

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDE ESCALA
APLICADO A BACIA DO RIO URUGUAI

Guilherme Jordão Cardoso

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

C268m Cardoso, Guilherme Jordão
Modelo hidrológico de grande escala aplicado a
Bacia do Rio Uruguai [recurso eletrônico] / Guilherme
Jordão Cardoso. – 2022.
4 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Cleomar Reginatto.
Dissertação (Mestrado em Engenharias Civil) –
Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Ciclo hidrológico. 2. Previsão hidrológica -
Uruguai, Rio, Bacia. I. Reginatto, Cleomar, orientador.
II. Título.

CDU: 627

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Guilherme Jordão Cardoso

MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDE ESCALA APLICADO A
BACIA DO RIO URUGUAI

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Cleomar Reginatto.

Passo Fundo

2022

Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental

Data da defesa: 05/04/2022

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Cleomar Reginatto
Universidade de Passo Fundo – UPF
Orientador

Prof. Dr. Vandrê Brião
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Vera Maria Cartana Fernandes
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Walter Collischonn
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Passo Fundo, 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e a minha namorada, que muito me apoiou e me incentivou a realiza-lo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esta dissertação as seguintes pessoas:

Meu pai Arlindo Sergio e minha mãe Astréa por todo apoio e por sempre me incentivar a não desistir.

A minha namorada Leda Cibele por estar ao meu lado o tempo todo durante a Pandemia da COVID 19 e por sempre me apoiar nos momentos difíceis e fazer os meus dias mais felizes.

Ao meu orientador Cleomar por sempre me compreender e me animar mesmo quando eu estava em crise, e por nunca me deixar desistir e sempre me incentivar a ir até o final.

Aos meus colegas do mestrado João Pedro e Lucas, que me incentivaram a sempre seguir em frente e a nunca desistir.

Aos meus avós Helio, Abel, Adozinda e Antônia, que já partiram, mas fizeram parte da minha vida e são sempre minha inspiração a seguir no caminho que escolhi.

Aos meus amigos, e aqueles que partiram em decorrência do coronavírus, vocês foram muito importantes na minha vida, e serão sempre lembrados, pois cada momento com vocês foi essencial para me lembrar dos valores quando eu me sentia perdido ou confuso, que cada gentileza e carinho que vocês me entregaram será repassada sempre aos próximos que eu vir a encontrar e que vou sempre seguir com vocês ao meu lado.

RESUMO

O uso de ferramentas computacionais para representar o ciclo hidrológico, e analisar suas características para entender o comportamento por trás de suas mudanças tem sido uma tarefa difícil, pois o meio ambiente está sempre mudando, seja por ações antrópicas ou por novos períodos climáticos. As diversas variáveis a serem inseridas em um modelo que possa representar, entender e prever o funcionamento hidrológico de uma grande bacia hidrográfica é um desafio que só pode ser superado com o apoio de modelos de simulação hidrológico-hidrodinâmica, que leva em consideração os vários fatores que influenciam uma determinada região hidrográfica e podem representar adequadamente o ambiente em questão. Os sistemas de previsão e monitoramento hidrológico ainda são baseados em modelos que apenas analisam dados hidrológicos sem combiná-los com o meio ambiente, sem avaliar condições que interferem no fluxo, escoamento, precipitação, infiltração no solo, evaporação, e transpiração de corpos d'água e em obras como barragens e hidrelétricas que alteram os regimes hídricos dos corpos d'água. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar e prever o funcionamento hidrológico de grandes bacias hidrográficas, suportado por modelos de simulação hidrológico-hidrodinâmica, avaliando os principais modelos hidrológicos para aplicação em grandes bacias hidrográficas. Foram avaliados os principais modelos dentro de estudos que abordavam diversos tipos, e através dessa busca bibliográfica, os melhores modelos para um sistema de previsão contra inundações para a bacia do Uruguai, sendo escolhido o modelo MGB-IPH para teste de aplicação e averiguação das ferramentas de calibração. O banco de dados SIG para o estudo foi elaborado com os dados disponibilizados para a região da bacia hidrográfica, e depois realizado o pré-processamento de informações geográficas preliminares para então realizar a aplicação para a bacia do rio Uruguai. Os resultados mostram que os parâmetros mais importantes para os trechos de escoamento superficial foram os ligados a vegetação e uso do solo, e para escoamento sub-superficial e infiltração conforme o tipo de solo. Os parâmetros estipulados por calibração manual com os otimizados pela ferramenta de calibração automática do modelo, encontram-se valores para os coeficientes acima de 0,7 e erros volumétricos dentro da faixa de amplitude de cinco a menos cinco, tendo ajustados os parâmetros calibráveis em 65 sub-bacias do rio Uruguai. O modelo utilizado apresentou bons resultados para previsão de comportamento na bacia, porém exige do usuário um conhecimento prévio da bacia e do funcionamento do modelo. Assim o modelo pode ser uma boa opção para previsão de comportamento de grandes bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Bacia do Uruguai; SIG; Modelagem hidrológica-hidrodinâmica; Previsão hidrológica.

ABSTRACT

The use of computational tools to represent the hydrological cycle, and to analyze its characteristics to understand the behavior behind its changes has been a difficult task, since the environment is always changing, either by anthropic actions or by new climatic periods. The several variables to be inserted in a model that can represent, understand and predict the hydrological functioning of a large hydrographic basin is a challenge that can only be overcome with the support of hydrological-hydrodynamic simulation models, which take into account the various factors that influence a given hydrographic region and can adequately represent the environment in question. Hydrological forecasting and monitoring systems are still based on models that only analyze hydrological data without combining them with the environment, without evaluating conditions that interfere with flow, runoff, precipitation, soil infiltration, evaporation, and transpiration of water bodies and in works such as dams and hydroelectric plants that alter the water regimes of water bodies. Therefore, the present work aims to evaluate and predict the hydrological functioning of large hydrographic basins, supported by hydrological-hydrodynamic simulation models, evaluating the main hydrological models for application in large hydrographic basins. The main models were evaluated within studies that approached different types, and through this bibliographic search, the best models for a flood forecasting system for the Uruguay basin, being chosen the MGB-IPH model for application testing and verification of the tools. of calibration. The GIS database for the study was prepared with the data available for the region of the hydrographic basin, and then the pre-processing of preliminary geographic information was carried out so that it can be applied to the Uruguay River basin. The results show that the most important parameters for the runoff sections were those linked to vegetation and land use, and for sub-surface runoff and infiltration according to the type of soil. The parameters stipulated by manual calibration with those optimized by the automatic calibration tool of the model, there are values for the coefficients above 0.7 and volumetric errors within the range of amplitude from five to minus five, having adjusted the calibratable parameters in 65 sub-basins of the Uruguay River. The model used showed good results for predicting behavior in the basin, but requires the user to have a prior knowledge of the basin and the functioning of the model. Thus, the model can be a good option for predicting the behavior of large watersheds.

Keywords: Uruguay Basin; GIS; Hydrological-hydrodynamic modeling; Hydrological forecasting.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA GERAL DO TRABALHO.....	29
FIGURA 2- MAPA DA DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI-RS COM AS SUBACIAS.....	30
FIGURA 3 - MAPA DA DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI NO TERRITÓRIO BRASILEIRO.....	31
FIGURA 4 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI TOTAL.....	32
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA DENTRO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	34
FIGURA 6 - PANORAMA GERAL DO MODELO MGB-IPH.....	35
FIGURA 7– OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES SOBRE A BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS DA BACIA DO URUGUAI.....	39
FIGURA 8– OBTENÇÃO DA BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS DA BACIA DO URUGUAI.....	40
FIGURA 9– ESTAÇÕES LOCALIZADAS DENTRO DA BACIA DO RIO URUGUAI NO ESTADO DO RS.....	41
FIGURA 10– MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI.....	42
FIGURA 11– MAPA DA DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI.....	43
FIGURA 12– MAPA DO PONTO DE EXUTÓRIO PARA DELIMITAÇÃO DA BACIA DO URUGUAI.....	45
FIGURA 13– MAPA DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI.....	46
FIGURA 14– MAPA DAS MINIBACIAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO URUGUAI.....	47
FIGURA 15– AJUSTES DO PRÉ-PROCESSAMENTO DO MODELO.....	48
FIGURA 16– DADOS DO ARQUIVO GERADO NO PRÉ-PROCESSAMENTO DO MODELO.....	49
FIGURA 17– DESCRIÇÃO DAS URHS NO MODELO.....	50
FIGURA 18– VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS FIXOS.....	58
FIGURA 19– PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA E OS PESOS.....	62
FIGURA 20 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO MANUAL PARA A ESTAÇÃO PASSO DO SARMENTO.....	66
FIGURA 21 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO MANUAL PARA A ESTAÇÃO JOAÇABA I.....	66
FIGURA 22 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO MANUAL PARA A ESTAÇÃO COLÔNIA MOUSQUER.....	67
FIGURA 23 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO MANUAL PARA A ESTAÇÃO PASSO SÃO JOÃO.....	67
FIGURA 24 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO MANUAL PARA A ESTAÇÃO CONCEIÇÃO.....	67
FIGURA 25 - RESULTADO CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA A ESTAÇÃO PASSO DO SARMENTO.....	76
FIGURA 26 - RESULTADO CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA A ESTAÇÃO JOAÇABA I.....	76
FIGURA 27 - RESULTADO CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA A ESTAÇÃO COLÔNIA MOUSQUER.....	76
FIGURA 28 - RESULTADO CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA A ESTAÇÃO PASSO SÃO JOÃO.....	77
FIGURA 29 - RESULTADO CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA A ESTAÇÃO CONCEIÇÃO.....	77

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – MODELOS HIDROLÓGICOS E O MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE VAZÃO UTILIZADO.	24
QUADRO 2 – DISPONIBILIDADE TEMPORAL DOS DADOS	51
QUADRO 3– MODELOS PESQUISADOS PARA SEREM APLICADOS	54
QUADRO 4– VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS CALIBRÁVEIS	60
QUADRO 5– RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO MGB.....	63
QUADRO 6 – MELHORES RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO MGB.....	65
QUADRO 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO APÓS A CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS.	68
QUADRO 8- COMPARAÇÃO DOS VALORES ENTRE A CALIBRAÇÃO MANUAL X AUTOMÁTICA.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB-IPH – Modelo de Grandes Bacias desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas

SACE – Sistema de Alerta Contra Eventos Críticos operado pela CPRM

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SWAT – Soil Water Assessment Tool

URH – Unidade de Resposta Hidrológica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Modelos Hidrológicos.....	17
2.1.1	Evolução dos modelos hidrológicos	20
2.1.2	Principais modelos hidrológicos	21
2.1.3	Modelos hidrológicos chuva-vazão.....	22
2.2	Aplicação dos modelos	24
2.3	Integração de modelos hidrológicos com SIG	26
2.3.1	Ferramenta Arc-Hydro.....	26
2.4	Sistemas de Alerta e previsão Hidrológica	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Local da pesquisa.....	29
3.2	Aspectos gerais	30
3.3	Métodos	32
3.3.1	Modelo MGB-IPH	34
3.3.2	Ferramenta IPH HYDRO TOOLS	36
3.3.3	Obtenção dos dados Hidrológicos	39
3.4	Caracterização e obtenção dos dados.....	41
3.4.1	Modelo digital de elevação	41
3.4.2	Delimitação da bacia	42
3.5	Pré-processamento	43
3.5.1	MDE.....	43
3.5.2	Segmentação	44
3.5.3	Bacia hidrográfica	45
3.5.4	Classes de respostas hidrológicas	45
3.5.5	Mini bacias	46
3.5.6	Sub-bacias.....	47
3.5.7	Projeto.....	48
3.6	Modelagem da bacia	49

3.6.1	Preparação	49
3.6.2	Obtenção dos dados Hidrometeorológicos.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Definição dos principais modelos.....	53
4.1.1	Obtenção de dados para o modelo.....	57
4.1.2	Parâmetros.....	57
4.1.3	Calibração Automática.....	61
4.2	Modelagem da bacia	62
4.2.1	Simulação	62
4.2.2	Calibração Automática.....	68
4.2.3	Comparação dos Resultados da Calibração	71
5	CONCLUSÕES.....	78
	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

O regime hidrológico é um dos fatores que garantem a manutenção e governam o funcionamento dos ecossistemas (POSTEL; RICHTER, 2003; BAYLEY, 1995). Conhecer o comportamento hidrológico permite investigar as relações existentes entre o regime de vazões e as características ecológicas influenciadas por tal regime e ajuda a entender a estrutura e o funcionamento do ecossistema (PAZ et al., 2010). Entretanto, mais do que conhecer o comportamento atual do ecossistema, é importante poder prever seu comportamento no futuro frente a possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas e face a cenários de variabilidade climática, que podem inclusive amplificar os impactos antrópicos. A estimativa de possíveis impactos é fundamental para o processo de tomada de decisão, o ajuste de projetos de intervenção antrópica e para elaboração de medidas de mitigação. Prever o comportamento do sistema hidrológico requer descrever seu funcionamento e ser capaz de reproduzi-lo de forma satisfatória, considerando-o sob determinadas condições de contorno e iniciais. Para tanto, a modelagem matemática vem sendo empregada desde o século XIX, procurando representar o escoamento da água através de equações derivadas da mecânica dos fluidos (ABBOTT, 1979; CUNGE et al., 1982, apud PAZ, 2010).

Nesse sentido os modelos de simulação hidrológica representam processos variáveis no tempo e espaço como infiltração e movimento de água no solo, balanço de energia e evapotranspiração e propagação de ondas de cheia em rios e planícies de inundação. Para tanto, existe uma grande diversidade de modelos, alguns focados na simulação de processos de interface atmosfera-solo-planta (PITMAN, 2003; WOOD et al., 1992), e outros mais focados na simulação de vazões em rios, propagação de ondas de cheia e estiagens (COLLISCHONN, 2007; PAIVA, 2011a).

A calibração dos parâmetros dos modelos, é uma etapa que varia de cada um, mas para bacias de grandes dimensões se faz necessária pois as diferentes sub-bacias que a compõem podem ter características diferentes que influenciam de maneira diferente no comportamento do ciclo hidrológico na região, tornando assim, o processo de calibração de extrema importância para entendimento da hidrologia do local de estudo.

Um processo importante que é simplificado na maioria dos modelos hidrológicos de larga escala é o roteamento de rios. CLARK et al. (2015) sugere que uma das áreas-chave para melhorar a representação dos processos hidrológicos nos modelos de superfície terrestre são as simulações do fluxo de rios, representando explicitamente as interações entre rios e aquíferos e melhorando as parametrizações do encaminhamento de canais e várzeas. Alguns anos antes, HODGES (2013) sugeriu que métodos simplificados de roteamento deveriam ser cada vez mais substituídos por métodos hidrodinâmicos em modelos hidrológicos de larga escala.

No entanto, as rotas de rios e a dinâmica das inundações são processos que, normalmente, são representados por abordagens relativamente simples. Uma revisão recente de doze modelos hidrológicos de grande escala KAUFFELDT et al. (2016) concluiu que a maioria deles usa ondas cinemáticas ou métodos ainda mais simples para o direcionamento do fluxo de rios. HUANG et al. (2016) testaram nove modelos hidrológicos em bacias hidrográficas de grande escala, quatro deles não incluídos na revisão de KAUFFELDT et al. (2016), e todos eles têm métodos simplificados para o encaminhamento fluvial.

As limitações das diferentes abordagens de simulação se referem não somente a simplificações na representação de processos físicos, mas também em deficiências nos dados de entrada destes modelos. Sendo assim, o desenvolvimento de novas abordagens de simulação como a que este trabalho se propõe, com a verificação do papel de diferentes processos hidrológicos usando dois modelos em conjunto, além da verificação das principais fontes de erros ainda é um assunto em aberto na modelagem hidrológica de grandes bacias, mas necessário, pois as instituições governamentais ainda estão desarmadas contra eventos críticos, haja visto as recentes notícias de problemas com enchentes.

Conhecer o comportamento hidrológico permite investigar as relações existentes entre o regime de vazões e as características ecológicas influenciadas por tal regime e ajuda a entender a estrutura e o funcionamento do ecossistema. Porém, é ainda mais importante poder prever o seu comportamento frente a possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas ou face a cenários de variabilidade climática, que podem até gerar impactos antrópicos. A estimativa de eventos críticos é fundamental para o processo da gestão de risco e gerenciamento de calamidades dando suporte a tomada de decisões frente a medidas de mitigação.

Prever o comportamento de um sistema hidrológico requer descrever o seu funcionamento e ser capaz de reproduzi-lo de maneira equidistante, considerando medidas de contorno e iniciais. Para tanto, a modelagem matemática vem sendo empregada desde o século XIX, procurando representar o escoamento da água através de equações derivadas da mecânica

dos fluidos (ABBOTT, 1979; CUNGE et al., 1981 apud PAZ, 2010). Apesar das dificuldades na representação matemática de alguns processos físicos e da necessidade da discretização de processos contínuos, os modelos matemáticos têm a vantagem de permitir a geração de resultados para diferentes situações com alta velocidade de resposta (TUCCI, 1998). Isso tem motivado amplamente o uso de modelos de simulação de escoamento também para sistemas de alerta e previsão de enchentes em tempo real (MOORE et al., 2005).

A incerteza nos sistemas operacionais de previsão hidrológica forçada com previsões numéricas do tempo é frequentemente avaliada quantificando a incerteza apenas a partir dos insumos. No entanto, parte da incerteza na descarga modelada decorre do modelo hidrológico. Segundo Huang et al. (2016) um sistema multi-modelo pode responder por parte dessa incerteza, mas existe uma infinidade de modelos hidrológicos e não é trivial selecionar aqueles que atendem a necessidades específicas e coletar coletivamente uma propagação representativa da incerteza do modelo.

Nesse sentido se faz importante e necessário ter ferramentas de apoio à tomada de decisões, que facilitem as análises técnicas e possam contribuir para um sistema de previsão e alerta de eventos críticos, integrando sistemas de informação geográfica e modelos hidrológicos, que constituem um subsídio importante para a gestão de risco e eficiência na previsão de calamidades, a previsão de vazões vai avaliar melhor os parâmetros de escoamento de base, direções de fluxo, saturação do solo e escoamento superficial.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o funcionamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Uruguai, com o suporte de um modelo de simulação hidrológica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os principais modelos hidrológicos para aplicação em grandes bacias hidrográficas;

- b) Realizar a caracterização e obtenção de dados para aplicação no modelo de comportamento;
- c) Aplicar o modelo selecionado à bacia do rio Uruguai;
- d) Verificar as alterações feitas pelo processo de calibração automática;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi desenvolvida de forma a apresentar uma breve introdução aos modelos hidrológicos, da conceituação, classificação, evolução, descrição e aplicações dos conceitos principais inseridos num programa de modelagem assegurando a caracterização dos conhecimentos necessários, e sua integração do sistema de informação geográfica SIG.

A primeira parte consiste de uma introdução aos modelos hidrológicos, princípios, classificação, evolução, principais modelos, integração com o SIG e ferramentas de destaque.

A segunda parte se faz referente ao modelo MGB – IPH, abrangendo a sua ferramenta SIG, sua evolução, dispositivos e evolução.

2.1 Modelos Hidrológicos

A complexidade do meio físico que compõe sistema hídrico torna trabalhosa as análises quantitativa e qualitativa do mesmo, contudo, modelos hidrológicos, uma das ferramentas que integram as relações entre os fenômenos que caracterizam um sistema e que, assim, buscam auxiliar a representação do seu comportamento, contribuem para o entendimento dos sistemas e para a previsão de condições diferentes das observadas, podendo facilitar os estudos através de uma linguagem ou de uma forma de mais fácil acesso, uso e aplicação.

A simulação hidrológica é influenciada pela heterogeneidade física da bacia hidrográfica e pelos processos envolvidos, o que se tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos, da escala espacial e temporal e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

Pela natureza variada dos modelos de simulação hidrológica, desenvolvidos e aplicados com diferentes objetivos, há diversas tentativas de categorização.

