

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO CENTRAL DO RIO  
GRANDE DO SUL – INDICADORES REGIONAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Deise Michelotti**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE  
DO SUL – INDICADORES REGIONAIS**

**Deise Michelotti**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Michelotti, Deise  
Disponibilidade hídrica de pequenas bacias  
hidrográficas na região central do Rio Grande do Sul -  
indicadores regionais. / Deise Michelotti.-2015.  
80 f.; 30cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2015

1. Disponibilidade hídrica 2. Modelo WIN\_IPH2 3.  
Pequenas bacias I. Paiva, João Batista Dias de II.  
Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Deise Michelotti. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: deisemichelotti@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação  
de Mestrado**

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL  
– INDICADORES REGIONAIS**

elaborada por  
**Deise Michelotti**

Como requisito para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**João Batista Dias de Paiva, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Débora Missio Bayer, Dra (UFSM)**

**Nadia Bernardi Bonumá, Dra (UFSC)**

Santa Maria, 31 de agosto de 2015.

*Dedico este trabalho aos meus pais  
Sergio Paulo Michelotti e Beloni Juditte Michelotti.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente a Deus pela vida e por não deixar-me fraquejar nos momentos difíceis pelos quais passei!*

*À minha família, pelo carinho, incentivo e apoio em minhas decisões, em especial a meus pais, Sergio e Beloni aos meus irmãos Serginho, Rosane e Rafael por nunca deixarem de acreditar em mim.*

*Ao meu namorado Daniel Moreira Vieira pelo apoio incondicional, amor, carinho, compreensão e companheirismo ao longo dos anos que compartilhamos;*

*Ao professor João Batista Dias de Paiva, meu orientador, por acreditar em minha capacidade, por sua amizade, ensinamentos e oportunidades durante o período no grupo de pesquisa,*

*Aos professores do PPGEC em Recursos Hídricos e Saneamento, pelos conhecimentos transmitidos;*

*À funcionária da secretaria do PPGEC, Marília, pela presteza, auxílio referente a assuntos administrativos e pela amizade que cultivamos ao longo desta caminhada;*

*Aos técnicos José Astério Rosa do Carmo e Alcides Sartori pela amizade, companheirismo e apoio no intuito de me manter no foco para prosseguir e posteriormente concluir meu projeto de Dissertação.*

*Aos colegas do mestrado do grupo GHidros e do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSM pela amizade, companheirismo e apoio, em especial à Tatiana Reckziegel, Marielle Medeiros Ruliana Bandinelli, Luciane Calheiro, Cristiane Graepin, Ronaldo Araujo, Robson Ilha, Helenesio Cabral e Pablo Valcorte que contribuíram para a execução deste trabalho;*

*Ao CNPq e a CAPES pelas bolsas de estudos.*

*Especialmente a minha amiga Marília Tamiosso por tamanha presteza e apoio incondicional durante todo o Projeto de Dissertação, ocasião em que mesmo tendo que viajar constantemente para lecionar em outra cidade, abria mão de seu período de descanso aos finais de semana para ajudar-me nesta empreitada, razão pela qual aproveito-me da presente mensagem para dizer-te o quanto prezo por nossa amizade, bem como o quão importante foste na elaboração deste projeto.*

*Ao amigo Fábio Alex Beling pela amizade e apoio prestado quando me conduziu no início do projeto.*

*Presto eterno agradecimento e homenagem à Professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, a qual teve suma importância na elaboração deste trabalho, pessoa iluminada que me disse as palavras certas na hora em que estava quase desistindo, ocasião em que me estendeu a mão dando o apoio que precisava. Fugindo das formalidades de mero agradecimento, gostaria de ressaltar que levarei para a vida as palavras de apoio, confiança e carinho que recebi da Professora Eloiza, da qual só restam saudades.*

*Por fim, agradeço ao Professor João Batista Dias de Paiva pelo empenho e presteza para a conclusão do presente trabalho, uma vez que por várias ocasiões me dava alguns “puxões de orelha”, atuando não só como orientador, mas como um pai que preza pelo sucesso da filha. Saiba que por muitas vezes pensei em abandonar este projeto, confesso que tinha medo das nossas reuniões, pois parecia que o projeto restava inerte, não saía do ponto onde comecei, mas sempre que pegava na minha mão e dizia: “não te preocupa, vou estar contigo, vou te ajudar!”, me dava o combustível necessário para continuar, o tempo foi passando os dados foram se organizando e o prazo se esgotando, foi quando tive o prazer inenarrável de lhe escutar dizer “Conseguimos, terminamos!”. Obrigado por me orientar em tempo integral, não somente no trabalho, mas me ensinando a seguir os meus anseios e não desistir dos meus sonhos diante dos obstáculos que a vida cedo ou tarde apresenta.*

*Muito Obrigada*

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL - INDICADORES REGIONAIS**

**AUTORA: DEISE MICHELOTTI**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA**

**Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de agosto de 2015.**

A disponibilidade hídrica natural em uma pequena bacia hidrográfica pode ser representada pelas vazões máximas, médias e mínimas, sendo o conhecimento destas de grande importância para um adequado planejamento do uso e da gestão dos recursos hídricos, minimizando assim os conflitos entre os diversos usuários. O objetivo deste estudo é simular a disponibilidade hídrica e estimar os Indicadores Regionais em pequenas bacias hidrográficas na região central do Rio Grande do Sul, utilizando o modelo WIN\_IPH2. O modelo foi calibrado com séries curtas de vazões e posteriormente, foi realizada a extensão da série de vazão a partir das séries longas de precipitação histórica. Com as séries de vazão estendida foram obtidas as curvas de permanência e os indicadores regionais de vazão. Os resultados apresentaram-se satisfatórios quanto a calibração e validação, pois obteve-se bons ajustes para os parâmetros e um bom coeficiente de Nash Sutcliffe. Para a curva de permanência comparou-se os resultados entre os anos de 1961 a 2000 e 2002 a 2015 da mesma estação pluviométrica (UFMS) para as estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, não apresentando diferença entre os resultados encontrados nas vazões médias. Para a bacia hidrográfica do rio Ibicuí Mirim encontrou-se um resultado abaixo da média esperada. Para os indicadores regionais de vazão foram encontrados valores satisfatórios para os índices de enchentes e o índice  $rcp_{50}$  (vazão média). Para os índices de vazão mínima os valores tenderam a zero por se tratar de bacias menores e por ter optado por uma função objetivo para máximas e médias.

**Palavras-chave:** Disponibilidade hídrica. Modelo WIN\_IPH2. Pequenas bacias.

## **ABSTRACT**

MSc Dissertation  
Post- Graduation program in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### **WATER AVAILABILITY OF SMALL HYDROGRAPHIC BASINS IN THE CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL - REGIONAL INDICATORS**

**AUTHOR: DEISE MICHELOTTI**

**ADVISER: PROF. DR. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA**

**Place and date of defense: Santa Maria August 31<sup>o</sup>, 2015.**

The natural water availability in a small hydrographic basin can be represented by its maximum, average and minimum flow. The knowledge of these values has a great importance for a proper planning of shared use and management, minimizing conflicts between its users. The purpose of this study is to simulate water availability and to estimate regional indicators in small hydrographic basins in the central region of Rio Grande do Sul by using the WIN\_IPH2 model. The model was calibrated with short flow series and, after that, the extension of the flow series was realized from the historical precipitation long series. By using the extended flow series, permanence curves and the regional flow indicators were obtained. Results were satisfactory in calibration and validation, as it was obtained a good adjustment to parameters and a good Nash Sutcliffe coefficient. For the flow duration curve, results from years 1961 to 2000 and from 2002 to 2015 were compared from the same pluviometric station (UFSM) for the Vacacaí Mirim hydrographic basin pluviometric stations, and no differences in average flow results were found. For the Ibicuí Mirim hydrographic basin, a result below the expected average was found. For the regional flow indicators, it was found values near the expected for the flood index and the  $rcp_{50}$  index (average flow). For the minimum flow indexes, values tended to zero because hydrographic basins were small and because an objective function for maximum and averages was used.

**Key words:** Water availability. WIN\_IPHS2 model. Small hydrographic basins.

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Perdas por evaporação no solo e interceptação. ....	31
Figura 2 – Continuidade na camada superior do solo. ....	32
Figura 3 – Representação gráfica das funções do algoritmo de infiltração. ....	34
Figura 4 – Situação I completada no algoritmo de infiltração. ....	35
Figura 5 – Situação IIa contemplada no algoritmo de infiltração. ....	36
Figura 6 – Situação IIb Contemplada no algoritmo de infiltração. ....	36
Figura 7 – Ilustração do modelo de Clark. ....	37
Figura 8 – Fluxograma de cálculo do Modelo IPH II. ....	41
Figura 9 – Área de Estudo, bacia Arroio Grande, Menino Deus II e Menino Deus IV. ....	43
Figura 11 – Interface do modelo WIN_IPH2 com o algoritmo SCE-UA. ....	52
Figura 12 – Representação do fluviograma e da curva de permanência. ....	54
Figura 13 – Vazões observadas e calculadas com a série de calibração de 167 dias na bacia MDII. ....	58
Figura 14 – Vazões observadas e calculadas com série de calibração de 102 dias para a bacia MDIV. ....	59
Figura 15 – Vazões observadas e calculadas com série de calibrações de 160 dias para a bacia Lajeado Grande (SMS). ....	59
Figura 16 – Comparação da série de vazão observada coma calculada no período de Validação do modelo na bacia MDII com 128 dias. ....	61
Figura 17 – Comparação da série observada e calculada no período de validação do modelo, da Bacia Lajeado Grande de SMS com 720 dias. ....	62
Figura 18 – Curva de permanência das bacias MDII, MDIV e Arroio Grande com 12 anos e 4 meses. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo WIN_IPH2 .....	22
Tabela 2 – Características das bacias hidrográficas estudadas. ....	43
Tabela 3 – Estações fluviométricas e pluviométricas e suas principais características. ....	47
Tabela 4 – Sugestões de Rmax para intervalos diários. ....	50
Tabela 5 – Limites máximos e mínimos dos parâmetros utilizados na calibração do modelo WIN_IPH2.....	51
Tabela 6 – Período séries observadas de vazão para validação do modelo. ....	53
Tabela 7 – Estações pluviométricas utilizadas no processo de simulação. ....	53
Tabela 8 – Período das vazões observadas para o processo de calibração .....	56
Tabela 9 – Parâmetros de calibração do modelo WIN_IPH2. ....	59
Tabela 10 –Valores de validação do modelo WIN_IPH2 nas bacias hidrográficas. ..	62
Tabela 11 –Vazões da curva de permanência (mínima, média e máxima em m <sup>3</sup> /s). ....	67
Tabela 12 –Vazões calculadas para as estações fluviométricas da bacia dos Rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim, em m <sup>3</sup> /s. ....	72
Tabela 13 –Indicadores regionais de vazão calculados para as bacias hidrográficas dos Rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim. ....	73

## LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

A	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
ANA	Agência Nacional das Águas
BDGHIDROS	Banco de dados do grupo de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFSM
CNS	Coeficiente de Nash Suttcliffe
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
FOMIN	Função Objetivo de coeficiente das mínimas
H	Parâmetro de decaimento da curva de infiltração
HTA	Histograma Tempo Área (coeficiente de forma)
$I_0$	Taxa máxima de infiltração no solo
$I_b$	Taxa mínima de infiltração no solo
IMP	Porcentagem da área impermeável
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH2	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
km	Quilômetros
$K_{Sub}$	Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo
$K_{Sup}$	Parâmetro de propagação do escoamento superficial
MDII	Menino Deus II
MDIV	Menino Deus IV
q	Vazão específica (l/(s.km <sup>2</sup> ))
$Q_{100}$	Vazão média ao período de retorno de 100 anos (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{50}$	Vazão de 50% da curva de permanência (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de duração de 7 dias com período de retorno de 10 anos
$Q_{95}$	Vazão de 95% da curva de permanência (m <sup>3</sup> /s)
$Q_m$	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{mc}$	Vazão média com período de retorno de 2 anos (m <sup>3</sup> /s)
$R_{max}$	Capacidade máxima do reservatório de interceptação
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution – University of Arizona
$S_{max}$	Teor máximo de umidade no solo
$t_p$	Tempo de percurso
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
WIN_IPH2	Modelo IPH2 para Windows

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	13
2 OBJETIVOS .....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	16
3.1 Disponibilidade Hídrica .....	16
3.2 Modelos hidrológicos .....	19
3.2.1 Modelo WIN_IPH2 .....	21
3.2.2 Aplicações do modelo IPH2 .....	23
3.3 Indicadores Regionais.....	24
3.3.1 Indicador de vazão específica média .....	25
3.3.2 Indicadores obtidos a partir da curva de permanência $r_{cp95}$ e $r_{cp50}$ .....	25
3.3.3 Indicadores de vazões mínimas .....	26
3.3.4 Indicadores de vazões máximas $r_{mc}$ e $r_{100}$ .....	27
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	30
4.1 Modelo chuva – vazão .....	30
4.1.1 Modelo WIN_IPH2 .....	30
4.1.1.1 Algoritmo de perdas por evaporação e interceptação .....	30
4.1.1.2 Algoritmo de separação dos escoamentos.....	31
4.1.1.3 Algoritmo de propagação do escoamento superficial .....	37
4.1.1.4 Algoritmo de propagação do escoamento subterrâneo .....	39
4.2 Área de estudo.....	42
4.2.1 Bacia hidrográfica Vacacaí Mirim.....	42
4.2.2 Bacia hidrográfica Arroio Grande.....	44
4.2.3 Bacia hidrográfica Menino Deus II .....	44
4.2.4 Bacia hidrográfica Menino Deus IV.....	45
4.2.5 Bacia hidrográfica Lajeado Grande.....	45
4.3 Informações hidrológicas .....	47
4.4 Aplicação do modelo WIN_IPH2 .....	48
4.4.1 Calibração do modelo WIN_IPH2 .....	49
4.4.2 Validação .....	52
4.4.3 Extensão das séries e geração de vazões .....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.1 Dados para calibração do modelo.....	56
5.2 Calibrações das Séries .....	57
5.3 Validação .....	60
5.4 Curva de Permanência .....	63
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	76

## INTRODUÇÃO

A falta de informações hidrológicas em pequenas bacias gera incertezas que comprometem o gerenciamento dos Recursos Hídricos. Em consequência a essa situação limita-se o processo de gerenciamento de planejamento do uso da água, como a avaliação de aproveitamentos de pequenos mananciais, com pequenas centrais hidrelétricas, sistemas de irrigação e abastecimento urbano. Essa ausência de dados hidrológicos prejudica os estudos de avaliação da qualidade das águas e os de apoio a instrução de processos de outorga (SILVEIRA ET AL, 1998).

Com o constante crescimento populacional há um aumento considerável no uso da água devido a diversos fatores como a industrialização e a expansão das fronteiras agrícolas, além do próprio consumo doméstico e saneamento básico (GASTALDINI et al., 2002). Desta forma, é necessário o desenvolvimento de ferramentas de análise e simulação que funcionem como suporte ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, auxiliando os Comitês de Bacias responsáveis pela tomada de decisão nas questões relacionadas aos recursos hídricos na bacia hidrográfica.

Para o planejamento dos recursos hídricos há uma necessidade de urgência e que tem o objetivo de ajustar as demandas econômicas, sociais e ambientais por água em níveis sustentáveis, de modo a permitir, sem que não haja conflitos, a convivência de seus usos atuais e futuros (SOARES ET AL, 2010).

Devido a relevância do tema cabe lembrar que sua fundamentação legal é regida pela Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que regulamenta o inciso XIX do art 21 da Constituição Federal e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

No Brasil a disponibilidade hídrica de pequenas bacias é estimada com dados de bacias maiores, uma vez que as estações de medição de vazões da rede nacional de monitoramento dos recursos hídricos localizam-se em geral em bacias maiores que 300km<sup>2</sup>. Devido a isso, as estimativas são obtidas por meio de: estudos de regionalização da curva de permanência de vazões e também da simulação chuva vazão (SILVEIRA e TUCCI, 1998). A estimativa da disponibilidade é a vazão

que pode ser utilizada em diversas atividades de consumo. É de grande interesse particular, pois dela depende a quantidade de água que poderá ser outorgada no sistema de recursos hídricos (CRUZ, 2001).

Na escassez de dados observados, estudos hidrológicos devem ser realizados para conduzir as estimativas de disponibilidade hídrica. Usualmente propõe-se um modelo de geração de precipitação diária, que procura incorporar as modificações simplificadoras compatíveis com as condições de disponibilidade de dados e utiliza-se um modelo chuva-vazão para a obtenção das vazões diárias. A partir desses dados de vazão estendidos se obtêm a vazão característica da curva de permanência (vazões mínimas, médias, máximas) e os indicadores regionais de vazão.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi simular a disponibilidade hídrica e estimar os Indicadores Regionais (vazões características da curva de permanência, vazões mínimas, vazões médias e vazões máximas) em pequenas bacias hidrográficas na região central do estado do RS, utilizando o modelo WIN\_IPH2.

**Para atender o objetivo foram desenvolvidas as seguintes atividades:**

- Analisar os dados hidroclimatológicos disponíveis (chuva, vazão e evapotranspiração).
- Calibrar os parâmetros do modelo WIN\_IPH2 com séries curtas de chuva, vazão e evapotranspiração.
- Validar a calibração realizada em períodos maiores, não utilizados na calibração.
- Estender a série de vazão a partir das séries longas de precipitação e representa-las por meio da curva de permanência;
- Estimar os Indicadores Regionais de vazão.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

Devido à falta de dados fluviométricos, em lugares onde inexitem ou são insuficientes, faz-se necessário à utilização de métodos para estimativa de vazões de modo a suprir esse problema. Devido à carência de dados fluviométricos em pequenas bacias ocorre uma limitação relativa ao desenvolvimento de estudos para quantificação de disponibilidade hídrica. Devido a essa escassez de dados tornou-se indispensável a busca de formas de transferência de dados conhecidos de um lugar para outro, abrangendo uma mesma área e comportamento hidrológico semelhante. Dentre as técnicas de transferência de informações, uma das mais recorrentes é a regionalização hidrológica, que consiste na extrapolação de parâmetros ou variáveis hidrológicas para regiões sem dados ou com disponibilidade insuficiente dos mesmos.

#### **3.1 Disponibilidade Hídrica**

A disponibilidade hídrica é a quantidade de água que pode ser utilizada em diversas atividades de consumo para o desenvolvimento da sociedade, sem que se comprometa a demanda ecológica. O estudo da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica é exposto pelas vazões médias e mínimas, é fundamental o conhecimento destas, sendo de grande importância para um adequado planejamento do uso e da gestão compartilhada dos recursos hídricos, minimizando assim os conflitos pelo uso da água entre os usuários.

A vazão média é a vazão máxima possível a ser regularizada no curso d'água, caracterizando como a maior disponibilidade hídrica de uma bacia. O conhecimento desta vazão permite avaliar os limites superiores do uso da água de um manancial para as diversas finalidades (NOVAES, 2005). As vazões mínimas são de grande importância para o estudo da disponibilidade hídrica, pois é nos períodos de ocorrência destas vazões em que a disponibilidade de água é considerada crítica para atender todas as demandas, principalmente nos rios que

preservam as condições naturais, isto é, que não possuem reservatórios de acumulação (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

Para Silveira e Silveira (2001), as vazões mínimas são bem definidas em uma bacia, na parte inferior da curva de depleção, pois seus limites tendem a zero, que seria o limite extremo inferior. Deste modo, as vazões mínimas são estudadas com base exclusivamente em medidas fluviométricas, podendo elas ser analisadas em três enfoques diferentes.

