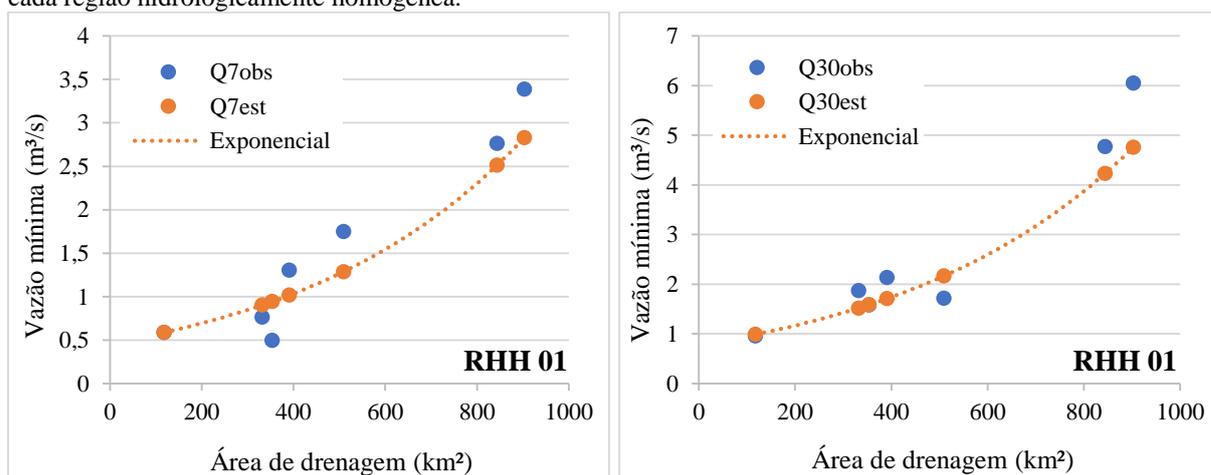
para irrigação da rizicultura. Na RHH 02, a estação excluída foi a Orleans I (84250008), também por apresentar vazão inferior às demais e estar prejudicando o ajuste do modelo. A estação Orleans I (série histórica de 1939 a 1954) localiza-se no mesmo ponto que a estação Orleans II (série de 1950 a 1981), podendo indicar erros na curva-chave da série antiga de dado.

**Tabela 20** - Modelos de regressão das vazões mínimas  $Q_{30}$  associados a cada região homogênea.

Região homogênea	Nº de estações	Modelo	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> a	σF
RHH 01	6	Exponencial	$Q_{30} = 0,782 e^{0,002A}$	0,932	0,915	0,200
RHH 02	8	Potencial	$Q_{30} = 0,008A^{1,006}$	0,971	0,967	0,173
RHH 03	7	Potencial	$Q_{30} = 0,016A^{0,996}$	0,988	0,985	0,116

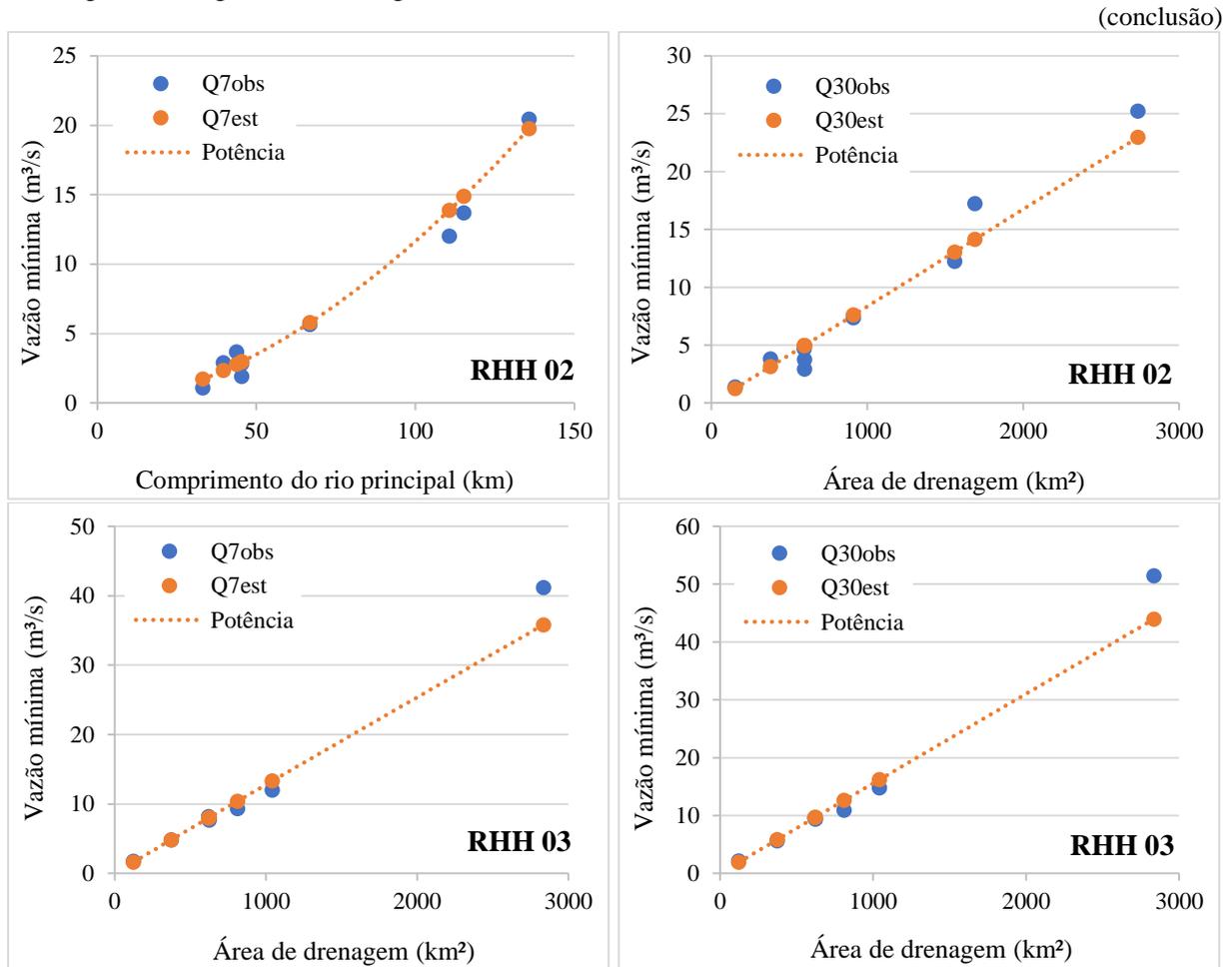
Com o intuito de observar o ajuste das equações de regressão das RHHs construiu-se os gráficos das vazões mínimas observadas e estimadas pela equação de regressão *versus* variável explicativa (Figura 10). Pode-se observar que a RHH 03 foi a que apresentou melhor ajuste, como já indicado pelos coeficientes de determinação e erro fatorial. No entanto, as RHH 01 e 02 embora apresentem dados mais dispersos à linha de tendência do modelo ajustado, os mesmos apresentam erros percentuais médios inferiores a 30% (Tabela 21).

**Figura 10** - Gráficos do ajuste dos modelos de regressão das vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$  às vazões observadas para cada região hidrologicamente homogênea.



(continua)

**Figura 11** - Gráficos do ajuste dos modelos de regressão das vazões mínimas  $Q_7$  e  $Q_{30}$  às vazões observadas para cada região hidrologicamente homogênea.



Na Tabela 21, a fim de comparação, são apresentados os erros percentuais entre os valores de vazões ( $Q_{7est}$  e  $Q_{30est}$ ) observadas e estimadas pelos modelos de regressão selecionados. Como pode-se observar, as vazões  $Q_7$  calculadas nas estações 84853000 (Foz do Manuel Alves), 84250008 (Orleans I) e 84541000 (Grão Pará) foram superestimadas em mais de 30%, enquanto para a  $Q_{30}$  as estações superestimadas foram a 84250008 e 84250000 (Orleans I e II, respectivamente). O restante das vazões apresentou erros percentuais menores que 30%, sendo, portanto, aceitáveis.

Em geral, os modelos ajustados representam adequadamente as vazões mínimas, visto que todas as RHH apresentaram ER médio inferiores a 30%. Analisando o coeficiente de Nash-Sutcliffe, pode-se observar que o ajuste para todas as equações foi considerado muito bom. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira (2013), Maciel *et al.* (2019) e Aguiar (2020), demonstrando a boa aderência dos modelos ajustados nos respectivos estudos às séries de vazões estudadas.

**Tabela 21** - Valores do erro percentual ER (%) entre as vazões mínimas observadas ( $Q_{obs}$ ) e estimadas ( $Q_{est}$ ) pelos modelos de regressão obtidos para cada região hidrologicamente homogênea.