Viessman Jr. e Lewis (2002) apresentam uma classificação descritiva dos modelos, em seis categorias:

- a) Modelos físicos vs. matemáticos: Os modelos físicos incluem tecnologias análogas e princípios de similaridade aplicados aos modelos em pequenas escalas. Por exemplo, o escoamento simulado em laboratório pode ser realizado com uma escala de 1:10 em relação ao da natureza. Modelos matemáticos

baseiam-se em enunciados matemáticos para representar o sistema. A teoria do hidrograma unitário é um modelo matemático da resposta de uma bacia hidrográfica aos vários eventos de chuva;

- b) Modelos empíricos vs. conceituais: Os modelos empíricos representam o sistema real pela descrição matemática com base em dados experimentais, em vez de leis físicas gerais. Os modelos conceituais baseiam-se nas concepções teóricas para caracterizar e interpretar os fenômenos, em vez de descrever a ocorrência empírica do processo físico;
- c) Modelos concentrados vs. distribuídos: Os modelos que ignoram as variações espaciais dos parâmetros no interior do sistema são designados como genéricos globais ou concentrados. Um exemplo é o uso do hidrograma unitário para prever a distribuição temporal do escoamento superficial para diferentes chuvas sobre áreas de drenagem homogêneas. Os modelos de parâmetros distribuídos levam em consideração as variações espaciais do comportamento do processo no interior do sistema. Por exemplo, alguns modelos de simulação de águas subterrâneas levam em conta as variações no armazenamento e transmissividade, com informações para cada unidade de uma rede de células à área espacial do aquífero. Mais recentemente, sistemas de água superficial estão sendo analisados através da tecnologia de sistema de informação geográfica com o uso de parâmetros distribuídos (ENGEL et al., 2007);
- d) Modelos estocásticos vs. determinísticos: Modelos estocásticos ou probabilísticos são modelos matemáticos em que o comportamento de uma ou mais variável é totalmente ou parcialmente descrito por funções de probabilidade. Modelos determinísticos são modelos matemáticos em que o comportamento de toda variável é completamente determinado pelas equações que governam o modelo. Muitos processos estocásticos são aproximados por métodos determinísticos se excluírem toda a consideração de parâmetros aleatórios. A simulação determinística descreve o comportamento do ciclo hidrológico em termos de relações matemáticas que descrevem as interações das várias fases do ciclo hidrológico;
- e) Modelos de eventos vs. contínuos: Os modelos hidrológicos podem ser investigados em maior detalhe se o intervalo de tempo da simulação for reduzido. Muitos modelos hidrológicos de curta duração podem ser classificados

como modelos de simulação de um único evento, em contraste com os modelos sequenciais ou contínuos. Um modelo contínuo é normalmente utilizado para simular 3, 4, 5, ou mais anos de vazões. Já um modelo típico de simulação de eventos pode utilizar um intervalo de tempo de 1 hora ou até mesmo de 1 minuto;

- f) Modelos de water budget vs. preditivos: Muitos modelos podem ser classificados conforme a sua finalidade. Uma comparação importante é verificar se o modelo se propõe a prever as condições futuras utilizando informações sintéticas sobre as precipitações e condições da bacia de drenagem (modelos preditivos) ou pela verificação dos eventos históricos (modelos water budget). Um modelo water budget é definido como um modelo ou um conjunto de relações que admitem o equilíbrio histórico de entradas, saídas e mudanças no armazenamento de um sistema em estudo.

A análise e posterior simulação dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas passam, necessariamente, pela obtenção de dados requeridos para o mapeamento da região de interesse, os quais são compostos por 3 categorias gerais (JOHNSON, 2016):

- a) Dados topográficos da várzea e bacia hidrográfica para apoiar a modelagem hidrológica e hidráulica;
- b) Dados físicos sobre as instalações construídas para controle de drenagem e edificações;
- c) Dados administrativos sobre limites de jurisdição.

Ogden et al. (2001) fazem uma descrição de diversos softwares que utilizam como base informações geoespaciais e podem ser aplicados para diversas finalidades no contexto de bacias hidrográficas, as quais vão desde a previsão de variáveis hidrológicas, passando pela análise do escoamento superficial, até à previsão/estimativa de inundações.

Já Fleenor e Jensen (2003) apresentam uma comparação entre o software de domínio público do Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) e o software de propriedade do Danish Hydraulic Institute (DHI), MIKE 11, 2 dos modelos mais comumente usados na previsão de inundações em todo o mundo.

2.1.1 Evolução dos modelos hidrológicos

O início da modelagem hidrológica pode ser atribuído ao desenvolvimento da engenharia civil na segunda metade do século XIX (TODINI, 1988, apud FERRIGO, 2014) surgindo em resposta a problemas de engenharia, como para projetos de estradas, canais, esgotos urbanos, sistemas de drenagem, barragens, bueiros, pontes e sistemas de abastecimento de água (SINGH; WOOLHISER, 2002).

Até meados da década de 1960, a modelagem hidrológica envolveu principalmente o desenvolvimento de conceitos, teorias e modelos de componentes individuais do ciclo hidrológico.

Segundo uma revisão realizada por Singh e Woolhiser (2002) sobre a evolução dos componentes individuais do ciclo hidrológico: os estudos da relação chuva-vazão foram iniciados com o desenvolvimento do método racional (MULVANY, 1850 apud FERRIGO, 2014); utilizando princípios simplificados da física, uma das primeiras tentativas de desenvolver uma teoria de infiltração foi por Green e Ampt (1911); Horton (1919), e citada por Ferrigo (2014) derivou uma série de fórmulas empíricas para estimar a interceptação de tempestades por vários tipos de cobertura vegetal; o escoamento em reservatórios foi estudado por Puls (1928, FERRIGO, 2014); os primeiros trabalhos descrevendo a evaporação de lagos foram feitos por Cummings (1935); Sherman (1932), apud FERRIGO (2014), introduziu o conceito do hidrograma unitário para relacionar a resposta do escoamento direto com o excesso da chuva; um ano após, Horton (1933), apud Ferrigo (2014) desenvolveu a teoria da infiltração para estimar o excesso da chuva e aprimorou as técnicas de separação do hidrograma; Fair e Hatch (1933, apud FERRIGO, 2014) apud derivaram uma fórmula para calcular a permeabilidade do solo; para o escoamento em rios foi desenvolvido o método de Muskingum (MCCARTHY, 1938 apud FERRIGO 2014); o trabalho que estabeleceu as bases da hidrologia subterrânea foi realizado por Theis (1935, apud FERRIGO 2014), em que combinou a lei de Darcy com a equação de continuidade para obter a relação entre a redução da superfície piezométrica e a taxa e duração da descarga de um poço; Barnez (1940, apud SINGH 2018) estudou a infiltração das águas subterrâneas e levou ao desenvolvimento de técnicas para a separação do escoamento de base e interfluxo de um hidrograma; Jacob (1943, 1944, apud FERRIGO, 2014) correlacionou os níveis de água subterrânea com a precipitação; Thornthwaite (1948) e Penman (1948), citados por FERRIGO (2014), fizeram importantes

contribuições para modelos de evapotranspiração; e o Soil Conservation Service (SCS, 1972) desenvolveu o método do SCS Curve Number para calcular o escoamento.

A integração de diferentes componentes do ciclo hidrológico e a simulação de praticamente toda a bacia hidrográfica foram possíveis somente com o início da revolução digital na década de 1960. O modelo SWM (Stanford Watershed Model), hoje HSPF, desenvolvido por Crawford e Linsley (1966) apud Ferrigo (2014) foi, provavelmente, a primeira tentativa de modelar praticamente todo o ciclo hidrológico, o qual introduziu a avaliação da distribuição espacial da infiltração. Além disso, foi desenvolvido uma série de modelos semidistribuídos capazes de explicar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, incluindo modelos capazes de simular fontes difusas e/ou pontuais de poluição.

De fato, tem aumentado gradualmente o desenvolvimento de modelos hidrológicos e a complexidade dos sistemas modelados, paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas computacionais desde a década de 1970. Descrevem-se na sequência as principais ferramentas disponíveis na atualidade (FERRIGO, 2014).

2.1.2 Principais modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos vêm sendo constantemente aprimorados para representar, principalmente, os processos naturais e antrópicos. Mais recentemente, esse desenvolvimento vem sendo acoplado a sistemas de informações geográficas (SIGs) como forma de unir as distintas séries de dados e informações disponíveis em multiescalas, além de possibilitar a distribuição espacial dessas informações através da subdivisão da área de estudo em unidades menores e hidrológicamente mais homogêneas, podendo minimizar uma das maiores limitações encontrada na aplicação de modelos complexos, que é trabalhar com a grande quantidade e heterogeneidade dos dados que descrevem os sistemas naturais.

Atualmente, existem diversos modelos de bacias hidrográficas, em geral bem conhecidos e em uso constante em diferentes países. Esses modelos variam significativamente na sua construção referente ao processamento de cada componente individual do ciclo hidrológico, e em parte, por apresentarem finalidades diferentes.

Nos Estados Unidos o modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System) é um modelo muito utilizado pelo setor privado para a concepção de sistemas de drenagem, quantificando o efeito da mudança do uso solo em cheias.

Já o modelo NWS (National Weather Service) é o modelo mais utilizado para a previsão de cheias. O HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) é um modelo de qualidade da água adotado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA). O modelo MMS (Modular Modeling System) do USGS é um dos modelos mais utilizados para o planejamento de recursos hídricos e gestão de obras.

Apesar das limitações mencionadas acima, os modelos hidrológicos de base física recentemente passaram a ser utilizados em sistemas regionais e mesmo globais de monitoramento e previsão hidrológica em tempo real. Por exemplo, Thielen et al. (2009) apresentam a concepção do “European Flood Awareness System - EFAS”, que se trata de um sistema alerta contra cheias para a Europa baseado em um modelo hidrológico distribuído forçado com previsões meteorológicas e utilizando a técnica de previsão probabilística. Houborg et al. (2012) apresentam as técnicas utilizadas no “U.S. Drought Monitor”, que consiste em de um sistema de monitoramento em tempo real de secas nos Estados Unidos baseado em resultados de modelos hidrológicos de superfície. Wood et al. (2002) mostram um sistema de previsão hidrológica sazonal para os Estados Unidos. Alguns estudos e protótipos de sistemas de previsão de vazões também foram desenvolvidos em algumas bacias brasileiras (TUCCI et al., 2003; COLLISCHONN et al., 2005; COLLISCHONN et al., 2007; MELLER, 2012).

2.1.3 Modelos hidrológicos chuva-vazão

Existem modelos que vem sendo desenvolvidos para analisar a propagação das vazões conforme a precipitação na área da bacia, e assim obtendo resultados que levem em consideração a série climatológica da região.

SHE (Abbott et al., 1986^a; Abbott et al., 1986b), acrônimo de European Hydrological System (Système Hydrologique Européen) é um modelo de base física, determinístico distribuído. Desenvolvido pelo Instituto Hidráulico Dinamarquês, Instituto Britânico de Hidrologia e o SOGREAH, é conhecido por sua importância histórica. O SHE é baseado na premissa de que os modelos da época não representavam com precisão os processos hidrológicos devido a base empírica ou conceitual e que o uso de modelos de base física e distribuídos poderiam resolver isso. O modelo representa os processos de interceptação, evapotranspiração, escoamento em zonas saturadas, escoamento na superfície, escoamento no

canal e neve. O escoamento no rio é calculado por um modelo de difusão unidimensional. Existem ainda algumas variações desse modelo, como é o caso do MIKE SHE (Thompson et al., 2004; Zhang et al., 2008).

TOPMODEL, siglapara “TOPography Based Hydrological MODEL”, também é uma referência devido a sua importância histórica, cerca de 33 anos. Segundo Beven (1997), esse modelo tem sido utilizado em inúmeras aplicações em uma larga variedade de bacias. O TOPMODEL é um modelo do tipo chuva-vazão, conceitual e semi-distribuído que utiliza o conceito de área variável de contribuição para a formação de escoamento superficial. No TOPMODEL a heterogeneidade da bacia hidrográfica é representada pelo índice topográfico de Kirby (Beven et al., 2003).

TOPKAPI (TOPographic Kinematic Approximation and Integration) é um modelo chuva-vazão, distribuído e de base física, desenvolvido sob a hipótese de que o escoamento horizontal em um ponto do solo, sobre as declividades e nos canais pode ser aproximado por um modelo de onda cinemática. O modelo utiliza, além da abordagem de onda cinemática, uma base de dados obtida a partir do MNT (modelo numérico do terreno) da bacia (Liu e Todini, 2005; Liu, Martina e Todini, 2005; Ciarapica e Todini, 2002). O TOPKAPI originalmente representava os processos de evapotranspiração, neve, água no solo, escoamento superficial e no canal. Todos os processos são simulados igualmente. Convertem-se as equações de onda cinemática em equações diferenciais ordinárias que representam reservatórios não lineares. Os processos são simulados e seguem a topografia da região obtida através do MNT.

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IHP, desenvolvido por Collischonn (2001) é um modelo distribuído, de base conceitual, baseado na estrutura dos modelos LARSIM e VIC*2L (Liang, Wood e Letternmaier, 1995) com algumas adaptações e simplificações. O MGB é composto prlos módulos de balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem. A preparação dos dados é feita através de uma metodologia de geoprocessamento, obtida pelo modelo numérico do terreno da região de estudo. O modelo também conta com uma metodologia para a fase de calibração automática. O modelo também conta com uma metodologia para a fase de calibração automática. O MGB foi desenvolvido para ser aplicado em bacias com áreas maiores ou iguais a 10000 km².

Além desses, existem vários outros modelos hidrológicos utilizados e que vem sendo atualizados com o passar do tempo. o Quadro 1, mostra um resumo de alguns modelos encontrados na literatura e o seu método de propagação de vazão.

Quadro 1 – Modelos hidrológicos e o método de propagação de vazão utilizado.

Modelo	Método de propagação	Referência
SHE	Modelo de Difusão 1D	Abbott et al., 1986a; Abbott et al., 1986b
TOPKAPI	Onda Cinemática	Todini, 2002
MGB-IPH	Muskingum-Cage Linear/Hidrodinâmico completo	Collischonn, 2001
LASCAM	Método simplificado baseado em reservatório linear simples	Siviplan et al., 2002
ARNO	Reservatório linear simples	Todini, 1996
LISFLOOD	Onda Cinemática	De Roo, Wesseling e Deursen, 2000
SWIM	Muskingum	Krysanova e Wechsung, 2000
HEC-1	Muskingum/ Muskingum-Cunge/Onda Cinemática	USACE (1999)

Fonte: Pontes, Paulo R. M., 2011.

2.2 Aplicação dos modelos

Nas últimas décadas, a ciência da modelagem de simulação computacional de sistemas hídricos superficiais e subterrâneos passou de difundidos interesses acadêmicos a um procedimento de engenharia prática.

Tucci (1998) categoriza em três grandes grupos os modelos empregados no gerenciamento de recursos hídricos, considerando principalmente os objetivos e aplicações:

- a) Modelos de comportamento: Alguns modelos, podendo ser chamados de modelos de comportamento, são utilizados para descrever o comportamento de um sistema, prognosticando as respostas destes quando sujeitos a diferentes entradas ou devido a modificações nas suas características. Um modelo de comportamento, que represente um trecho de um rio, por exemplo, busca reproduzir o hidrograma de jusante, sujeito a diferentes hidrograma de entrada a montante ou a modificações no seu leito ou mesmo a construção de uma barragem no trecho. Os modelos, neste caso, são utilizados para avaliar

alternativas possíveis de ocorrerem no sistema, prognosticando a resposta do mesmo a estas ações;

- b) Modelos de otimização: Os modelos de otimização estão preocupados com as melhores soluções em nível de projeto de engenharia, de um sistema específico. Por exemplo, a rede de abastecimento de água de uma parte de uma cidade pode ser representada por um modelo hidráulico, o modelo de otimização é aquele que pesquisa o menor diâmetro comercial dos diferentes trechos da malha;
- c) Modelos de planejamento: Esses tipos de modelos simulam as condições globais de um sistema. Normalmente, o modelo de planejamento envolve além de uma solução hidrológica, hidráulica e econômica, uma quantificação socioeconômica e ambiental.

As principais aplicações da modelagem hidrológica estão basicamente ligadas à: compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos; análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão (ADAMOWSKI; SUN, 2010; HOSSEINI et al., 2011; FRANCHINI et al., 2011; PONTES; COLLISCHONN, 2012; MAHESWARAN; KHOSA, 2012); dimensionamento e previsão de cenários de planejamento; efeitos resultantes da modificação do uso do solo (GIRI et al., 2011; MACHADO et al., 2003); gestão integrada de bacias hidrográficas (GLAVAN et al., 2012; HU et al., 2010; SHI et al., 2012); avaliação da eficácia de manejos agrícolas para a redução da perda de solo e poluição difusa (GÜOMANN et al., 2005); previsão e identificação de processos erosivos e sedimentação (PANAGOPOULOS et al., 2011; MINOTI, 2006; FERRIGO et al., 2012); avaliação de impactos nos recursos hídricos pelas mudanças no clima (BOOJI, 2005; FARAMARZI et al., 2012; RYU et al., 2011; ESCARIÃO et al., 2012); avaliação da disponibilidade e qualidade da água (PERRIM et al., 2012, PISINARAS et al., 2010, LAM et al., 2012, LINS et al., 2012) entre muitas outras.

Esses estudos vêm do importante papel que hidrólogos têm em desempenhar para garantir que futuras atribuições da água sejam cientificamente baseadas e feitas de forma eficiente, de modo a satisfazer as necessidades de ambos os sistemas humanos e naturais.

2.3 Integração de modelos hidrológicos com SIG

Um dos aspectos que mais tem contribuído para que os sistemas de alerta e previsão de eventos críticos tenham mais agilidade, é a integração dos modelos hidrológicos com Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Por quase duas décadas entre os anos 60 e 70 os sistemas de informação geográfica e os modelos hidrológicos foram desenvolvidos em paralelo, com pequena interação (SUI; MAGGIO, 1999). Os principais esforços de investigação para a integração entre os SIG e modelos hidrológicos só se desenvolveram no final dos anos 80, como uma parte dos esforços dos usuários de SIG para melhorar a compatibilidade analítica dos SIG (FOTHERINGHAM; ROGERSON, 1994; GOODCHILD et al, 1992) e as novas demandas dos hidrólogos de melhorar a representação digital do terreno (CLARK, 1998; SINGH; FIORENTINO, 1996). Atualmente, a integração dos dois vem trazendo benefícios e vantagens que são observados, mas ainda não são totalmente aproveitados.

Diversos modelos hidrológicos vêm trazendo aos usuários de SIG a possibilidade de seguir além das aplicações básicas que só gerenciam os dados para até sofisticados modelos e simulações. Os SIG, com a evolução computacional, onde os processadores se tornaram mais potentes, possibilitando se desenvolver aplicações mais complexas, em especial o processamento de dados de modelos numéricos do terreno e sua topologia, vem proporcionando sistemas com novas plataformas para gestão de risco e gerenciamento de calamidades. A crescente literatura sobre a integração dos SIG com modelos hidrológicos testemunha o reconhecimento de tais benefícios mútuos (DEVNTIER; FELDMAN, 1993; MAIDMENT, 1993; MCDONNELL, 1996; MOORE, 1996).

2.3.1 Ferramenta Arc-Hydro

Um conjunto organizado de conceitos que podem facilitar a integração de modelos hidrológicos e SIG é a estrutura de dados e o conjunto de ferramentas denominado ArcHydro, desenvolvido em parceria pela Universidade do Texas e pela empresa ESRI (MAIDMENT, 2002). O ArcHydro foi desenvolvido para operar internamente ao programa ArcGIS, para extrair informações necessárias para a modelagem hidrológica a partir de Modelos Digitais de Elevação – MDE. ArcHydro além de prover a delimitação, área, declividade, cursos d'água e outras características das bacias, permite a análise da rede de drenagem baseada em representações vetoriais de elementos de rede.