A **vazão mínima estatística** é determinada pelo seu valor, duração e período de retorno. Para o valor correspondente à média da vazão de estiagem na duração considerada e o período de retorno é fornecida pela distribuição estatística que melhor se ajusta a esta variável assim definida. O período de retorno de uma vazão de estiagem estatística, definido pelo seu valor e pela sua duração, que correspondem ao seu tempo médio a que ela pode ser inferiorizada ou igualada. As vazões mínimas estatísticas, utilizadas em estudo da disponibilidade hídrica e que consideram sua magnitude, duração, frequência e depleção é a vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

A **curva de vazão mínima de permanência** é um índice muito utilizado em estudos principalmente em processos de concessão de outorga, a qual representa uma parcela de tempo que uma determinada vazão é igualada num período histórico definido, sendo as vazões 90 ( $Q_{90\%}$ ) e 95 ( $Q_{95\%}$ ) de permanência as mais utilizadas neste processo (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

As **vazões mínimas ecológicas**, ou de **preservação ambiental**, são vazões mínimas necessárias que podem garantir a sobrevivência do ecossistema. Para determiná-las é preciso de um estudo multidisciplinar de dados fluviométricos em união com o ecossistema dependente do regime hidrológico. Na ausência de tais estudos, estimativas estatísticas tem dado subsídio a abordagem ecológica e frequentemente a vazão ecológica emprega-se a vazão mínima  $Q_{7,10}$  ou vazões de maior permanência no tempo ( $Q_{90\%}$  ou  $Q_{95\%}$ ), sem qualquer ligação com os ecossistemas (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

Segundo Tamiosso (2012), “em processos de outorga de direito uso dos recursos hídricos, a vazão máxima outorgável é definida em função da vazão mínima ecológica, isto é, a vazão que deve ser mantida no curso”. O assunto sobre disponibilidade hídrica e outorga está bem fundamentada na tese “Disponibilidade

*Hídrica para Outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais*” desenvolvida por Cruz (2001).

Vazão ecológica, no estado do Rio Grande do Sul está definida pelo Decreto Estadual nº 37.033 de 1996, artigo 5º, “*Ressalva a competência da União, a FEPAM definirá as quantidades mínimas de água necessária para a manutenção da vida nos ecossistemas aquáticos, para cada Bacia Hidrográfica*”.

Importante frisar que existindo dados disponíveis sobre disponibilidade hídrica não há grande dificuldade de se aferir sua estimativa, entretanto, tais dados geralmente apresentam incertezas. Ocorre que grande parte das bacias do mundo apresentam dados mínimos ou inexistentes, razão pela qual geram grande dificuldade de se obter qualquer estimativa, fato que somado a falta de redes de monitoramento contribui para o aumento das incertezas de estimativa adequada da previsão e gestão de recursos hídricos, tanto na quantidade quanto na qualidade de tais recursos, situação que se agrava com os impactos antrópicos (como mudança no uso do solo) e variações climáticas (SIVAPALAN et al, 2003).

No Brasil, podemos mencionar alguns estudos que abordam sobre a disponibilidade hídrica. Assim como, o trabalho de Paiva et al. (1999) que estudou a caracterização das disponibilidades hídricas do rio São Francisco, baseando-se na reconstituição da vazão natural. Após a análise dos dados existentes na bacia do rio São Francisco, os autores verificaram que, para o trecho entre as nascentes e o reservatório de Três Marias, por exemplo, não havia dados confiáveis para que se pudessem avaliar as disponibilidades naturais. Assim, para obter as séries de vazões naturais para os locais dos postos fluviométricos selecionados no estudo, os autores utilizaram os dados de vazões afluentes aos reservatórios de Três Marias e Sobradinho e os transferiram para as seções de interesse, em uma demonstração das dificuldades do procedimento de reconstituição das vazões naturais com base na demanda exercida.

Silveira (1997) também avaliou a caracterização da disponibilidade hídrica para simulações de chuva-vazão para a estimativa de vazão em pequenas bacias com carência de dados. Neste estudo monitorou 12 pequenas bacias de 1 a 11km<sup>2</sup>, de uma rede experimental estabelecida na região Serrana do Rio Grande do Sul em um período de 2 a 3 anos, também analisou a curva de permanência e as formas de como sintetizar com menor incerteza para a seção fluvial. Este estudo é inovador,

pois vincula o processo de síntese de vazões, 3 vazões medidas no local. Assim, o procedimento uniu os parâmetros regionais à realidade física de pequenas bacias, reduzindo as incertezas inerentes do processo de síntese de vazões em locais com carência de dados.

Neste mesmo contexto, Cruz (2001) também estudou a disponibilidade hídrica para outorga e o gerenciamento da outorga, utilizando dados fluviométricos existentes das bacias dos rios Vacacaí, Vacacaí-Mirim, Pardo, Pardinho e Baixo Jacuí, pertencentes à bacia do rio Guaíba, no Rio Grande do Sul, onde concluiu que a instrução de outorga trata-se de procedimento complexo que envolve balanço entre disponibilidade hídrica e demandas do uso de água, compatibilizando as necessidades de conservação ambiental e as restrições de ordem econômica, social e legal. Em contrapartida, que o equacionamento utilizado no estudo permite a implementação de simulações que utilizam o critério de outorgas escalonadas e combinações, bem como o emprego de técnicas de otimização multi-objetivo, incluindo, também, a avaliação das consequências econômicas e ambientais de cada cenário.

### **3.2 Modelos hidrológicos**

Os modelos hidrológicos estão presentes no desenvolvimento de diversas áreas do conhecimento humano, científico e das ciências naturais, bem como na física, astronomia, agricultura e hidrologia. Na hidrologia, os modelos hidrológicos busca representar no todo ou em partes o comportamento de um processo hidrológico, em um dado instante ou intervalo de tempo.

Os modelos hidrológicos são ferramentas que a ciência desenvolveu para uma melhor representação e entendimento do comportamento do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica. Para a aplicação desses modelos que é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvido no ciclo hidrológico, o que proporciona o desenvolvimento de um grande número de modelos hidrológicos (TUCCI et al., 2002).

Com o desenvolvimento da tecnologia computacional a partir da década de 1950, os modelos matemáticos tiveram um acelerado processo de desenvolvimento de dados, disseminação e popularização de técnicas computacionais, com esses modelos hidrológicos, eles estão baseados em conceitos físicos, no qual, estão em substituição com os modelos existentes a que utilizavam somente métodos de indicadores estatísticos (TUCCI, 2005). Com o crescimento da tecnologia, isto é, aumento da disponibilidade de computadores, possibilitou o aprimoramento dos métodos baseados em indicadores estatísticos devido à automação do processo envolvido na aplicação destes métodos.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados em dois grandes grupos determinísticos e estocásticos. Chow citado por Tucci (2005) descreve que se o modelo considera a chance de ocorrência das variáveis, ou seja, utiliza o conceito de probabilidade este será denominado estocástico, caso o modelo segue um processo definido que não seja baseado em probabilidade, o modelo é dito determinístico.

Segundo Carvalho (2001), os modelos determinísticos procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto que os modelos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries de afluições.

As previsões, nos modelos físicos, são obtidas a partir de dados de precipitações ocorridas e previstas, enquanto que nos modelos estocásticos as previsões são obtidas tendo como base as últimas afluições observadas. As previsões de vazões para os planejamentos de médio e curto prazo tendem a ser feitas através de modelos estocásticos. Já as previsões para o curtíssimo prazo, podem ser feitas através de modelos físicos (determinísticos), (CARVALHO, 2001, p 3).

Os modelos chuva vazão são uma ferramenta que permite compreender o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes da observada (TUCCI, 2005).

Segundo Tucci (2005) as séries de dados disponíveis de vazões normalmente são mais curtas que as séries de precipitação. Os modelos chuva vazão surgiram para simular a parte do processo do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, possibilitando assim, completar períodos desconhecidos de vazão.

Nessa dissertação o modelo utilizado foi o WIN\_IPH2 (Bravo et al., 2006) que se classifica como um modelo chuva-vazão, determinístico do tipo conceitual,

concentrado. Onde esse modelo acopla três modelos, o IPHII (TUCCI, 2005), o algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1992) e o algoritmo MOCOM-UA (Yapo et al., 1998).

### 3.2.1 Modelo WIN\_IPH2

O modelo IPH2 descrito por Tucci et al (1981) foi desenvolvido, pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no final da década de 70, com o objetivo de proporcionar seu uso para projetos de engenharia, tanto em bacias rurais quanto urbanas. O modelo WIN\_IPH2 faz parte de uma família de modelos desenvolvidos pelo IPH, utiliza poucos parâmetros e é baseado em algoritmos conhecidos, e pode ser aplicado em bacias características distintas (TUCCI, 2005).

O modelo é composto pelos seguintes algoritmos:

- Perdas por evaporação e interceptação;
- Separação de escoamentos;
- Propagação dos escoamentos superficiais; e
- Propagação do escoamento subterrâneos.

Os dados de entrada necessários para aplicação do modelo são:

- Área da bacia;
- Tempo de concentração;
- Taxa impermeável da bacia;
- Coeficiente de forma do HTA;
- Séries de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada (para caso de calibração);
- Series de precipitação e evapotranspiração potencial (para caso de simulação).

Os parâmetros de calibração do modelo são:

- ***l<sub>o</sub>*** - capacidade de infiltração máxima do solo;
- ***l<sub>b</sub>*** - capacidade de infiltração mínima do solo;
- ***h*** - parâmetro de decaimento da infiltração no solo;
- ***K<sub>s</sub>*** - parâmetro de propagação do escoamento superficial;

- **$K_{sub}$**  - parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo;
- **$R_{máx}$**  - capacidade máxima do reservatório de interceptação.

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo WIN\_IPH2

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	UNIDADES
$R_{max}$	capacidade máx. do reservatório de interceptação	mm
$S_{max}$	teor máximo de umidade do solo	mm
$I_0$	capacidade de infiltração para $t = 0$	mm h <sup>-1</sup>
$I_b$	capacidade de infiltração mínima	mm h <sup>-1</sup>
$K$ ou $h$	parâmetro empírico função do tipo de solo	h <sup>-1</sup> ou admen.
$t_p$	tempo de percurso	h
$K_{Sup}$	coef. de recessão do escoamento superficial	h
$K_{Sub}$	coef. de recessão do escoamento subterrâneo	h
$IMP$	percentagem de área impermeável	%

Os parâmetros utilizados no modelo que necessitam ser ajustado são:  $K_{sub}$ , como o coeficiente de depleção do escoamento subterrâneo  $K_{sub}$  pode ser estimado a partir da recessão dos hidrogramas observados. Sendo ele muito pouco sensível, principalmente para as simulações de cheias isoladas. O parâmetro  $R_{max}$  também é pouco sensível e pode ser facilmente ajustado através da análise dos volumes observados e calculados pelo modelo. Este parâmetro representa as perdas iniciais que variam com as características da bacia hidrográfica e com as condições antecedentes do evento. Os parâmetros mais sensíveis para o ajuste do modelo são:  $I_0$ ,  $I_b$ ,  $h$  para o controle do volume do escoamento. O parâmetro  $K_{sup}$  representa o tempo em (números de intervalos) entre o centro do hietograma (após a aplicação do histograma tempo-área) e o centro de massa do hidrograma.

### 3.2.2 Aplicações do modelo IPH2

O modelo IPH2 tem sido aplicado em diversos estudos como em 1981 que foi aplicado por Tucci, Sanchez e Lopez no rio Ray na Inglaterra, tributário do rio Thames, possuía uma área de drenagem de 18,6 km<sup>2</sup>. O acompanhamento foi ministrado no período de 11 dias onde houve a disponibilidade de dados horários de precipitação, assim como evaporação potencial e vazão, tendo assim o modelo apresentado um resultado satisfatório. A aplicação do IPH2 também foi ministrada no território brasileiro nas bacias do rio Capivari em Santa Catarina, onde apresentava uma área de 810 km<sup>2</sup>, do arroio Dilúvio, contribuindo com uma área de 15 km<sup>2</sup>, e dos rios Mathias e Jaguarão com áreas de 2,6 km<sup>2</sup> e 9,1 km<sup>2</sup>. No arroio Dilúvio devido a calibração de eventos isolados, pode-se constatar uma tendência não linear das funções, porém os resultados predominantes foram considerados satisfatórios.

O bom desempenho do modelo foi comprovado por diversos autores, aplicando-o a escalas de tempo diferentes e bacias hidrográficas de áreas variáveis, desde micro-bacias urbanas Germano et al. (1998) até bacias de tamanhos significativamente maiores Mine (1998).

O modelo IPH2 foi utilizado para o cálculo de reservatórios em diversas bacias como Genovez (1987) e Richter (1992) que seguiu sua metodologia, assim como Brun (1990) que também aplicou este modo em tempo real.

O modelo, também já foi estudado para as bacias que esta sendo trabalhada neste estudo pelos autores Meller et al. (2002), Fronza (1995), Marins (2004).

Moreira et al (2007) estudou modelagem com dados de radar e pluviômetros. Maziero (2010) utilizou para o método do HTA, Tamiosso (2012) ampliou seu estudo comparando com outro modelo.

Outros exemplos de aplicação do IPH II podem ser encontrados em Bravo et al. (2007), Krauskop Neto et al. (2005) e Favoreto et al. (2003). Hass & Mine (1999) apresentam ainda um estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros envolvidos no modelo.

### 3.3 Indicadores Regionais

Os indicadores regionais são utilizados para suprir a falta de informações hidrológicas em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados, tratando-se de ferramenta importantíssima para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Salienta-se que os modelos de regionalização de vazão tem por objetivo uma melhor estimativa de vazões em seções onde inexitem medições fluviométricas, modelos estes que não são recomendados em seções que possuem medições, tendo em vista que estes não podem substituir informações reais (SILVA JÚNIOR et al., 2002).

Os referidos indicadores regionais apresentam-se como alternativa para a regionalização de variáveis hidrológicas, sendo o indicador regional o valor médio de uma variável hidrológica ou proporção entre as variáveis características de uma região com comportamento homogêneo (TUCCI, 2002). Entre os diferentes indicadores regionais empregados para avaliação de vazões em regiões consideradas hidrologicamente homogêneas, a vazão específica tem sido o indicador mais recorrentemente utilizado (AGRA et al., 2005; PRUSKI et al., 2004). Desta forma, a relação entre os mesmos, de forma adimensional pode permitir uma menor variabilidade e seu uso com abrangência maior (TUCCI, 2002).

Apenas há poucos anos, começou-se a dar atenção à quantificação relativa aos erros na transferência de dados de uma bacia monitorada para uma bacia não monitorada com características semelhantes. Consiste por sua vez em uma tarefa não muito fácil, a regionalização de modelos chuva-vazão em bacias não monitoradas. De modo que as estimativas relacionadas aos valores hidrológicos, estão sujeitas às mais variadas incertezas relativas aos dados hidrológicos, assim como a falta de definições dos locais sem dados (TUCCI, 2002).

Alguns desses valores se apresentam da seguinte maneira:

- A vazão média de longo período;
- A vazão máxima média ou para outros tempos de retorno;
- A vazão mínima de 7 dias e 10 anos de período de retorno;
- A vazão de 95% da curva de permanência.

Serão estabelecidos indicadores aplicáveis à caracterização de vazões médias, vazões mínimas, vazões máximas e de vazões características da curva de permanência. Uma breve descrição dos indicadores é apresentada nos parágrafos subsequentes conforme TUCCI (2005).

### 3.3.1 Indicador de vazão específica média

A vazão específica, relação entre a vazão média de longo período e área de drenagem da bacia hidrográfica, usualmente são expressas como indicadores estáveis, sendo aproximadamente constante para grupos de estações fluviométricas que não apresentem grande variação de área (TUCCI, 2002). Para grupos de bacias que apresentam áreas de drenagem muito diferentes, a relação entre vazão média e área pode deixar de ser linear, em função dos diferentes fatores que podem influenciar no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

$$q = \frac{Q_m}{A} \quad (01)$$

Onde:

q - vazão específica em l/(s.km<sup>2</sup>);

Q<sub>m</sub>- vazão média de longo período (m<sup>3</sup>/s);

A - área de drenagem (km<sup>2</sup>).

### 3.3.2 Indicadores obtidos a partir da curva de permanência rcp<sub>95</sub> e rcp<sub>50</sub>

Dois diferentes indicadores regionais serão obtidos a partir da curva de permanência: o rcp<sub>95</sub> e o rcp<sub>50</sub>. Estes indicadores serão estimados a partir das equações 28 e 29.

$$rcp_{95} = \frac{Q_{95}}{Q_m} \quad (02)$$

Onde:

$Q_{95}$  - vazão de 95% da curva de permanência em m<sup>3</sup>/s.

$Q_m$  – vazão média em m<sup>3</sup>/s.

$$rcp_{50} = \frac{Q_{50}}{Q_m} \quad (03)$$

Onde:

$Q_{50}$  - vazão com 50% da curva de permanência, que por sua vez, é um valor característico associado com as condições médias de escoamento do curso d'água.

A relação entre a vazão de 95% da curva de permanência e a vazão média de longo período permite estimar a primeira em função da vazão à medida que este índice é conhecido. Este índice pode apresentar pequena variação a medida que as características que determinam a variabilidade da vazão ao longo do ano se mantenham de um local para o outro. A vazão  $Q_{95}$  é um valor característico do comportamento de uma bacia hidrográfica em períodos de estiagem.

### 3.3.3 Indicadores de vazões mínimas

Para a avaliação das vazões mínimas em cursos d'água serão utilizados indicadores o  $r_{7,10}$  e o  $r_m$ . Outra vazão utilizada para a estimativa nas condições de vazão mínima é a vazão de duração de 7 dias com 10 anos de período de retorno ( $Q_{7,10}$ ). Pode ser expressa pelos dois índices apresentados nas equações 30 e 31, respectivamente.

$$r_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{Q_m} \quad (04)$$

$$r_m = \frac{Q_{95}}{Q_{7,10}} \quad (05)$$

O indicador  $r_{7,10}$  estabelece uma proporção entre a vazão média e uma vazão mínima característica, permitindo avaliar a vazão mínima a partir da média histórica de vazões na seção fluviométrica considerada. O indicador  $r_m$ , por sua vez, permite identificar a relação entre as duas vazões usualmente utilizadas como vazão mínima. A vazão mínima  $Q_{95}$  caracteriza uma situação de permanência de um estado recessivo de vazões; a vazão  $Q_{7,10}$ , por sua vez, indica uma situação de estado mínimo.

#### 3.3.4 Indicadores de vazões máximas $r_{mc}$ e $r_{100}$

A vazão associada a um período de retorno da ordem de dois anos indica a vazão média de enchente  $Q_{mc}$ , cujo valor corresponde aproximadamente à cota limite do leito menor de rios aluvionares. O indicador  $r_{mc}$ , que relaciona a referida vazão média de enchente e a vazão média de longo período.

$$r_{mc} = \frac{Q_{mc}}{Q_m} \quad (06)$$

Relaciona a vazão média da enchente e a vazão média de longo período num determinado local. Esse indicador permite estimar a amplitude das enchentes com relação às condições médias de um rio.

A vazão  $Q_{100}$ , que corresponde ao valor de vazão associado ao período de retorno de 100 anos, geralmente representa o limite superior da faixa de inundação ribeirinha. Relacionando essa vazão com a vazão média de longo período através de um indicador, relaciona-se a capacidade de escoamento do leito menor do rio e a capacidade do leito limite de inundação do vale. Desta forma, o indicador aplicável à esta situação será estimado pela relação:

$$r_{100} = \frac{Q_{100}}{Q_{mc}} \quad (07)$$

Este fator indica a variação de vazão que delimita a várzea do rio no local de estudo. Quando este fator se mantém constante, indica, aproximadamente, a proporção da vazão que atinge as margens, e a topografia local deve delimitar espacialmente a cota que será atingida.