RHH	Código	$Q_{7obs}$	$Q_{7est}$	ER (%)	$Q_{30obs}$	$Q_{30est}$	ER (%)
01	84800000	0,586	0,588	0,4	0,960	0,990	3,1
	84820000	1,747	1,287	26,3	1,716	2,164	26,1
	84853000	0,496	0,943	90,1	1,582	1,585	0,2
	84949000	0,765	0,903	18,1	1,869	1,519	18,7
	84949800	2,763	2,514	9,0	4,768	4,229	11,3
	84950000	3,389	2,830	16,5	6,049	4,759	21,3
	84970000	1,305	1,016	22,2	2,137	1,708	20,1
	<i>ER médio</i>			<b>26,08</b>			
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,83</b>				<b>0,92</b>
02	84249998	3,681	2,786	24,3	4,701	4,962	5,5
	84250000	2,837	2,968	4,6	3,757	4,969	32,3
	84250008	1,916	2,968	54,9	2,938	4,969	69,1
	84300000	5,659	5,787	2,3	7,382	7,605	3,0
	84541000	1,097	1,721	56,9	1,397	1,256	10,1
	84551000	2,908	2,347	19,3	3,807	3,148	17,3
	84560000	13,686	14,894	8,8	17,242	14,141	18,0
	84560002	12,01	13,891	15,7	12,251	13,058	6,6
	84580000	20,445	19,763	3,3	25,24	22,961	9,0
	<i>ER médio</i>			<b>21,12</b>			
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,95</b>				<b>0,94</b>
03	84500000	1,757	1,620	7,8	2,148	1,933	10,0
	84520000	4,828	4,859	0,6	5,657	5,858	3,5
	84520010	7,675	8,042	4,8	9,380	9,738	3,8
	84559800	12,016	13,333	11,0	14,787	16,221	9,7
	84580500	41,187	35,816	13,0	51,473	43,969	14,6
	84598002	8,205	7,980	2,7	9,531	9,663	1,4
	84600000	9,345	10,411	11,4	10,945	12,638	15,5
	<i>ER médio</i>			<b>7,34</b>			
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,99</b>				<b>0,99</b>

#### 4.5 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS

Como pode-se observar todas as equações regionalizadas obtidas por meio de regressão múltipla apresentaram coeficientes de determinação e erros padrões respeitando o critério adotado na metodologia ( $R^2$  e  $R^2a > 0,90$  e  $\sigma F < 1,0$ ) (Tabelas 22 e 23). O modelo potencial foi adotado por quatro dos seis modelos ajustados, para os demais foram selecionados os modelos linear e exponencial.

**Tabela 22** - Equação de regionalização da vazão mínima média em 7 dias com período de retorno de 10 anos ( $Q_{7;10}$ ) e coeficientes de ajuste.

Região	Nº de estações	Modelo	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	R <sup>2a</sup>	σF
RHH 01	5	Potencial	$Q_{7;10} = 0,004 A^{0,814}$	0,961	0,948	0,156
RHH 02	9	Linear	$Q_{7;10} = 0,089L - 2,501$	0,958	0,952	0,778
RHH 03	7	Potencial	$Q_{7;10} = 0,006 A^{1,052}$	0,986	0,983	0,131

Na regressão múltipla para obtenção das equações das regiões 02 e 03 foram utilizadas todas as estações fluviométricas. Apenas a RHH 01 exigiu a exclusão de algumas estações, sendo descartadas na análise de regressão da  $Q_{7;10}$  as estações Turvo (84949000) e Foz do Manuel Alves (84853000) e na  $Q_{30;10}$  as estações Forquilha (84820000) e Foz do Manuel Alves (84853000). Em ambos os casos as estações foram excluídas por possuírem vazões específicas inferiores às demais e prejudicarem o ajuste do modelo.

**Tabela 23** - Equação de regionalização da vazão mínima média em 30 dias com período de retorno de 10 anos ( $Q_{30;10}$ ) e coeficientes de ajuste.

Região	Nº de estações	Modelo	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	R <sup>2a</sup>	σF
RHH 01	5	Exponencial	$Q_{30;10} = 0,311 e^{0,002A}$	0,950	0,934	0,189
RHH 02	9	Potencial	$Q_{30;10} = 0,002 L^{1,761}$	0,913	0,900	0,308
RHH 03	7	Potencial	$Q_{30;10} = 0,006 A^{1,063}$	0,987	0,984	0,130

A área de drenagem e o comprimento do rio principal foram as variáveis que melhor representaram as variáveis dependentes  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  nas equações regionalizadas. Outros estudos também constataram que a área e o comprimento do rio principal foram as variáveis que melhor se juntaram. Baena *et al.* (2004) e Ribeiro, Marques e Silva (2005) utilizaram nos modelos de regressão ajustados para vazões mínimas as variáveis área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem e precipitação, porém as variáveis área e comprimento do rio foram as que mais se destacaram, sendo utilizadas, sozinhas ou em conjunto, em todos os modelos. Silva, Marques e Lemos (2009) selecionaram, como sendo melhor variável para explicar o comportamento da  $Q_{7;10}$ , o comprimento do rio principal.

A variável área de drenagem foi utilizada para explicar a vazão  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  nas equações da RHH 01 e da RHH 03, enquanto para a RHH 02 foi selecionado o comprimento do rio principal para ambas as vazões. A vantagem de utilizar o comprimento do rio está em este ser de mais fácil de obtenção, sem necessariamente exigir esforço computacional,

facilitando assim sua utilização no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Neste trabalho o comprimento do rio principal foi obtido da base vetorial de cursos d'água da ANA disponível gratuitamente na base de dados do site SIGSC da SDE, sendo de mais fácil manipulação, ao comparar o trabalho com arquivos matriciais (MDT).

Pode-se observar na Tabela 24, que as vazões  $Q_{7;10}$  calculadas pela equação de regionalização foram superestimadas em mais de 30% nas estações Foz do Manuel Alves (84853000), Turvo (84949000), Orleans I, (84250008) e Armazém Capivari (84600000), sendo subestimada na estação Orleans - montante (84249998). Para a  $Q_{30;10}$  as estações superestimadas foram Forquilha (84820000), Foz do Manuel Alves (84853000) e Grão Pará (84541000) e subestimada na estação Orleans - montante (84249998). O restante das vazões mínimas apresentou erros percentuais inferiores a 30%.

Como pode-se observar, as vazões observadas da RHH 03 foram as que melhor se ajustaram ao modelo de regressão, apresentando pouca dispersão em relação a linha de tendência dos dados estimados (Figura 11). Analisando a Tabela 24, é possível comprovar esses resultados, visto os erros percentuais foram todos abaixo ou muito próximos de 30%, sendo o ER médio de 9,29% para a equação  $Q_{7;10}$  e 10,86% para a  $Q_{30;10}$ . Outro indicativo importante é o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que foi classificado como muito bom para ambos os modelos (acima de 0,98).

A RHH 02 apresentou maior dispersão em comparação aos gráficos da RHH 03 (Figura 11), no entanto, observando o coeficiente de Nash-Sutcliffe na Tabela 24, pode-se afirmar que o ajuste foi considerado muito bom já que apresenta valores maiores que 0,75 (0,88 para equação da  $Q_{7;10}$  e 0,92 para a  $Q_{30;10}$ ). O ER médio foi abaixo de 30% para o modelo da  $Q_{30;10}$  (20,49%), no entanto o para o modelo  $Q_{7;10}$  o erro relativo médio foi de 31,54%. Foram realizados vários testes, sendo este o modelo com menor erro percentual, o mesmo foi mantido.