Para modelar um sistema de bacias, é necessário representar os elementos da rede de drenagem e organizá-los de acordo com suas próprias características topológicas. O modelo deve ter a capacidade de integrar rios e sub-bacias e identificar os elementos de montante e jusante.

Os conceitos e ferramentas do ArcHydro permitem a análise da rede de drenagem, com base em representações vetoriais de elementos da rede (p. ex. rios como linhas e bacias como polígonos) e suas correspondentes tabelas de atributos. Fornece um quadro para organização e pré-processamento geo-espacial e temporal de dados em um sistema de informação geográfica para uso em modelos de simulação hidrológica e hidráulica (WHITEAKER T., et al, 2006).

2.4 Sistemas de Alerta e previsão Hidrológica

Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) é uma medida não estrutural adotada para a diminuição de prejuízos causados por cheias nas bacias hidrográficas. O Serviço Geológico do Brasil - CPRM opera atualmente 17 sistemas de alerta hidrológico em todo o Brasil, sendo que SAH da Bacia do rio Doce é operado desde 1997 (MATOS A. J. S., et al, 2020).

O SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos) é a plataforma desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para disponibilizar todas as informações geradas no contexto dos Sistemas de Alerta Hidrológico (SAHs). Aqui, são reunidas todas as informações disponíveis para cada bacia hidrográfica, como o monitoramento automático de chuvas e níveis de rios em diversas estações hidrometeorológicas, os links para os mapas de riscos dos municípios e todos os boletins de monitoramento e alertas publicados.

O objetivo dos SAHs consiste no monitoramento e previsão de níveis de rios, gerando e disseminando informações hidrológicas para subsidiar a tomada de decisões por parte da população e dos órgãos relacionadas à mitigação dos impactos de eventos hidrológicos extremos.

Nas salas de monitoramento da CPRM, as equipes trabalham com dados que são recebidos a cada 1 hora, por transmissores via satélite ou GSM instalados nas estações de monitoramento automáticas. Esses dados são provenientes das estações da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), de responsabilidade da Agência Nacional das Águas, e operada pela CPRM. Tais estações são dotadas de sensores de nível, que medem a variação nos níveis das águas com alta precisão, bem como pluviômetros automáticos, capazes de registrar a quantidade de chuva em intervalos de segundos. Os dados são recebidos, consistidos e

processados por meio de modelos hidrológicos elaborados pela equipe da CPRM, e consolidados em forma de boletins de monitoramento, enviados às defesas civis estaduais, municipais, ao CENAD, à ANA, ao CEMADEN, e demais órgãos de interesse. Sempre que há necessidade, são enviados também boletins de alerta hidrológico, com informações adicionais de previsões dos níveis dos rios, de forma que os órgãos atuantes possam se preparar da melhor forma possível para o evento (Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM).

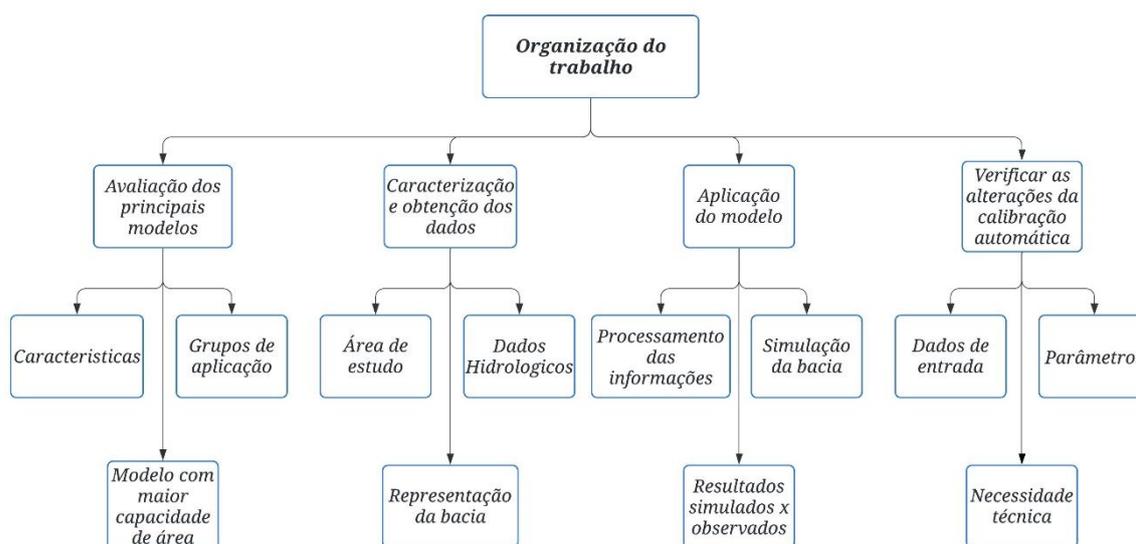
Atualmente no Brasil, a empregabilidade dos sistemas de SAH se limita a CPRM, e algumas situações pontuais de pequenas bacias para estudos, e o uso de ferramentas como modelos hidrológicos de grande escala pouco é empregada, devida a demanda de estudos e complexidade na sua operação, e ao grau de dificuldade sobre a organização destes, mas que leva a resultados mais precisos e com maiores possibilidades, sendo sua empregabilidade cada vez mais procurada pelos pesquisadores de instituições como a própria CPRM, mas que ainda precisa de mais técnicos para dedicar esforços para execução de tal sistema.

3 METODOLOGIA

A metodologia geral do trabalho foi construída com duas etapas de maneira que se conseguisse alcançar os objetivos desejados. A primeira etapa foi um levantamento de estudos que apresentassem informações referentes a diversos modelos e como realizar a escolha para a condição ou bacia que se quer avaliar.

Na segunda etapa, foi aplicado o modelo selecionado na bacia, seguindo as orientações do manual de aplicação do modelo e tutoriais, caracterizando a bacia, organizando os dados, obtendo as informações pelas aplicações disponíveis e testando a ferramenta de otimização. O fluxograma da figura 1 apresenta a estrutura geral desenvolvida no trabalho.

Figura 1 - Fluxograma geral do trabalho



3.1 Local da pesquisa

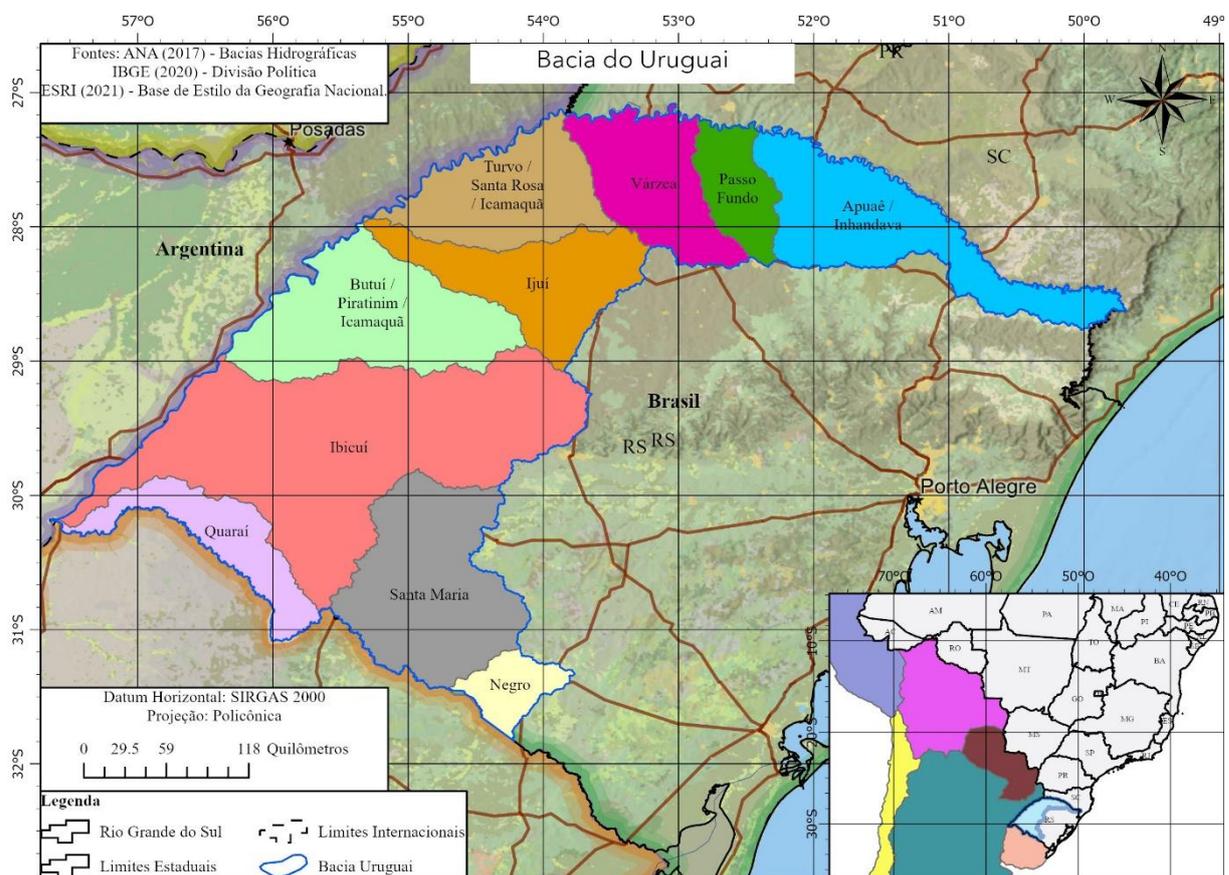
A pesquisa foi realizada na bacia hidrográfica do rio Uruguai, na parcela que fica no Rio Grande do Sul, pois esta é a maior bacia do estado, além de ser uma bacia com características de planície de inundação e região de serra e planalto, com o relevo bastante completo e diversificado, e por se tratar de uma região hidrográfica de proporções continentais, servindo como limite transfronteiriço de países e estados.

3.2 Aspectos gerais

O rio Uruguai é formado da confluência do rio Pelotas com o rio Canoas, possui 2.200 km de extensão, até a sua foz no estuário do rio da Prata. O rio divide os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em seu trecho nacional, e faz fronteira entre o Brasil a Argentina e o Uruguai. A área total drenagem é de cerca de 385.000 km², onde 45%, ou seja, 174.412 km² estão situados em território nacional (MMA, 2006).

A figura 2 apresentar a delimitação das bacias e suas 11 sub-bacias, divididas conforme o Decreto estadual nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018.

Figura 2 - Mapa da delimitação da bacia hidrográfica do Uruguai-RS com as sub-bacias

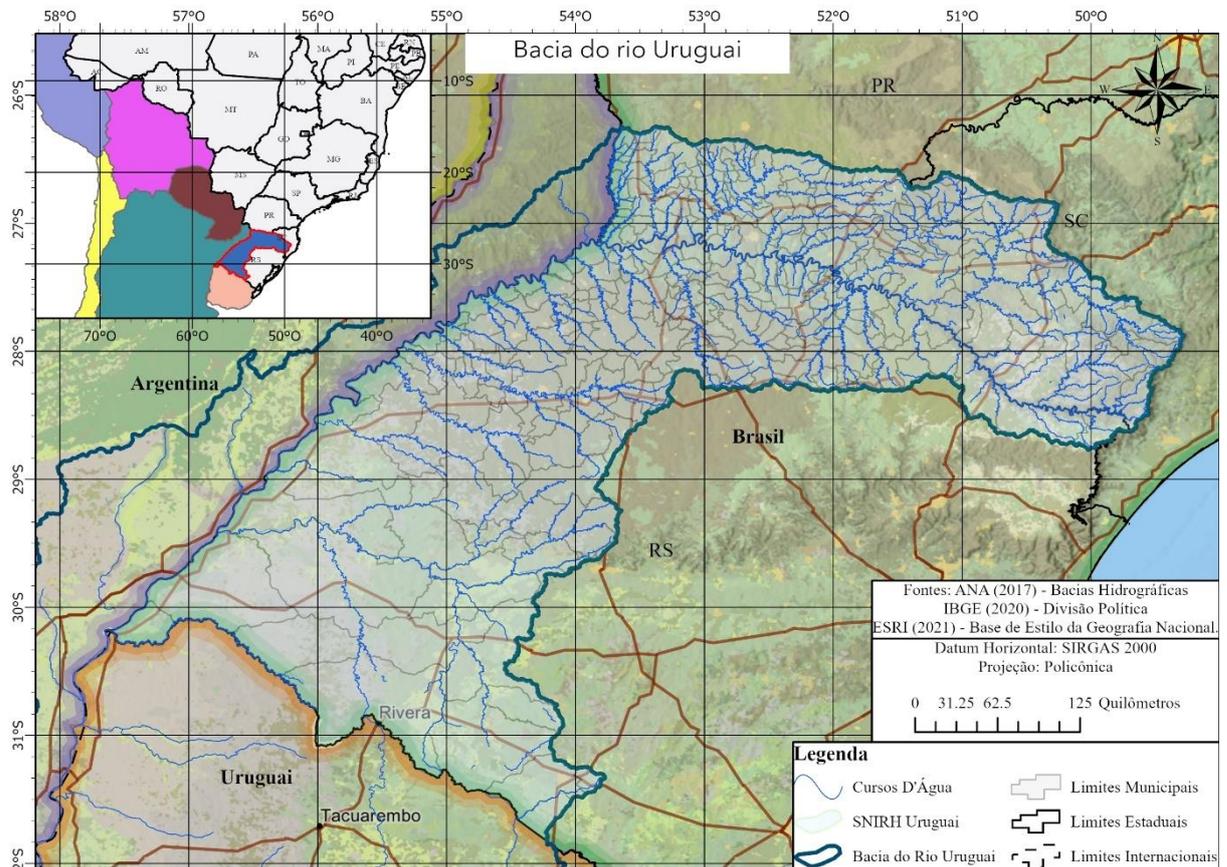


Fonte: Autor, 2021

A figura 3 apresenta a delimitação da bacia do Uruguai em todo o território brasileiro, conforme a delimitação proposta com a metodologia de Otto Pfafstetter e estabelecida pelo

CNRH, conforme a resolução n° 32/2003 que institui a divisão hidrográfica em 12 regiões hidrográficas.

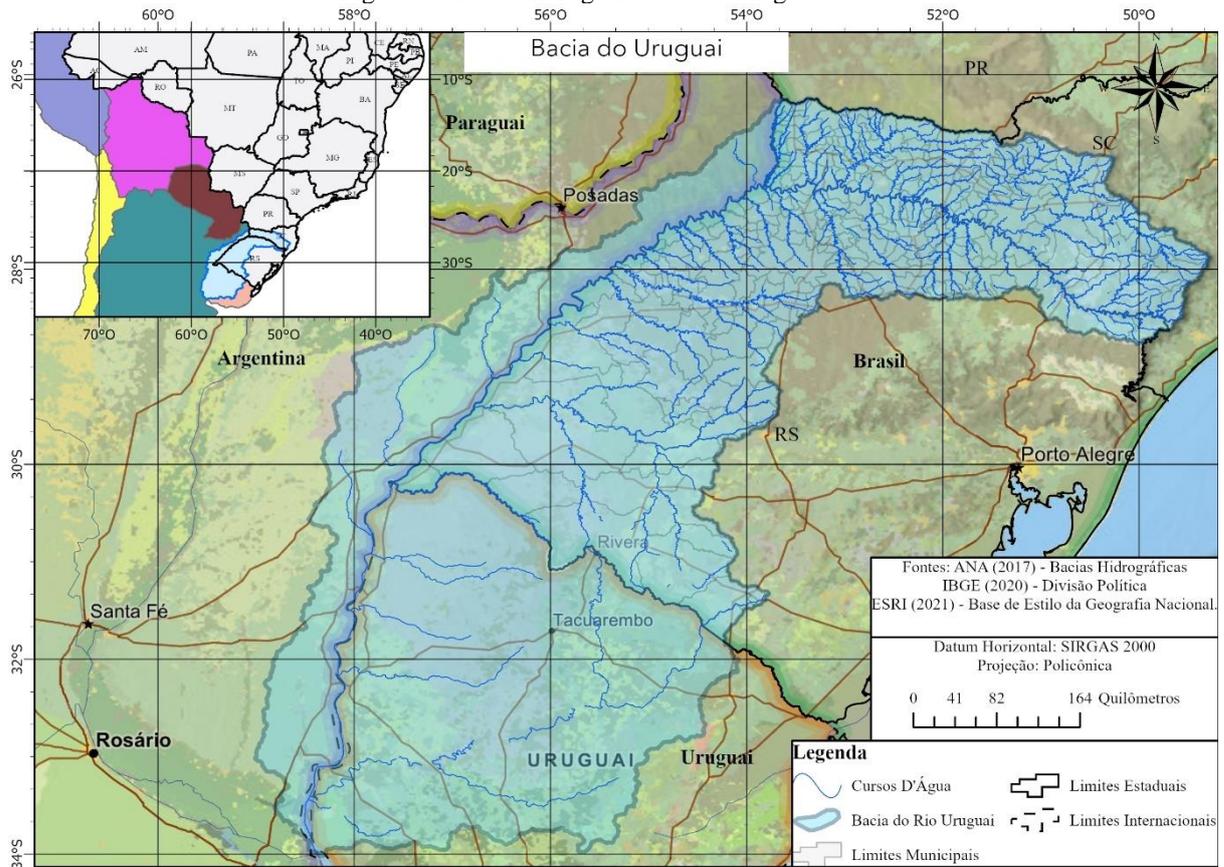
Figura 3 - Mapa da delimitação da bacia hidrográfica do Uruguai no território brasileiro



Fonte: Autor, 2021

A figura 4 apresenta a delimitação da bacia do Uruguai em sua totalidade, seguindo os critérios da metodologia proposta por Otto Pfafstetter, na divisão de bacias de nível 1.

Figura 4 – Bacia hidrográfica do rio Uruguai total.



Fonte: Autor, 2021

3.3 Métodos

O desenvolvimento do trabalho foi realizado com a utilização de softwares computacionais de processamento de dados geográficos, programas de edição de planilhas, comparador de dados Hidrometeorológicos e sistema de análise de consistência de dados hidrológicos, o plugin do IPH-Hydro Tools e o modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH versão 4.6.