Fatores de inundação devem variar principalmente em função do seguinte:

- Características das precipitações máximas da bacia: intensidade, distribuição temporal e espacial, que dependem dos tipos predominantes das precipitações;
- Características geomorfológicas dos rios: leito menor e leito maior (planície de inundação).

A primeira relação geralmente apresenta grande variabilidade, enquanto a vazão média de enchente tende a se correlacionar com a área da bacia para um determinado local. O segundo fator tende a apresentar menor variabilidade.

Segundo a descrição de Tucci, o uso de valores médios regionais de variáveis como indicadores não é um procedimento preciso, mas é útil para o seguinte: (i) verificar se os resultados de estudos específicos estão dentro da ordem de grandeza de uma determinada região; (ii) permitir uma primeira estimativa dos usos e controles dos recursos hídricos em locais sem dados (TUCCI, 2002).

Os indicadores regionais de vazão foram utilizados por Curado (2003), em estudo de vazões mínimas em sub-bacias do Rio Miranda, pertencente à Bacia do Alto Paraguai, no Estado do Mato Grosso do Sul.

Indicadores regionais para vazões máximas, médias e mínimas foram calculados no estudo de Reis et al. (2008), para avaliação do regime de vazão dos cursos d'água da bacia do Rio Itabapoana, importante sistema hídrico para a porção sul do Estado do Espírito Santo. Os autores obtiveram indicadores de vazões médias consistentes, com pequenos desvios entre os valores reais e estimados, e indicadores de vazões máximas eficientes. Em contrapartida, foram encontrados erros percentuais significativos para os indicadores de vazões mínimas. Serão discutidos, nos próximos itens, indicadores regionais usualmente utilizados para

estimativa de vazões médias, mínimas, máximas e vazões com diferentes permanências nos cursos d'água.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo descrito abaixo foi utilizado para o desenvolvimento deste estudo hidrológico e também como o uso dos indicadores regionais de vazão.

### 4.1 Modelo chuva – vazão

#### 4.1.1 Modelo WIN\_IPH2

A seguir são apresentados os algoritmos do modelo. O modelo está bem documentado em Bravo et al (2006), Tucci et al (1983), Germano et al (1998), Tucci (2005), Mine (1998) entre outros. A descrição que segue foi baseada nas literaturas citadas.

##### 4.1.1.1 Algoritmo de perdas por evaporação e interceptação

Inicialmente a evaporação é retirada da precipitação quando  $I_{he}$  for inferior. Caso contrário, a evaporação potencial é atendida pelo reservatório de interceptação (áreas permeáveis e depressões). No caso em que este reservatório seja totalmente esgotado, o déficit de evaporação potencial passa a ser atendido pela água contida no solo através da relação linear conforme a equação 8 e figura 8.1(a).

$$ES_t = \frac{EP_t \cdot S_t}{S_{max}} \quad (08)$$

Onde:

$ES_t$  - Evaporação do solo no tempo  $t$ ;

$EP_t$  - Evaporação potencial no tempo  $t$ ;  
 $S_t$  - Umidade do solo no tempo  $t$ ;  
 $S_{max}$  - Teor máximo de umidade do solo.

Quando a precipitação pluviométrica é maior que a evaporação potencial, a diferença é retida por interceptação até atingir sua capacidade máxima  $R_{max}$  conforme ilustra a figura 1 (b). Na precipitação restante é utilizado o algoritmo de infiltração para o cálculo dos valores superficial e percolado nas áreas permeáveis. A outra parte da precipitação resultante, sobre as áreas impermeáveis, é escoada apenas superficialmente, sem passar pelo algoritmo referido. IMP é o parâmetro utilizado para definir a percentagem de área impermeável na bacia.

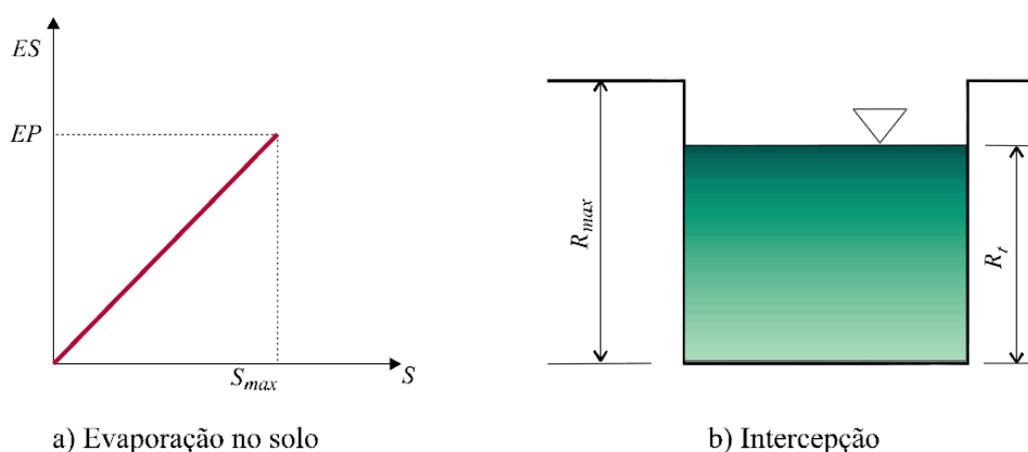


Figura 1 – Perdas por evaporação no solo e interceptação.

Fonte: MINE (1998).

#### 4.1.1.2 Algoritmo de separação dos escoamentos

A infiltração pode ser obtida pela equação de Horton (Equação 9).

$$I = I_b + (I_0 - I_b)h^t \quad (09)$$

Onde:

$$h = e^{-k}$$

$I$  - capacidade de infiltração no tempo  $t$ ;

$I_b$  - capacidade de infiltração mínima;

$I_0$  - capacidade de infiltração para  $t = 0$ ;

$k$  - parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo;

$e$  - base dos algoritmos neperianos.

A percolação da camada superior do solo é obtida pela equação 10.

$$T = I_b (1 - h^t) \quad (10)$$

A equação da continuidade aplicada à zona superior do solo, conforme figura 2, sendo expressa pela equação 11.

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (11)$$

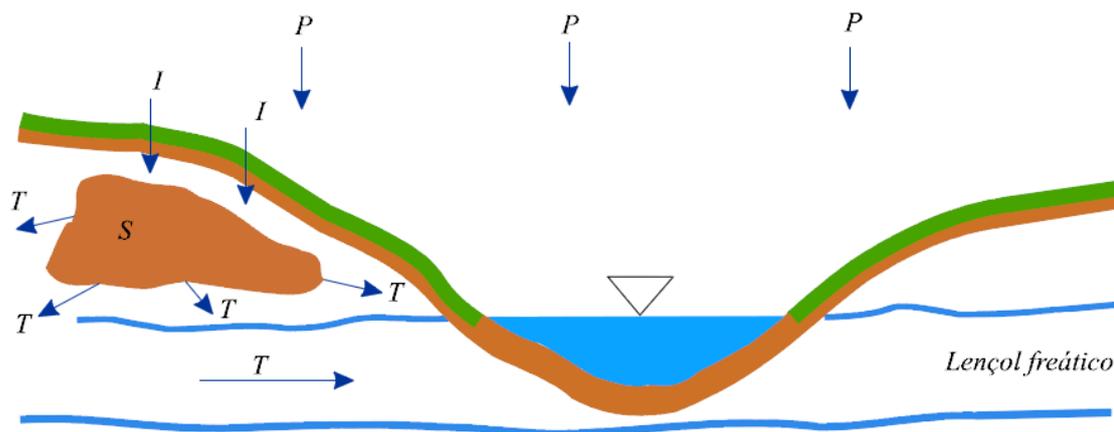


Figura 2 – Continuidade na camada superior do solo.

Fonte: MINE (1998)

Substituindo as equações 9 e 10 na equação 11 e integrando no intervalo de  $t = 0$  até  $t$ , tem-se como resultado a equação 12:

$$S = S_0 + \frac{I_0}{\ln h} (h^t - 1) \quad (12)$$

Onde:

$S_0$  - estado de umidade do solo quando inicia a percolação;

$I_0$  - capacidade de infiltração correspondente.

Isolando-se o termo  $h^t$  nas 9 e 10 e substituindo na equação 12, resultam as seguintes equações 13 e 14 para  $S_0=0$ . O algoritmo de infiltração está representado esquematicamente na figura 11.

$$S = a_i + b_i \cdot I(t) \quad (13)$$

$$S = b_t T(t) \quad (14)$$

Onde:

$T(t)$  – percolação

Sendo  $a_i$ ,  $b_i$  e  $b_t$  calculados conforme as equações 15, 16 e 17, respectivamente.

$$a_i = \frac{-I_0^2}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (15)$$

$$b_i = \frac{I_0}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (16)$$

$$b_t = \frac{-I_0}{\ln h I_b} \quad (17)$$

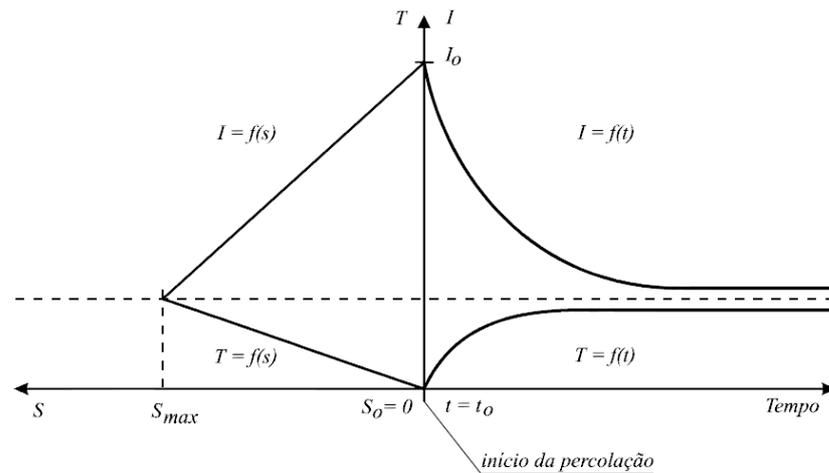


Figura 3 – Representação gráfica das funções do algoritmo de infiltração.

Fonte: MINE (1998)

Duas situações podem ocorrer no cálculo dos volumes superficial e percolado, sendo que uma delas compreende-se duas alternativas. A precipitação utilizada em todos os cálculos é a que resulta da aplicação do algoritmo de perdas.

**Situação I:  $P(t) > I(t)$**  (Figura 4). A precipitação é maior do que a capacidade de infiltração, a equação de Horton (equação 9) pode ser utilizada. O volume infiltrado é a integral, no intervalo de tempo  $[0, \Delta t]$  da equação de Horton, que resulta na equação 18. O volume escoado superficial é definido pela equação 19, e o volume percolado é obtido pela equação 20. Os volumes calculados serão propagados no algoritmo de propagação dos escoamentos.

$$V_i = I_b \cdot \Delta t + \frac{I(t) - I_b}{\ln h} (h^{\Delta t} - 1) \quad (18)$$

$$V_e = P(t) \cdot \Delta t - V_i \quad (19)$$

$$V_p = S_t - S_{t+1} + V_i \quad (20)$$

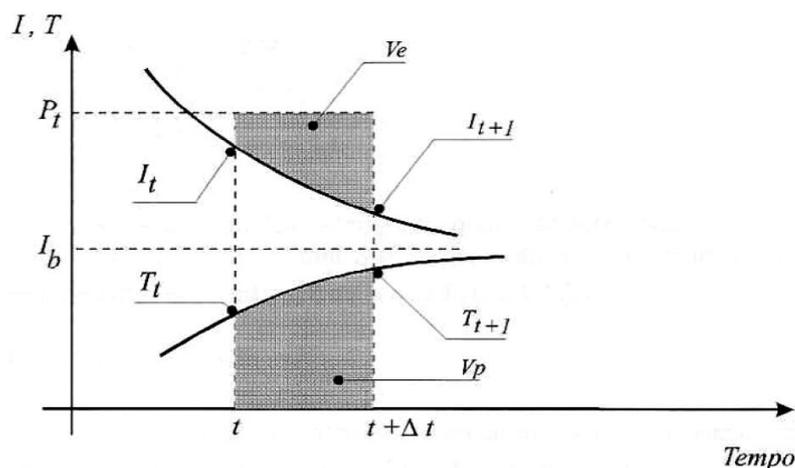


Figura 4 – Situação I completada no algoritmo de infiltração.

Fonte: TUCCI (2005).

**Situação II:  $P(t) < I(t)$ .** Neste caso a precipitação é menor do que a capacidade de infiltração. Portanto, a infiltração é substituída pela precipitação na equação da continuidade. Substituindo ainda na equação da continuidade a percolação  $T$  em função de  $S$  (equação 14) e resolvendo a equação diferencial da continuidade para o intervalo de tempo  $t, t + 1$ , resulta na seguinte equação 21, com  $P(t)$  em  $\text{mm}/\Delta t$ .

$$S_{t+1} = S_t e^{-\Delta t/bt} + P_t b_t (1 - e^{-\frac{\Delta t}{bt}}) \quad (21)$$

Nesta situação duas alternativas podem se apresentar:

**a)  $P(t) < I(t+1)$**  (figura 5). O volume infiltrado é toda a precipitação no intervalo de tempo e o volume escoado é nulo. A percolação é obtida pela equação 20.

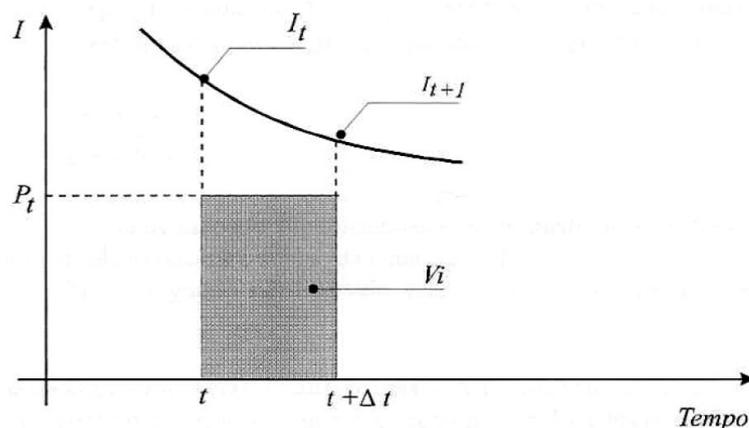


Figura 5 – Situação IIa contemplada no algoritmo de infiltração.

Fonte: TUCCI (2005)

**b)  $P(t) > I(t+1)$**  (Figura 6). Neste caso, a curva de infiltração cruza a precipitação formando duas condições diferentes. Há necessidade de se dividir o intervalo de tempo  $\Delta t$  em duas partes, sendo  $\Delta t_x$  a duração do primeiro subintervalo, no final do qual  $I_x = P$ . Após o cálculo de  $S_x$  e  $T_x$ , ocorre do mesmo encaminhamento da situação IIa, retira-se o valor de  $\Delta t_x$  da equação 21, e obtendo-se a equação 22.

$$\Delta t_x = \frac{2b_t(S_x - S_t)}{2b_tP - S_x - S_t} \quad (22)$$

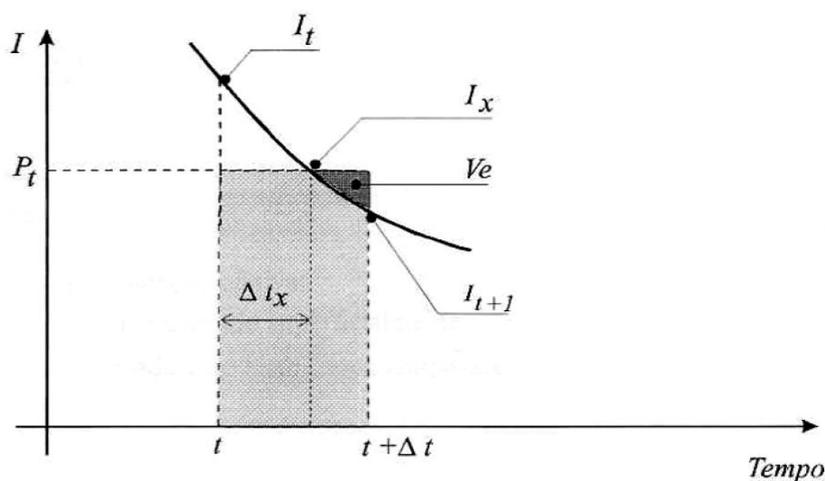


Figura 6 – Situação IIb Contemplada no algoritmo de infiltração.

Fonte: TUCCI (2005).

#### 4.1.1.3 Algoritmo de propagação do escoamento superficial

A propagação do volume superficial, determinado no algoritmo anterior, é feita até a seção principal da bacia pelo método de Clark. Este método utiliza a teoria do histograma tempo-área (HTA) para representar o efeito de translação e o modelo do reservatório linear simples (RLS) para o amortecimento, conforme a figura 7.

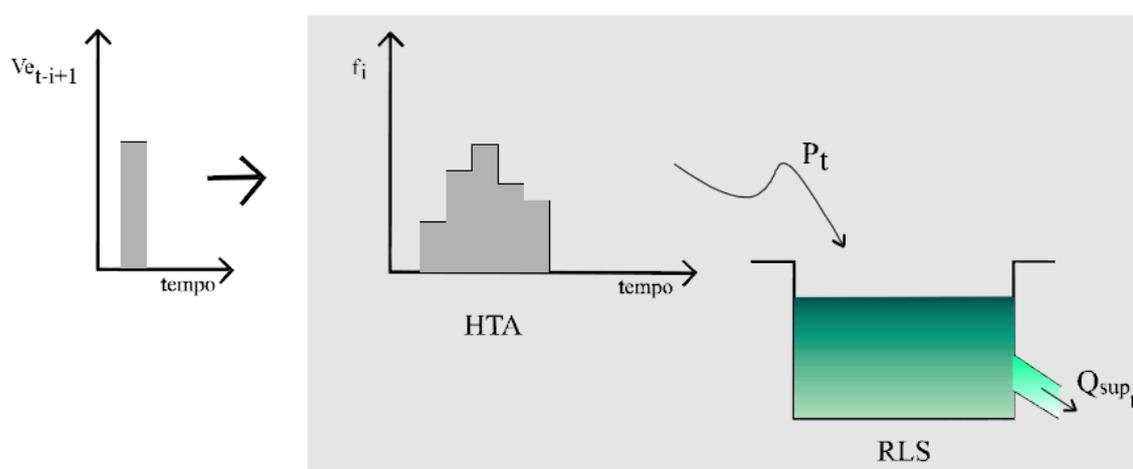


Figura 7 – Ilustração do modelo de Clark.

Fonte: MINE (1998).

O histograma tempo-área pode ser determinado através de um conhecimento detalhado da bacia hidrográfica. Quando não se dispõe de informações suficientes pode-se utilizar o histograma tempo-área sintético, que é obtido admitindo-se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto em estudo à seção principal. Considera-se a área de contribuição relacionada ao tempo de percurso pelas equações 23 e 24.

$$A_c = aT'^n \quad (23)$$

$$0 < T' < 1/2$$

$$A_c = 1 - a(1 - T')^n \quad (24)$$

$$1/2 < T' < 1$$

Onde:

$A_c$  - área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total;

$T'$  - tempo em unidades do tempo de concentração  $t_c$ ;

$n$  - coeficiente que varia com a forma da bacia;

$a = 0,5^{1-n}$ .