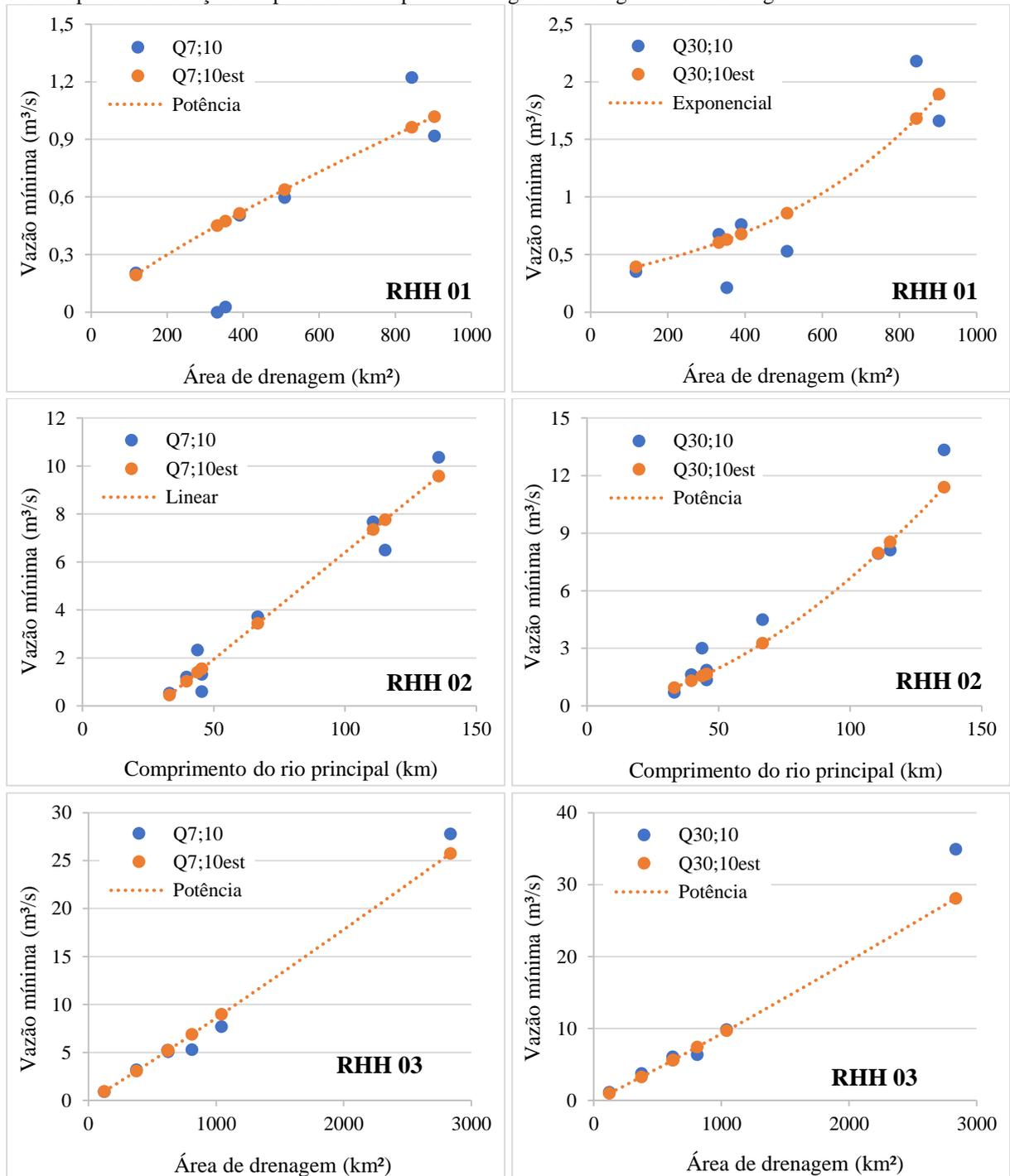
Os modelos ajustados para a RHH 01 foram os que apresentaram menor desempenho, os quais podem ser observados pelo ajuste dos gráficos (Figura 11) e pelos ER e  $CNS_{\log}$  (Tabela 24). O ajuste da equação de regionalização da  $Q_{30;10}$  foi considerado bom, analisando o coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $0,65 < CNS \leq 0,75$ ). No entanto, o erro percentual médio foi superior a 30% (46,98%) demonstrando então um baixo desempenho na estimativa dessa vazão mínima. Já o modelo selecionado para regionalização da  $Q_{7;10}$  se mostrou inadequado, visto que o erro percentual médio foi 306,76% e o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi 0,17, sendo considerado insatisfatório ( $CNS \leq 0,50$ ).

**Tabela 24** - Valores do erro percentual ER (%) entre as vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  obtidas utilizando as distribuições de probabilidade e as estimadas ( $Q_{7;10est}$  e  $Q_{30;10est}$ ) pelas equações de regionalização e o coeficiente de Nash-Sutcliffe obtidos para cada região hidrologicamente homogênea.

RHH	Código	$Q_{7;10}$	$Q_{7;10est}$	ER (%)	$Q_{30;10}$	$Q_{30;10est}$	ER (%)
01	84800000	0,205	0,194	5,4	0,352	0,394	11,8
	84820000	0,598	0,639	6,8	0,529	0,861	62,7
	84853000	0,027	0,475	1657,6	0,213	0,630	196,0
	84949000	0,047	0,451	860,0	0,676	0,604	10,6
	84949800	1,223	0,964	21,2	2,181	1,682	22,9
	84950000	0,919	1,019	10,8	1,661	1,893	13,9
	84970000	0,505	0,515	2,0	0,762	0,679	10,9
	<i>ER médio</i>			<b>306,76</b>			<b>46,98</b>
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,17</b>			<b>0,66</b>	
02	84249998	2,325	1,396	39,9	2,998	1,554	48,2
	84250000	1,313	1,541	17,4	1,857	1,657	10,7
	84250008	0,597	1,541	158,2	1,352	1,657	22,6
	84300000	3,715	3,443	7,3	4,487	3,268	27,2
	84541000	0,531	0,450	15,2	0,703	0,952	35,5
	84551000	1,205	1,030	14,6	1,632	1,306	20,0
	84560000	6,492	7,759	19,5	8,112	8,546	5,4
	84560002	7,674	7,354	4,2	7,931	7,961	0,4
84580000	10,361	9,579	7,5	13,336	11,394	14,6	
<i>ER médio</i>			<b>31,54</b>			<b>20,49</b>	
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,88</b>			<b>0,92</b>	
03	84500000	0,923	0,95	2,9	1,147	1,001	12,7
	84520000	3,191	3,06	4,1	3,737	3,267	12,6
	84520010	5,077	5,24	3,1	5,883	5,621	4,5
	84559800	7,700	8,98	16,6	9,865	9,690	1,8
	84580500	27,787	25,74	7,4	34,914	28,088	19,6
	84598002	5,229	5,19	0,7	6,057	5,575	8,0
	84600000	5,292	6,90	30,3	6,348	7,424	16,9
	<i>ER médio</i>			<b>9,29</b>			<b>10,86</b>
<i>CNS<sub>log</sub></i>			<b>0,99</b>			<b>0,98</b>	

Desconsiderando as estações que não foram utilizadas na regressão para obtenção das equações de regionalização da RHH 01, os resultados são satisfatórios. A equação da  $Q_{7;10}$  obtém um ER médio de 9,2% e um  $CNS_{log}$  de 0,96, sendo o ajuste, considerado muito alto. Para a equação da  $Q_{30;10}$ , o ER médio é de 10,0% e o  $CNS_{log}$  de 0,94, também indicando um ajuste muito alto.

**Figura 12** - Gráficos do ajuste das vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  estimadas pela equação de regionalização às obtidas pelas distribuições de probabilidade para cada região hidrologicamente homogênea.



Os resultados indicam que a variabilidade de vazões em uma região com baixa densidade de postos de monitoramento, além de prejudicar a divisão das regiões hidrologicamente homogêneas, também resulta em uma representação deficiente da real disponibilidade hídrica da área de estudo. Considerando o tamanho da RHH 01, o ideal seria subdividi-la em duas ou mais regiões, o que provavelmente refletiria em uma melhoria no

modelo, porém a divisão foi impossibilitada pela deficiência de estações fluviométricas. Caso a região fosse dividida, a quantidade de estações em cada região seria muito pequena (<5 estações), inviabilizando o ajuste dos modelos de regressão múltipla. Baena *et al.* (2004) tiveram a mesma constatação, analisando as regiões homogêneas da bacia do rio Paraíba do Sul (RJ, MG e SP), em que não foi possível dividir uma área grande por conta da baixa densidade de estações fluviométricas.

Os trabalhos de regionalização realizados nos Planos de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas da área de estudo (SDM, 2002; SADR, 2006; SDS, 2014; SDS, 2017a; SDS, 2019; DRHS, 2020), mostram um baixo número de postos usados na regionalização de vazões e/ou a utilização da área total da bacia como região hidrologicamente homogênea. O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina, assim como os planos das bacias dos rios Araranguá e Mampituba, utilizam o estudo de regionalização de vazões realizado em Santa Catarina em 2006 (SADR, 2006) para caracterização da disponibilidade hídrica. No entanto, este estudo utiliza uma baixa densidade de postos de monitoramento em cada bacia hidrográfica. A região hidrologicamente homogênea onde encontram-se as bacias dos rios Araranguá e Mampituba, por exemplo, utiliza apenas quatro estações fluviométricas de monitoramento para regionalização das vazões.

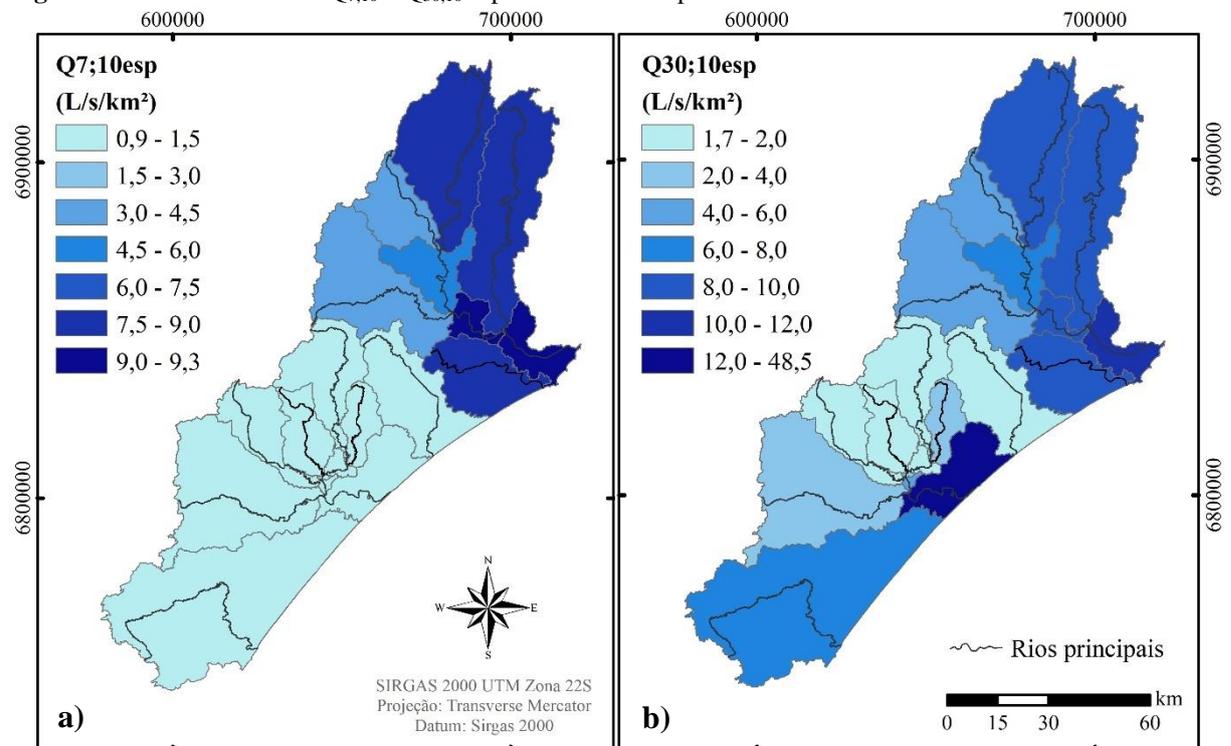
Os planos das bacias dos rios Tubarão e Urussanga foram os que utilizaram maior número de estações. No entanto, consideram toda a bacia como uma região homogênea. Para a vazão  $Q_{7,10}$ , o plano da bacia do rio Tubarão utilizou 13 estações fluviométricas com série histórica variando de 1939 a 1996, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99, o que indica uma equação com alto ajuste (SDM, 2002). No entanto, no presente estudo não foi possível alcançar  $R^2$  maior que 0,90 em nenhum modelo de equação. Isto se deve a este estudo utilizar um número maior de postos de monitoramento (16 estações) e séries históricas mais longas 1939 a 2019, mostrando que pode ter ocorrido mudanças no regime fluviométrico dos cursos d'água.