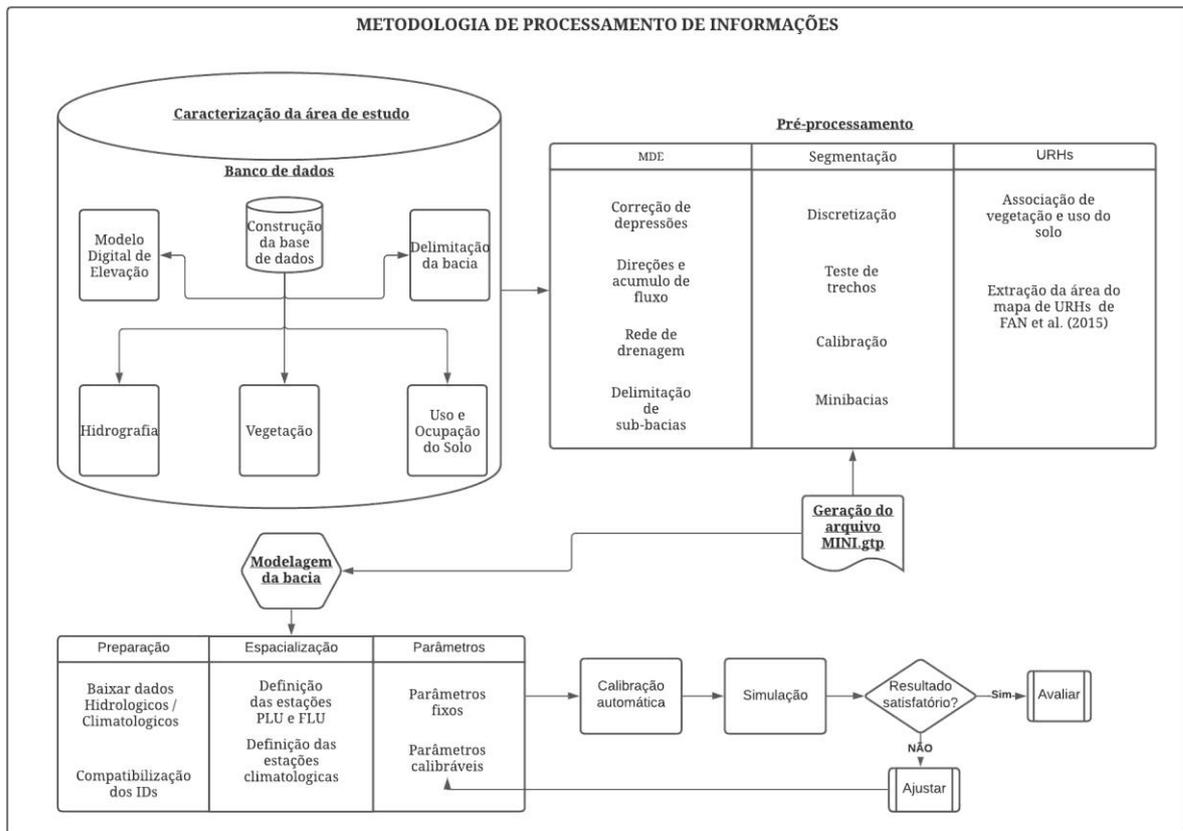
Foi utilizado o ArcGIS PRO 2.8.2 do Environmental Systems Research Institute – ESRI, para a construção dos dados espaciais necessários, e o QGIS 3.4.14 para o processamento das informações aplicadas ao modelo, haja vista que o ArcGIS é o software mais conceituado e utilizado para trabalhos com mapeamento digital e geoprocessamento de dados espaciais, e o ArcGIS PRO é o produto mais moderno da empresa, sendo que o QGIS, por integrar as ferramentas de processamento do modelo MGB, se faz necessário para emprego dos recursos mais recentes disponíveis do sistema.

As planilhas foram editadas no Microsoft Office Excel, do pacote Office Professional Plus 2019 da Microsoft, tabulando dados e organizando as séries de informações para serem inseridas nos modelos, visto que o volume de dados será grande e que o Excel é o mais completo programa computacional para tabulação de dados.

O Plugin IPH-Hydro Tools foi utilizado para o pré-processamento dos dados, e ajustes das informações, e o plugin do MGB-IPH para compatibilização das informações, baixar os dados Hidrometeorológicos da base da ANA e INMET, o processamento das simulações de vazões observadas com as simuladas e a calibração dos parâmetros com o uso do algoritmo de calibração automática.

Os dados Hidrometeorológicos baixados foram comparados pelo Super Manejo de Dados 2.0.5 do IPH, visto que o programa oferece a análise temporal dos dados de Vazão, Chuva, Cota (Nível) e Clima, assim identificando o melhor período com disponibilidade temporal de dados, para escolha do período de série histórica empregado neste trabalho, e dispõe de ferramenta para geração de diagrama comparador de dados, além de outras funcionalidades que não foram utilizadas neste estudo. A figura 5 apresenta os passos metodológicos empregados no trabalho no processo de simulação.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia empregada dentro do software de simulação.



3.3.1 Modelo MGB-IPH

Foi utilizado o modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias), desenvolvido por Collischonn (2001), em sua versão mais atual aperfeiçoada por Pontes et al. (2017). A escolha do modelo se deu principalmente em função de que o modelo já foi amplamente aplicado com sucesso em bacias hidrográficas da América do Sul (e.g., Siqueira et al., 2018), tem seu código disponibilizado livremente na página do grupo de Hidrologia de Grande Escala (“<https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/>”), e em função da experiência do grupo de pesquisa em que o trabalho foi desenvolvido (Addor & Melsen, 2018).

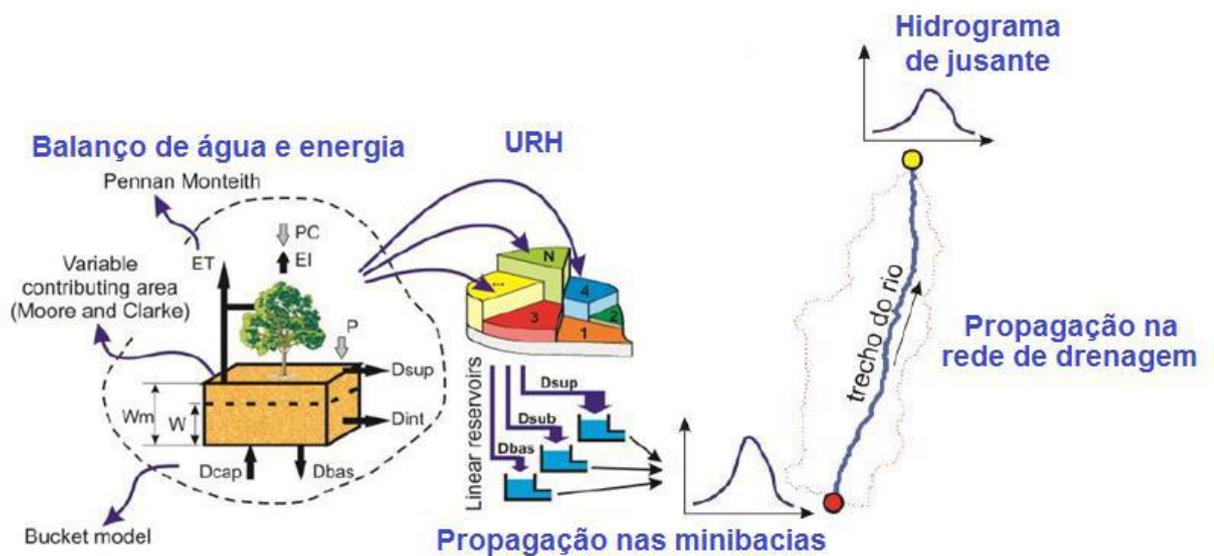
O modelo hidrológico distribuído denominado MGB – Modelo de Grandes Bacias – foi baseado na estrutura dos modelos LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) e VIC-2L com algumas modificações nos módulos de evapotranspiração, percolação e propagação de vazões (COLLISCHONN et al, 2007; COLLISCHONN, 2006), sendo desenvolvido para aplicações em grandes bacias hidrográficas, com áreas superiores a aproximadamente, 10.000

km² (COSTA, 2016). Basicamente, o modelo procura representar o processo de transformação de chuva em escoamento e a propagação de sua vazão ao longo dos rios (ARAÚJO, 2017).

O modelo é do tipo distribuído, e por isso discretiza as áreas de interesse em pequenas unidades, a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE), conhecidas como minibacias, que apresentam características únicas de uso e tipo do solo e tipo de vegetação. As minibacias, geradas pela discretização da bacia, são conectadas entre si por trechos de rios. A propagação de tais volumes na rede está baseada no método Muskingum Cunge até a sua chegada ao exutório (COLLISCHONN, 2001). A interação entre estas características gera a Unidade de Resposta Hidrológica (URH), admitindo-se inclusive, que uma dada URH tem o mesmo comportamento hidrológico independentemente de onde está localizada dentro da área de estudo (FAN et al, 2010; BEVEN, 2001).

O modelo MGB simula as etapas do ciclo hidrológico: balanço de água no solo, evapotranspiração, interceptação, geração de escoamento (superficial, sub-superficial e subterrâneo) e propagação de vazões na rede de drenagem. A bacia hidrográfica é discretizada em unidades menores de simulação (minibacias), as quais são sub-divididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), conforme características de uso e tipo de solo e de vegetação. Para cada URH, são computados os processos hidrológicos verticais, cujo resultado é propagado a jusante a nível de minibacia, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Panorama geral do modelo MGB-IPH.



Fonte: Oliveira, A.M., adaptado de Paiva (2012) e Pontes et al. (2017).

Os processos hidrológicos verticais incluem balanço de água no solo, interceptação, evapotranspiração e geração de escoamento (superficial, sub-superficial e subterrâneo). A evapotranspiração é calculada pelo método de Penman-Monteith. A geração de escoamento considera um processo Dunniano, em que o escoamento é gerado apenas em áreas saturadas, sendo que o escoamento dentro de cada minibacia é propagado pelo método de reservatórios lineares. O balanço hídrico no solo é apresentado na Equação (1).

$$W_t = W_{t-1} + (P - ET - D_{sup} - D_{int} - D_{bas} + D_{cap}) \quad (1)$$

Em que W [mm] é o volume de água armazenado no solo, P [mm] é a precipitação que chega ao solo, ET [mm] representa as perdas por evapotranspiração, D_{sup} [mm] é o escoamento superficial, D_{int} [mm] é o escoamento sub-superficial, D_{bas} [mm] é o escoamento subterrâneo e D_{cap} [mm] representa o fluxo ascendente do aquífero ao solo. A propagação do escoamento na rede de drenagem, no MGB, pode ser realizada através do método Muskingum-Cunge ou do modelo inercial. Enquanto o método Muskingum-Cunge pode ser adequado em alguns casos e apresenta um custo computacional menor, o modelo inercial é mais acurado, especialmente em rios com baixa declividade, planícies de inundação ou efeitos de remanso (Pontes et al., 2017), fornecendo também estimativas de áreas inundadas ou de nível d'água, motivos pelos quais o modelo inercial foi adotado como método de propagação do escoamento no presente estudo. Para a aplicação do MGB, o modelo dispõe de interface gráfica em software livre (QGIS), que facilita a preparação do modelo e a visualização de seus resultados.

3.3.2 Ferramenta IPH HYDRO TOOLS

Desenvolvido em linguagem VB.NET, o pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools foi implementado na forma de um plugin do software MapWindow GIS® (AMES et al., 2008), um SIG de código aberto que contém um grande número de funcionalidades e usualmente suficiente para as necessidades básicas dos usuários. Os plugins consistem em códigos compilados como bibliotecas de vínculo dinâmico - Dynamic Link Library (DLL) - programados em linguagem .NET (Visual Basic ou C#), sendo adicionados ao programa através de um procedimento simples de instalação (AMES, 2006; FAN; COLLISCHONN, 2014). O conjunto de ferramentas disponível neste pacote foi baseado no ArcHydro Tools (MAIDMENT, 2002), originalmente acoplado ao ArcGIS e cujas ferramentas se referem a

etapas básicas para geração de informações como rede de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas. Em relação a aspectos funcionais, o IPH-Hydro Tools possibilita trabalhar com dados armazenados em formato ASCII Grid, amplamente utilizado no contexto de geoprocessamento devido à facilidade de leitura e independência de software, além de dados armazenados em um formato binário do ASCII, intitulado na ferramenta como IPH Raster Grid (IRST). Dentre os principais produtos que podem ser gerados através deste pacote estão: direções de escoamento da água com base no relevo, rede hidrográfica iniciada a partir de uma área mínima de drenagem, delimitação da bacia até um ponto de interesse e a subdivisão desta bacia em pequenas áreas de contribuição (catchments), as quais são caracterizadas pela área situada entre duas confluências ou entre uma confluência e uma cabeceira de drenagem.

A extração das informações topológicas no IPH-Hydro Tools requer o processamento de um MDE através de uma série de etapas, iniciando pela remoção de depressões no terreno. Estas depressões topográficas são representadas pela área de uma ou mais células contíguas com elevação menor do que a das vizinhas, resultando em regiões sem exutório definido (BUARQUE et al., 2009; ZANDBERGEN, 2006), as quais podem ser decorrentes de aspectos naturais do terreno, a exemplo de lagos e bacias endorreicas, como também artificiais, sendo então consideradas espúrias (HESSE, 2008; WANG; LIU, 2006). A maioria das depressões identificadas na matriz de elevações é usualmente espúria, sendo proveniente de erros de interpolação durante a geração do MDE, truncamento dos valores interpolados e resolução limitada da grade (ARNOLD, 2010; JENSON; DOMINGUE, 1988; MARTZ; GARBRECHT, 1999). Dentre as etapas existentes no processamento de modelos digitais de elevação, usualmente a remoção de depressões apresenta-se como aquela de maior complexidade para fins hidrológicos (BUARQUE et al., 2009).

Para a análise de verificação do desempenho do modelo utilizaram-se três métricas distintas as quais estão apresentadas e detalhadas a seguir. O Índice de Eficiência de NashSutcliffe (NSE) apresentado na Equação 2, determina a magnitude relativa da variância residual (“ruído”) comparada à variância dos dados medidos (“informação”). Assim, o índice NSE pode variar entre $-\infty$ a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste das vazões estimadas em relação às observadas. Por outro lado, valores negativos desse índice indicam que a média dos dados observados prediz resultados melhores (FAN et al., 2017; MORIASI et al. 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

Onde:

NSE é o índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe;

$Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no tempo t [m^3/s];

$Q_{calc}(t)$ é a vazão calculada no tempo t [m^3/s];

\bar{Q}_{obs} é a média das vazões observadas [m^3/s];

Σ é o somatório para todos os intervalos de tempo.

Porém, devido à diferença da ordem de grandeza entre vazões mínimas e máximas que ocorre naturalmente, pode haver supressão dos erros associados às vazões de estiagem pelo índice de eficiência de Nash-Sutcliffe. Por conseguinte, uma métrica que é menos sensível aos valores extremos devido à diferença dos quadrados é o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado (NSELOG), o qual é indicado para avaliar o desempenho do modelo ao que se refere às vazões mínimas, podendo ser calculado a partir da aplicação do logaritmo nas vazões do Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exemplificado na Equação 3 abaixo (MORIASI et al. 2007; SIQUEIRA, 2015).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

A última métrica utilizada visa avaliar as perdas de água por evapotranspiração que, segundo Collischonn (2001), pode ser feita através da diferença entre os volumes observados e calculados, conforme apresentado na Equação 4. Assim, valores negativos representam que o modelo está subestimando a vazão observada, enquanto que para valores positivos o modelo está superestimando a vazão observada.

$$\Delta V = \frac{\sum Q_{calc} - \sum Q_{obs}}{\sum Q_{obs}} \quad (4)$$

Em que, ΔV é o erro em [%].

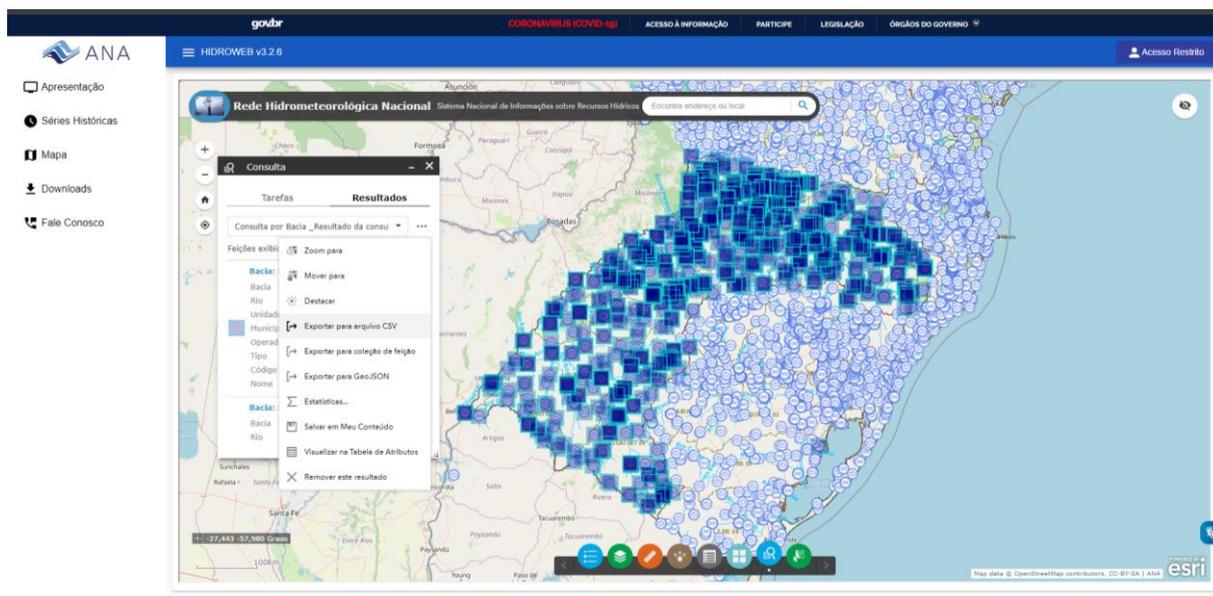
Posteriormente à calibração, realizou-se o processo de validação do modelo, que consoante Refsgaard (1997) é definido como o processo de demonstração que, para uma

determinada bacia hidrográfica, o modelo é capaz de fornecer previsões suficientemente precisas. Isso implica na aplicação do modelo utilizando os mesmos parâmetros ajustados durante o processo de calibração para um período diferente do utilizado na calibração do modelo. Desta forma, o modelo hidrológico é dito válido se a acurácia e a capacidade de previsão no período de validação estejam dentro de limites aceitáveis.

3.3.3 Obtenção dos dados Hidrológicos

A base de dados hidrológicos da bacia está disponível no portal do HIDROWEB, de forma que foi possível consultar apenas as estações pluviométricas e fluviométricas da bacia do rio Uruguai, fazendo download dos dados gerais de cada estação, como apresentado na figura 7.

Figura 7– Obtenção das informações sobre a base de dados Hidrológicos da bacia do Uruguai



Com as informações gerais das estações hidrológicas, foram baixadas as informações das séries históricas das estações, a fim de se verificar qual o melhor período para ser analisado no modelo, fazendo assim, uso da ferramenta de aquisição de dados da ANA presente no MGB, assim como demonstrado na figura 8.