O histograma tempo-área é dividido em intervalos onde as coordenadas são calculadas utilizando a equação 25.

$$f_i = (A_{Ci} - A_{Ci-1}) \quad (25)$$

O algoritmo de separação do escoamento é utilizado para a parcela permeável da bacia. A altura de água resultante deste algoritmo é  $Ve_{(t)}$ . A altura de água superficial das superfícies impermeáveis é  $P_t$ . A altura total de água superficial resultante das superfícies permeáveis e impermeáveis é calculada por:

$$Vs_{(t)} = \sum_{i=r}^t Ve_{(t-i+1)} \cdot fp(i) + \sum_{i=r}^t P_{(t-i+1)} \cdot fm(i) \quad (26)$$

$$fp(i) = f(i) \cdot (1 - \alpha) \quad (27)$$

$$fm(i) = \alpha \cdot f(i) \quad (28)$$

Onde:

$r = 1$  para  $t < n$ ;

$r = t - n + 1$  para  $t > n$ ;

$n$  - número de ordenadas do HTA;

$f_p(i)$  - fator de ponderação do volume de escoamento superficial da parcela permeável;

$f_m(i)$  - fator de ponderação do volume de escoamento superficial da parcela impermeável;

$\alpha$  – taxa impermeável da bacia.

No reservatório linear simples, considera-se que o escoamento superficial sofre amortecimento equivalente ao de um reservatório. Este modelo combina a equação de armazenamento (equação 29) com a equação da continuidade concentrada sem contribuição lateral (equação 30), resultando na vazão superficial propagada (equação 31).

$$S = K_{sup} \cdot Q_s \quad (29)$$

$$\frac{dS}{dt} = V_s - Q_s \quad (30)$$

$$Q_{S(t+1)} = Q_{S_t} e^{-\Delta t / K_{sup}} + V_{S(t+1)} (1 - e^{-\Delta t / k_{sup}}) \quad (31)$$

Onde:

$K_{sup}$  - tempo médio de esvaziamento do reservatório ou tempo de retardo do escoamento superficial;

$V_s$  – vazão superficial de entrada do reservatório;

$Q_s$  - vazão superficial de saída do reservatório (vazão propagada);

$S$  - armazenamento do reservatório factício.

#### 4.1.1.4 Algoritmo de propagação do escoamento subterrâneo

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através de um RLS. Dessa forma, a vazão resultante do escoamento subterrâneo é dada por uma

equação semelhante à equação 31, onde o  $ksup$  é substituído por  $Ksub$  e  $Vs$  é substituído por  $Vp$ .

$$Qb_{(t+1)} = Qb_{(t)}.e^{-\Delta t/Ksub} + Vp_{(t+1)}.(1 - e^{-\Delta t/Ksub}) \quad (32)$$

Essa formulação representa a recessão do hidrograma, e  $Ksub$  representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo.

A vazão total calculada é obtida pela soma da vazão subterrânea e superficial em cada intervalo de tempo.

O fluxograma do modelo é apresentado na figura 8 e representa o processo de cálculo em um intervalo de tempo. Os parâmetros utilizados no modelo estão descritos na tabela 1. O valor de  $S_{max}$  é obtido pelo uso da equação 33 para  $I = I_b$ , ou seja, quando o solo atinge a grau de saturação, resultando:

$$S_{max} = -\frac{I_0}{\ln h} \quad (33)$$

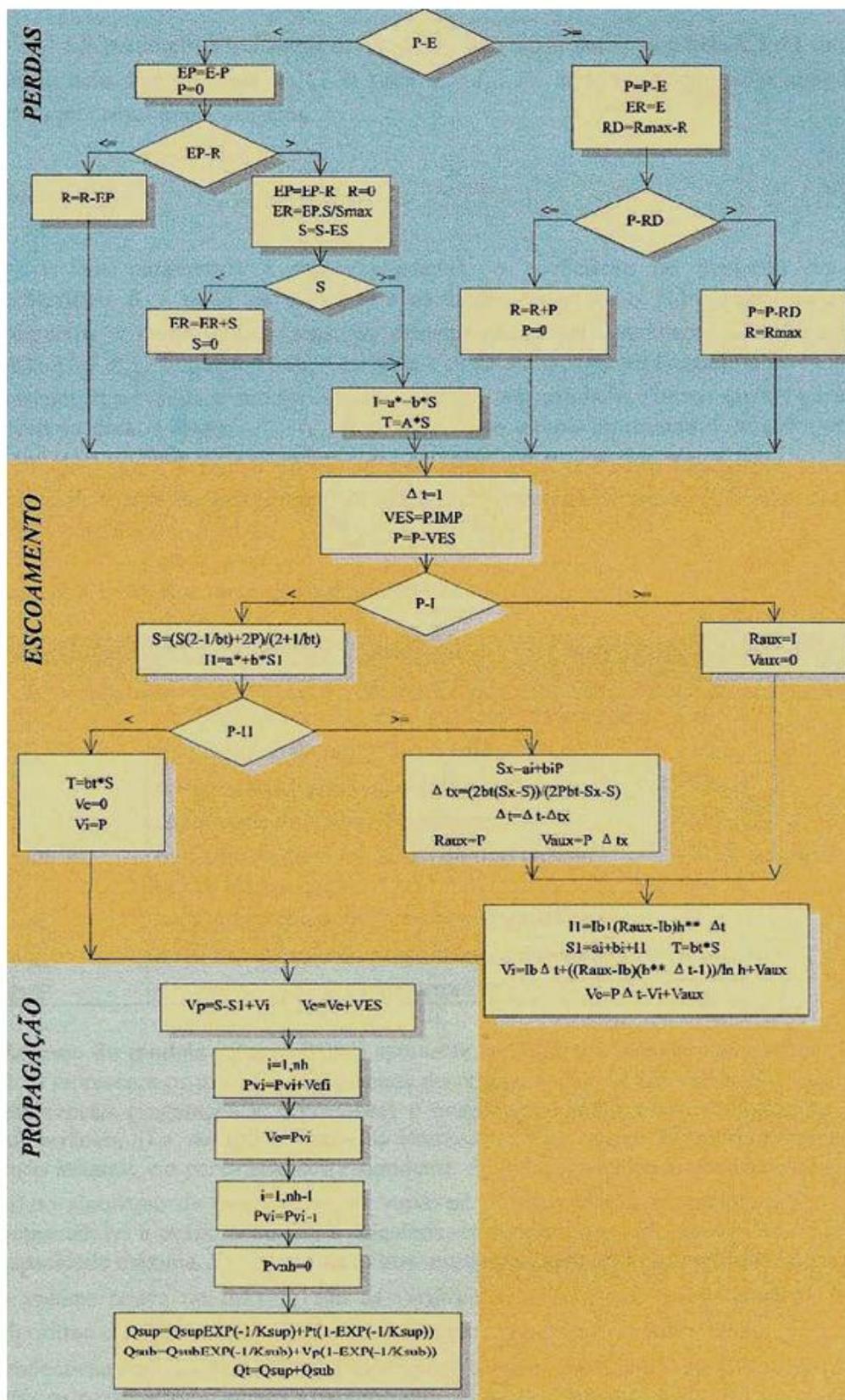


Figura 8 – Fluxograma de cálculo do Modelo IPH II.

Fonte: MINE (1998).

## 4.2 Área de estudo

O presente trabalho tem o objetivo de simular a disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim com o uso do modelo WIN\_IPH2. Sendo que, para a bacia hidrográfica Vacacaí Mirim foram analisadas três sub-bacias: Menino Deus II, Menino Deus IV e Arroio Grande, pertencentes ao município de Santa Maria, já para a bacia hidrográfica Ibicuí Mirim foi analisada a sub-bacia Lajeado Grande, pertencente ao município de São Martinho da Serra.

A seguir, apresentam-se as características da área de estudo, o método utilizado para a obtenção dos dados de entrada do modelo (hidroclimatológicos e físicos), as demais etapas desenvolvidas para o ajuste do modelo WIN\_IPH2 (calibração e validação), bem como o método para a obtenção dos indicadores regionais.

### 4.2.1 Bacia hidrográfica Vacacaí Mirim

Na bacia hidrográfica Vacacaí Mirim foram analisadas três sub-bacias de pequena área de drenagem denominadas de: Arroio Grande, Menino Deus II e Menino Deus IV, sendo que elas estão situadas na cabeceira da bacia do rio Vacacaí Mirim localizada em uma área rural de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, conforme ilustra a figura 9.

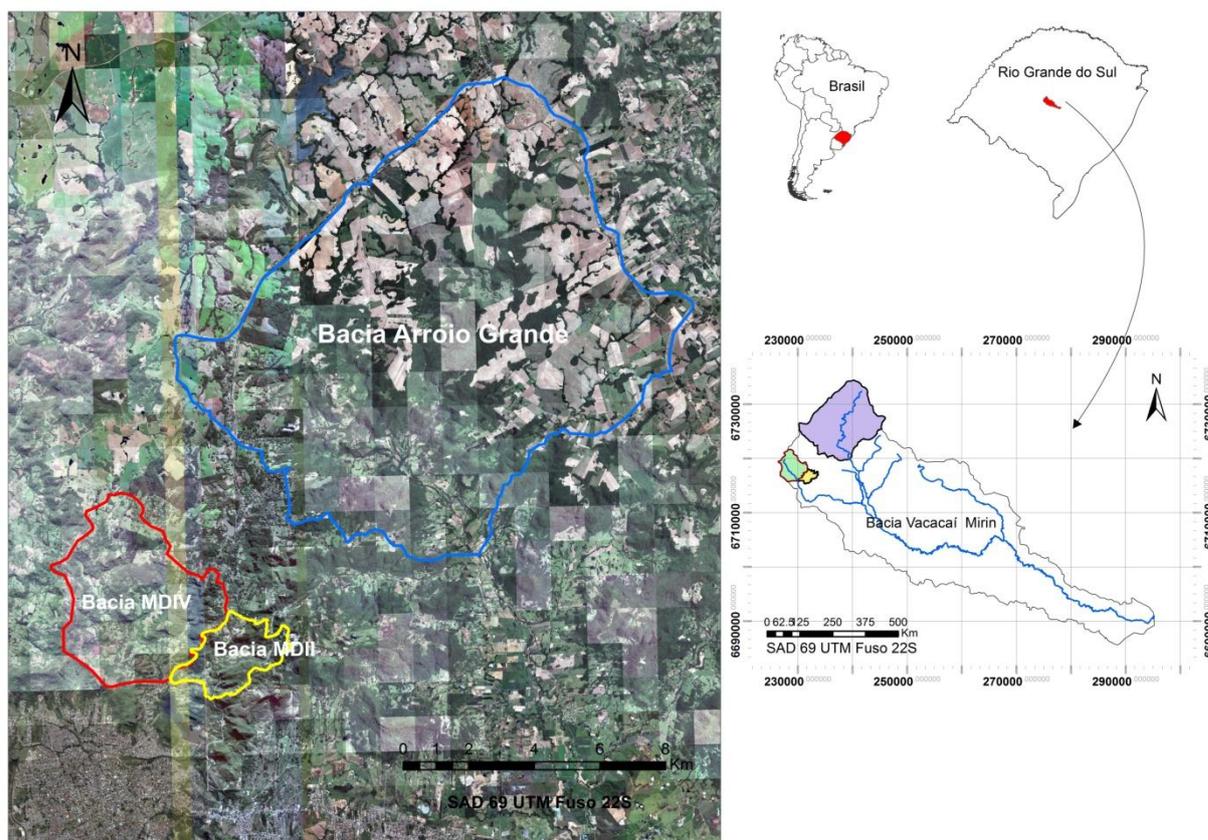


Figura 9 – Localização da bacia hidrográfica Vacacaí Mirim e sub-bacias.

O clima da região é subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen e caracteriza-se por chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, enquanto no mês mais frio a baixa é de 9°C.

As características da bacia hidrográfica Vacacaí Mirim estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Características das bacias hidrográficas estudadas.

Bacias	Área (km <sup>2</sup> )	Tipo	Coordenadas	
			Latitude (S)	Longitude (O)
Arroio Grande	128,95	Rural	29°37'00"	53°41'00"
Menino Deus II	05,03	Rural	29°39'28,94"	53°47'20,06"
Menino Deus IV	18,80	Rural	29°39'29,06"	53°47'23,9"

#### 4.2.2 Bacia hidrográfica Arroio Grande

Descrita por Richter (1992), a bacia hidrográfica Arroio Grande possui uma área de 128,95 km<sup>2</sup>, com a seção principal localizada a cerca de 1km da localidade de Três Barras. O arroio é afluente do rio Vacacaí Mirim, o qual por sua vez é tributário do rio Jacuí.

Segundo Nuñez (1991), o relevo da região é composto por planaltos, encostas, degrau estrutural e planície aluvial. O planalto corresponde a 69% da área total da bacia, o relevo é ondulado, a cobertura vegetal predominante são as pastagens nativas, utiliza-se uma pequena parcela de área nas lavouras de verão. Restam apenas algumas áreas cobertas com mata, principalmente ciliares. A encosta corresponde a 27,9% da área total, caracterizando-se por terraços estruturais, declives retos, relevo forte ondulado e montanhoso. Ao seu entorno de 25% é utilizado para agricultura e o restante é coberto por matas e vegetação arbustiva. Degráu estrutural e planície aluvial compreendem a 3,1% da área de bacia, sendo muito utilizada para agricultura.

Os solos que correspondem à região segundo a classificação de Azolin e Mutti (1988), descrita por Richter (1992), são Podzólico Vermelho Escuro álico e Litólico Distrófico álico.

#### 4.2.3 Bacia hidrográfica Menino Deus II

A bacia hidrográfica Menino Deus II possui uma área de 5,03 km<sup>2</sup>, que representa 18,5% da área de contribuição para o reservatório do Vacacaí Mirim segundo estudo feito por Paranhos e Paiva (2008). A vegetação predominante na bacia é mata nativa com 63,8% e seguida de campo com 24,5% e uma pequena porcentagem de agricultura com 8,5%, tendo uma impermeabilidade do solo de 3,2%.

Os solos que predominam na bacia segundo a classificação de Streck et al (2002), são denominados: Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico e associação de Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico.

#### 4.2.4 Bacia hidrográfica Menino Deus IV

A bacia hidrográfica Menino Deus IV caracteriza-se como rural abrangendo uma área de 18,8 km<sup>2</sup>. A vegetação predominante nesta região é mata nativa com 53,5%, seguindo de campo com 37,3% e em menor percentual a agricultura com 5,3%, plantação de pinus e eucalipto 3,1% e a impermeabilidade do solo com 0,3%.

Segundo Azolin e Mutti (1988), a classificação do solo predominante na região é composta por Neossolo Litólico Eutrófico Chernossolo e Associação de Neossolo Litólico Eutrófico Chernossolo Cambissolo – Colúvios.

#### 4.2.5 Bacia hidrográfica Lajeado Grande

A bacia hidrográfica Lajeado Grande, situada nas cabeceiras do Rio Ibicuí, entre as coordenadas 53°52'46" e 53°57'14" de longitude Oeste e as coordenadas 29°30'16" e 29°35'04" de latitude Sul, na figura 10 indica a localização da área de estudo. A bacia possui aproximadamente 33,12km<sup>2</sup>, o comprimento do rio principal é de 11,10km, possui declividade média de 0,0273865m/m, com perímetro de 29,40km, e seu relevo é fortemente ondulado, com altitudes que variam de 160 a 470m (BONUMÁ ET AL, 2008).

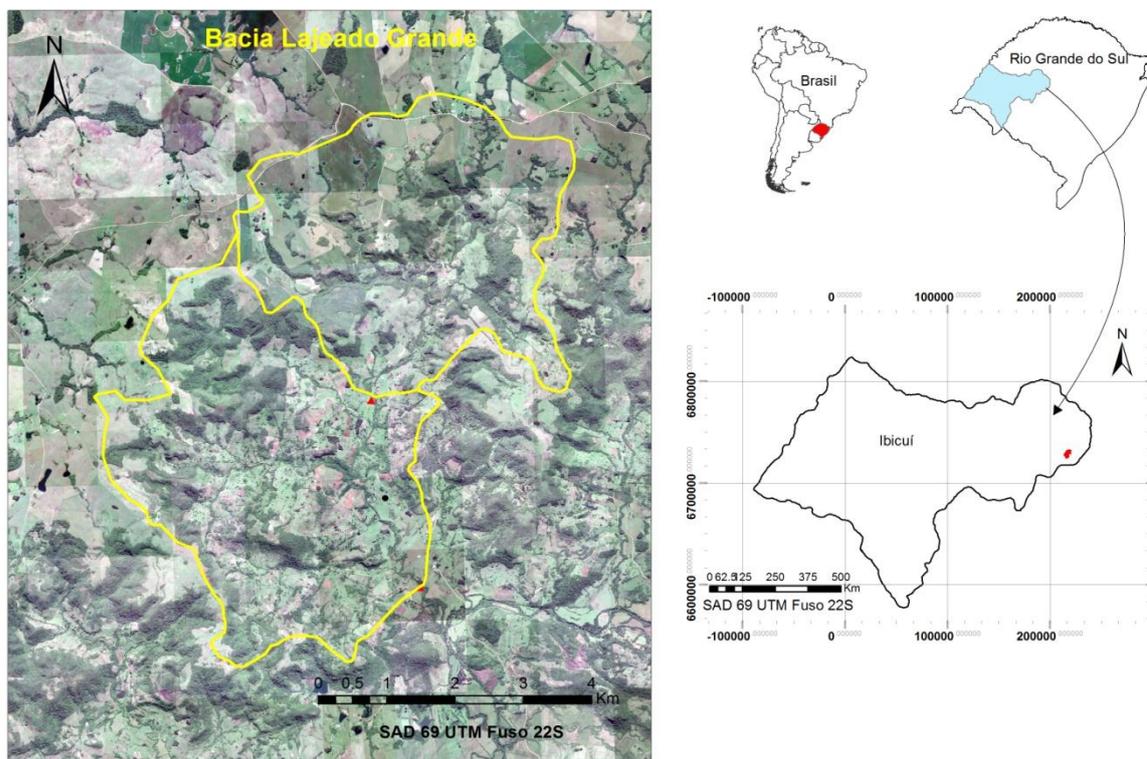


Figura 10 – Área de estudo, da bacia Lajeado Grande, São Martinho da Serra – RS.

A bacia Lajeado Grande é uma bacia rural localizada no Município de São Martinho da Serra, pertencente a uma região do Rio Grande do Sul considerada de elevado potencial gemológico. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico, Cfa, isto é, subtropical úmido sem estação seca, onde a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, enquanto a do mês mais frio é inferior a 18°C.

Segundo Bonumá et al (2008), o uso do solo na região não há assentamento populacional, apenas atividade agropastoril e garimpo de pedras preciosas.

O solo se classifica como Neossolo Litólico Distrófico Típico, raso com uma sequência de horizontes A/R textura média, relevo fortemente ondulado de substrato basalto (STRECK et al., 2002).

### 4.3 Informações hidrológicas

Após o levantamento dos dados hidroclimatológicos existentes nas bacias do rio Vacacaí-Mirim e da bacia Lajeado Grande deu-se início à obtenção dos dados que já se encontram disponíveis nos arquivos eletrônicos do banco de dados do Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFSM (BDGHIDROS). A organização e análise dessas informações tiveram como objetivo compor uma série homogênea de dados. Na tabela 3 apresentam-se as características das estações fluviométricas e pluviométricas estudadas.

Tabela 3 – Estações fluviométricas e pluviométricas e suas principais características.