Na bacia do rio Urussanga foram utilizados dados de 13 estações localizadas nas bacias dos rios Tubarão e Araranguá, obtendo um  $R^2$  de 0,79 (SDS, 2019). Nos parâmetros do presente estudo, esta equação seria considerada inadequada. O baixo ajuste da equação pode ser um indicativo dos dados não representarem uma região hidrologicamente homogênea. A SDS (2019) utilizou dados de estações de monitoramento localizadas em bacias com características físicas e climáticas diferentes, que influenciam diretamente em seus regimes hidrológicos e, portanto, nas vazões dos cursos d'água.

#### 4.6 MAPA DAS VAZÕES MÍNIMAS

A Figura 12a mostra vazões mínimas específicas maiores na RHH 03 e menores valores na RHH 01. Já em relação a  $Q_{30;10}$  (Figura 12b) a diferença entre as vazões mínimas específicas das regiões é menos evidente. Foi constatado que a equação da  $Q_{30;10}$  superestima a vazão, quando aplicada às bacias de área maior, como é o caso da bacia do rio Mampituba e a bacia do rio Araranguá. Isto ocorre porque a maior área de drenagem utilizada na análise de regressão foi a bacia do Taquaruçu, com 902,98 km<sup>2</sup>, a qual não engloba as sub-bacias dos rios Mãe Luzia e Manoel Alves.

**Figura 13** - Vazões mínimas  $Q_{7;10}$  e  $Q_{30;10}$  específicas obtidas para as ottobacias nível 5 da área de estudo.



Este resultado mostra a importância de dados de bacias de diferentes tamanhos para obter um modelo adequado para regionalização, conferindo maior confiabilidade na estimativa das vazões. Na RHH 01 foram utilizados dados de bacias com área variando de 117,75 a 902,98 km<sup>2</sup>, enquanto as bacias da RHH 02 possuem 152,29 a 2.736,97 km<sup>2</sup> e da RHH 03, 123,19 a 2.836,86 km<sup>2</sup>. Utilizar as equações de regionalização para estimar vazões de bacias com áreas inferiores ou superiores ao respectivo intervalo de área, podem resultar em valores não representativos da vazão real do curso d'água.

A espacialização dos resultados obtidos, tem papel fundamental na avaliação do ajuste do modelo e na compreensão do comportamento hidrológico da região de estudo. As menores

vazões observadas nas bacias dos rios Araranguá, Mampituba e Urussanga em relação aos planos de bacias hidrográficas podem estar relacionadas ao fato deste estudo utilizar a vazão observada nos postos de monitoramento, sem os dados passarem por reconstituição das séries de vazões naturais. Sendo assim, as vazões utilizadas já consideram as perdas provenientes da captação para usos consultivos. Tendo em vista que a região do Extremo Sul Catarinense possui uso intensivo dos cursos d'água para irrigação, as baixas vazões em períodos críticos podem estar relacionadas ao alto consumo coincidindo com os períodos de estiagem. Já na bacia do rio Tubarão, a vazão pode ser superior as observadas nos outros estudos por esta bacia ter sido dividida em duas regiões hidrologicamente homogêneas. Foi adotado como critério para seleção da RHH a diferença observada entre as vazões médias mínimas em 7 e 30 dias consecutivos específicas na área de estudo.

No Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina e nos planos de bacias hidrográficas da área de estudo foi determinada a vazão mínima, ou vazão de estiagem,  $Q_{7;10}$ . Pode-se observar na Tabela 25 que, como as equações de regionalização foram obtidas utilizando metodologias diferentes (seja pela distribuição de probabilidade adotada ou pelo número de estações), as vazões variaram entre os estudos. A maior diferença foi observada no presente estudo.

**Tabela 25** - Comparação entre as vazões obtidas no presente trabalho às determinadas no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina e nos respectivos planos de bacias hidrográficas.

Bacia Hidrográfica	Plano Estadual $Q_{7;10}$ (m <sup>3</sup> /s)	Plano de Bacia $Q_{7;10}$ (m <sup>3</sup> /s)	Presente estudo $Q_{7;10}$ (m <sup>3</sup> /s)
Rio Araranguá	8,11 <sup>(1)</sup>	8,11 <sup>(2)</sup>	2,77
Rio Mampituba	2,29 <sup>(1)</sup>	-	1,88
Rio Tubarão	24,02 <sup>(1)</sup>	20,56 <sup>(3)</sup>	44,12
Rio Urussanga	2,74 <sup>(1)</sup>	3,34 <sup>(4)</sup>	0,81

Fonte: <sup>(1)</sup> SDS, 2017a; <sup>(2)</sup> SDS, 2014; <sup>(3)</sup> SDM, 2002; <sup>(4)</sup> SDS, 2019.

Ao comparar as estatísticas e metodologias adotadas para determinar as equações de regionalização dos planos de gestão das bacias hidrográficas, nota-se algumas defasagens. O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina, elaborado em 2017, utilizou as equações obtidas no estudo de regionalização de vazões realizado em Santa Catarina em 2006 (SADR, 2006). Neste estudo, a região sul do Estado foi dividida em duas regiões homogêneas. Os resultados dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram satisfatórios, apresentando valores superiores a 0,92 para ambas as regiões. A região composta pelas bacias dos rios Araranguá e Mampituba com  $R^2$  igual a 0,9266, e a região das bacias dos rios Tubarão e Urussanga com  $R^2$

de 0,9973 (SDS, 2017a). É importante mencionar que, além de estar desatualizado, foram usadas apenas quatro estações da bacia do rio Araranguá e sete da bacia do rio Tubarão.

O Plano da bacia do rio Araranguá também se baseou no estudo de regionalização de Santa Catarina, sendo assim o  $R^2$  foi de 0,9266 (SDS, 2014). O próprio plano menciona a disponibilidade de dados de sete estações, no entanto justifica estatisticamente o uso das equações propostas por SADR (2006). Foi realizada a análise de correlação entre as vazões mínimas de 7 dias para as estações fluviométricas da bacia e as calculadas pela regionalização anterior, obtendo um bom ajuste ( $R^2 = 0,9799$ ). Vale lembrar que no estudo de SADR (2006) foi o emprego da distribuição Gumbel para a determinação das vazões mínimas com período de retorno de 10 anos. Esta distribuição, com base no presente estudo, não se mostrou adequada para a região Sul de Santa Catarina.

O Plano de Recursos Hídricos a bacia do rio Mampituba, elaborado em 2020, não possui valor de  $Q_{7;10}$  definido (Tabela 25). Para análise das vazões mínimas é utilizada a  $Q_{90\%}$  (DRHS, 2020). Esta vazão de permanência foi obtida também por meio do estudo de regionalização da SADR (2006). Em território catarinense o Plano Estadual abrange a bacia do Mampituba na mesma região homogênea da bacia do Araranguá, enquanto a porção gaúcha a disponibilidade hídrica no Plano Estadual utilizou-se dados da bacia do rio Tramandaí para análise de disponibilidade hídrica. A determinação da disponibilidade hídrica no Plano do Rio Grande do Sul baseou-se na vazão média de longo período e na vazão mínima  $Q_{95\%}$  (SEMA, 2007).

O Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Tubarão, elaborado em 2002, é o mais antigo entre as bacias hidrográfica do Sul Catarinense. Na regionalização da vazão mínima  $Q_{7;10}$  foram utilizados dados de 13 estações fluviométricas, com séries variando de 10 a 58 anos. Séries consistentes e estações distribuídas por toda a bacia do rio Tubarão, garantiram qualidade da equação ajustada ( $R^2 = 0,9918$ ) (SDM, 2002). O estudo não cita qual distribuição de probabilidade foi utilizada no estudo. Com o incremento de dados disponíveis nas séries, se faz necessário novos estudos para realizar a atualização das equações de regionalização utilizadas na gestão dos corpos hídricos.