Figura 8– Obtenção da base de dados Hidrológicos da bacia do Uruguai

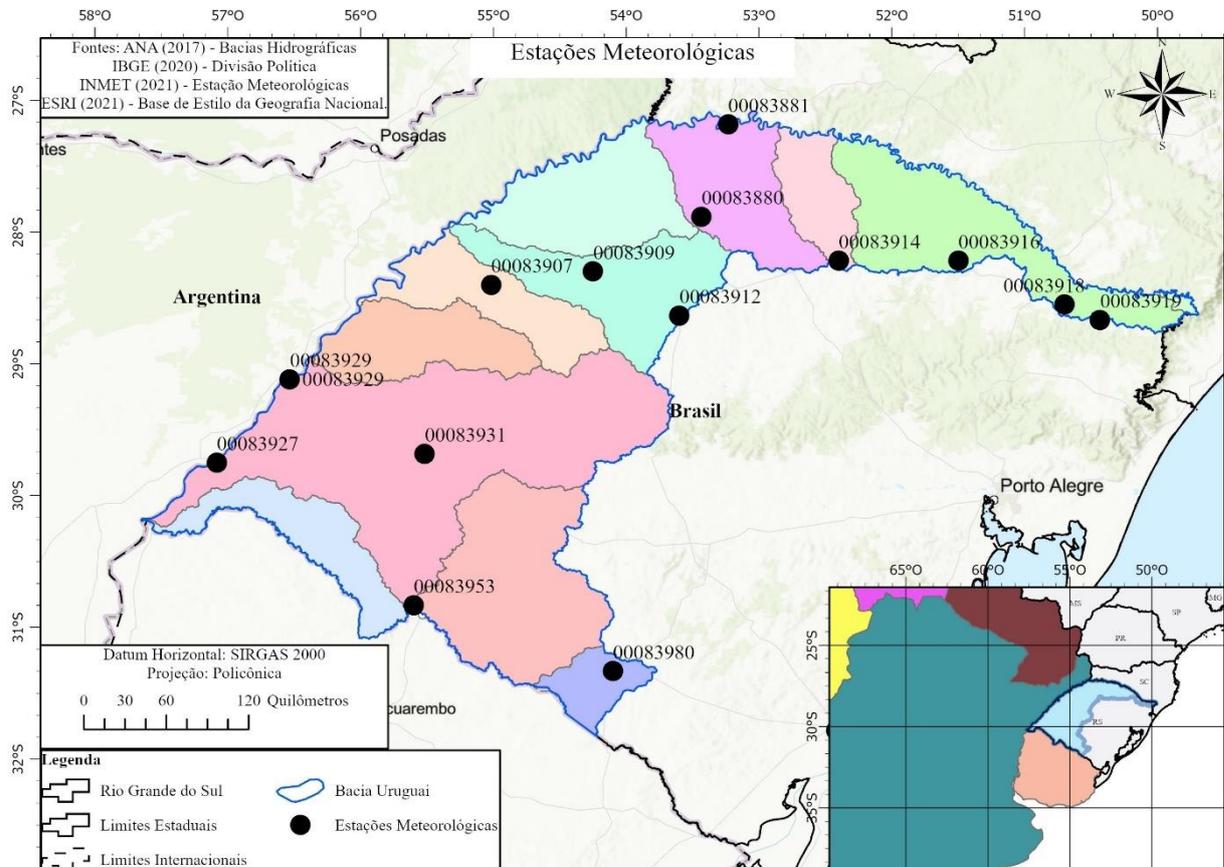
The screenshot shows the 'ANA data acquisition' software interface. The 'Information' section has 'Discharge' selected. The 'Interval' section shows a start date of 01/01/1900 and a final date of 01/09/2021. The 'Input files' section has 'Gauges' selected with the file path 'D:\LIXO\Estações_Vazão.txt'. Below this, there are input fields for 'Left' (-50.293), 'Top' (-14.493), 'Right' (-48.641), and 'Bottom' (-16.27). A table lists gauge data with columns for Name, Lat, and Lon. The 'Output files' section has a 'Destination folder' of 'D:\MGB\Vazão'. A 'Download Data' button is visible at the bottom right.

Name	Lat	Lon
72430000	-27.8791675567...	-51.7547225952
72630000	-27.7058334350...	-51.8849983215
74270000	-27.2802772521...	-53.3186111450
74370000	-27.3327770233...	-53.6394462585
74610000	-27.5219440460...	-54.2322235107

Após a conclusão do download das informações, foi realizada consulta pelo Super Manejador de Dados, para criação de um diagrama que comparasse a disponibilidade de dados das séries históricas de todas as estações, selecionando assim, as estações com melhor disponibilidade por um critério de média de disponibilidade do período maior que 99,8% dos dados, e o período a ser utilizado no estudo ficou estabelecido entre 2010 à 2020.

Com as estações meteorológicas, fez-se uso da ferramenta do MGB de aquisição dos dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, filtrando as estações, ficando com 15 estações dentro da delimitação da bacia no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 9– Estações localizadas dentro da bacia do rio Uruguai no estado do RS

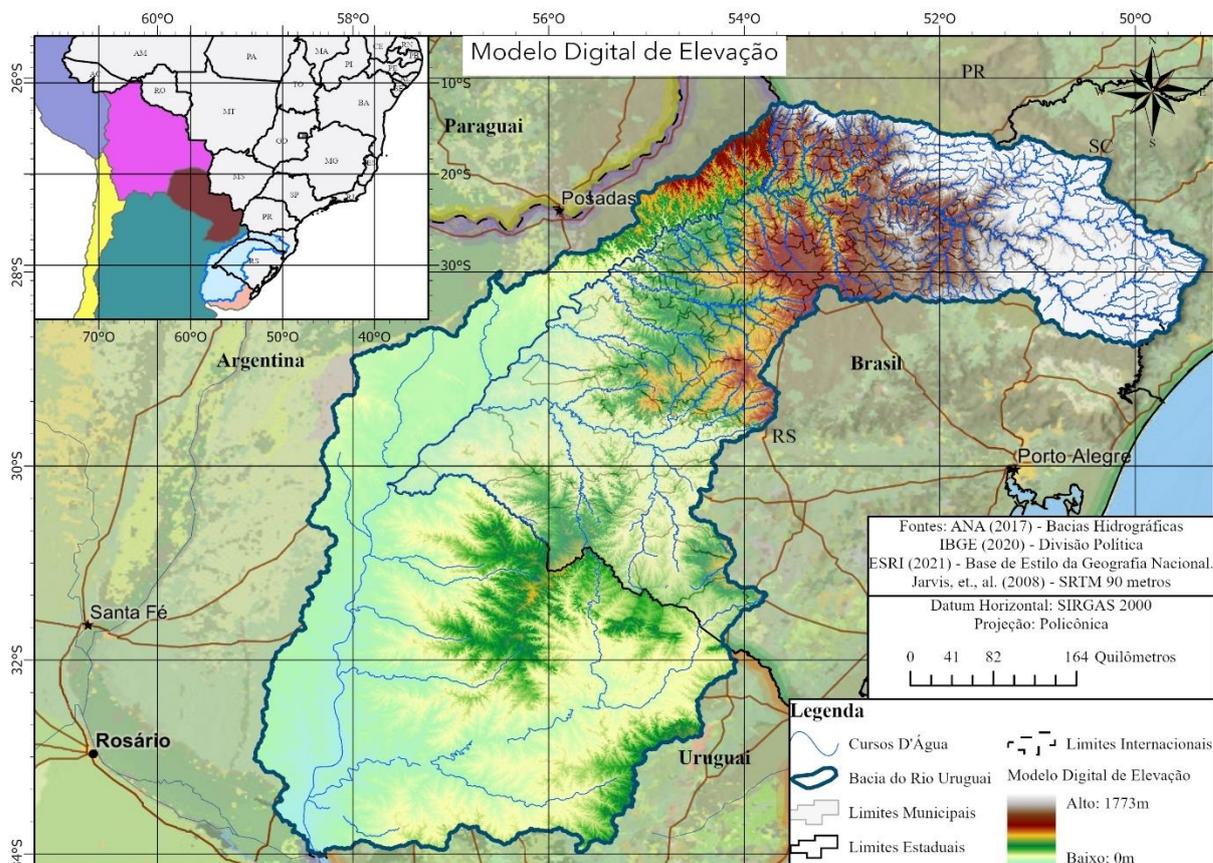


3.4 Caracterização e obtenção dos dados

3.4.1 Modelo digital de elevação

Utilizou-se o modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução espacial de 90 metros disponibilizado pela plataforma Google Earth Engine (GOOGLE, 2019), sendo essencial para o pré-processamento da área, sendo utilizado na delimitação da bacia, das sub-bacias, minibacias, rede de drenagem, discretização e linhas de fluxo de escoamento.

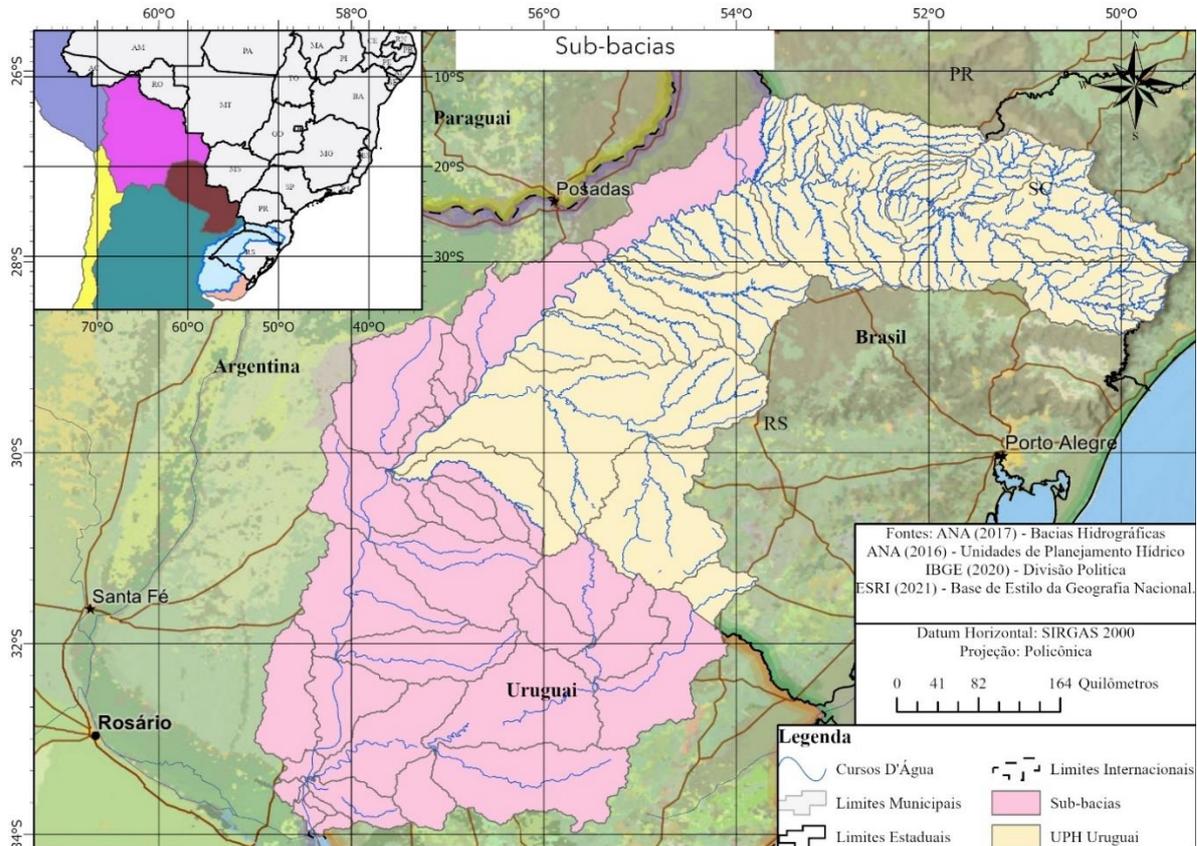
Figura 10– Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Uruguai



3.4.2 Delimitação da bacia

Foram utilizados os limites de bacia propostos por Otto para bacias de nível 1, apresentado na figura 11, e o de nível 4 mesclado com a divisão das Unidades de Planejamento Hídrico – UPH propostas pelo CNRH para todas as bacias brasileiras.

Figura 11– Mapa da delimitação das sub-bacias da bacia hidrográfica do Uruguai



3.5 Pré-processamento

3.5.1 MDE

3.5.1.1 Correções de depressões

A fim de se corrigir eventuais falhas do modelo digital de elevação, para a delimitação da bacia e da rede de drenagem, foi realizado o processo de remoção de depressões pelo uso da ferramenta Sink and Destroy, que ajusta as altitudes das células e/ou seus conjuntos de células vizinhas para que não ocorram falhas nas direções de fluxo, e acúmulos em linhas de escoamento da rede de drenagem. Com o IPH-Hydro Tools é possível fazer a correção por dois métodos, o MHS (Modify Heuristic Search) e o PFS (Priority-First-Search), optou-se por utilizar o MSH neste estudo. Cada um destes métodos trabalha de forma diferente, geralmente trazendo bons resultados (SIQUEIRA et al., 2016).

3.5.1.2 *Direções e acúmulo de fluxo*

Com a remoção das depressões no MDE, foi feita uma etapa de verificação, para corrigir eventuais falhas de processamento, após, com o uso do Process Flow Direction, foram processadas no arquivo as direções de fluxo, atribuindo em cada célula do raster um valor que representa o caminho em que a água percorre na rede de drenagem.

Da geração das direções de fluxo, foi realizado o processo de Flow Accumulation, criando um arquivo raster onde cada célula atribuí um valor com o número de células que drenam a água até aquela, para gerar a rede de drenagem com base na resolução espacial do arquivo.

3.5.2 Segmentação

Para criar a rede de drenagem da bacia, foi necessário escolher o tamanho da drenagem a rede a ser considerada. Isto foi feito a partir dos parâmetros, com número mínimo de células que drenam para o ponto onde a rede começa a ser traçada, mas poderia ser realizado pela percentagem de células que drenam para o ponto onde a rede começa a ser traçada, ou ainda uma área mínima de contribuição para o limiar do traçado. Assim, utilizando o arquivo com a acumulação de fluxo para definir um valor aproximado de área.

A escolha deste valor depende da experiência ou conhecimento prévio do operador acerca da região. Um limiar muito baixo acarretaria em uma drenagem muito ramificada que pode não ser interessante para o usuário, enquanto um valor alto pode excluir rios de interesse.

Portanto, foi utilizado um limiar de 20 km², que resultou em uma segmentação satisfatória, havendo densidade de rede suficiente para drenagem em todos os postos fluviométricos, assim, podendo considerar maior quantidade de estações no modelo.

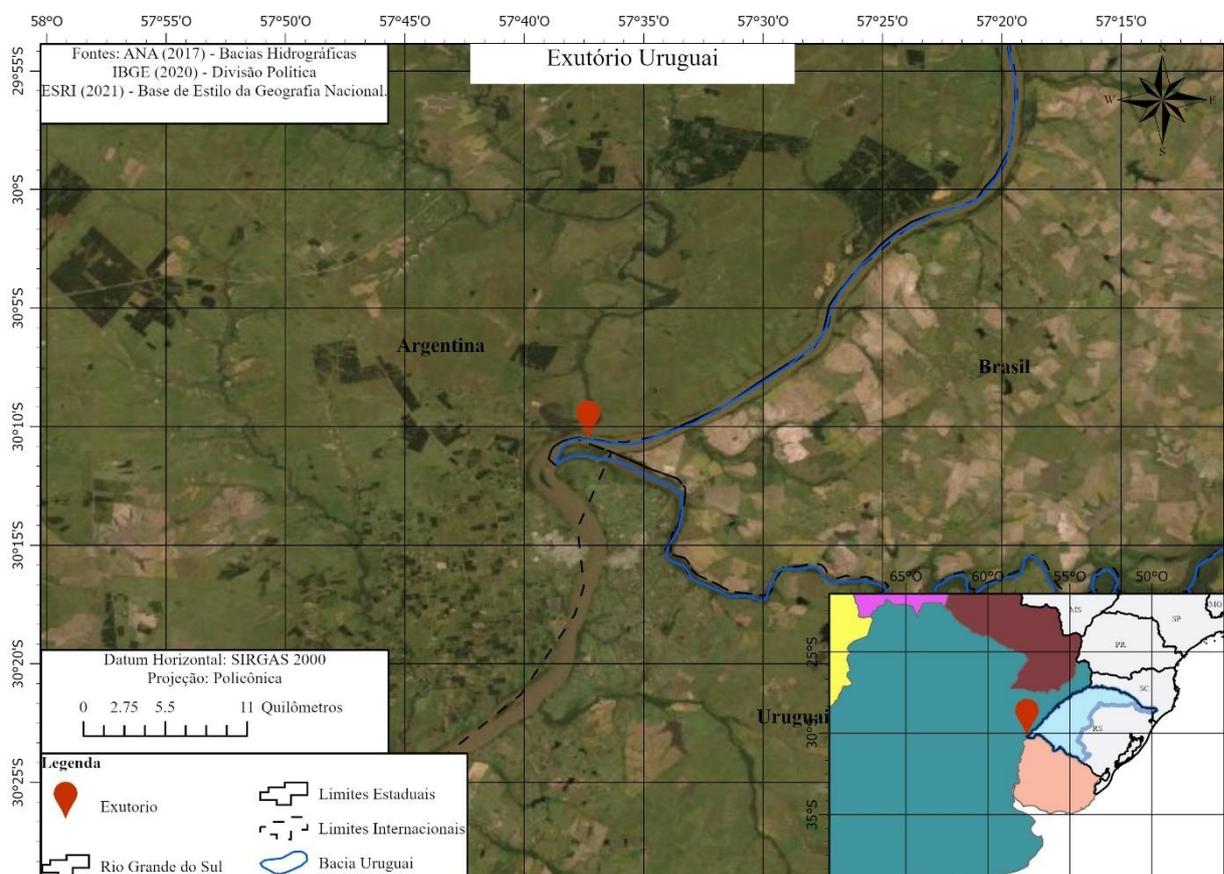
3.5.2.1 *Rede de drenagem*

Com a remoção das depressões no MDE, é feita uma etapa de verificação, que corrige eventuais falhas de processamento, e com o MDE corrigido, com o uso do Process Flow Direction, são processadas no arquivo as direções de fluxo, atribuindo em cada célula do raster um valor que representa o caminho em que a água percorre na rede de drenagem.

3.5.3 Bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser definida como "uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída" (Tucci, 1997). Para sua delimitação, foi necessário definir o exutório da bacia antes de delimitá-la, que, no caso do estudo, foi o ponto final da bacia na sua área dentro do território brasileiro, conforme a figura 12 apresenta.

Figura 12– Mapa do ponto de exutório para delimitação da bacia do Uruguai

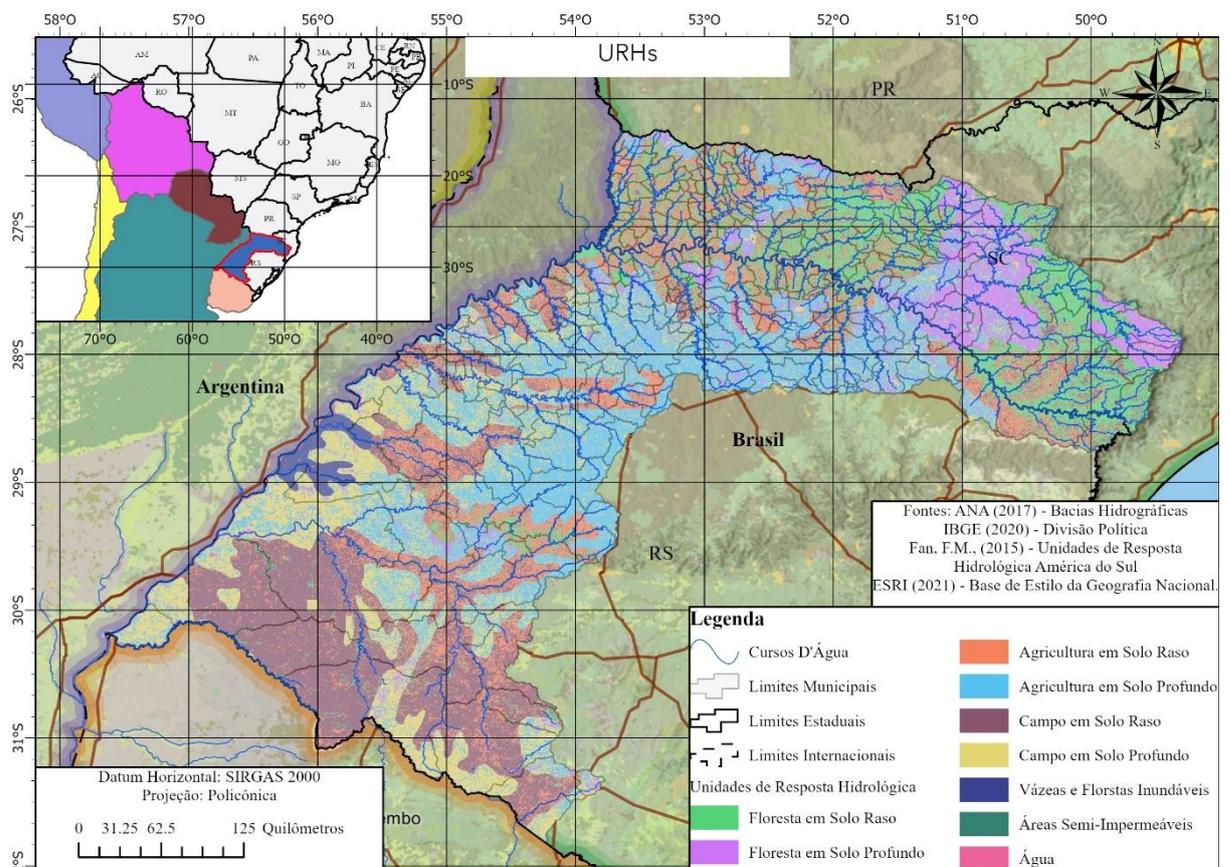


3.5.4 Classes de respostas hidrológicas

Cada mini bacia é dividida em unidades de resposta hidrológica (URHs), as quais representam as regiões que devem possuir os mesmos comportamentos hidrológicos, para que assim o modelo interprete a forma como o ciclo hidrológico em cada uma ocorre. O estudo utilizou o mapa das URHs elaborado por FAN et al. (2015) para a América do Sul, sendo

recortada a área de interesse da bacia para dar seguimento no estudo. O mapa, que tem resolução espacial de 400 metros, possui 9 classes distintas que são: Floresta em solo raso; Floresta em solo profundo; Agricultura em solo raso; Agricultura em solo profundo; Campo em solo raso; Campo em solo profundo; Várzeas inundáveis; Áreas semi-impermeáveis; e Água, conforme pode ser observado na legenda da figura 13.