Estação Fluviométrica	$\Delta t$ (min)	Área (km <sup>2</sup> )	Tipo	Coordenadas	
				Latitude (S)	Longitude (O)
Arroio Grande	1440	128,95	Rural	29°37'00"	53°41'00"
Lajeado Grande Jus	1440	33,32	Rural	29°34'8,2"	53°54'20,5"
Menino Deus II	1440	05,10	Rural	29°39'28,94"	53°47'20,06"
Menino Deus IV	1440	18,80	Rural	29°39'29,06	53°47'23,9"
Estação Pluviométrica	$\Delta t$ (min)	Área (km <sup>2</sup> )	Tipo	Coordenadas	
				Latitudes (S)	Longitudes (O)
Maciel	1440	-	Rural	29°39'2,50"	53°46'26,21"
Vila Maria	1440	-	Rural	29°42'4,5"	53°44'52,6"
São Martinho Serra	1440	-	Rural	29°33'25,13"	53°54'38,35"

Para a calibração e validação dos dados no modelo WIN\_IPH2 foram utilizados os dados de chuva e vazão descrita na tabela 3.

Os dados de chuva utilizados para a extensão da série de vazão das bacias MDII, MDIV e Arroio Grande foram obtidos por meio da estação meteorológica Santa Maria – RS. Esta estação localiza-se no campus da Universidade Federal de Santa Maria e pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, onde são registrados os valores de precipitação horários por um pluviógrafo automático. Os dados estão disponibilizados no site [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Para o preenchimento de

falhas foram feitos a correlação de dupla massa e correlação linear, para os dados mensais de Dona Francisca do código 2953008 e Estação UFSM do código 2953017.

Para a bacia hidrográfica Lajeado Grande foi utilizado dados de precipitação da Estação de Quevedos do código 2954019, para preenchimento de falhas foram utilizados os dados de precipitação das estações de código 2954020 – Santiago e 2954032 – Toropi.

Os dados das estações descritas acima foram obtidos por meio do banco de dados hidrológicos da ANA – Hidroweb. Estas estações foram utilizadas para estender a séries de dados e para o preenchimento de falhas.

Os dados de evaporação foram obtidos da estação meteorológica Santa Maria/RS. Esta estação localiza-se no campus da Universidade Federal de Santa Maria e pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, no qual são catalogados manualmente os valores diários de evaporação do tanque classe A. Para a extensão da série de vazão das bacias Hidrográficas MDII, MDIV e Arroio Grande do ano de 1961 a 1990, utilizou os dados mensais de evaporação de piché para correlacionar com a evaporação do tanque classe A, da estação meteorológica da UFSM, no qual utilizou a correlação de dupla massa e a correlação linear, para o preenchimento das falhas da evaporação do tanque classe A.

#### **4.4 Aplicação do modelo WIN\_IPH2**

Para a aplicação do modelo precisa-se de algumas informações como, características físicas da bacia, dados hidrometeorológicos (precipitação e evaporação). Estes são os dados de entrada do modelo, que desenvolvem o balanço hídrico mediante o ajuste dos parâmetros. Neste estudo utilizou-se o processo de calibração automática monobjetivo.

#### 4.4.1 Calibração do modelo WIN\_IPH2

Para a calibração das séries contínuas no modelo, são utilizados como dados de entrada:

- Série de precipitação;
- Série de evapotranspiração potencial;
- Série de vazão observada;
- Área da bacia;
- Tempo de concentração (em unidade de intervalo de tempo de simulação);
- Porcentagem de área impermeável da bacia;
- Coeficiente de forma do histograma tempo-área (HTA);

Para a obtenção da série de evapotranspiração potencial, multiplicou-se a série de evaporação do tanque classe A, pelo fator de correção do tanque, que varia de 0,6 a 1,0 neste caso adotou-se 0,8 resultando assim uma série de evapotranspiração potencial.

O tempo de concentração para todas as bacias foi estipulado como 1, uma vez que o intervalo de tempo de calibração é diário e todas as bacias estudadas possuem áreas pequenas, e assim, o tempo de concentração é inferior a 1 dia. Para o coeficiente de forma do HTA, adotou-se o parâmetro  $n=1,5$ .

As porcentagens de área impermeável das bacias em estudo foram obtidas por meio de pesquisas de outros estudos já publicados que são eles: (BONUMÁ, 2006; GRUTKA, 2013; PARANHOS, 2002; RICHTER, 1992).

Após a determinação dos dados de entrada, foi iniciado o processo de calibração dos parâmetros.

O modelo WIN\_IPH2 possui sete parâmetros para serem calibrados, os três primeiros são da equação de Horton, constante do algoritmo de separação de volumes, onde:

- $I_0$  – representa a capacidade de infiltração do solo correspondente a umidade limite do ponto de murcha da vegetação (capacidade de campo);
- $I_b$  – representa a capacidade de infiltração quando o solo está saturado;

- $H - (H=e^{-k})$ , sendo  $k$  um parâmetro que caracteriza o decaimento da curva exponencial de infiltração e depende das características do solo;
- $K_{sup}$  – parâmetro do algoritmo de propagação do escoamento superficial ( $Clark = HTA + RLS$ ) representa o tempo médio do esvaziamento do RLS, ou seja, o tempo médio que levaria para escoar toda a vazão superficial.
- $K_{sub}$  – parâmetro que caracteriza o esvaziamento do RLS do algoritmo de propagação de escoamento subterrâneo.
- $R_{max}$  – parâmetro que representa a capacidade máxima de perdas por interceptação. Este parâmetro varia com as características da bacia, pois bacias com vegetação, com grande capacidade de retenção da precipitação e grandes depressões do solo ou mesmo açudes, devem ter valores altos para  $R_{max}$ . Crawford e Linsley (1966) citado por Tucci (2005) apresentam alguns valores para o parâmetro  $R_{max}$  (tabela 4). Como este parâmetro engloba outras perdas além da vegetal, pode assumir valores maiores.

Tabela 4 – Sugestões de  $R_{max}$  para intervalos diários.

<b>Cobertura</b>	<b><math>R_{max}</math> (mm)</b>
Campo, Prado	2,50
Floresta ou mato	3,75
Floresta ou mato denso	5,00

Fonte: Tucci (2005)

- Alfa – parâmetro que participa do processo de separação do escoamento no caso em que a precipitação é menor que a capacidade de infiltração.

Após a etapa de calibração dos sete parâmetros do modelo e o respectivo intervalo de busca para cada parâmetro, deu-se início a calibração, sendo esses, ajustados automaticamente no modelo WIN\_IPH2. Os parâmetros de entrada não

foram incluídos na calibração, pois os mesmos foram adotados diretamente a partir de informações da bacia hidrológica descrita anteriormente.

Os limites máximos e mínimos do intervalo de busca de cada parâmetro do modelo do WIN\_IPH2 são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Limites máximos e mínimos dos parâmetros utilizados na calibração do modelo WIN\_IPH2.

Parâmetro	Unidade	Valor mínimo	Valor máximo
lo	mm. $\Delta t^{-1}$	5,00	600,0
lb	mm. $\Delta t^{-1}$	5,00	100,0
H	-	0,01	001,0
Ksup	$\Delta t^{-1}$	0,01	050,0
Ksub	$\Delta t^{-1}$	0,10	100,0
Rmax	mm	0,10	080,0
Alfa	-	0,01	025,0

Neste trabalho foi utilizada a versão do algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona; DUAN et al.,1992) que é utilizado no programa WIN\_IPH2 (BRAVO et al., 2006) para a calibração automática monobjetivo do modelo WIN\_IPH2. Para avaliar o desempenho do modelo WIN\_IPH2, utilizou-se o Coeficiente de Nash-Suttcliffe, que está disponível no modelo como uma alternativa para a função objetivo. Este coeficiente possui tendência de valorizar as vazões maiores (os picos), por ser baseado no desvio quadrático.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad (34)$$

Onde que,  $Q_{oi}$  é a vazão observada em tempo  $i$ ;  $Q_{ci}$  é a vazão calculada no tempo  $i$ ;  $NT$  é o numero de intervalo de tempo da simulação. O coeficiente de Nash é uma medida de associação entre as vazões calculadas e observadas, e o seu valor varia no intervalo de  $-\infty$  a 1. Se o valor do coeficiente for igual a 1 ou mais próximo

de 1, é evidente que existe uma excelente correlação na amostra, não havendo diferença entre os valores calculados e observados.

No algoritmo SCE-UA foi considerada uma população de 20 indivíduos por complexo nas diferentes calibrações do modelo WIN\_IPH2, como ilustra a figura 11, mostrando a interface do modelo WIN\_IPH2.

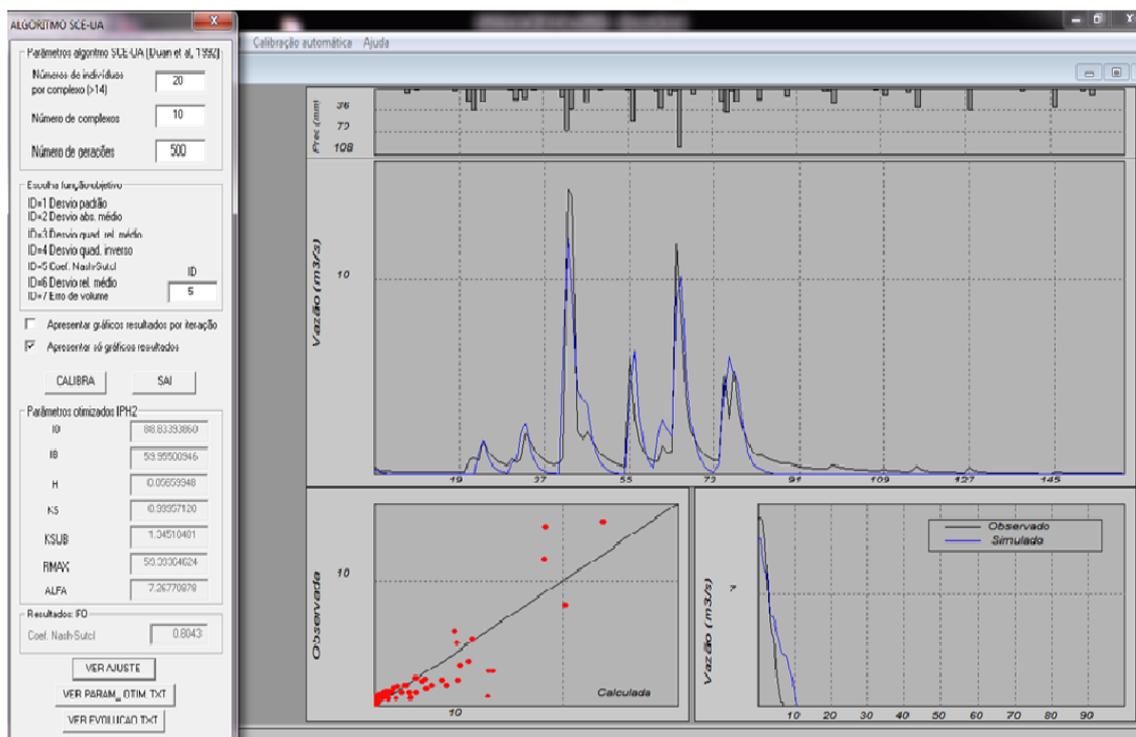


Figura 11 – Interface do modelo WIN\_IPH2 com o algoritmo SCE-UA.

#### 4.4.2 Validação

A validação ou verificação é o processo empregado para avaliar o desempenho do modelo para períodos temporais diferentes aos utilizados na calibração de seus parâmetros (WAGENER ET AL., 2004).

Para esse fim, foram adotados valores médios dos parâmetros calibrados na bacia hidrográfica MDII, pois para essa bacia houve três calibrações de séries curtas que apresentaram bons resultados no CNS. Já para a bacia Lajeado Grande adotou-

se o método de melhor calibração dos parâmetros, isto é, que apresentou o melhor CNS para calibração de série curta. Na tabela 6 mostra o período utilizado de vazão observada na validação do modelo WIN\_IPH2.

Tabela 6 – Período séries observadas de vazão para validação do modelo.

<b>Bacias Hidrográficas</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Dias</b>	<b>Série Observada</b>
MDII	05,10	128	07/01/02 – 14/05/02
Lajeado Grande SMS	33,32	720	20/07/05 – 09/07/07

#### 4.4.3 Extensão das séries e geração de vazões

Após a finalização da etapa de calibração dos parâmetros, foi realizada a extensão das séries de vazões a partir de séries históricas de precipitações longas. Em algumas bacias hidrográficas foi adotada a mesma estação pluviométrica situada nas proximidades da bacia, sendo adotada uma única estação, pois a densidade de estações pluviométricas é baixa, apresentando elevado número de falhas de precipitações diárias e algumas não possuem dados suficientes ou estão desativadas. Na tabela 7 estão apresentados os códigos e o período das séries históricas das estações pluviométricas aplicadas.

Tabela 7 – Estações pluviométricas utilizadas no processo de simulação.

<b>Estação Pluviométrica</b>	<b>Código da Estação</b>	<b>Série Observada</b>
UFSM	83936	1961-2015
Quevedos	2954019	1976-2007

Com as séries de vazões estendidas foi construída uma curva de permanência para cada bacia.

As curvas de permanência são curvas de frequência comumente empregadas para descrever a vazão de um determinado sistema aquático, de acordo com a abordagem quantitativa, isto é, fornecem uma visualização gráfica do comportamento hidrológico das bacias monitoradas, quanto à variabilidade das vazões ao longo do tempo, obtendo-se a porcentagem de tempo em que uma dada vazão é igualada ou superada num período. A figura 12 representa esquematicamente a curva de permanência das vazões.

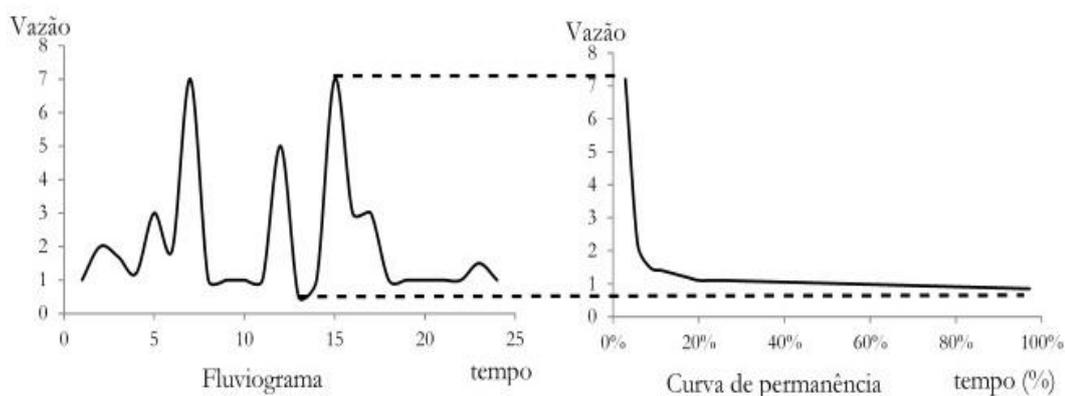


Figura 12 – Representação do fluviograma e da curva de permanência.

Fonte: QUIMPO; McNALLY (1983).

#### 4.5 Indicadores Regionais de Vazão

Para a obtenção das vazões mínimas de referência de sete dias foi utilizado o seguinte método: Primeiramente, baseou-se na média aritmética dos dados de sete dias consecutivos com menor valor de vazão em cada ano da série.

Posteriormente, tais valores foram submetidos à análise estatística, para identificação do modelo probabilístico para o melhor ajuste dos dados. O modelo testado foi: Distribuição de Gumbel. Para as vazões máximas  $Q_{mc}$  e  $Q_{100}$ , foi empregada a mesma distribuição.

Os indicadores regionais de vazão associados a cada estação fluviométrica das bacias dos rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim foram calculados por meio das equações (01) a (07), apresentadas no item 1.3.1 do presente trabalho.

Por fim, foram calculadas as médias dos indicadores das estações fluviométricas estudadas, sendo esses valores médios assumidos como indicadores regionais de vazão para toda a extensão das bacias hidrográficas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são discutidos os resultados obtidos na análise de calibração, validação utilizando o modelo WIN\_IPH2, e na caracterização dos indicadores regionais de vazão.

### 5.1 Dados para calibração do modelo

Os períodos de vazões observadas de séries curtas, utilizados para a calibração do modelo WIN\_IPH2 está descrito na tabela 8.

Para a bacia MDII obtiveram-se três séries de vazões observadas no período de 25/01/01 a 23/06/01, totalizando em 150 dias com dados, 12/08/01 a 16/12/01, totalizando em 85 dias de dados e por fim o período de 01/10/11 a 10/01/12, totalizando em 167 dias de dados em uma bacia rural. Na bacia MDIV, obteve-se uma série de vazões observadas para o período de 01/10/11 a 10/01/12, totalizando em 102 dias de dados. Para a bacia Lajeado Grande SMS, obteve-se uma série de vazões observadas no período de 01/08/05 a 07/01/06, totalizando 160 dias de dados. Para estes períodos, foram obtidas as séries de precipitação e evaporação do tanque classe A.

Tabela 8 – Período das vazões observadas para o processo de calibração

Bacias Hidrográficas	Área (km <sup>2</sup> )	Dias	Série Observada
MDII	05,10	150	25/01/01 – 23/06/01
		085	12/08/01 – 16/12/01
		167	01/10/11 – 10/01/12
MDIV	18,80	102	01/10/11 – 10/01/12
Lajeado Grande SMS	33,32	160	01/08/05 – 07/01/06

Para a bacia Arroio Grande não houve calibração nem validação, pois estes parâmetros calibrados foram retirados da dissertação de mestrado de Luiz Antônio Richter de 1992, intitulado “Determinação da Vazão de Regularização da Bacia do Arroio Grande Utilizando Metodologia para Pequenas Bacias com Dados Esparsos”.

O autor utilizou o modelo matemático chuva-vazão IPH-II versão junho de 1990, para a calibração dos parâmetros de sua bacia de estudo e adotou a função objetivo de vazões mínimas. Esses parâmetros foram utilizados somente para estender a série de vazão, neste estudo.

## 5.2 Calibrações das Séries

A partir das séries históricas de vazão, precipitação e de evapotranspiração, de cada bacia iniciou-se a calibração automática do modelo WIN\_IPH2. Na calibração do modelo, os parâmetros foram ajustados visando obter hidrogramas simulados semelhantes aos hidrogramas observados.

O modelo WIN\_IPH2 apresenta um algoritmo de otimização dos parâmetros, no qual esse algoritmo foi utilizado para calibrar os valores obtidos na calibração das séries curtas.

Nas Figuras 13, 14 e 15, estão apresentados os hidrogramas observados e simulados para as bacias MDII, MDIV e Lajeado Grande (SMS).

Comparando os resultados dos parâmetros obtidos neste estudo, das bacias descritas acima, com a pesquisa realizada por Germano et al. (1998), os parâmetros relacionados como da infiltração  $I_0$  e  $h$  apresentaram maior sensibilidade, observando-se grandes variações entre as bacias MDII, MDIV e Lajeado Grande. Outros parâmetros que também se mostraram muito importantes foram os de escoamento superficial ( $K_{sup}$ ) e o que define a capacidade mínima de infiltração  $I_b$ , entre as bacias estudadas, pois na bacia Lajeado Grande apresentou maior variação comparada a outras duas bacias. O parâmetro  $R_{max}$ , que representa as perdas iniciais, mostrou pouca sensibilidade, embora tenha apresentado grandes variações, conforme pode ser observada na tabela 9 que a bacia Lajeado Grande obteve a maior variação, já a bacia MDII apresentou um elevado  $R_{max}$  comparado com a bacia

MDIV que ficou entre os limites esperados. Na tabela 9 apresentam-se os parâmetros finais resultantes da calibração das séries contínuas.