Para o Plano de Recursos Hídricos do rio Urussanga foi realizado uma nova regionalização das vazões  $Q_{7;10}$ . Neste estudo, foram utilizadas as distribuições de Log-Pearson Tipo III e Log-Normal de 2 parâmetros, as quais apresentaram um bom desempenho na região Sul Catarinense. Quanto aos dados usados, embora a bacia não conte com nenhuma estação fluviométrica, utilizou-se 14 estações para regionalização da  $Q_{7;10}$  (SDS, 2019). O que em primeiro momento pode parecer vantajoso, merece atenção. Destas 14 estações, nove se localizam na bacia do rio Tubarão, quatro na bacia do rio Araranguá e uma na bacia do rio

Mampituba. Estas bacias, de acordo com os resultados apresentados e o estudo da SADR (2006), pertencem a regiões homogêneas diferentes. O fato de não pertencerem a mesma região reflete o baixo ajuste da equação de regressão, com  $R^2$  de 0,792 (SDS, 2019).

O presente estudo obteve coeficientes de determinação entre 0,91 e 0,99 para todas as equações de regionalização das regiões hidrologicamente homogêneas. O rigor do estudo ainda se prova devido às extensas análises estatísticas realizadas para escolha das melhores distribuições de probabilidade a serem adotadas. Vale mencionar que foram utilizadas todas as estações com séries históricas superiores a 10 anos, com dados das estações em operação atualizados até 2019.

## 5 CONCLUSÕES

A distribuição que demonstrou melhor aderência às séries de vazões mínimas médias em 7 e 30 dias consecutivos foi a distribuição de Weibull a 3 parâmetros, sendo selecionada para 9 estações para ambas as vazões. Vale destacar que a distribuição Pearson Tipo III foi escolhida para 7 estações no ajuste das séries  $Q_7$  e as distribuições Log-Normal com 3 parâmetros e Pearson Tipo III foram selecionadas, ambas, para ajuste de 4 séries de  $Q_{30}$ . A distribuição de Gumbel (mínimos) foi a que apresentou pior desempenho, sendo a mais rejeitada pelos testes de aderência. A distribuição chegou a 22 rejeições de 23 estações fluviométricas pelo teste de Anderson-Darling e 20 rejeições pelo teste de Filliben.

Para regionalização de vazões definiu-se três regiões hidrologicamente homogêneas, sendo as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Mampituba e Urussanga pertencentes a RHH 01, enquanto bacia do rio Tubarão divide-se em RHH 02 e 03. Os modelos de regressão obtidos alcançaram  $R^2$  e  $R^2_a$  superiores a 0,91 e  $\sigma F$  inferiores a 0,25, sendo considerados satisfatórios. Os modelos ajustados representam adequadamente as vazões mínimas, apresentando erros percentuais (ER) médios entre as vazões  $Q_7$  e  $Q_{30}$  observadas e estimadas menores que 30% e ajuste classificado como muito alto ( $CNS_{\log} > 0,75$ ).

A regionalização das vazões foi realizada por meio de ajuste de equações de regressão regionais, sendo obtidos resultados positivos em todas as regiões hidrologicamente homogêneas. Os modelos exponencial, linear e potencial foram selecionados para representar as vazões, com destaque ao modelo potencial, escolhido para quatro, das seis equações ajustadas. Os  $R^2$  e  $R^2_a$  foram superiores a 0,90 e  $\sigma F$  menores que 0,78, atendendo assim os critérios definidos na metodologia do trabalho.

As variáveis explicativas utilizadas na análise de regressão, tanto para definição das regiões homogêneas, quanto na regionalização de vazões, foram área de drenagem e

comprimento do rio principal. Essas variáveis apresentaram alta correlação com as vazões mínimas analisadas e bom ajuste aos modelos de regressão. A área de drenagem foi utilizada na regionalização da RHH 01 e RHH 03, enquanto o comprimento do rio principal explicou as vazões da RHH 02.

Os mapas das vazões mínimas específicas  $Q_{7;10}$ , gerados utilizando as isotopias de nível 5 mostram vazões maiores na RHH 03 e menores valores na RHH 01. A diferença entre as vazões mínimas  $Q_{30;10}$  específicas das regiões é menos evidente, embora o comportamento das RHH 02 e 03 se assemelhe a vazão  $Q_{7;10}$ . Para a  $Q_{30;10}$ , RHH 01 apresenta resultados superiores aos obtidos nas demais regiões homogêneas para as bacias dos rios Araranguá e Mampituba, os quais podem estar sendo superestimados. Isto se deve a equação de regionalização ser obtida utilizando dados de estações com área de drenagem variando de 117,75 a 902,98 km<sup>2</sup>. Não havendo, portanto, dados que caracterizem áreas maiores dentro da RHH 01, como as bacias dos rios Araranguá e Mampituba.

Vale salientar que, embora a regionalização de vazões tenha dado resultados satisfatórios é fundamental aumentar a rede de estações de monitoramento de vazão, a fim de validar os resultados obtidos dos modelos e melhorar a estimativa das vazões de interesse.

Recomenda-se para estudos futuros aumentar a rede de monitoramento de vazões, principalmente nas bacias dos rios Mampituba e Urussanga, que carecem de estações fluviométricas. Também é importante incluir estações em bacias menores, possibilitando assim o estudo do comportamento hidrológico das bacias de diferentes tamanhos. Além disso, recomenda-se que as medições de vazões mínimas extremas sejam mais representativas, buscando fornecer dados confiáveis para ajuste da curva-chave e, conseqüentemente, da calibração dos modelos, a fim de melhorar as estimativas extremas.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M. C.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SANTOS, G. R.; ALMEIDA, L. T.; ZANETTIM, S. S. Critérios para escolha de distribuições de probabilidade em estudos de Eventos externos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 601-613, 2018. doi: 10.1590/0102-7786334004.
- ACRE. Resolução CEMACT nº 4 de 17/08/2010. Regulamenta a concessão outorga provisória e de direito de uso dos recursos hídricos no Estado do Acre. **Diário Oficial do Estado**, Rio Branco, 13 de setembro de 2010.
- ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Plano estadual de recursos hídricos do Acre**. Rio Branco: SEMA, 2012.
- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS E SANEAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Resolução nº 350, de 3 de junho de 2006**. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga do direito de uso dos recursos hídricos em corpos de água de domínio do Distrito Federal e em corpos de água delegados pela União e Estados. Brasília: ADASA, 2006.
- AGUIAR, A. F. de O. **Regionalização de vazões mínimas diárias e mensais para bacias hidrográficas do Sul de Santa Catarina, Brasil**. 2020. 113 p. Dissertação (Mestre em Engenharia e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC.
- AIYELOKUN, O.; OJELABI, A.; MALOMO, S.; AGBEDE, O. Efficient flood forecasting for the operation of hydraulic structures in a typical river basin. **International Journal of Scientific & Engineering Research**. v. 8, n. 11, 2017.
- ALAGOAS. **Decreto nº 49.419 de 18 de julho de 2016**. Altera o Decreto nº 06, de 23 de janeiro de 2001, que regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos prevista na Lei Estadual nº 5.965, de 10 de novembro de 1997, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Maceió, 19 de julho de 2016.
- ALAGOAS. **Decreto nº 6, de 23 de janeiro de 2001**. Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos prevista na Lei nº 5.965 de 10 de novembro de 1997, que dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos, institui o sistema estadual de gerenciamento integrado de recursos hídricos e dá outras providências. Maceió: Governo do Estado de Alagoas, 2001.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMAPÁ. Resolução CERH/AP Nº 9 DE 18/09/2017. Dispõe sobre a classificação dos usos de pequena vazão de derivação, captação, acúmulo e lançamento em recursos hídricos de domínio do Estado do Amapá, que são dispensados de outorga. **Diário Oficial do Estado**, Macapá, 16 de outubro de 2017.
- AMAZONAS. **Resolução CERH-AM nº 01, de 19 de julho de 2016**. Estabelece critérios técnicos a serem utilizados pelo Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas – IPAAM para o processo de análise de pedido de outorga do direito de uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Amazonas. Manaus, 19 de julho de 2016.