Figura 13– Mapa das Unidades de Resposta Hidrológica da bacia hidrográfica do Uruguai



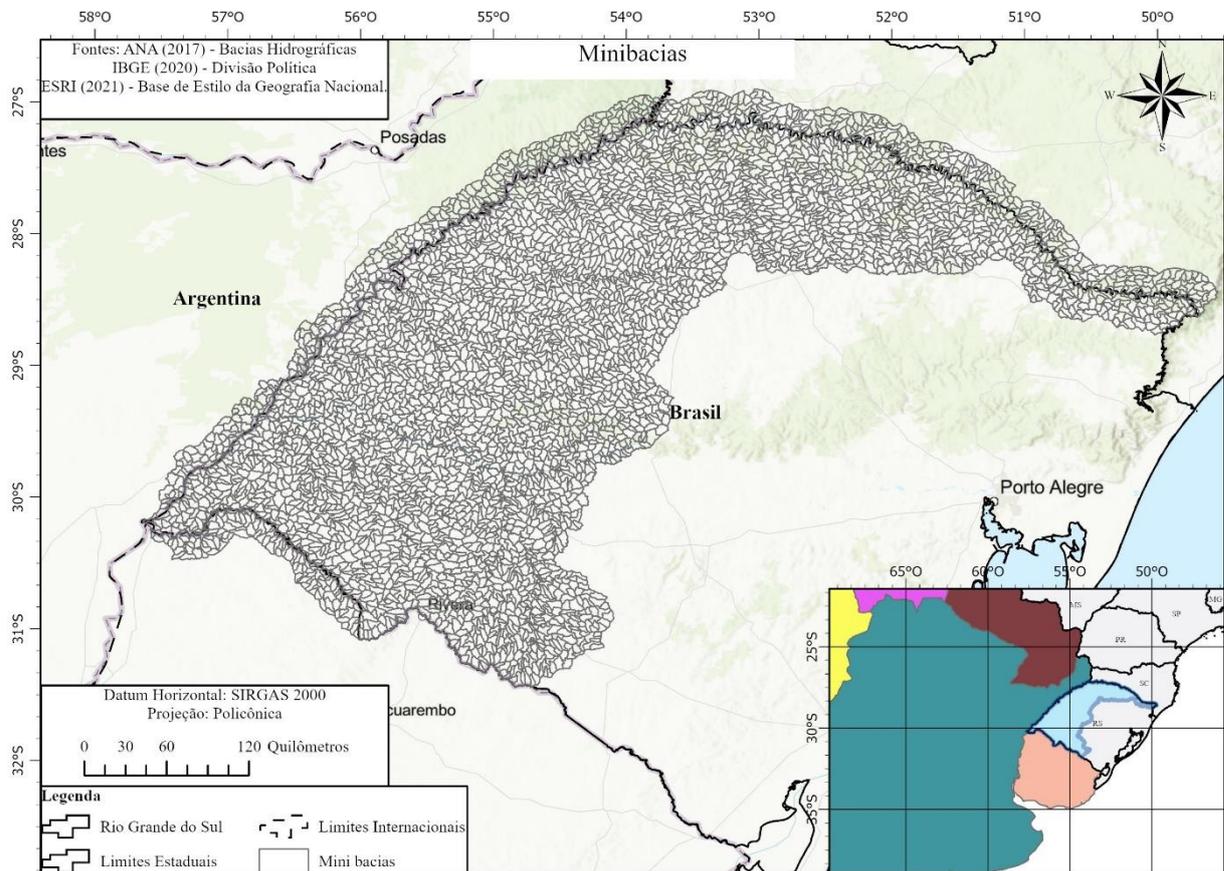
3.5.5 Mini bacias

No modelo MGB-IPH tem a possibilidade de discretizar a bacia em minibacias por dois métodos: segmentar a rede de drenagem por confluência ou por trechos de comprimento fixos. Para este estudo, utilizou-se da metodologia de Siqueira et al. (2016), a qual dividi a rede de drenagem em trechos de comprimento fixo. Para tal, foi utilizada a ferramenta Fixed Length Segmentation sendo informado como dado de entrada o tamanho do trecho e os arquivos

gerados nas etapas anteriores, das direções de fluxo, acumulação de fluxo e rede de drenagem. Assim, foram considerados oito comprimentos diferentes na discretização da bacia, sendo eles: 7 km, 10 km, 20 km, 35 km, 40 km, 50 km, 70 km e 100 km. O número de minibacias geradas varia de forma inversa com o tamanho do trecho escolhido, ou seja, quanto menor o tamanho maior número de minibacias, conforme exemplifica a Figura 17.

Após a definição das URHs, foi gerado o mapa das minibacias, e associou-se as informações das classes hidrológicas às minibacias. A figura 14 exemplifica o resultado das minibacias dentro da delimitação do Uruguai, e com o limiar de área em 20 quilômetros quadrados.

Figura 14– Mapa das minibacias da bacia hidrográfica do Uruguai



3.5.6 Sub-bacias

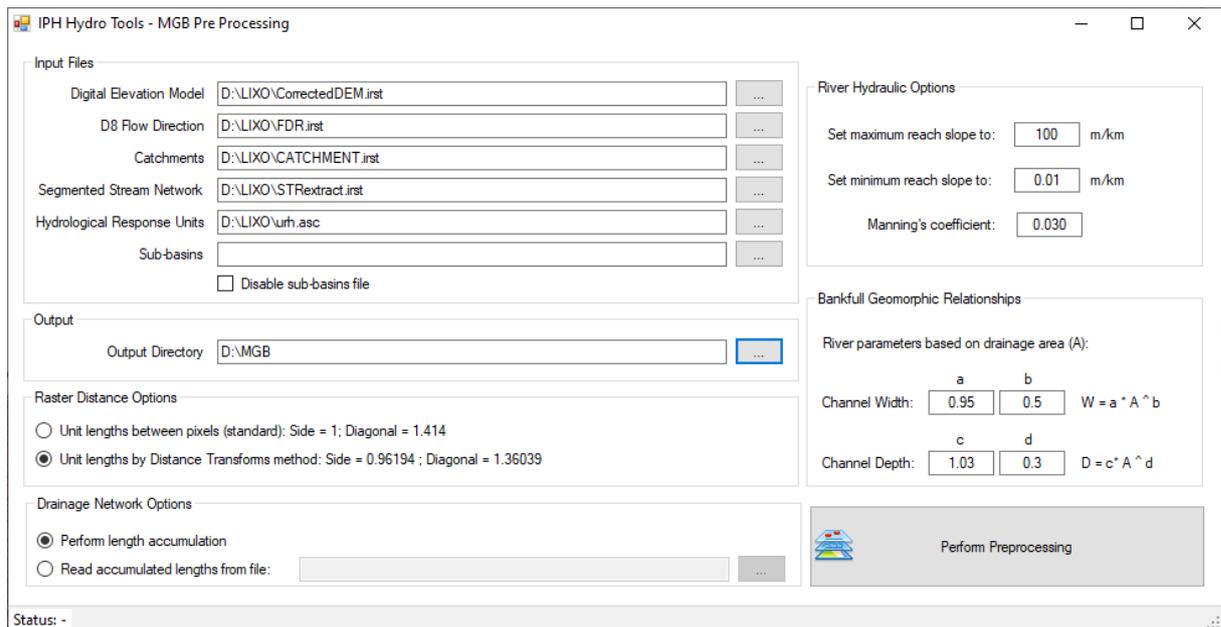
Para fim de teste, inicialmente foi utilizada a mesma delimitação de sub-bacias das unidades de proteção hídrica do estado, conforme apresentada anteriormente na figura 5, no

entanto, após verificação dos resultados, e das características de cada sub-bacia, dividiu-se a bacia pelos exutorios de encontro da rede em 65 sub-bacias, considerando seus pontos de escoamento e as predominâncias de URHs em cada uma.

3.5.7 Projeto

Com as etapas anteriores concluídas, foi feito o pré-processamento das informações, seguindo os parâmetros de ajustes de forma padrão, sem alterá-los, e selecionando todos os arquivos necessários, utilizando a função *Process All Delineation Steps* para gerar todos os arquivos necessários no formato do plugin do IPH Hydro Tools, tendo respostas mais rápidas e com conteúdo mais leve, e processando as informações com maior acurácia, conforme apresentado na figura 15.

Figura 15– Ajustes do Pré-processamento do modelo



Após a conclusão do pré-processamento, foi aberto o arquivo na extensão “. mgtp” denominado de MINI, para visualização das informações e verificação se o processo ocorreu de maneira correta, como a figura 16 apresenta.

Figura 16– Dados do arquivo gerado no Pré-processamento do modelo

CatID	Mini	Xcen	Ycen	Sub	Area_(km2)	AreaM_(km2)	Ltr_(km)	Str_(m/km)	
168	1	-49.58892	-28.46832	1	51.86126	51.86126	10.12113		
232	2	-54.21603	-31.04014	1	19.81786	19.81786	8.65524	10.0517	
284	3	-53.25701	-28.15253	1	41.25394	41.25394	9.72126	9.77239	
322	4	-55.7231	-30.86918	1	55.1489	55.1489	10.12692	6.31979	16.9589
352	5	-55.64784	-30.81948	1	45.05681	45.05681	9.976	7.71852	
373	6	-55.06612	-31.27831	1	27.40195	27.40195	10.20055		
432	7	-54.24094	-28.89285	1	39.56465	39.56465	9.36445	16.5519	
469	8	-52.55146	-28.17798	1	43.97157	43.97157	10.15944		
496	9	-53.98723	-28.99145	1	19.20958	19.20958	9.46992	7.18063	
546	10	-52.32432	-28.25167	1	36.25862	36.25862	10.15011		
564	11	-52.16018	-28.25914	1	64.01752	64.01752	10.14481		
582	12	-54.90629	-29.19619	1	32.17373	32.17373	7.81957	17.7759	
616	13	-51.33726	-28.20232	1	34.21688	34.21688	10.18291		
634	14	-53.80215	-28.02875	1	35.53457	35.53457	10.16247		
667	15	-53.93461	-28.98926	1	28.55864	28.55864	8.29156	15.4373	
688	16	-53.34051	-28.01511	1	29.39902	29.39902	8.22122	8.27127	
699	17	-54.52904	-30.40167	1	27.25687	27.25687	10.15667		
721	18	-53.51028	-28.017	1	42.27176	42.27176	10.12381	3.4572	
731	19	-55.51999	-30.87497	1	55.0568	55.0568	10.13229	2.07258	16.5006
745	20	-53.73473	-29.48811	1	61.1191	61.1191	10.15632	10.92916	
758	21	-55.34681	-30.44493	1	19.03279	19.03279	6.81462	23.3321	
776	22	-54.17269	-28.12139	1	40.69574	40.69574	10.15892		
794	23	-54.05475	-28.07209	1	45.20087	45.20087	10.08288		
812	24	-56.05588	-30.27202	1	50.51294	50.51294	10.19857		

3.6 Modelagem da bacia

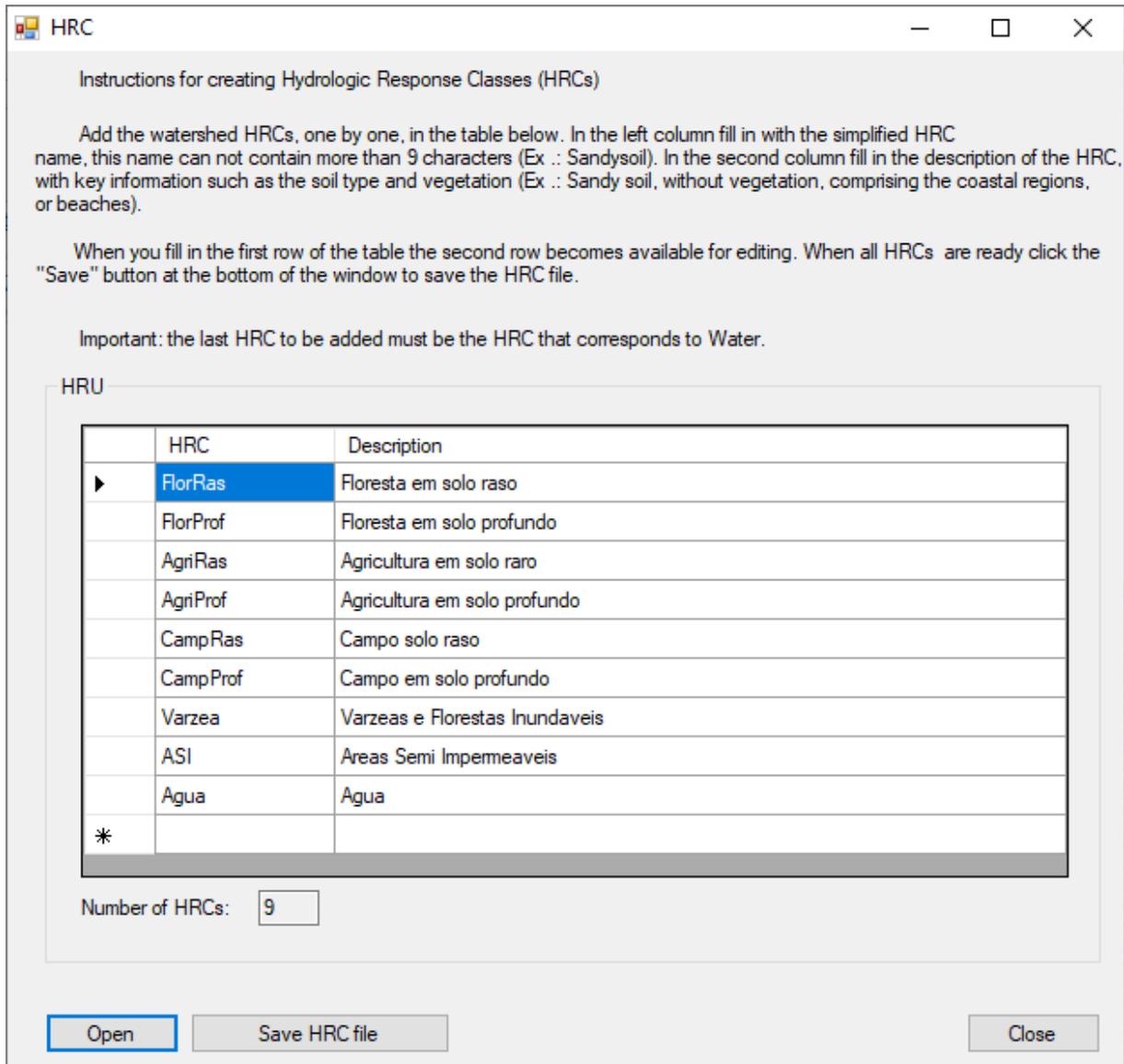
3.6.1 Preparação

Para iniciar no modelo, primeiramente, foi necessário realizar a compatibilização dos identificadores de cada mini bacia processada na etapa de pré-processamento com os valores do arquivo de mini bacias, alinhando assim, os itens com seus respectivos números de identificação.

Nesta etapa, verificaram-se os IDs dos arquivos das minibacias com os do pré-processamento para identificar as diferenças, e depois da compatibilização, foi feita nova consulta para confirmar se ocorreu de forma correta.

Após os ajustes dos IDs, foram reescritas as descrições das URHs no modelo para que fossem simplificadas na tabela de atributos para que não houvessem mais de 9 caracteres em cada linhas, seguindo a descrição utilizada por Fan, F.M., et. al. 2015 para as URHs que ele disponibiliza para a América do Sul, que é utilizado neste trabalho.

Figura 17– Descrição das URHs no modelo



3.6.2 Obtenção dos dados Hidrometeorológicos

Os dados de chuva, vazão e clima, foram todos baixados pela aplicação do modelo, sendo os fluviométricos e pluviométrico da base da ANA, e os de clima do INEMET, e sendo escolhidos os postos fluviométricos do SACE para efeito de comparação, conferindo a disponibilidade temporal das estações, onde foi possível observar que o período com menor quantidade de falhas nos dados, é o período de 2010 à 2020, escolhendo assim esse período de dados pela sua maior disponibilidade temporal, conforme é visto no quadro 2.

Quadro 2 – Disponibilidade temporal dos dados

Estação	Anos											Médias	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		
71498000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
73900000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74900000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
75200000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
75230000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
75450000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
76100000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
76650000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
76800000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
72849000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74270000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74800000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
72715000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
72430000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74370000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
72630000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74424500	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74610000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
70500000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
74320000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00%
73600000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99.91%
73770000	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	99.91%
74470000	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	99.91%
76500000	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	99.91%
72810000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	99.91%
72680000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99.91%
73300000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	98	99.82%
73960000	100	100	100	100	100	98	100	99	100	100	100	100	99.73%
76560000	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	99.73%
75700000	100	100	97	100	100	99	100	100	100	100	100	100	99.64%
76750000	100	100	100	100	100	97	99	99	100	99	100	100	99.45%
70300000	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	99.45%
75155000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	93	99.36%
76440000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	93	99.36%
74205000	100	100	100	100	100	100	100	93	100	100	100	100	99.36%
74700000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91	91	99.18%
73820000	100	100	100	100	100	98	100	100	100	92	100	100	99.09%
71200000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89	89	99.00%
76460000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	88	88	98.91%
73350000	100	100	97	95	95	100	100	100	100	100	100	100	98.82%

70100000	100	100	100	100	100	89	98	100	99	100	100	98.73%
77500000	100	95	100	100	100	99	100	100	100	100	92	98.73%
74100000	100	100	100	100	100	85	100	100	100	100	100	98.64%
74460000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	84	98.55%
75295000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83	100	98.45%
76085000	100	100	92	100	100	99	100	100	100	100	92	98.45%
75600000	100	98	96	96	100	100	100	100	100	92	100	98.36%
76310000	100	100	100	100	100	100	100	98	91	92	100	98.27%
70200000	100	100	100	100	100	100	99	99	100	99	84	98.27%
77150000	100	99	100	99	100	100	91	100	100	100	92	98.27%
71250000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	76	97.82%
75500000	100	100	100	100	100	100	72	100	100	100	100	97.45%
74880000	100	100	100	100	100	99	94	97	100	81	100	97.36%
76251000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	71	97.36%
71350001	100	100	100	100	100	97	93	94	100	100	84	97.09%
76300000	100	100	100	100	100	100	92	97	100	98	72	96.27%
73765000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83	75	96.18%
71300000	100	100	100	100	100	99	99	97	100	92	65	95.64%
79400000	100	93	94	96	98	98	92	100	97	88	94	95.45%

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Definição dos principais modelos

Para melhor entendimento dos modelos e suas possibilidades foram estudados diversos modelos hidrológicos, onde observou-se que o modelo MGB-IPH, é o que melhor atende as características do local de estudo. Um dos critérios que se destacam, é a área com que os modelos conseguem trabalhar tendo resultados satisfatórios, foram levados em consideração a capacidade dos modelos de trabalharem com bacias de grandes proporções, se o sistema de roteamento das linhas de fluxo é simplificado ou complexo, a quantidade de dados necessários e a gratuidade do código. O quadro 3 apresenta os principais modelos já utilizados em simulações de grandes bacias e a adequação ou não as condições propostas.