Para uma melhor calibração dos parâmetros  $I_0$ ,  $I_b$ ,  $k_{sup}$  e  $R_{max}$ , optou-se em alterar estes valores de acordo com a tabela 5, sendo que em algumas simulações esses valores foram novamente alterados, até encontrar um melhor valor da função objetivo. Para os outros parâmetros foram adotados valores e fixados, não sendo alterados durante a simulação, pois seus valores não apresentaram grandes variações entre eles.

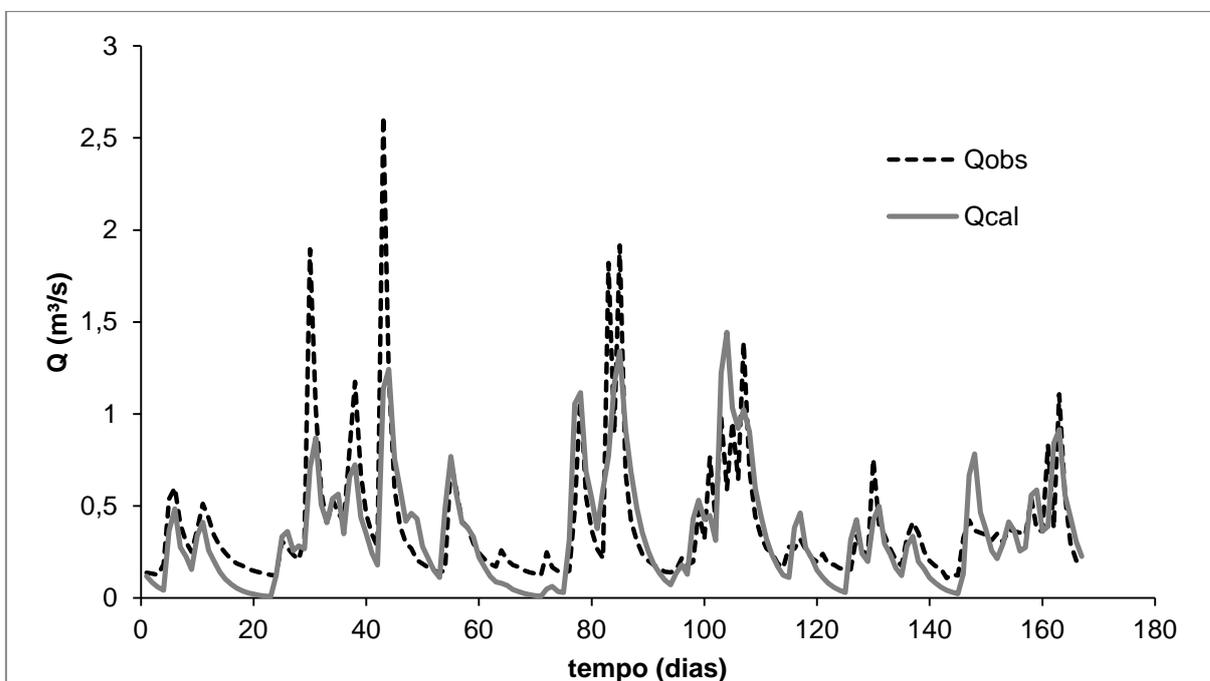


Figura 13 – Vazões observadas e calculadas com a série de calibração de 167 dias na bacia MDII.

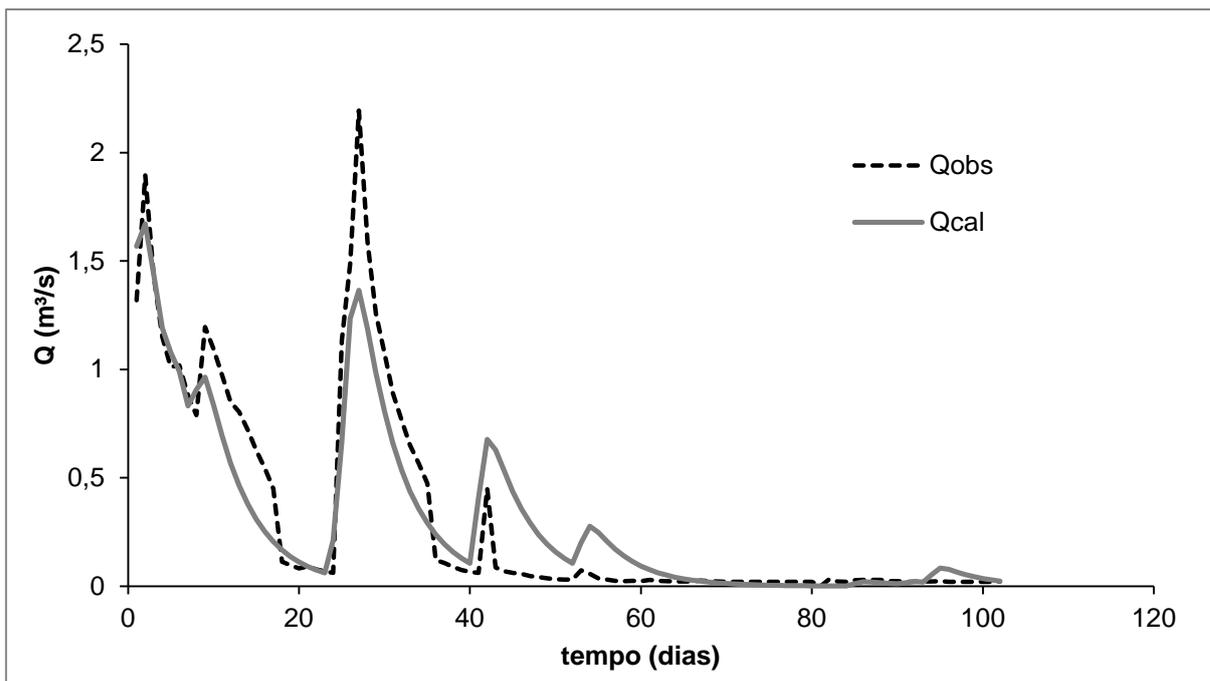


Figura 14 – Vazões observadas e calculadas com série de calibração de 102 dias para a bacia MDIV.

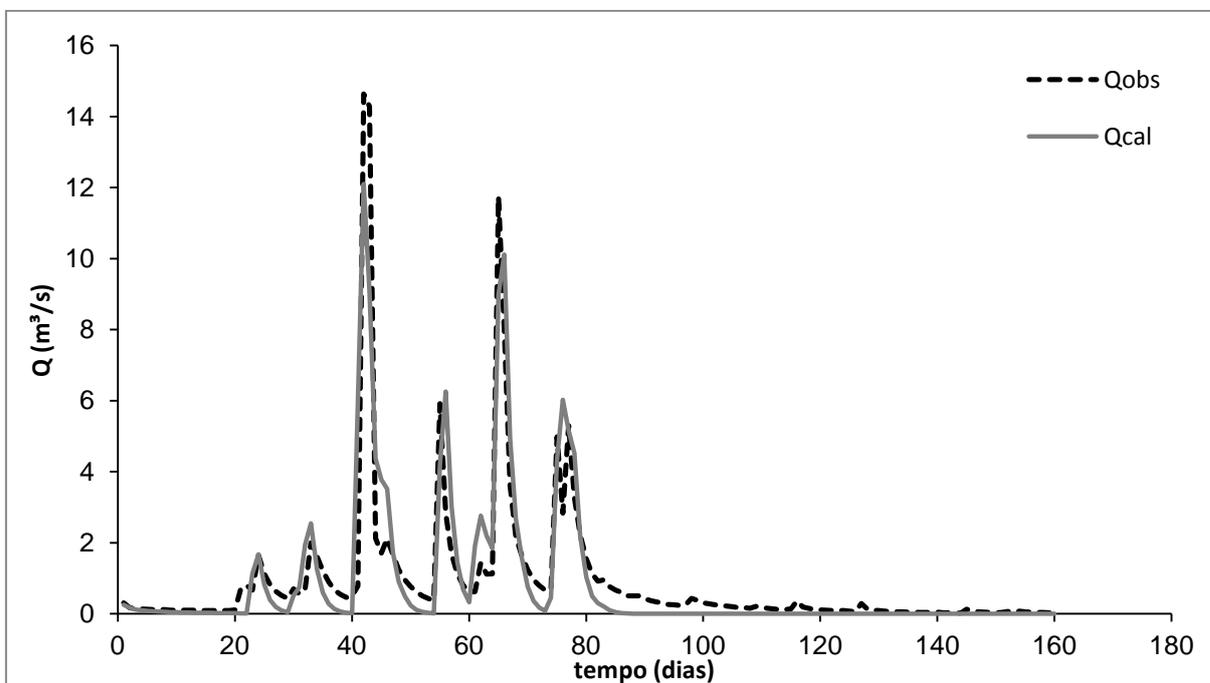


Figura 15 – Vazões observadas e calculadas com série de calibrações de 160 dias para a bacia Lajeado Grande (SMS).

Tabela 9 – Parâmetros de calibração do modelo WIN\_IPH2.

<b>Bacias Hidrográficas</b>				
<b>Parâmetros</b>	<b>MD II</b>	<b>MD IV</b>	<b>Lajeado Grande (SMS)</b>	<b>Arroio Grande</b>
<b>Io</b>	53,62	55,37	88,83	114,21
<b>Ib</b>	40,60	30,00	59,96	0,66
<b>H</b>	0,01	0,11	0,06	0,78
<b>Ksup</b>	2,06	0,08	0,91	2,29
<b>Ksub</b>	3,30	4,91	1,34	3,77
<b>Rmax</b>	16,89	0,23	59,39	24,80
<b>Alfa</b>	3,49	0,91	7,27	0,07
<b>CNS</b>	0,66	0,88	0,80	-
<b>FO MIN</b>	-	-	-	59,65

Para as bacias hidrográficas o tempo de concentração foi de 1 dia e o coeficiente de determinação do histograma tempo-área foi de 1,50.

Na bacia de Arroio Grande, estudada por Richter (1992), encontrou-se o melhor parâmetro de calibração, com o modelo IPH II versão junho 1990, para uma função objetivo de vazões mínimas, no qual obteve um valor de 59,65 descrito na tabela 7, onde o autor utilizou esses parâmetros para estender as séries sintéticas de vazões, por ter proporcionado um melhor resultado.

### 5.3 Validação

Na validação foram utilizados dados de vazão observados que não foram utilizados no período da calibração. Para a bacia MDII obteve-se uma série de vazões observadas no período de 07/01/02 a 14/05/02, totalizando em 128 dias com dados, como pode ser visualizada na figura 16. Para as bacias MDII e Lajeado Grande na tabela 10 está descrita os valores encontrados na validação das bacias

Para este período de validação foi encontrado um coeficiente de NS de 0,55, inferior ao obtido na fase de sua calibração. No período analisado, a vazão média observada foi de 0,1058 m<sup>3</sup>/s e a calculado foi de 0,1108 m<sup>3</sup>/s a vazão máxima observada foi de 0,6415 m<sup>3</sup>/s e calculada foi de 0,5305 m<sup>3</sup>/s, já as vazões mínimas observadas foi de 0,02992 m<sup>3</sup>/s e a calculada foi de 0,000987 m<sup>3</sup>/s. A média

observada foi próxima da calculada, assim como os valores máximos também foram bem próximos. Observa-se que as mínimas observadas foi superior ao calculado, mostrando que o modelo está subestimando as vazões mínimas, isso é, devido aos parâmetros ajustáveis ao uso da função objetivo NS, que serve para cálculo das vazões de pico (máximas) e média segundo Viola et al. (2012).

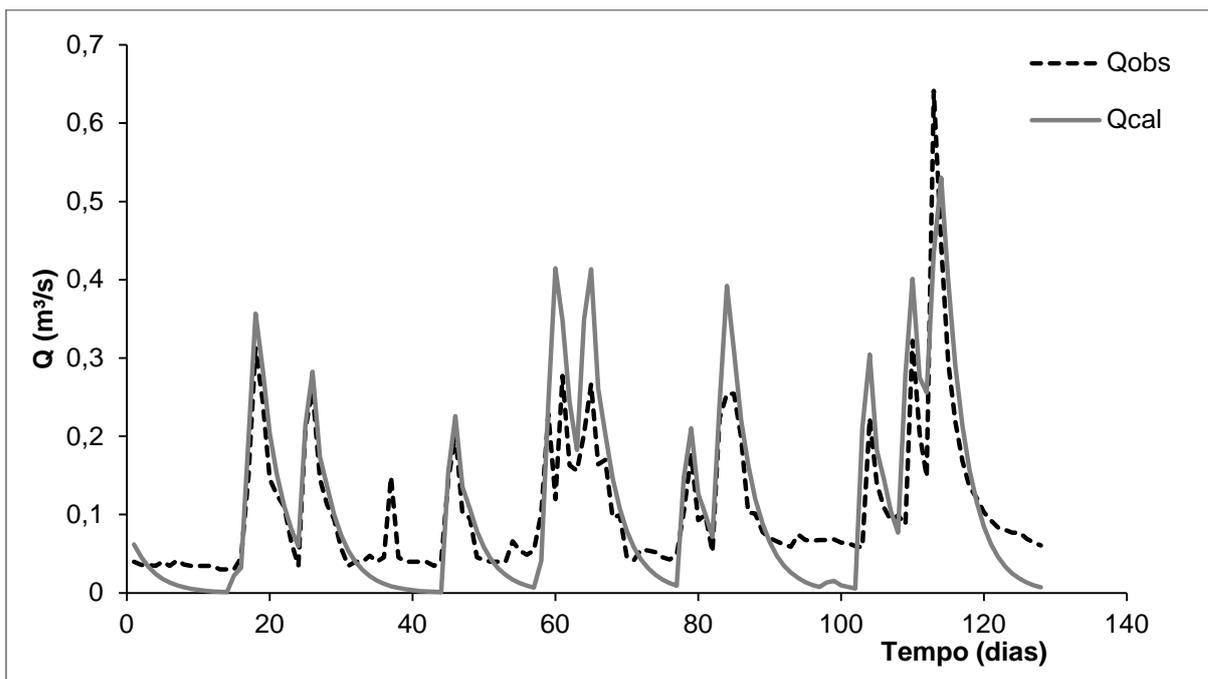


Figura 16 – Comparação da série de vazão observada com a calculada no período de validação do modelo na bacia MDII com 128 dias.

Para a validação da bacia Lajeado Grande de SMS obteve-se uma série de vazões observadas no período de 20/07/2005 a 09/07/2007, totalizando 720 dias com dados, como pode ser visualizado na figura 17.

Neste período de verificação foi encontrado um coeficiente de NS de 0,64, inferior ao encontrado na fase de calibração. No período analisado, a vazão média observada foi de 0,616 m<sup>3</sup>/s e a calculada foi 0,515 m<sup>3</sup>/s, a vazão máxima observada foi de 24,87 m<sup>3</sup>/s e a calculada foi de 13,14 m<sup>3</sup>/s e a vazão mínima observada foi de 0,021 m<sup>3</sup>/s e a calculada foi de 1,07x10<sup>-30</sup> m<sup>3</sup>/s. Embora o ajuste da vazão média tenha resultado bom, os resultados da vazão mínima observada foi bastante inferior

ao calculado. Neste caso, também se utilizou a função objetivo de NS, por isso houve bons ajustes para as máximas e para as médias e as mínimas ocorreu uma subestimação dos ajustes dos parâmetros conforme está comentado no estudo de Viola et al. (2012).

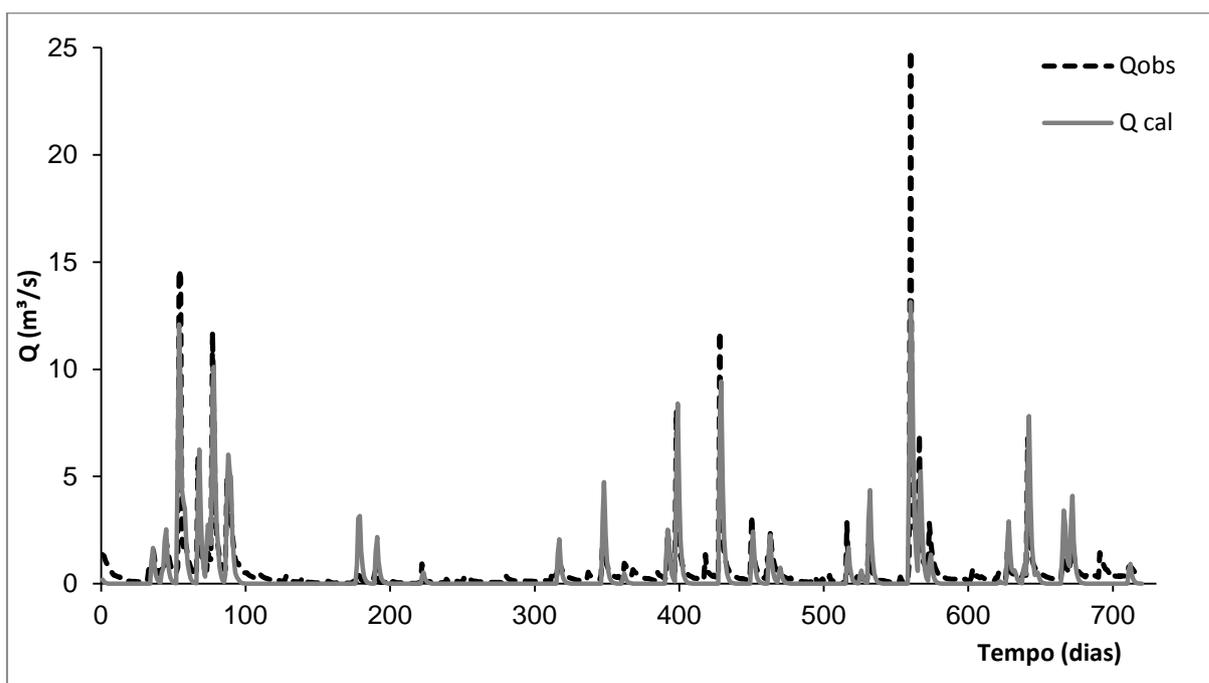


Figura 17 – Comparação da série observada e calculada no período de validação do modelo, da Bacia Lajeado Grande de SMS com 720 dias.

Tabela 10 – Valores de validação do modelo WIN\_IPH2 nas bacias hidrográficas.

<b>Parâmetros</b>	<b>Bacias Hidrográficas</b>	
	<b>MD II</b>	<b>Lajeado Grande (SMS)</b>
<b>CNS</b>	0,55	00,64
<b>Q<sub>méd</sub><sub>obs</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,11	00,62
<b>Q<sub>méd</sub><sub>cal</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,11	00,52
<b>Q<sub>mín</sub><sub>obs</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,03	00,21
<b>Q<sub>mín</sub><sub>cal</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,00	00,00
<b>Q<sub>máx</sub><sub>obs</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,64	24,87
<b>Q<sub>máx</sub><sub>cal</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,53	13,14

Para a bacia MDIV, não houve dados suficientes para a realização da validação, por se tratar de uma bacia com poucos dados hidrológicos.

#### **5.4 Curva de Permanência**

Para estender a série de vazão utilizaram-se dados históricos de precipitação e evaporação do tanque classe A. Para as bacias MDII, MDIV e Arroio Grande utilizou-se uma série de dados de chuva de 12 anos e 4 meses da estação climatológica da UFSM. Também foi utilizado para essas bacias outro período de dados com 39 anos da estação da UFSM de chuva e dados de evaporação do tanque classe A (1990-2000) e dados de evaporação de piché (1961-1990). Para o estudo de simulação da bacia Lajeado Grande de SMS utilizaram-se dados de 30 anos e um mês da estação de Quevedos, junto com os parâmetros utilizados na calibração do modelo.