- ANA - Agência Nacional das Águas. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (BHO 2017)**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/0c698205-6b59-48dc-8b5e-a58a5dfcc989>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- ANA. **Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2011. 50 p. (Cadernos de capacitação em Recursos Hídricos, v. 6).
- ANA. Resolução nº 399, de 22 de julho de 2004. **Altera a Portaria nº 707, de 17 de outubro de 1994, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, e dá outras providências**. Brasília: ANA, 2004.
- ANTUNES, R. B.; CONSTANTE, V. T. Hidrografia. In: **Atlas Geográfico de Santa Catarina. Diversidade da natureza – Fascículo 2**. Florianópolis: Ed. UDESC, 2016. 2 ed., cap. 6. p. 113-140. doi: 105965/9788583020783220166114.
- ASUERO, A. G.; SAYAGO, A.; GONZÁLEZ, A. G. The Correlation Coefficient: An Overview. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 36, n. 1, p. 41-59, 2006.
- BACK, Á. J. **Bacias hidrográficas: classificação e caracterização física** (com o programa HidroBacias para cálculos). Florianópolis: Epagri, 2014. 162 p.
- BACK, Á. J.; JUST, M. C. Consumo de água em lavouras de arroz irrigadas em sistema coletivo. **Revista Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 24, p.133-145, 2018.
- BACK, Á. J.; WILDNER, L. P.; GARCEZ, J. G. Análise de chuvas intensas visando ao dimensionamento de estruturas de conservação do solo para a região de Chapecó, Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 95-100, 1 ago. 2019. Tikinet Edicao Ltda. - EPP. doi: 10.22491/rac.2019.v32n3.14.
- BACK, Á. J.; ZAMBRANO, G. J. D.; CORSEUIL, C. W. Análise de vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Timbó, SC. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXIII SBRH**, 2019, Foz do Iguaçu, PR. Anais... Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2019.
- 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 hidrologicamente consistente**. 2002. 148 p. Tese (Magister scientiae em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9466/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- BAENA, L. G. N.; DA 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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, set./dez. 2004.
- BAHIA. **Decreto nº 6.296**, de 21 de março de 1997. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos, infração e penalidades e dá outras providências. Salvador: Governo do Estado da Bahia, 1997.
- BARROS, C. G. D.; PESSOA, F. C. L.; SANTANA, L. R.; LOPES, Y. K. L.; COSTA, C. E. A. de S. Vazão mínima  $Q_{7,10}$  no Amapá estimada por modelos probabilísticos. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 284-294, 2018. doi: 10.13083/reveng.v26i3.930.
- BAZZO, K. R.; GUEDES, H. A. S.; CASTRO, A. S.; SIQUEIRA, T. M.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A. Regionalização da vazão  $Q_{95}$ : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, RS. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal Of**

**Applied Science**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 855-870, 23 ago. 2017. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). doi: 10.4136/ambi-agua.2032.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, 1994. 112 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de jan. de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Brasília: Diário Oficial da União, 1997.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de jul. de 2000. **Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências**. Brasília: Diário Oficial da União, 2000.

BRASIL. Resolução nº 1.938, de 30 de out. de 2017. **Dispõe sobre procedimentos para solicitações e critérios de avaliação das outorgas preventivas e direito de uso de recursos hídricos**. Brasília: Diário Oficial da União, 2017.

CADORIN, S. B. **Avaliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Manoel Alves com enfoque na outorga de direito de uso de água para a rizicultura**. 2018. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC.

CEARÁ. **Decreto nº 23.067**, de 11 de fevereiro de 1994. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e cria o Sistema de Outorga para Uso da Água. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 1994.

CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; GASPARINI, K. A. C.; CATRINCK, C. N. Avaliação de métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia do rio Itapemirim. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 2, p. 122-132, 2018.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.43-51, 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n3.p43-51>.

CHIANG, S. L.; JOHNSON, F. W. Low flow criteria for diversions and impoundments. **Journal of the Water Resources Planning and Management Division**, v. 102, p. 227-238, 1976.

CLARKE, R. T. Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/ UFRGS: ABRH, 2014. 4 ed. cap. 17. p. 659-702. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

CLARKE, R. T. **Statistical Modelling in Hydrology**. Porto Alegre: Wiley, 1994. 411 p.

DAS, N. M. S.; SIMONOVIC, S. P. The Comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the Upper Thames River Watershed under Global Climate Models. **Water Resources Research Report**, Londres, p. 1-54. Set. 2011.

DE LIZ, D. Sistema de Apoio à Gestão de Recursos Hídricos para o Estado de Santa Catarina. **Revista Uniplac**, v. 4, n. 1, 2016.

DRHS - Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento. **Plano da Bacia Hidrográfica do rio Mampituba - Fase A: Diagnóstico do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica**

do rio Mampituba. 2020. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/1050-bh-mampituba>. Acesso em: 05 fev. 2021.

ELESBON, A. A. A.; SILVA, D. D. da; SEDIYAMA, G. C.; GUEDES, H. A. s.; RIBEIRO, C. A. A. S.; RIBEIRO, C. B. de M. Multivariate statistical analysis to support the minimum streamflow regionalization. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 838-851, out. 2015. FapUNIFESP (SciELO). doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n5p838-851/2015.

ELETROBRÁS - Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, RJ, 1985. 202 p.

ELIAS, G. A.; PADILHA, P. T.; SANTOS, R. O bioma Mata Atlântica em Santa Catarina. In: SANTOS, R.; ZANETTE, V. C.; ELIAS, G. A.; PADILHA, P. T. **Bioma de Santa Catarina**: Parque Estadual da Serra Furada. Criciúma, SC: UNESC, 2016. 188 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, 10., 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

EPA - Environmental Protection Agency. **Technical Support Document for Water Quality-based Toxics Control**. EPA/505/2-90-001, v. 57, n. 109, 1991.

ESPÍRITO SANTO. **Resolução CERH nº 005/2005 de 07 de julho de 2005**. Vitória: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

FERREIRA, G. M. **Regionalização de vazões de referência Q7,10 e Q90**. 2010. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

FINKLER, N. R.; MENDES, L. A.; SCHNEIDER, E. H. M.; BORTOLIN, T. A.; SCHNEIDER, V. E. Comparação de Funções de Distribuição de Probabilidades na Determinação de Vazão Mínima Anual e Sazonal. **Scientia Cum Industria**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 42-49, 21 nov. 2015. Universidade Caxias do Sul. doi: 10.18226/23185279.v3iss2p42.

GAGG, G. Aplicações do teste de Filliben para avaliação da normalidade de amostras. In: UFRGS. **10 anos do curso de Engenharia Cartográfica da UFRGS**. Porto Alegre: UFRGS/IG/LPG, 2008. p. 44-48.

GARCIA, O. Simplified method-of-moments estimation for the Weibull distribution. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 11, n. 3, p. 304-306, 1981.

GASQUES, A. C. F.; MEVES, G. L.; SANTOS, J. D. dos; OKAWA, C. M. P.; MAUAD, F. F. REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS: breve revisão teórica. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 60-70, 6 mar. 2018. Universidade Federal de Goiás. doi: 10.5216/reec.v14i2.47105.

GERMANO, A.; PEDROLLO, M. C. Regionalização de vazões na bacia do rio Tubarão. In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte: ABRH, 1999.

GOIÁS. Resolução nº 09, de 04 de maio de 2005. Estabelece o Regulamento do Sistema de outorga das águas de domínio do Estado de Goiás e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Goiânia, nº 19.653, de 02 de junho de 2005.

GOTARDO, R.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E.; SEVERO, D. L.; KAUFMANN, V. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**, Florianópolis, v. 33, n. 67, p. 253-276, 2018. doi: 10.5007/2177-5230.2018v33n67p253

GRANEMANN, A. R. B.; MINE, M. R. M.; KAVISKI, E. Frequency analysis of minimum flows. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 23, e17, 2018. doi: 10.1590/2318-0331.0318170080.

GUEDES, Y. M. F. **Avaliação da regionalização das vazões  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mlt}$  do rio Boa Esperança – SC**. 2018. 82 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192325>. Acesso em: 01 nov. 2019.

HOSKING, J. R. M. L-Momentos: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics. **J. R. Statist. Soc. B**. New York, p. 105-124. jan. 1990.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acesso em: 25 fev. 2021.

KITE, G. W. **Frequency and risk analyses in hydrology**. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications, 1978. 224 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478 p.

LUNDGREN, W. J. C.; SOUZA, I. F. de; LUNDGREN, G. A. Krigagem na construção de mapa pluviométrico do Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 013-022, 2017.

MACIEL, A. L.; VIEIRA, E. M.; MONTE MOR, R. C.; VASQUES, A. C. Regionalização e espacialização de vazões de permanência: estudo aplicado na bacia rio Piracicaba-MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019. doi: 10.5380/abclima.v24i0.58420.

MARANHÃO. Resolução CONERH Nº 57 DE 21/05/2019. Estabelece os critérios gerais para a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, São Luís, 23 de maio de 2019.

MARTIN, G.R.; FOWLER, K.K.; ARIHOOD, L.D. **Estimating selected low-flow frequency statistics and harmonic-mean flows for ungaged, unregulated streams in Indiana**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2016 –5102, 2016. 45 p. doi: 10.3133/sir20165102.

MASSIGNAM, A.M.; PANDOLFO, C. **Estimativa da evapotranspiração de referência mensal e anual no Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2006. 24 p.

MATIAS, F. J. N. **Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Baixo Rio Grande\_UPGRH-GD8**. 2018. 103 p. Dissertação (Mestre em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, MG. doi: 10.14393/ufu.di.2018.859.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Econômico. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Resolução nº 25**, de 3 de março de 2015. Estabelece critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos. Campo Grande: CERH, 2015.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Resolução nº 27**, de 9 de julho de 2009. Estabelece os critérios técnicos a serem aplicados nas análises dos pedidos de outorga de captação superficial, quanto à disponibilidade hídrica, ao uso racional da água e à garantia de seus usos múltiplos. Cuiabá: CEHIDRO, 2009.

MELLO, C. R., LIMA, J. M., SILVA, A. M., MELLO, J. M., OLIVEIRA, M. S.. Krigagem e

inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 925-933, 2003.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de Gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. **Irriga**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.334-350, 22 dez. 2005. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. doi: 10.15809/irriga.2005v10n4p334-350.