Quadro 3– Modelos pesquisados para serem aplicados

Modelo	Capacidade de trabalhar com grandes bacias	Disponibilidade de código	Empregabilidade	Dados necessários	Possibilidade de calibração	Facilidade de se inserir postos de observação	Referência
CLM	De 5 a 10 km ² , mas aceita maiores	Código aberto	Grupo ativo com mais de 100 usuários	CDF < 6H, ~2/0.1° S, R, SR, LW, SP, Q, T, W, aerossol, CO2	Em teoria, mas complexo. Ferramentas não disponíveis	Disponível	Lawrence, D., 2014
E-HYPE	215 km ²	Código aberto	UFZ(Alemanha) e IRSTEA (França).	Arquivos de texto	Calibração para 104 estações. Diversas ferramentas incluídas.	Suporta mais de 8500 estações	Arheimer, B., 2014
G2G	De 50 m a 25 km	Apenas executáveis	CPI (Inglaterra, Gales e Escócia)	ASCII, P, T, PET	Variedade de ferramentas disponível, tanto para manual quanto automática	Vazão observada é usado para assimilação, comparação e calibração de dados	Moore, R. J., 2014
H08	Flexível	Código aberto	NIE, TMP, PU, ISI-MIP, EU-WATCH	Plano binário, R, S, T, Q, W, SP, SW, LW	Ferramentas não disponíveis	Ferramentas não fornecidas	Hanasaki, N., 2014
JULES	Depende dos dados de entrada	Código aberto	ECMWF	ASCII, R, S, T, Q, LW, SW, SP	Não possui	Ferramentas não fornecidas	Blythe, E., 2014
LISFLOOD	Depende dos dados de entrada	Apenas executáveis	JRC	PCRaster grid, P, PET, T	Existem ferramentas dedicadas	Assimila estações reais para larga escala no modelo	De Roo, Wesseling e Deursen, 2000

MGB-IPH	3.000 ~ 1.000.000 km ²	Código aberto	IPH, UFRGS, ABRH, CPRM	Dados SIG de caracterização da bacia, P, R, T	Variedade de ferramentas disponível, tanto para manual quanto automática	Comparação de vazão observada com simulada	Collischonn, 2001
mHM	Flexível	Código aberto	Desenvolvedores e usuários na UFZ e organizações parceiras	ASCII, P, T, PET	Flexível, pode ser alterado sem recalibrar	Cada bacia pode ter quantas precisar	Samaniego, L., 2014
SWAT	1 ha ~ 3.000 km ²	Código aberto	Diversos grupos internacionais, com fóruns online	Informações vetoriais e de grid no ArcGIS, OM Tmin, Tmas	Automático, na interface SIG	Depende da definição e das sub-bacias	White, M., 2014
SWIM	1.000 ~ 500.000 km ²	Fornecido se solicitado	Instituto Potsdam	ASCII, sub-bacias até 500.000 km ² , P, T, SR, Q	Ferramentas disponíveis	Depende da definição de hidrótopo e sub-bacias.	Krysanova e Wechsung, 2000

Fonte: Adaptado e alterado de Kauffeldt, A. et, al. 2016 e Pontes, Paulo R. M., 2011.

P – Precipitação

R – Chuva

S – Nevasca

PET – Potencial de evapotranspiração

T – Temperatura do ar

Tmin – Temperatura mínima do ar

Tmáx – Temperatura máxima do ar

SP – Pressão na superfície

SW – Irradiação curta

LW – Irradiação longa

SR – Radiação solar

W – Velocidade do vento

Q – Humidade

O modelo MGB-IPH foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, ele vem sendo continuamente melhorado, e conforme PONTES et al. (2017), o modelo devido a nova versão possibilitar o acoplamento a uma fonte aberta de GIS, melhorar as ferramentas de processamento de entrada e saída, incluindo uso de conjuntos de dados de sensoriamento remoto, realizar a discretização espacial em captações irregulares baseadas no comprimento dos rios e novas instalações hidráulicas abordagens de modelagem que permitem a simulação de grandes e complexas bacias com várzeas, ramificação de rios e baixa disponibilidade relativa de dados PONTES et al (2017).

Também se destacam os modelos SWIM e SWAT, que conseguem trabalhar em bacias de larga escala, e tem capacidade para atender uma bacia como a do rio Uruguai, mas possuem menos informações de fácil acesso, e no caso do SWIM, a aplicação é menos aplicada.

O SWIM foi desenvolvido especificamente para investigar os impactos das mudanças no clima e no uso da terra em escala regional, onde os impactos se manifestam e as medidas de adaptação ocorrem. O modelo simula processos interligados, como geração de escoamento, crescimento de plantas e culturas, ciclo de nutrientes e carbono e erosão. Ele fornece vários modelos de saída, como vazão do rio, produção de safras e concentrações e cargas de nutrientes. A abordagem permite a simulação de todos os processos inter-relacionados dentro de uma estrutura de modelo único em uma etapa de tempo diária usando dados disponíveis regionalmente (clima, uso da terra e solo) e considerando feedbacks. A configuração do modelo e o pós-processamento são suportados por uma interface GIS (baseada no GRASS). O modelo usa o esquema de desagregação de 3 níveis: bacia - sub-bacias - hidrótopos. Os resultados são apresentados como séries temporais e mapas para uma série de variáveis. SWIM é um modelo de complexidade intermediária para a bacia hidrográfica e escala regional, pois é a) mais abrangente do que os modelos puramente hidrológicos e precipitação-escoamento devido a uma representação mais confiável dos processos hidrológicos, vegetais e nutrientes interligados; b) orientado por dados regionais comumente disponíveis e pode ser parametrizado mais facilmente do que modelos hidrológicos mais complexos.

O Modelo Integrado Solo e Água (SWIM) é um modelo ecohidrológico semi-distribuído em tempo contínuo, integrando processos hidrológicos, vegetação, nutrientes e erosão. Foi desenvolvido para avaliação de impacto na escala da bacia hidrográfica. SWIM é acoplado ao GIS e tem requisitos de dados modestos. Durante a última década, o SWIM foi extensivamente testado em mesoescala e grandes bacias para processos hidrológicos (descarga, água

subterrânea), nutrientes, eventos extremos (inundações e vazões baixas), produção agrícola e erosão (Krysanova, V., et al., 2014).

Conforme estudos posteriores de KAUFFELDT et al. (2016), e HUANG et al. (2016), um dos modelos mais indicados para a bacia do rio Uruguai pode ser SWAT, haja vista que a escolha do modelo para a bacia ainda é subjetiva, mas, considerando que é um modelo que conforme a tabela 1, atende a escalas continentais e é amplamente empregado para soluções em conjunto com o software ArcGIS, o SWAT é tipicamente utilizado para sub-bacias, a abordagem da sub-bacia tem a vantagem de usar limites naturais e com isso uma representação mais correta das características reais da bacia hidrográfica.

4.1.1 Obtenção de dados para o modelo

4.1.2 Parâmetros

4.1.2.1 Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos são aqueles cujos valores podem ser medidos, ou que podem ser relacionados a vegetação, e não são alterados no processo de calibração do modelo (PIAZI, 2020). São eles:

Albedo: parcela de radiação solar refletida pelo solo, que depende do tipo de vegetação e período do ano. A variabilidade do albedo no modelo é dada pelo uso de valores médios mensais, apresentados na figura 18.

Índice de área foliar (IAF): determinado pela relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela do solo (m^2/m^2) (ARAÚJO, 2017). É relevante na análise de mudança de uso do solo porque no modelo a interceptação depende diretamente deste parâmetro. De acordo com Collischonn (2001), os valores variam de: 2 a 3 para campos e pastagens, 6 a 9 para florestas, 0 (durante o preparo do solo) a 6 (no desenvolvimento máximo) em cultivos anuais, e no caso da água o índice não se aplica recomendando-se adotar o valor de 0.

Altura média das árvores (m): altura do dossel mês a mês, durante todo o ano (ARAÚJO, 2017), sendo importante no cálculo da resistência aerodinâmica à evapotranspiração, inversamente proporcional a este parâmetro. Os valores variam de acordo

com o uso do solo, sendo 0,5 para áreas de agricultura, 0,5 para campos e pastagens, 5 para cerrados e 10 a 30 para áreas de floresta (COLLISCHONN, 2001).

Resistência superficial (s/m): resistência estomática das folhas. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta. Por exemplo, em condições favoráveis, ou seja, com abundância de água, os valores de resistência superficial são mínimos (SILVA, 2014). A resistência superficial a água é igual a 0, a áreas agricultáveis varia entre 40 e 154, em áreas de pastos e campos entre 40 e 80, cerrado de 60 a 200 e áreas de floresta adota-se o valor de 100 (COLLISCHONN, 2001).

Figura 18– Valores médios dos parâmetros fixos

The screenshot shows the 'Vegetation Parameters' window with the 'Albedo' tab selected. The main table lists parameters for 12 months (January to December). The 'Albedo' parameter is highlighted in blue for the 'FlorRas' row, with a value of 11.0 for all months. Other parameters include FlorProf (16.0), AgriRas (15.0), AgriProf (26.0), CampRas (0.10), CampProf (19.0), Varzea (10.0), ASI (15.0), and Agua (8.0). Below the table are two buttons: 'Extrapolate the first column data to the others' (highlighted) and 'Extrapolate the first row data to the others'. A section titled 'Typical values:' contains a table with columns for 'Albedo', 'Minimum', 'Average', and 'Maximum'. The rows are Forest (0.11, Average, 0.16), Cerrado (0.13, Average, 0.18), Pasture (0.18, Average, 0.26), Agriculture (0.15, Average, 0.26), and Water (Average, 0.08). At the bottom, there is a 'Number of HRCs:' field with the value '9' and four buttons: 'New vegetation parameters file', 'Save vegetation parameters file', 'Open vegetation parameters file', and 'Close'.

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
HRC												
FlorRas	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
FlorProf	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
AgriRas	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
AgriProf	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
CampRas	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
CampProf	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
Varzea	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
ASI	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Agua	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
*												

Albedo	Minimum	Average	Maximum
Forest	0.11		0.16
Cerrado	0.13		0.18
Pasture	0.18		0.26
Agriculture	0.15		0.26
Water		0.08	

Para utilização dos parâmetros de vegetação, fez-se uso dos valores mínimos e máximos já fornecidos, inserindo os máximos para as URHs de áreas profundas, mínimos para rasos e médios para os demais tipos.

4.1.2.2 *Parâmetros calibráveis*

Os parâmetros calibráveis podem ser alterados a cada aplicação do modelo na busca por um bom ajuste entre os dados observados e aqueles calculados. Um parâmetro calibrável associado a um determinado bloco tem o mesmo valor para esse bloco em todas as células da bacia. De acordo com Collischonn (2001), Araújo (2017) e Silva (2014), tais parâmetros podem ser descritos como:

Capacidade de armazenamento do solo (W_m): capacidade máxima que um solo pode absorver a água da chuva, sem que o escoamento superficial ocorra. Os valores podem variar entre 50 a 100 mm, sendo mais elevado em solos profundos;

Parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação (b): controla a separação entre a saturação da capacidade de armazenamento do solo e o escoamento superficial. Um aumento deste parâmetro faz com que um maior volume de água escoe superficialmente, e menos água infiltre no solo. O valor usual é 0,12 e pode chegar até 1,60. Este parâmetro ajusta os picos de vazão observados e calculados, principalmente durante as pequenas cheias.

Parâmetro de drenagem subterrânea (K_{bas}): parâmetro de controle do volume de água escoado subterraneamente de uma determinada camada de solo. Os valores variam entre 0,05 a 5 mm/dia.

Parâmetro de drenagem sub-superficial (K_{int}): parâmetro de controle do volume de água escoado subsuperficialmente de uma determinada camada de solo, apresentando valores em torno de 4 a 40 mm/dia.

Parâmetro de forma da curva de redução (XL): parâmetro de controle da forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo, sendo adotado usualmente o valor de 0,67.

Parâmetro do fluxo ascendente (CAP): parâmetro que representa a presença ou não de fluxo ascendente de umidade do lençol freático para o perfil do solo. Geralmente a

possibilidade de retorno da água subterrânea para a camada de solo é desprezada, por isso adota-se CAP igual a zero.

Parâmetros de armazenamento residual (Wc): limita o escoamento subsuperficial e o escoamento subterrâneo, sendo pouco sensível em uma faixa razoável de valores e, em geral, é fixado em 10% da capacidade de armazenamento no solo (Wm).

Parâmetros de retardo do reservatório superficial (CS), de retardo do reservatório subsuperficial (CI) e de retardo do reservatório subterrâneo (CB): parâmetros responsáveis pelo controle do retardo do escoamento dentro das células. Representam as interferências que o escoamento sofre durante o seu percurso até o exutório;

Vazão de base (QB): escoamento de água armazenada na camada subterrânea do solo.

O referido modelo é composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo das células e escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN, 2006). O balanço hídrico é realizado de maneira independente para cada URH, utilizando as características e os parâmetros dos blocos.

Quadro 4– Valores médios dos parâmetros calibráveis

URH	Descrição	Wm	b	Kbas	Kint	XI	CAP	WC
FlorRas	Floresta em solo raso	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	Floresta em solo profundo	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	Agricultura em solo raso	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriProf	Agricultura em solo profundo	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
CampRas	Campo em solo raso	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
CampProf	Campo em solo profundo	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
Varzea	Várzeas e Florestas Inundáveis	500	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
ASI	Áreas Semi-Impermeáveis	300	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
Água	Água	0	0	0	0	0	0	0

CS: 20

CI: 150

CB: 2000

QB: 1

Para utilização dos parâmetros de solo, fez-se uso dos valores mínimos e máximos já fornecidos na descrição, inserindo os máximos para as URHs de áreas profundas, mínimos para rasos e médios para os demais tipos.

Após, foram avaliadas as 65 sub-bacias, onde modificou-se para cada uma os valores com base nas predominâncias de cada URH e de solos rasos e profundos, conseguindo assim resultados melhores dos primários com os valores inicialmente inseridos.

Em cada bacia, foram testados valores de parâmetros de capacidade de armazenamento do solo (W_m); forma da relação entre armazenamento e saturação (b); drenagem subterrânea (K_{bas}); drenagem sub-superficial (K_{int}); retardo do reservatório superficial (CS), retardo do reservatório subsuperficial (CI); retardo do reservatório subterrâneo (CB) e Vazão de base (QB), avaliando que como cada URH foi discretizada de forma a tentar chegar a uma forma mais homogênea na presença de solos rasos ou profundos, vegetação, agricultura, área semi-impermeável, e fluxos de água, geralmente os valores se ajustavam em um formato padrão para cada tipo de profundidade de solo, isso possibilitou variar o W_m predominantemente entre 300 à 900, o “ b ” de 0,6 à 1,1, K_{bas} de 0,9 à 1,7 e K_{int} de 2 a 7. Os parâmetros retardo de reservatório foram os que tiveram uma tendência mais relacionada ao tipo de solo e a menor presença de vegetação, tendo maiores variações e menor padrão.

4.1.3 Calibração Automática

A nova versão do modelo MGB-IPH, utiliza o algoritmo de otimização MOCOM-UA (YAPO et al., 1998), que é uma extensão do SCE-UA (DUAN et al., 1992), para otimização global de múltiplos objetivos. Trata-se de uma evolução natural dos processos globais que utiliza um método de aleatorização que atribui graus para cada unidade individual em uma população, usando um ranking de Pareto (GOLDBERG, 1989) para envolver a contribuição de cada um de forma a separar os que deveriam estar em rankings diferentes para marca-los como de outra classe.

Figura 19– Parâmetros da calibração automática e os pesos

Parameters for automatic calibration

Create Automatic Calibration File | Create New Soil Parameters File | Soil Parameters description

HRCs: D:\MGB\HRUs_South_America\URHs.hrc

Soil Parameters: D:\LIXO\solo.CAL

Parameters for Automatic Calibration:

Calibrate parameter? (How to fill in the column)
 0 = does not calibrate and uses the original value
 1 = calibrates
 -1 = solidarity calibration with HRC n.

Calibration specifications

Number of individuals in a population: 100

Maximum number of generations: 500

Objective functions

Nash-Sutcliffe efficiency
 Nash-Sutcliffe efficiency of the logarithm of the flows
 Error module in the total volume
 Q90 error

HRU	Lower Wm	Average Wm	Highest Wm	Calibrate Wm?	Lower b	Average b	Highest b	Calibrate b?	Lower Kbas	Average Kbas
FlorRas	270	900	1620	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
FlorProf	300	1000	1800	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
AgriRas	270	900	1620	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
AgriProf	300	1000	1800	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
CampRas	270	900	1620	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
CampProf	300	1000	1800	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1
Varzea	150	500	900	1	0.3	1	1.8	1	0.3	1

Number of HRCs: 9 | Number of catchments: | Reference subwatershed: 1

Calibrate which subwatershed?

Subwatershed
1

Gauge stations used on the calibration

Observed flows file: D:\LIXO\Qobs.qob

Catchment	Gauge Station	Weight 1	Weight 2	Weight 3
4198	70200000	0	0	0
4078	72430000	0	0	0
4147	72630000	0	0	0
4210	72680000	0	0	0
4467	74100000	0	0	0

CS: 1 | 20 | 20 | Suggestion: Values between 1 and 20

CI: 50 | 150 | 200 | Suggestion: Values between 50 and 200

CB: 1000 | 2000 | 10000 h | Suggestion: Use base flow filter

QB: 1 m³/(s.km²)

Close

4.2 Modelagem da bacia

4.2.1 Simulação

4.2.1.1 Método de Propagação

Para aplicação do modelo, optou-se por utilizar o módulo de Muskingum-Cunge pois não há intenção de verificar as interações de diferentes tipos de estruturas presentes na bacia, como barragens, hidrelétricas e reservatórios, e nem para geração de mancha de inundação.

4.2.1.2 Coeficientes de resultado

Os parâmetros calibráveis podem ser alterados a cada aplicação do modelo na busca por um bom ajuste entre os dados observados e aqueles calculados. Um parâmetro calibrável associado a um determinado bloco tem o mesmo valor para esse bloco em todas as células da bacia.

No quadro 5, estão os resultados que os parâmetros inseridos chegam para toda a bacia discretizada. A partir deste ponto, é possível entender com o conjunto das informações de caracterização da bacia, o comportamento do escoamento ao longo dos trechos do rio Uruguai, entendendo o ciclo hidrológico de cada região.

Quadro 5– Resultados da simulação no MGB.