Na figura 18 apresenta-se a curva de permanência com 12 anos e 4 meses de dados de chuva, das bacias MDII, MDIV e Arroio Grande. Nota-se que para a bacia hidrográfica de Arroio Grande, os dados da curva permanência foram baseados por meio do estudo de Richter (1992). Observa-se que nesta bacia há uma capacidade de regularização maior do que as outras, pois tem as mínimas maiores, e as cheias mais abatidas.

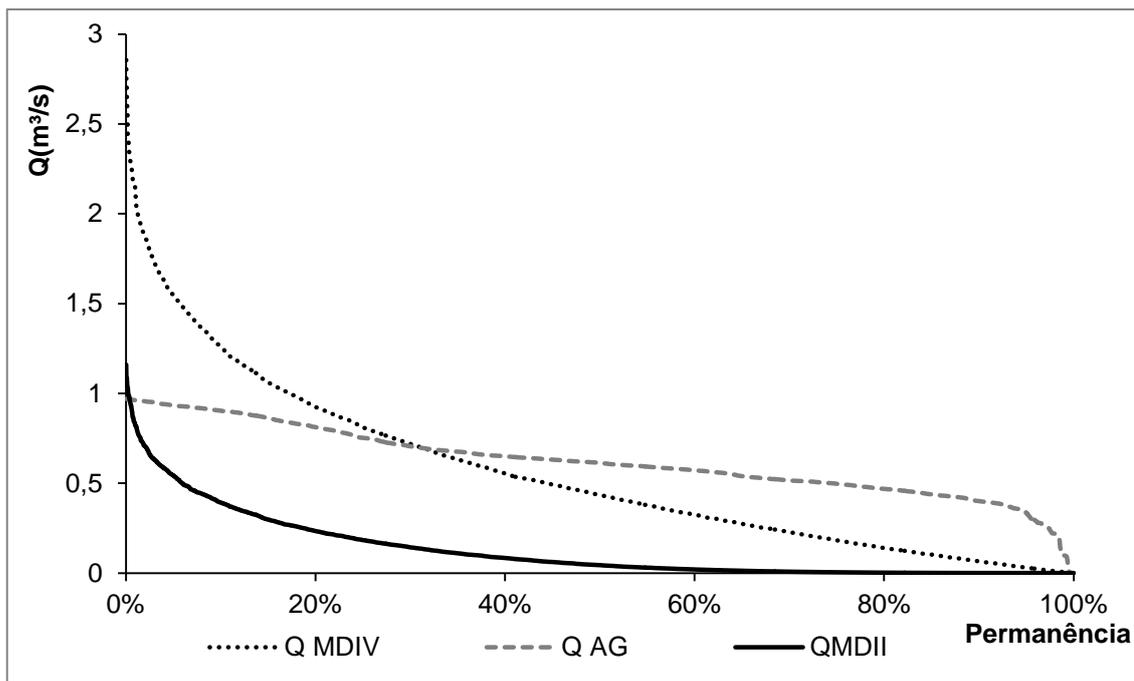


Figura 18 – Curva de permanência das bacias MDII (QMDII), MDIV (QMDIV) e Arroio Grande (QAG) com 12 anos e 4 meses.

Na figura 19 apresenta-se a curva de permanência com 39 anos de dados de chuva para as bacias MDII, MDIV e Arroio Grande. Analisando o gráfico, nota-se que não há diferença entre as curvas de permanência para as diferentes séries de dados, então constatou que há coerência nos dados, por se tratar da mesma estação de chuva, apenas com períodos de anos diferentes.

Em comparativo com as figuras 18 e 19, constatou que há uma coerência entre elas, nos períodos de 12 anos e 39 anos de dados calculados. Encontrou-se para as vazões médias alguns valores iguais, como para a bacia MDII sua vazão média é de 32% para 12 anos e 31% para 39 anos de dados de vazão e para a bacia MDIV encontrou uma vazão média de 39% para os 12 anos e 39% para 39 anos de dados de vazão. Já para a bacia Arroio Grande encontrou uma vazão média de 47% para 12 anos e 52% para 39 anos, considerando uma pequena diferença entre elas.

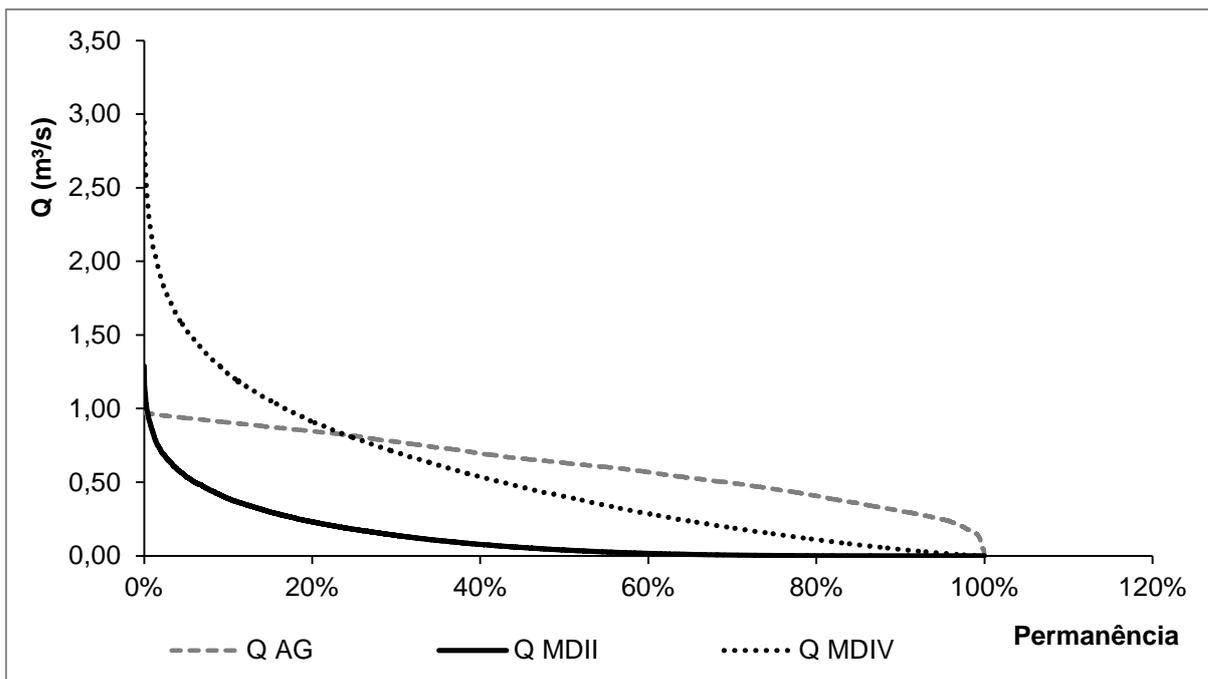


Figura 19 – Curva de permanência das bacias hidrográficas MDII (QMDII), MDIV (QMDIV) e Arroio Grande (QAG) com 39 anos de dados.

Na figura 20 apresenta-se a curva de permanência da bacia hidrográfica do rio Lajeado Grande SMS. Pode observar que 50% da curva de permanência ela tende suas vazões a zero, isto é, que as vazões mínimas são representadas como uma vazão de referência zero. A vazão média observada foi de 0,75 m³/s (20%). As vazões mínimas  $Q_{7,10}$  de 0,00 m³/s e as vazões  $Q_{90}$  de 0,00 m³/s e a  $Q_{95}$  de 0,00 m³/s. Portanto, pode-se dizer que as vazões mínimas tende à zero, isto é, pois em períodos de estiagem o medidor de cotas (linígrafo) não é sensível para captar essas vazões mínimas. Outro motivo que tendem as vazões mínimas a zero está descrito no item 3.3.

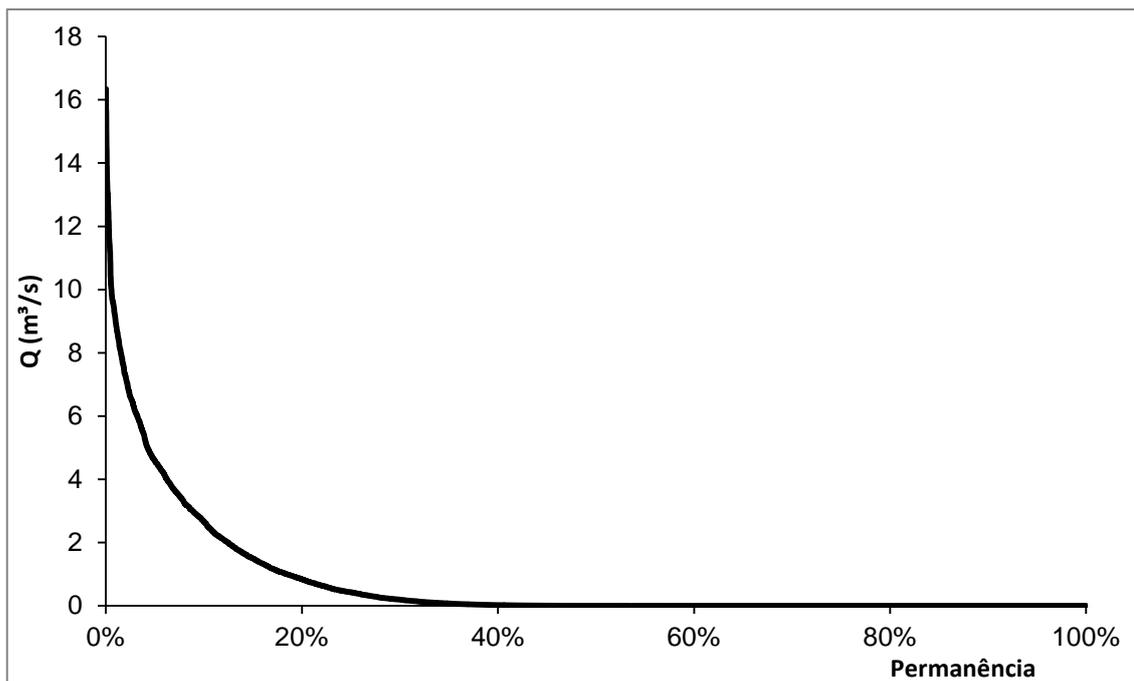


Figura 20 – Curva de permanência da bacia Lajeado Grande SMS.

Na tabela 11 estão apresentados os principais parâmetros da curva de permanência que são as vazões mínimas, vazões médias e vazões máximas.

Observa-se que na comparação entre as bacias MDII, MDIV e Arroio Grande, não há uma discrepância entre as vazões médias encontradas em tempos diferentes.

Para a bacia Lajeado Grande de SMS, a maioria de suas vazões tende a zero, sendo que sua média está desproporcional com as outras bacias, que foi apenas de 20%.

Isso pode estar associado à pequena dimensão da bacia e a escala de simulação que foi diária. Sendo, que o tempo de concentração dessas bacias, gira em torno de 2 horas. O adequado seria a realização da simulação em escala de tempo de concentração mais curto como horários ou em minutos, para tempos de concentração menor que 1 hora. Outro motivo a ser considerado é a função objetivo (NS), utilizada para calibrar os parâmetros do modelo WIN\_IPH2, pois segundo estudos de Viola et al. (2012), esta função apresenta, um melhor resultado para vazões máximas ( $Q_{40}$ ) 40%, ( $Q_{30}$ ) 30% e ( $Q_{20}$ ) 20% e vazão média ( $Q_{50}$ ) 50%.

Tabela 11 – Vazões da curva de permanência (mínima, média e máxima em m<sup>3</sup>/s).

		<b>Bacias Hidrográficas</b>						
		<b>Arroio Grande</b>	<b>MDII</b>	<b>MDIV</b>	<b>Arroio Grande (1961-2000)</b>	<b>MDII (1961-2000)</b>	<b>MDIV (1961-2000)</b>	<b>Lajeado Grande (SMS)</b>
<b>Permanência no tempo correspondente à vazão média</b>		<b>47%</b>	<b>32%</b>	<b>39%</b>	<b>52%</b>	<b>31%</b>	<b>39%</b>	<b>20%</b>
<b>Q<sub>média</sub></b>		<b>0,622</b>	<b>0,129</b>	<b>0,562</b>	<b>0,619</b>	<b>0,127</b>	<b>0,540</b>	<b>0,750</b>
<b>Curva de permanência</b>	<b>Q<sub>10</sub></b>	0,904	0,393	1,258	0,906	0,389	1,235	2,662
	<b>Q<sub>20</sub></b>	0,811	0,234	0,924	0,846	0,231	0,912	0,837
	<b>Q<sub>30</sub></b>	0,705	0,143	0,190	0,774	0,139	0,702	0,193
	<b>Q<sub>40</sub></b>	0,650	0,084	0,554	0,694	0,077	0,537	0,023
	<b>Q<sub>50</sub></b>	0,613	0,044	0,433	0,632	0,039	0,403	0,001
	<b>Q<sub>60</sub></b>	0,572	0,020	0,323	0,568	0,016	0,286	0,000
	<b>Q<sub>70</sub></b>	0,516	0,008	0,228	0,495	0,005	0,189	0,000
	<b>Q<sub>80</sub></b>	0,468	0,002	0,139	0,406	0,001	0,109	0,000
	<b>Q<sub>90</sub></b>	0,400	0,000	0,066	0,304	0,000	0,044	0,000
	<b>Q<sub>95</sub></b>	0,335	0,000	0,030	0,247	0,000	0,017	0,000
<b>Q<sub>99</sub></b>	0,098	0,000	0,004	0,150	0,000	0,001	0,000	

## 5.5 Indicadores Regionais de Vazão

Para o cálculo dos indicadores regionais de cada estação fluviométrica foram selecionadas vazões  $Q_m$ ,  $Q_{95}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{mc}$  e  $Q_{100}$ , obtidas, por meio da construção da curva de permanência de vazões. Para o cálculo da vazão mínima  $Q_{7,10}$  foi empregada a distribuição de probabilidade de Gumbel. Para as vazões máximas  $Q_{mc}$  e  $Q_{100}$ , foram empregadas à mesma distribuição.

### 5.5.1 Obtenção da vazão mínima de referencia ( $Q_{7,10}$ )

As vazões mínimas de sete dias associadas ao período de retorno de dez anos, considerando períodos anuais, foram resultantes da aplicação da distribuição de Gumbel para as bacias hidrográficas de MDII, MDIV, Arroio Grande e Lajeado Grande de SMS.

Na figura 21 apresenta-se a análise de distribuição de Gumbel, para a obtenção da vazão mínima  $Q_{7,10}$  para a bacia MDII. Encontrou uma vazão mínima de referência de 0,00 m<sup>3</sup>/s. Pode-se tratar de uma bacia com dimensão pequena, sua vazão mínima tende a zero. Outro motivo para as mínimas tender a zero pode ser pelo medidor de cotas (linígrafo) não ser sensível para vazões muito baixas. Também pode ter outro motivo mencionado no item 3.3, pela escolha da função objetivo.

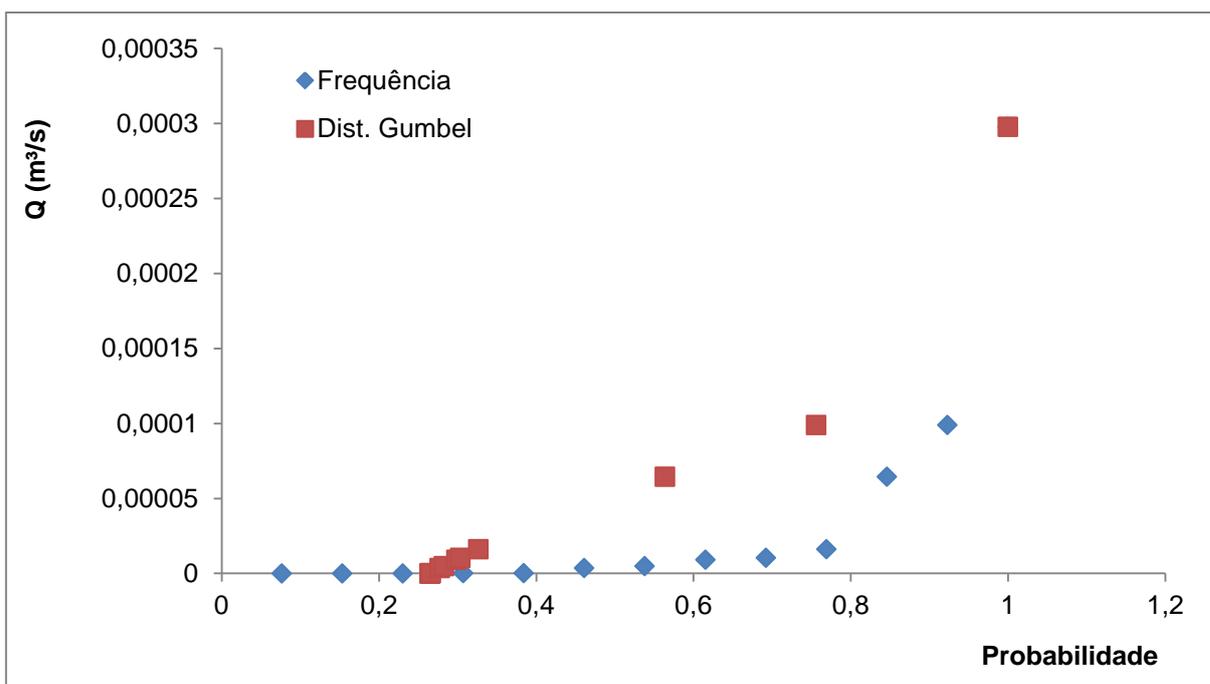


Figura 21 – Análise da distribuição de Gumbel para as vazões mínimas anuais da bacia Hidrográfica MDII.

Na figura 22 apresenta-se a análise de distribuição de Gumbel, para a obtenção da vazão mínima  $Q_{7,10}$ , na bacia hidrográfica MDIV.

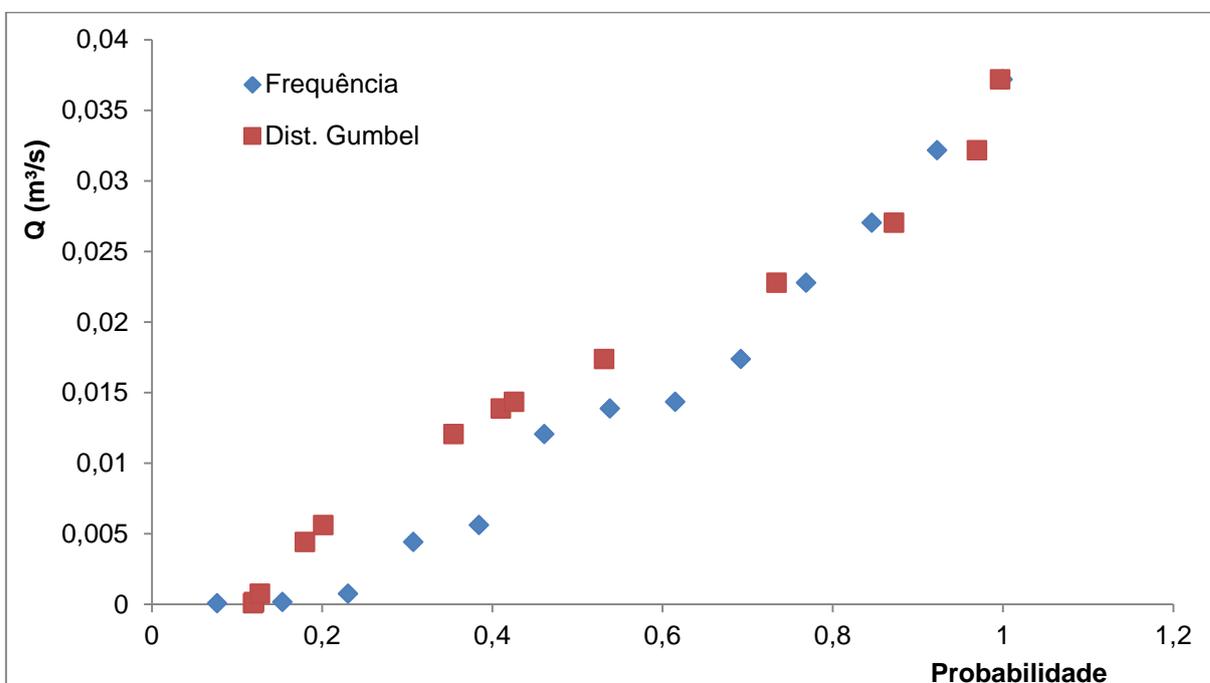


Figura 22 - Análise da distribuição de Gumbel para as vazões mínimas anuais da bacia Hidrográfica MDIV.