MENDES, L. A. **Análise dos critérios de outorga de direito de usos consultivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência**. 2007. 187 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. doi: 10.11606/D.3.2007.tde-01082007-180524.

MINAS GERAIS. Secretário de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março 2012**. Dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; Instituto Mineiro de Gestão de Águas, 2012.

MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. Análise de métodos para estimativa das vazões da bacia do rio Paraopeba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 313-324, 2014. doi: 10.21168/rbrh.v19n2.p313-324.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NAGHETTINI, M.; PORTELA, M. M. **Probabilidade e Estatística Aplicadas à Hidrologia**. Hidrologia Aplicada. DECivil, IST: 2011. 57 p.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande**. 2008. 173 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, MG. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/3512>. Acesso em: 11 jan. 2021.

OLIVEIRA, V. A. de. **Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 e GD2**. 2013. 99 p. Dissertação (Mestre em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3744>. Acesso em: 05 jan. 2021.

PARÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Resolução nº 10**, de 3 de setembro de 2010. Dispõe sobre os critérios para análise de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos e dá outras providências. Belém: CERH, 2010.

PARAÍBA. **Decreto nº 19.260**, de 31 de outubro de 1997. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e dá outras providências. João Pessoa: Governo do Estado da Paraíba, 1997.

PARANÁ. Decreto nº 4.646, de 31 de agosto de 2001. Dispõe sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos e adota outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Curitiba, n. 6062, 31 de agosto de 2001.

PEREIRA, J. R. **Caracterização hidrológica como ferramenta de análise ambiental da APA/Bacia do Rio Maior**. 2016. 103 p. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) –

Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/3986>. Acesso em: 01 nov. 2019.

PERNAMBUCO. Resolução APAC Nº 2 DE 23/11/2012. Estabelece critérios técnicos para concessão das outorgas de captação de água em surgências. **Diário Oficial do Estado**, Recife, 28 de novembro de 2012.

PETRUCCI, E; OLIVEIRA, L. A. Coeficientes de assimetria e curtose nos dados de vazão média mensal da bacia do rio Preto-BA. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (org). **Os desafios da geográfica física na fronteira do conhecimento**. Campinas, SP: Instituto de Ciências - UNICAMP, v. 1, 2017. doi: 10.20396/sbgfa.v1i2017.1785.

PIAUI. Resolução CERH nº 004/05, de 26 de abril de 2005. Dispõe sobre Critérios e Procedimentos Provisórios para Outorga Preventiva e Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado**, Teresina, nº 083, 05 de maio de 2005.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, P. L.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 830-838, 2016. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p830-838/2016.

PYRCE, R. Hydrological low flow indices and their uses. **Watershed Science Centre**, n. 4, 33 p., 2004.

RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES, F. A.; SILVA, D. D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 2, p. 103-117, 2005.

RIO DE JANEIRO. Resolução INEA nº 162 de 26 de dezembro de 2018. Estabelece critério para a determinação da vazão de referência para fins do cálculo de disponibilidade hídrica para outorga de direito de uso de recursos hídricos e usos considerados insignificantes de domínio do estado do Rio de Janeiro e revoga o art. 10 e altera o art. 18 da portaria SERLA nº 567, de 07 de maio de 2007. **Diário Oficial do Estado**, Rio de Janeiro, nº 16, 22 de janeiro de 2019.

RIO GRANDE DO NORTE. **Decreto nº 13.283**, de 22 de março de 1997. Regulamenta os incisos III do art. 4º da Lei nº 6.908, de 01 de julho de 1996, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Natal: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 1997.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 37.033, de 21 de novembro de 1996. Regulamenta a outorga do direito de uso da água no Estado do Rio Grande do Sul, prevista nos artigos 29, 30 e 31 da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994. **Diário Oficial do Estado**, Porto Alegre, 22 de novembro de 1996.

RONDÔNIA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Rondônia (PERH/RO): Diagnóstico dos Recursos Hídricos**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental – SEDAM, 2017.

RORAIMA. Decreto nº 8.123, de 12 de julho de 2007. Regulamenta o inciso III, do artigo 4º, bem como os artigos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77 e 78 da Lei n.º 547, de 23 de junho de 2006, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos”. **Diário Oficial do Estado de Roraima**, Boa Vista, n. 617 p. 4–9, 12 de julho de 2007.

SADR - Secretaria de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Rural de Santa Catarina. **Estudos dos instrumentos de gestão de recursos hídricos para o Estado de Santa**

**Catarina e apoio a sua implementação:** regionalização de vazões das bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: SADR; SDS; Engecorps-Tetraplan-Lacaz Martins, 2006. 141 p.

SANTA CATARINA. Lei nº 10.949, de 09 de novembro de 1998. **Dispõe sobre a caracterização do Estado em 10 (dez) Regiões Hidrográficas.** Florianópolis, SC, 1998.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável. Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008. Estabelece os critérios de natureza técnica para outorga de direito de uso de recursos hídricos para captação de água superficial, em rios de domínio do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Florianópolis, n. 18.414, 31 de julho de 2008a.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável. Portaria SDS nº 51, de 2 de outubro de 2008. Altera a Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008. **Diário Oficial do Estado**, Florianópolis, n. 18.462, de 7 de outubro de 2008b.

SÃO PAULO. **Instrução Técnica DPO nº 12, de 30/05/2017.** Estabelece critérios e procedimentos para apresentação de documentação, referente a aproveitamentos hidrelétricos (Usina Hidrelétrica de Energia – UHE; Pequena Central Hidrelétrica - PCH e Central Geradora Hidrelétrica - CGH). Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos, São Paulo, 2017.

SÃO PAULO. Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH e dá providências correlatas. **Assessoria Técnica da Casa Civil**, São Paulo, 14 de dezembro de 2016.

SCHREFFLER, C. L. **Low-flow statistics of selected streams in Chester County, Pennsylvania.** U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4117, 1998. 43 p. doi: 10.3133/wri984117.

SDM - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Tubarão e Complexo Lagunar - Volume I:** Atividades preliminares. Florianópolis, 2002. Disponível em: [http://www.aguas.sc.gov.br/index.php?option=com\\_k2&view=item&layout=item&id=1904&Itemid=248&jsmallfib=1&dir=JSROOT/DHRI/Planos+de+Bacias/Plano+da+Bacia+Hidrografica+do+Rio+Tubarao+e+Complexo+Lagunar/Volume+I](http://www.aguas.sc.gov.br/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=1904&Itemid=248&jsmallfib=1&dir=JSROOT/DHRI/Planos+de+Bacias/Plano+da+Bacia+Hidrografica+do+Rio+Tubarao+e+Complexo+Lagunar/Volume+I). Acesso em: 05 fev. 2021.

SDS - Secretaria de Desenvolvimento Sustentável. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Araranguá - Etapa B:** Diagnóstico e Prognóstico dos Recursos Hídricos: Relatório B2 – Cenário Hídrico Atual. Porto Alegre, RS: Profill, 2014. 227 p. Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/base-documental/planos-de-bacias?jsmallfib=1&dir=JSROOT/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Ararangua>. Acesso em: 05 fev. 2021.

SDS. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Urussanga - Etapa C:** diagnóstico dos recursos hídricos. 2019. Disponível em: [https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Urussanga/Etapa\\_C\\_Diagnostico.pdf](https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Urussanga/Etapa_C_Diagnostico.pdf). Acesso em: 05 fev. 2021.

SDS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina - PERH/SC:** Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos de Santa Catarina. 2017a. Disponível em: [http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Plano%20Estadual/etapa\\_b/PERH\\_SC\\_Cenario\\_atual\\_CERTI-CEV\\_2017\\_final-2.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Plano%20Estadual/etapa_b/PERH_SC_Cenario_atual_CERTI-CEV_2017_final-2.pdf). Acesso em: 05 fev. 2021.

SDS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina – PERH/SC:** Caracterização geral das Regiões Hidrográficas de Santa Catarina (RH9 – Sul Catarinense). 2017b. 33 p.

SDS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina – PERH/SC:** Caracterização geral das Regiões Hidrográficas de Santa Catarina (RH10 – Extremo Sul Catarinense). 2017c. 33 p.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul - Relatório Síntese da Fase A:** Diagnóstico e prognóstico hídrico das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: Ecoplan Engenharia, 2007. 146 p. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/perh>. Acesso em: 05 fev. 2021.

SERGIPE. Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CONERH. **Resolução nº 01**, de 19 de abril de 2001. Dispõe sobre Critérios para a Outorga de Uso de Recursos Hídricos. Aracaju: CONERH/SE, 2001.

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

SILVA, D. D.; MARQUES, F. de A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do rio São Francisco. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 5, p. 392-403, 2009. doi: 10.13083/reveng.v17i5.166.

SILVEIRA, A.; MOURA, R. M. P.; ANDRADE, N. L. R. Determinação da  $Q_{7,10}$  para o Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil e comparação com a vazão regularizada após a implantação do reservatório de aproveitamento múltiplo de Manso. **Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. Punta del Este – Uruguay, 2006. 8 p.

SINGB, K. P.; RAMAMURTHY, G. S.; SEO, I. W. **7-Day 10-year low flows of streams in the Rock, Spoon, La Moine, and Kaskaskia regions**. Illinois State Water Survey Contract Report 440, 1988. 32 p.

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 240, p. 147-186, 2001. doi: 10.1016/s0022-1694(00)00340-1.

SOUZA, R. M. de; SANTOS, I. dos. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.L.], v. 28, p. 134-154, 2013. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v28i0.32304>.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Frequency Analysis of Extreme Events, chapter 18 in **Handbook of Hydrology**, MAIDMENT, D. R. (ed.), New York: McGraw-Hill, 1993.

STUCKEY, M. H. **Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5130, 2006. 84 p.

SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Manual técnico de outorgas**. Curitiba: SUDERHSA, 2006.

TOCANTINS. Secretário de Estado do Planejamento e Meio Ambiente. Decreto no 2.432, de 6 de junho de 2005. Regulamenta a outorga do direito de uso de recursos hídricos de que

dispõem os artigos 8º, 9º e 10 da Lei 13.07, de 22 de março de 2002. **Diário Oficial do Estado do Tocantins**, Palmas, n. 1935, 7 de junho 2005.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Ed. da Universidade/Porto Alegre: UFRGS, 2002. 256 p.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. As múltiplas dimensões da crise hídrica. **Revista USP**. Dossiê crise hídrica. n. 106, p. 21-30, 2015.

ULIANA, E. M.; MARTINS, C. A. da S.; SILVA, J. G. F. da.; REIS, E. F. dos. Análise estatística para determinação da  $Q_{7,10}$  na Bacia do Rio São Mateus. In: **Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 16.; Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 11.**, 2011, São José dos Campos, SP. As contribuições da ciência para a sustentabilidade do planeta. São José dos Campos: UNIVAP, 2011. Disponível em: <http://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/handle/123456789/3600>. Acesso em: 13 nov. 2019.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., Eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIVEKANANDAN, N. Comparison of EV1 and EV2 distributions for extreme value analysis of rainfall, temperature and wind speed. **International Journal of Exploring Emerging Trends in Engineering (IJEETE)**, v. 2, jul-aug, 2015a. p. 210-218.

VIVEKANANDAN, N. Flood frequency analysis using method of moments and L-moments of probability distributions. **Cogent Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-10, 16 mar. 2015b. Informa UK Limited. doi: 10.1080/23311916.2015.1018704.

WOLFF, W. **Regionalização hidrológica do estado de Santa Catarina: uma abordagem sazonal e geoestatística baseada em modelos**. 2017. 80 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

WOLFF, W.; DUARTE, S.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 21-33, 2014. doi: 10.21168/rbrh.v19n4.p21-33.

**APÊNDICES**

APÊNDICE A – Matriz de correlação de Pearson de cada região hidrologicamente homogênea

**Tabela 1A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_7$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 1.

	$Q_7$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$E_{\text{toanual}}$	$E_{\text{tojun}}$
$Q_7$	1,00										
A	<b>0,98</b>	1,00									
L	0,66	0,71	1,00								
Dec	<b>-0,77</b>	<b>-0,84</b>	-0,92	1,00							
Dd	0,02	0,13	0,25	-0,08	1,00						
S	-0,61	-0,71	-0,89	0,97	-0,09	1,00					
$P_{\text{anual}}$	-0,56	-0,51	-0,64	0,68	0,57	0,63	1,00				
$P_{\text{ts}}$	0,37	0,47	0,05	-0,37	0,17	-0,39	0,18	1,00			
$P_{\text{mês}}$	0,33	0,44	0,09	-0,24	0,65	-0,24	0,49	0,84	1,00		
$E_{\text{toanual}}$	0,12	0,15	0,27	-0,48	-0,66	-0,58	-0,64	0,26	-0,25	1,00	
$E_{\text{tojun}}$	-0,43	-0,51	-0,04	0,40	0,02	0,41	-0,04	-0,98	-0,73	-0,39	1,00

**Tabela 2A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_7$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 2.

	$Q_7$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$E_{\text{toanual}}$	$E_{\text{tojun}}$
$Q_7$	1,00										
A	<b>0,99</b>	1,00									
L	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	1,00								
Dec	0,61	0,52	0,66	1,00							
Dd	<b>-0,94</b>	<b>-0,92</b>	<b>-0,99</b>	-0,70	1,00						
S	0,49	0,40	0,56	0,93	-0,60	1,00					
$P_{\text{anual}}$	0,67	0,63	0,75	0,73	-0,78	0,80	1,00				
$P_{\text{ts}}$	0,47	0,39	0,54	0,89	-0,56	0,97	0,86	1,00			
$P_{\text{mês}}$	<b>-0,72</b>	-0,66	<b>-0,81</b>	-0,87	<b>0,84</b>	-0,92	-0,94	-0,90	1,00		
$E_{\text{toanual}}$	-0,48	-0,48	-0,57	-0,41	0,59	-0,63	-0,89	-0,69	0,79	1,00	
$E_{\text{tojun}}$	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	0,61	<b>-0,94</b>	0,49	0,67	0,47	<b>-0,72</b>	-0,48	1,00

**Tabela 3A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_7$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 3.

	$Q_7$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_7$	1,00										
A	<b>1,00</b>	1,00									
L	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	1,00								
Dec	-0,59	-0,54	-0,22	1,00							
Dd	-0,62	-0,67	-0,89	-0,23	1,00						
S	-0,44	-0,45	-0,62	-0,10	0,68	1,00					
$P_{\text{anual}}$	<b>-0,86</b>	<b>-0,88</b>	<b>-0,97</b>	0,19	0,88	0,78	1,00				
$P_{\text{ts}}$	<b>-0,87</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,95</b>	0,31	0,80	0,75	<b>0,98</b>	1,00			
$P_{\text{mês}}$	<b>0,70</b>	<b>0,72</b>	<b>0,89</b>	0,00	-0,88	-0,91	<b>-0,96</b>	<b>-0,93</b>	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	0,55	0,59	0,82	0,20	-0,91	-0,91	-0,90	-0,85	0,98	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,90</b>	-0,59	-0,62	-0,44	<b>-0,86</b>	<b>-0,87</b>	<b>0,70</b>	0,55	1,00

**Tabela 4A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_{30}$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 1.

	$Q_{30}$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_{30}$	1,00										
A	<b>0,94</b>	1,00									
L	0,49	0,71	1,00								
Dec	-0,68	-0,84	-0,92	1,00							
Dd	0,07	0,13	0,25	-0,08	1,00						
S	-0,54	-0,71	-0,89	0,97	-0,09	1,00					
$P_{\text{anual}}$	-0,35	-0,51	-0,64	0,68	0,57	0,63	1,00				
$P_{\text{ts}}$	0,62	0,47	0,05	-0,37	0,17	-0,39	0,18	1,00			
$P_{\text{mês}}$	0,55	0,44	0,09	-0,24	0,65	-0,24	0,49	0,84	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	0,11	0,15	0,27	-0,48	-0,66	-0,58	-0,64	0,26	-0,25	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	-0,65	-0,51	-0,04	0,40	0,02	0,41	-0,04	-0,98	-0,73	-0,39	1,00

**Tabela 5A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_{30}$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 2.

	$Q_{30}$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_{30}$	1,00										
A	<b>0,99</b>	1,00									
L	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	1,00								
Dec	-0,24	-0,17	-0,28	1,00							
Dd	0,56	0,52	0,66	-0,68	1,00						
S	<b>-0,91</b>	<b>-0,92</b>	<b>-0,99</b>	0,31	-0,70	1,00					
$P_{\text{anual}}$	0,42	0,40	0,56	-0,51	0,93	-0,60	1,00				
$P_{\text{ts}}$	0,61	0,63	0,75	-0,04	0,73	-0,78	0,80	1,00			
$P_{\text{mês}}$	0,40	0,39	0,54	-0,35	0,89	-0,56	0,97	0,86	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	-0,65	-0,66	-0,81	0,35	-0,87	0,84	-0,92	-0,94	-0,90	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	-0,42	-0,48	-0,57	-0,26	-0,41	0,59	-0,63	-0,89	-0,69	0,79	1,00

**Tabela 6A** - Matriz de correlação de Pearson entre a vazão média mínima anual  $Q_{30}$  de cada estação e as possíveis variáveis explicativas para a RHH 3.

	$Q_{30}$	A	L	Dec	Dd	S	$P_{\text{anual}}$	$P_{\text{ts}}$	$P_{\text{mês}}$	$EtO_{\text{anual}}$	$EtO_{\text{jun}}$
$Q_{30}$	1,00										
A	<b>1,00</b>	1,00									
L	<b>0,89</b>	<b>0,93</b>	1,00								
Dec	-0,69	-0,74	-0,91	1,00							
Dd	-0,60	-0,54	-0,22	-0,03	1,00						
S	-0,61	-0,67	-0,89	0,89	-0,23	1,00					
$P_{\text{anual}}$	-0,43	-0,45	-0,62	0,76	-0,10	0,68	1,00				
$P_{\text{ts}}$	<b>-0,85</b>	<b>-0,88</b>	<b>-0,97</b>	0,94	0,19	0,88	0,78	1,00			
$P_{\text{mês}}$	<b>-0,87</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,95</b>	0,93	0,31	0,80	0,75	<b>0,98</b>	1,00		
$EtO_{\text{anual}}$	0,69	0,72	0,89	-0,95	0,00	-0,88	-0,91	-0,96	-0,93	1,00	
$EtO_{\text{jun}}$	0,54	0,59	0,82	-0,93	0,20	-0,91	-0,91	-0,90	-0,85	0,98	1,00