Como pode ser observado no gráfico de análise de Gumbel, para a bacia MDIV foi encontrado uma vazão mínima de referência  $Q_{7,10}$  de 0,00  $m^3/s$ . Para esse caso pode-se dizer que as vazões tendem a zero por se tratar de uma bacia pequena com uma área de 18  $km^2$ . Como a área da bacia é pequena pode-se dizer que em períodos de estiagem o medidor de cotas (linígrafo) não é sensível para captar essas vazões mínimas. Outro motivo que tende as vazões mínimas a zero está descrito no item 3.3.

Na figura 23 apresenta-se a análise de distribuição de Gumbel, para a obtenção da vazão mínima  $Q_{7,10}$ , na bacia hidrográfica de Arroio Grande.

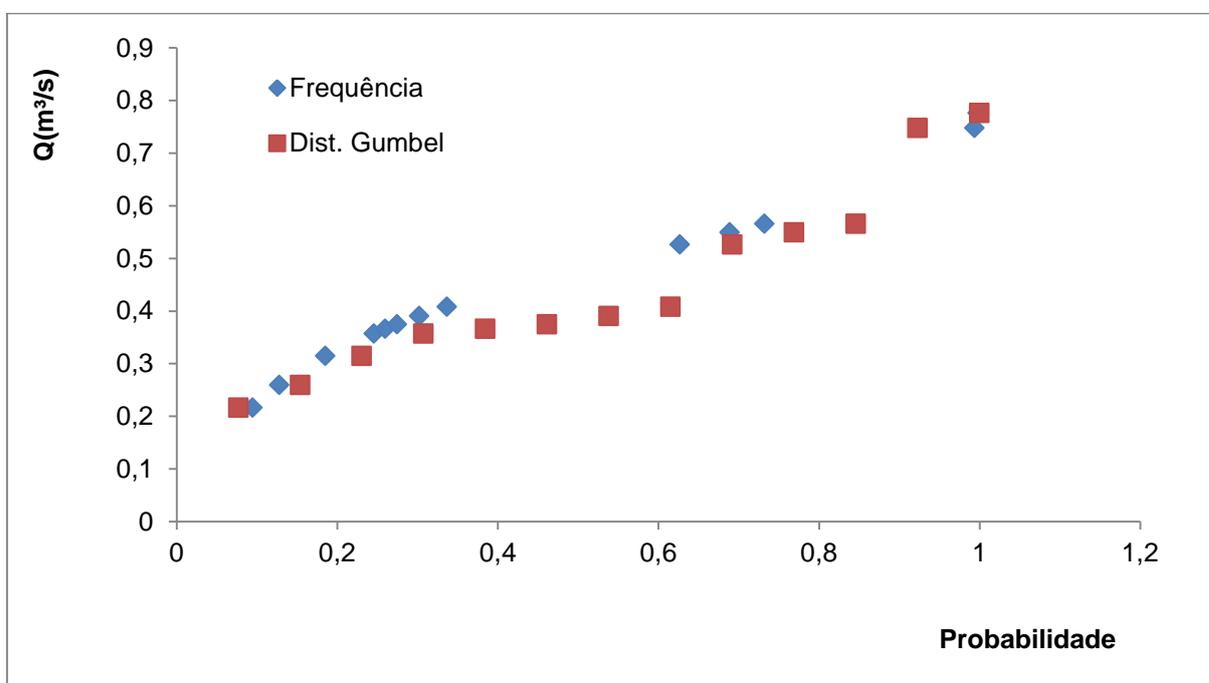


Figura 23 - Análise da distribuição de Gumbel para as vazões mínimas anuais da bacia Hidrográfica de Arroio Grande.

Como pode ser observado no gráfico a análise de Gumbel, para a bacia Arroio Grande foi encontrada uma vazão mínima de referência  $Q_{7,10}$  de 0,22  $m^3/s$ . Por se tratar de uma bacia de maior dimensão com uma área de 128  $km^2$ , a vazão mínima de referência é diferente de zero. Richter (1992) utilizou em seu estudo a função objetivo adequada para o cálculo de vazões mínimas. Deste modo encontrou-se uma boa análise de Gumbel para estas vazões.

Na bacia hidrográfica de Lajeado Grande de SMS, por os dados na simulação apresentarem valores aproximados a zero, não haveria a necessidade de realizar a distribuição de Gumbel, pois a função objetivo priorizou as máximas e mínimas neste caso, levando a um resultado tendencioso para o cálculo das mínimas. Contudo, no intuito de melhor obtenção dos indicadores regionais, foi realizado a distribuição de Gumbel na bacia de Lajeado Grande de SMS, assim como nas demais.

Para o cálculo dos indicadores regionais de vazão, foram obtidas as vazões média de logo período ( $Q_m$ ), vazões com 95% e 50% de permanência ( $Q_{95}$  e  $Q_{50}$ ), vazões médias mínimas com duração de 7 dias e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) e vazões máximas com período de retorno de 2 e 100 anos ( $Q_{mc}$  e  $Q_{100}$ , respectivamente). Para a distribuição de probabilidades das vazões  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{mc}$  e  $Q_{100}$  foi utilizada a distribuição de Gumbel. Na Tabela 12 são apresentadas as referidas vazões para cada estação fluviométrica. Os indicadores regionais estão apresentados na tabela 13.

Tabela 12 – Vazões calculadas para as estações fluviométricas da bacia dos Rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim, em m<sup>3</sup> /s.

<b>Postos Fluviométricos</b>	<b>Q<sub>m</sub></b>	<b>Q<sub>95</sub></b>	<b>Q<sub>50</sub></b>	<b>Q<sub>7,10</sub></b>	<b>Q<sub>mc</sub></b>	<b>Q<sub>100</sub></b>
<b>MDII</b>	0,129	0,000	0,044	0,000	0,934	1,198
<b>MDIV</b>	0,562	0,030	0,433	0,000	2,257	2,877
<b>Arroio Grande</b>	0,622	0,335	0,613	0,224	0,849	1,021
<b>Lajeado Grande SMS</b>	0,619	0,000	0,001	0,000	12,135	15,954

Tabela 13 – Indicadores regionais de vazão calculados para as bacias hidrográficas dos Rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim.

Postos Fluviométricos	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Indicadores regionais de vazão						
		q(L/s.km <sup>2</sup> )	r <sub>cp50</sub>	r <sub>cp95</sub>	r <sub>7,10</sub>	r <sub>m</sub>	r <sub>mc</sub>	r <sub>100</sub>
<b>MDII</b>	5,10	25,35	0,34	0,00	0,00	0,00	7,23	1,28
<b>MDIV</b>	18,80	29,88	0,77	0,05	0,00	0,00	4,02	1,27
<b>Arroio Grande</b>	128,95	4,82	0,98	0,54	0,36	1,49	1,36	1,20
<b>Lajeado Grande SMS</b>	33,32	18,58	0,00	0,00	0,00	0,00	19,60	1,31
<b>Média</b>		21,96	0,52	0,15	0,09	0,37	8,05	1,27
<b>CV(%)</b>		49,74	83,86	176,44	200,00	200,00	100,13	3,71

Na tabela 13 podem ser observados os parâmetros dos indicadores regionais de vazão, no qual a vazão específica média das bacias hidrográficas dos rios Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim, apresentam uma média de 21,96 e um coeficiente de variação de quase 50% para todas as bacias.

Para os índices  $rcp_{50}$  que corresponde a  $(Q_{50}/Q_m)$ , onde a vazão de 50% da curva de permanência, que por sua vez, é um valor característico associado com as condições médias de um escoamento do curso d' água. Para esse índice foi encontrado um bom valor, pois apresentou uma média em todas as estações de 0,52 e o coeficiente de variação foi de 83,9%.

No índice  $rpc_{95}$ , que corresponde a  $(Q_{95}/Q_m)$ , no qual a vazão 95% do tempo, sendo esse um valor característico do comportamento de uma bacia hidrográfica em períodos de estiagem. Para esse índice foi encontrado uma média nas bacias estudadas de 0,15 e de coeficiente de variação de 176,4%.

Os indicadores  $r_{7,10}$  e  $r_m$  são índices utilizados para avaliação de vazões mínimas em cursos de água. No índice da  $r_{7,10}$  a média foi de 0,09 e o coeficiente de variação foi de 200,00% e para o  $r_m$  a média foi de 0,37 e o coeficiente de variação foi de 200,00%. O valor do coeficiente de variação está alterado (elevado), pois a vazão mínima de referencia ( $Q_{7,10}$ ) de algumas bacias tende a zero. Esse fator pode estar alterando os dados por ter utilizado a função objetivo (NS), não havendo um bom ajuste para as vazões mínimas, no qual, se obteve valor zero para as bacias MDII, MDIV e Lajeado Grande. Para a bacia Arroio Grande houve um bom ajuste, pois utilizou-se a função objetivo para mínimas.

Para os índices de enchente  $R_{mc}$  e  $R_{100}$ , ou seja, são índices de vazões máximas. O índice de  $r_{mc}$  para um período de retorno de 2 anos, indicando a vazão média de enchente, encontrou-se um valor de média para as bacias de 8,05 e um coeficiente de variação de 100%. Para o índice que corresponde a um período de 100 anos de retorno encontrou-se uma vazão média de 1,26 e um coeficiente de variação de 3,71%. Para os índices de enchentes encontraram-se bons valores, pois a função objetivo utilizada para as bacias estudadas atingiu bons resultados, isto é, esta função é recomendada para o calculo de vazões máximas e médias segundo Viola et al. (2012).

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para o ajuste dos parâmetros na calibração do modelo WIN\_IPH2, obtiveram-se resultados satisfatórios, pois o CN ficou próximo de 1 para todas as bacias estudadas.

Por se dispor de poucos dados observados (serie curta), o modelo chuva-vazão, o modelo não teve o período de amortecimento dos parâmetros na calibração, uma vez que não se considera todas as estações do ano, a calibração pode ficar tendenciosa ao período utilizado.

Por ter utilizado no modelo uma função objetivo (NS) para vazões máximas e médias as vazões mínimas foram subestimadas pelo modelo, gerando resultados não satisfatórios para a curva de permanência, como a (Q<sub>90</sub>) 90% e (Q<sub>95</sub>) 95%.

Os indicadores regionais de vazões máximas  $r_{mc}$  e  $r_{100}$  e vazão média  $rcp_{50}$ , apresentaram resultados satisfatórios para as bacias estudadas.

Recomenda-se realizar simulações de chuva-vazão utilizando outros métodos, que possa utilizar tempos de concentração real para a bacia e que possa usar períodos longos de séries históricas.

Ampliar redes de monitoramento em pequenas bacias hidrográficas.

## REFERÊNCIAS

AGRA, S. G.; SOUZA, V. C. B.; NEVES, M. G. F. P.; CRUZ, M. A. S. Metodologias de regionalização de vazões: Estudo comparativo na bacia do Rio Carreiro – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, João Pessoa. Resumos Expandidos. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, p. 1-20.

AZZOLIN, M. A. D.; MUTTI, L. S. M. **Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim**. Santa Maria – DNOS – UFSM, 1987/1988. 20p. (Relatório técnico não publicado).

BONUMÁ, N.; GASTALDINI, M. do C. C.; PAIVA, J. B. D. Análise da Carga Difusa de Poluição Gerada por Atividades de Mineração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 105 -115, Jul/Set 2008.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências, 1997.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. **Manual de Usuário do Modelo hidrológico WIN\_IPH2**, p. 63, 2006.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins Educacionais. In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17. **Anais...** São Paulo, 2007.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. ;PILAR, J. V.; TUCCI, C. E. M. Influência da capacidade de regularização de reservatórios nos benefícios da previsão de vazão de longo prazo. In: **Anais...** do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Dez. 2007..

BRUN, G. W. **Previsão Contínua em Tempo Real do Volume de Afluência do Reservatório: Ernestina, RS, RS**. 1999. 95 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

CARVALHO, A. R. L. **Previsão de aflúências diárias para horizontes de 1 a 7 dias através de uma abordagem estocástica – modelo PREVIVAZH**. 2001. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

CLARKE, R. T. & TUCCI, C. E. M. Regionalização Hidrológica. In: PAIVA, J.B.D. de & PAIVA, E.M.C.D. DE (Orgs.), **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 169-222, 2003.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. 2001. 199 f. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

CURADO, L. C.. **Indicadores de Vazões Mínimas de Referência em Sub Bacias do Rio Miranda**. 2003. 89f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2003.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**. v.28. n.4. p. 1015-1031. 1992.

FAVORETO, R. S.; PEREIRA FILHO, D. L. B.; BURMASTER, C. L.; HILU, A.; SILVA, S. B.; MINE, M. R. M. **Modelagem de eventos de vazão máxima natural no reservatório de Vossoroca utilizando o Modelo IPHII**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Nov. 2003.

FRONZA, D.. **Avaliação de modelos matemáticos precipitação – vazão na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim**. 1995. 158 f. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS, 1995.

GASTALDINI, M. C. C.; PAZ, M. F.; KRAEMER, M. C. N. ; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Modelagem Matemática da Qualidade das Águas do Reservatório do Arroio Vacacaí Mirim. In Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria y Ambiental, 28. **Anais... AIDIS**: Cancun, 2002.

GENOVEZ, A. M. **Avaliação da regularização de vazões em pequenas bacias com dados esparsos**. 1987. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Universidade de São Paulo, Escola da Engenharia de São Carlos, São Carlo, 1987.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M. et al. Estimativas dos Parâmetros do Modelo IPH2 para algumas Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 3, n. 4, p. 103-120, 1998.

HASS, J.; MINE, M. R. M. Análise de Sensibilidades dos Parâmetros do Modelo IPH II. **Revista EC – Engenharia e Construção**, Curitiba, 1999.

KRAUSKOP NETO, R.; MINE, M. R. M.; MACHADO, F. W. ; MAXIMIANO, S. M.; FRANCO, E. J. Simulação hidrológica da bacia do rio Barigüi com discretização de 15 min utilizando o modelo IPH II. In: **Anais... XX Congreso Nacional del Agua**, Mendoza, maio, 2005, p. 1-21.

MAZIERO, E. **Histograma tempo/área geoprocessado: Uso em modelo chuva-vazão concentrado**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MARINS, A. P. **Simulação hidrológica do reservatório do Vacacaí-Mirim/ Santa Maria – RS utilizando o sistema IPHS1**. 2004. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MELLER, A.; PARANHOS, R.M.; PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D. **Parâmetros de calibração de modelo IPH II na bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim**. REUNIÃO FINAL DA REHIDRO, 2002, Vitória, Rede Cooperativa em Recursos Hídricos, São Paulo FINEP, 2002, v. 1, p. 1-10.

MINE, M.R.M. **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheia**. 1998. 146f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MOREIRA, I. A.; MINE, M. R. M.; FILHO, A. J. P. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. **Fundación para El Fomento de La Ingeniería Del Agua**, v. 14, n. 2, marzo 2007. p. 83-96.

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005, 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NÜNEZ, M.V.J. **Perdas de solo e nutrientes na bacia hidrográfica do Arroio Grande, Santa Maria, RS**. 1991. 82f. Dissertação. (Curso de Pós-Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1991.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. et al. Estimativa do Assoreamento do Reservatório do DNOS, em Santa Maria, RS. In: CONGRESSO NACIONAL DEL AGUA, 17 e SIMPOSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DEL CONO SUR, 2, 1998, Santa Fé. **Anais...** Santa Fé: ABRH, 1998.

PAIVA, M. F.; ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A.; et al. Avaliação Preliminar das Disponibilidades e Demandas na Bacia do Rio São Francisco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 1999.

PARANHOS, R. M.; PAIVA., J. B. D. Avaliação de metodologia de estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 07 – 18, Jan/Mar 2008.

PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 2/3, p. 247-253, 2004

QUIMPO, R. G.; McNALLY, T. A. Regionalized flow duration for Philippines. In: **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 109, n. 04, p. 320-330, 1983.

REIS, J. A. T.; GUIMARÃES, M. A.; BARRETO NETO, A. A.; BRINGHENTI, J.. Indicadores Regionais Aplicáveis à Avaliação do Regime de Vazão dos Cursos D'Água da Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana. **Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 509-516, 2008.

RICHTER, L. A. **Determinação da vazão de regularização da bacia do arroio grande utilizando metodologia para pequenas bacias com dados esparsos**. Santa Maria, UFSM, 1992. 103f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e drenagem), 1992.

RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 10.350 do Rio Grande do Sul, de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. Publicado no DOE em 01 de janeiro de 1995

SILVA, E. A. **Estimativa regional da vazão máxima instantânea em algumas bacias brasileiras**. 1997. 90f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH/UFRGS. 1997.

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

SILVEIRA, A. L. L.; SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH. 2001. Cap. 5, p125-163.

SILVEIRA, G. L. **Quantificação de vazão em pequenas bacias carentes de dados**. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 1997. 180f. Tese de Doutorado.

SILVEIRA, G. L. e TUCCI, C. E. M. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa da disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3. P 97-110, 1998.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v. 3, n. 3, p 111-131, Jul/Set. 1998.

SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E.M.; O'CONNELL, P.E.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences**. J. 48(6), 857–880. 2003.

SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; SOARES, K. H.; ZUCCO, E. Estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas com escassez de dados fluviométricos. **Revista de Estudos Ambientais (online)**, v. 12, n. 1, p. 29-38, Jan/Jun. 2010.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2002. 107p.

TAMIOSSO, M. F. **Avaliação do método Silveira com uso de dois modelos chuva-vazão para a estimativa de disponibilidade hídrica em pequenas bacias com pequena amostragem de vazão**. 2012. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2012.

TUCCI, C. E. M. Análise da sensibilidade dos parâmetros do algoritmo de infiltração. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia, 3, Brasília, 1979. **Anais...** Brasília; ABRH, 1979.

TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. **Simulação distribuída com IPH II: nova versão.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10 e Simpósio de Recursos Hídricos do Conesul, 1, 1993, Gramado. **Anais...** Gramado: ABRH, v. 3, p. 495-504, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 678 p., 2005.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 256 p., 2002.

TUCCI, C. E. M, CLARKE, R. T., SILVA DIAS, P. L., COLLISCHONN, W. **Previsão de médio prazo da afluência de reservatório com base na previsão climática.** Instituto de Pesquisas e Hidráulica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Final 2002.

TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J.; LOPES, S. **Modelo matemático precipitação-vazão IPH II.** Publicação Recursos Hídricos n 3, IPH – UFRGS. 1981.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; GIONGO, M.; BESKOW, S.; SANTOS, A. F. S. Hydrological Modeling in a watershed of the Lower Araguaia River Basin, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v.3, n.3, p. 33-47, august 2012. ISSN: 2179-4804

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of hydrology**. v. 204. p. 83-97. 1998.