Estação	Nome	Corpo Hídrico	Área de Drenagem	Latitude	Longitude	Nash	Nashlog	Evol
77150000	Uruguaiana	Rio Uruguai	190000 km ²	-29.75	-57.09	-1.510	-158.380	-99.992
74800000	Porto Lucena	Rio Uruguai	95200 km ²	-27.85	-55.03	-0.821	-107.300	-99.958
74100000	Iraí	Rio Uruguai	61900 km ²	-27.18	-53.23	0.501	0.333	-8.434
76800000	Passo Mariano Pinto	Rio Ibicuí	42500 km ²	-29.31	-56.06	0.650	0.767	-23.840
76560000	Manoel Viana	Rio Ibicuí	29400 km ²	-29.60	-55.48	0.580	0.752	-19.348
76500000	Jacaquá	Rio Ibicuí	27800 km ²	-29.69	-55.20	0.622	0.750	-19.510
76310000	Rosário do Sul	Rio Santa Maria	12100 km ²	-30.24	-54.92	0.466	0.587	-35.461
73960000	Barra do Chapecó Aux.	Rio Chapecó	8240 km ²	-27.04	-52.95	0.762	0.698	2.608
76300000	Ponte Ibicui da Armada	Rio Ibicuí Da Armada	6010 km ²	-30.28	-54.90	0.407	0.506	-31.393
76750000	Alegrete	Rio Ibirapuitã	5868 km ²	-29.77	-55.79	0.358	0.529	-38.322
73770000	Porto Fae Novo	Rio Chapecó	5550 km ²	-26.82	-52.73	0.722	0.576	8.883
75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	5440 km ²	-28.36	-54.27	0.757	0.697	-13.287
74270000	Passo Rio da Várzea	Rio Da Várzea	5340 km ²	-27.28	-53.32	0.614	0.804	-3.583
75500000	Passo do Sarmento	Rio Piratini	5230 km ²	-28.21	-55.32	0.819	0.774	-19.243
77500000	Quaraí	Rio Quaraí	4570 km ²	-30.38	-56.47	0.328	0.366	-46.112
72849000	Joaçaba I	Rio Do Peixe	3710 km ²	-27.16	-51.48	0.839	0.763	2.592
75700000	Passo do Novo	Rio Icamaquã	3710 km ²	-28.68	-55.58	0.510	0.656	-44.172
71498000	Passo Marombas	Rio Das Marombas	3680 km ²	-27.33	-50.75	0.798	0.653	7.849
72680000	Passo Colombelli	Rio Apue Ou Ligeiro	3660 km ²	-27.56	-51.86	0.824	0.386	-9.396
75450000	Passo Santa Maria	Rio Piratini	3240 km ²	-28.58	-54.91	-0.548	-23.384	-99.581
71350001	Encruzilhada II	Rio Canoas	3230 km ²	-27.51	-50.11	-0.935	-42.564	-99.472
70200000	Invernada Velha	Rio Pelotas	2820 km ²	-28.44	-50.30	0.684	-0.153	-16.691
72630000	Passo Santa Tereza	Rio Apue Ou Ligeiro	2800 km ²	-27.71	-51.89	0.812	0.280	-12.884
76100000	Vila Clara	Rio Toropi	2790 km ²	-29.56	-54.34	0.677	0.674	-11.357
76650000	Passo da Cachoeira	Rio Itu	2560 km ²	-29.31	-55.71	0.689	0.378	-18.160
76440000	Jaguari	Rio Jaguari	2320 km ²	-29.50	-54.69	0.688	0.634	-4.759
74610000	Cascata Burica - Nova	Rio Buricá	2260 km ²	-27.52	-54.23	0.663	-0.449	-7.128
75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	2160 km ²	-28.39	-54.33	0.704	0.804	-8.665

74424500	Raigão Alto	Rio Peperi Guaçu	2090 km ²	-26.93	-53.71	0.740	0.556	-9.843
74370000	Palmitinho	Rio Guarita	2020 km ²	-27.33	-53.64	0.637	0.684	5.229
72810000	Tangará	Rio Do Peixe	2010 km ²	-27.09	-51.26	0.660	0.486	27.296
71300000	Rio Bonito	Rio Canoas	2000 km ²	-27.70	-49.84	-0.570	0.551	5.733
75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	1940 km ²	-28.29	-53.78	0.696	0.582	-12.613
73600000	Abelardo Luz	Rio Chapecó	1840 km ²	-26.56	-52.33	0.717	0.640	-6.661
72430000	Passo do Granzotto	Rio Forquilha Ou Inhanduva	1620 km ²	-27.88	-51.75	0.571	0.423	-0.746
74470000	Três Passos	Rio Turvo	1540 km ²	-27.39	-53.88	0.663	0.568	-7.457
76085000	Cachoeira 5 Veados	Rio Toropi	1540 km ²	-29.43	-54.05	0.604	0.544	-6.175
73350000	Barca Irani	Rio Irani	1500 km ²	-27.17	-52.52	0.818	0.694	-10.037
74900000	Linha União	Rio Comandá	1260 km ²	-27.93	-54.94	0.537	0.548	-31.206
79400000	Estância do Espantoso	Rio Negro	1180 km ²	-31.53	-54.29	-0.219	-39.251	- 100.000
70300000	Fazenda Mineira	Rio Lava Tudo	1170 km ²	-28.09	-50.06	0.551	0.782	-16.369
74700000	Tucunduva	Rio Santa Rosa	1140 km ²	-27.67	-54.46	0.705	-0.918	-18.241
71200000	Vila Canoas	Rio Canoas	1010 km ²	-27.80	-49.78	0.387	-0.661	-24.094
73820000	Passo Pio X	Rio Burro Branco	1010 km ²	-26.86	-52.90	0.603	0.379	-11.570
76460000	Ernesto Alves	Rio Jaquarizinho	926 km ²	-29.36	-54.74	0.471	0.562	-21.228
74880000	Passo São João	Rio Comandá	817 km ²	-28.06	-54.76	0.752	0.709	-11.664
75200000	Conceição	Rio Conceição	811 km ²	-28.45	-53.97	0.745	0.753	4.637
72715000	Rio das Antas	Rio Do Peixe	801 km ²	-26.90	-51.08	0.652	0.578	1.253
73300000	Bonito	Rio Irani	654 km ²	-26.95	-52.18	0.735	0.660	7.737
74320000	Ponte do Sargento	Rio Sargento	609 km ²	-26.68	-53.29	0.601	0.691	-12.709
70500000	Coxilha Rica	Rio Pelotinhas	550 km ²	-28.16	-50.44	0.492	0.605	-38.245
70100000	Despraiado	Rio Pelotas	533 km ²	-28.37	-49.80	0.600	-0.281	-26.758
74460000	Ponte do Rio Turvo	Rio Turvo	502 km ²	-27.82	-53.73	-1.936	0.386	19.051
71250000	Ponte do Rio João Paulo	Rio João Paulo	489 km ²	-27.83	-49.63	0.369	0.445	-5.208
76251000	Dom Pedrito	Rio Santa Maria	462 km ²	-30.97	-54.69	-0.035	-0.791	-86.315
74205000	Linha Cescon	Arroio Caturete	437 km ²	-27.81	-53.03	0.674	0.686	8.054
73900000	Saudades	Rio Saudades	418 km ²	-26.92	-53.01	0.526	0.535	7.668
75600000	Passo das Turmas	Rio Icamaquã	378 km ²	-28.84	-54.86	0.147	0.114	-56.761
73765000	Passo Quilombo	Rio Do Ouro	266 km ²	-26.76	-52.75	0.481	0.383	-7.615

Para efeito de validação, procuram-se obter valores de coeficiente Nash superiores a 0,7 ou iguais, para tanto, é necessário realizar uma calibração dos parâmetros do solo, e, na execução do trabalho, foi possível observar que o modelo depende da qualidade dos dados de entrada, como o Modelo Digital de Elevação, pois, mesmo a ferramenta do IPH-HydroTools

ter a capacidade de corrigir algumas falhas, para uma bacia com a dimensão da bacia do rio Uruguai, e suas características geomorfológicas, foram encontradas diversas dificuldades que só foram superadas com ajustes contínuos conforme a aplicação do modelo, isso torna o seu emprego desafiador.

Dos postos fluviométricos onde se obteve melhores respostas, observando resultados próximos de 0,7 em ambas as situações, ficam elencadas os cinco melhores apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Melhores resultados da simulação no MGB

Nome	Corpo Hídrico	Área de Drenagem	Coordenadas		Calibração Manual		
			Latitude	Longitude	Nash	Nashlog	Evol
Passo do Sarmento	Rio Piratini	5230 km ²	-28.21	-55.32	0.819	0.774	-19.243
Joaçaba I	Rio Do Peixe	3710 km ²	-27.16	-51.48	0.839	0.763	2.592
Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	2160 km ²	-28.39	-54.33	0.704	0.804	-8.665
Passo São João	Rio Comandá	817 km ²	-28.06	-54.76	0.752	0.709	-11.664
Conceição	Rio Conceição	811 km ²	-28.45	-53.97	0.745	0.753	4.637

O coeficiente de Nash (R^2) possui valor máximo igual a 1, que corresponde a um ajuste perfeito entre as vazões calculadas e as observadas. O valor de R^2 é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, por isto, quando R^2 é próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias (COLLISCHONN, 2001).

O erro no volume não tem valor máximo e nem mínimo. O valor de ΔV apenas expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões, calculadas e observadas. Quando mais próximos de zero os valores destes parâmetros, melhores podem ser considerados os resultados do modelo. (COLLISCHONN, 2001).

Considerando a ocorrência de valores maiores que 0,7 em ambos os coeficientes, estas foram as estações que o modelo melhor representou na simulação, ainda havendo nos casos de Joaçaba I e Conceição um valor de erro volumétrico na amplitude de 5 negativo a 5 positivo, e no de Colônia Mousquer na amplitude de 10.

A Área de drenagem destas estações demonstra que mesmo em grandes áreas como as de Passo do Sarmento e Joaçaba I, o modelo desempenha bem, conseguindo resultados satisfatórios, e ainda consegue manter consistência para as bacias menores, mas que ainda são bacia próximas de um mil quilômetros quadrados.

A calibração dos parâmetros, pode ser feita manualmente, e há também a opção de calibração automática, conforme abordado no item 4.2.2, mas mesmo a calibração automática, ainda necessita de um manual antes.

As figuras 20 a 24 apresentam os hidrogramas obtidos durante a calibração prévia, para uma análise prévia de comportamento dos parâmetros em cada URH.

Figura 20 - Resultado da calibração manual para a estação Passo do Sarmento

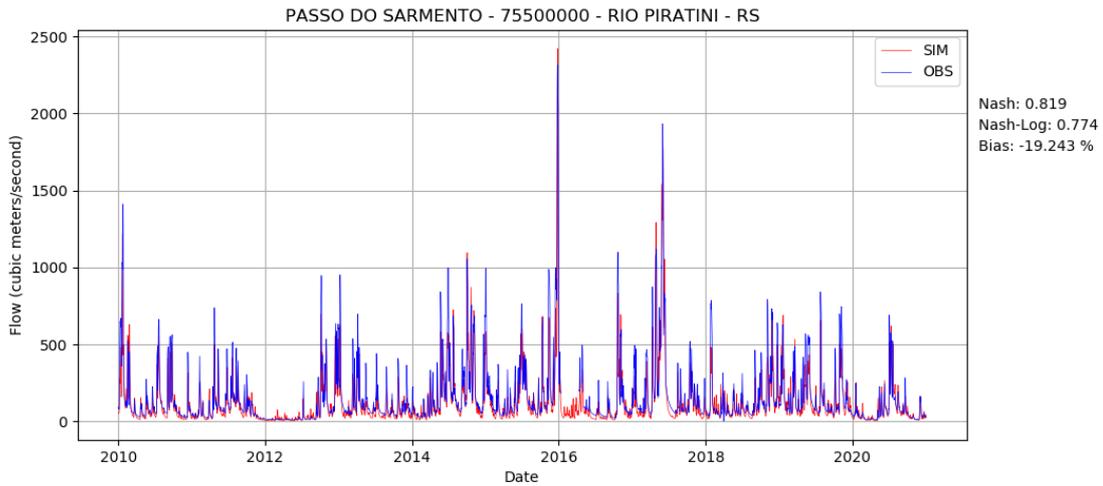


Figura 21 - Resultado da calibração manual para a estação Joaçaba I

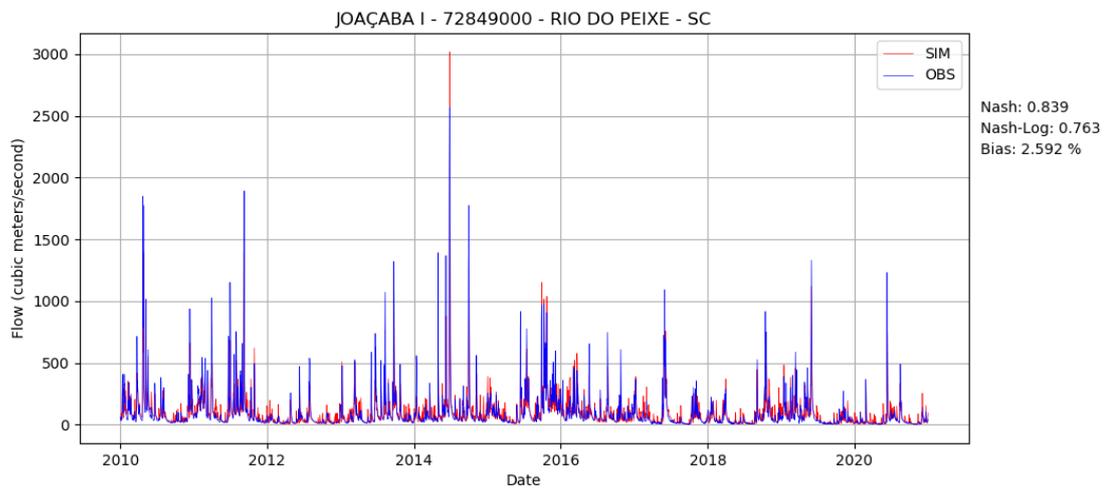


Figura 22 - Resultado da calibração manual para a estação Colônia Mousquer

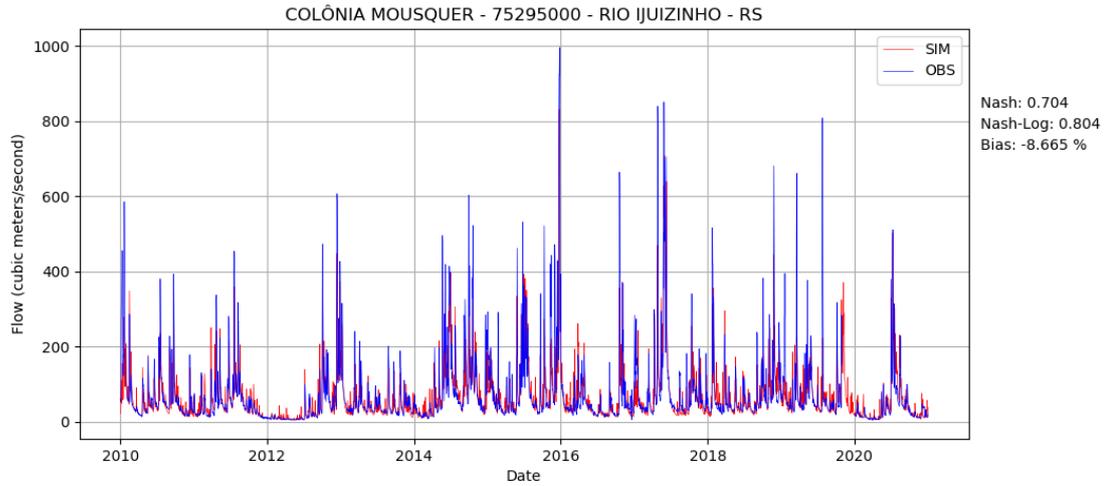


Figura 23 - Resultado da calibração manual para a estação Passo São João

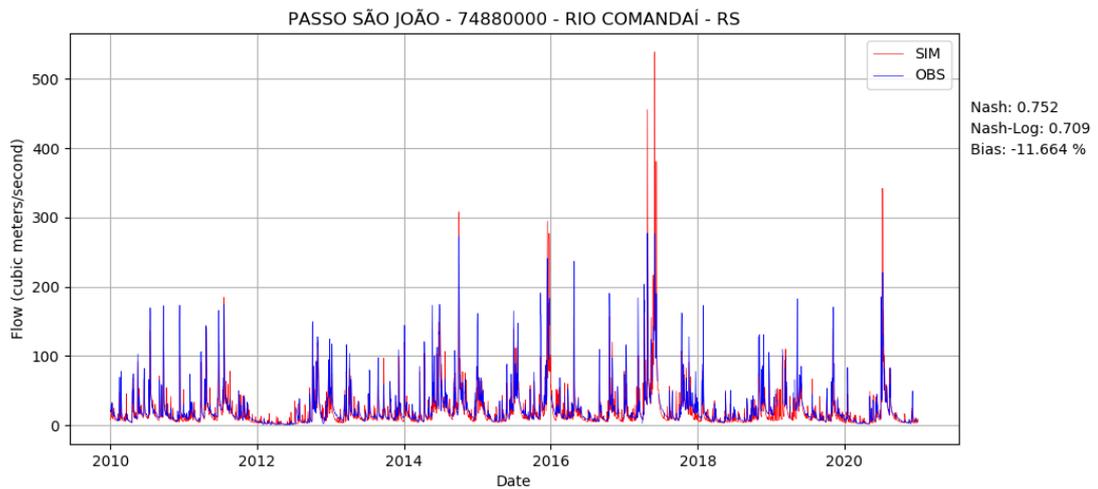
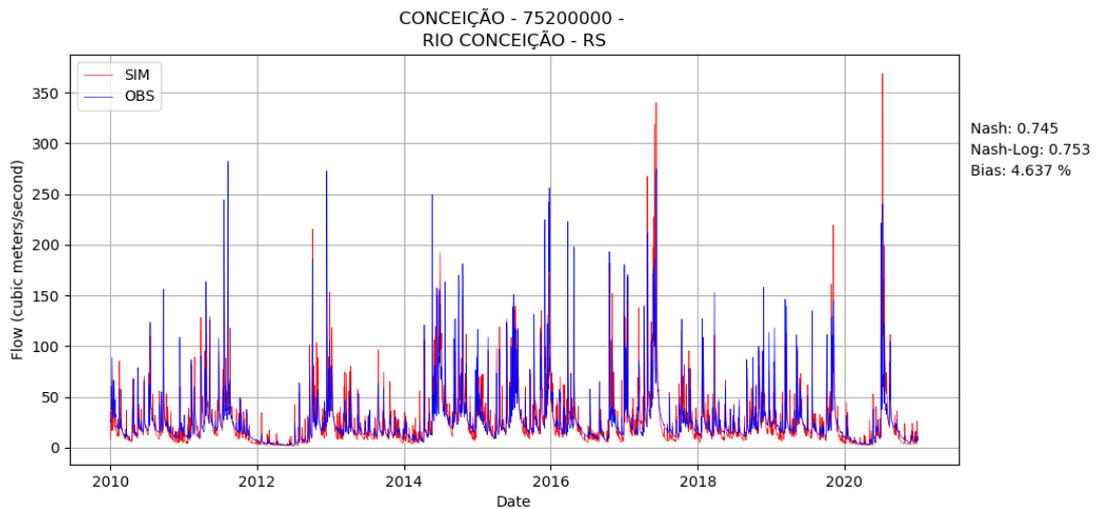


Figura 24 - Resultado da calibração manual para a estação Conceição



4.2.2 Calibração Automática

Após a aplicação, foi testada a ferramenta de calibração automática, com intuito de se verificar a sua capacidade de ajuste dos parâmetros do modelo, mesmo estes não estando com bons resultados para validação, e assim, observar o quanto esta ferramenta consegue ajustar, no manual e nos tutoriais fornecidos, a aplicação é mencionada como um refinamento dos valores já obtidos pela calibração manual, sendo uma otimização dos valores já encontrados, conforme é possível observar ao comparar o quadro 6 com o quadro 7.

Quadro 7 – Resultados da simulação após a calibração automática dos parâmetros.

Estação	Nome	Corpo Hídrico	Área de Drenagem	Latitude	Longitude	Nash	Nashlog	Evol
77150000	Uruguaiana	Rio Uruguai	190000 km ²	-29.75	-57.09	-1.510	-165.816	-99.991
74800000	Porto Lucena	Rio Uruguai	95200 km ²	-27.85	-55.03	-0.821	-102.697	-99.953
74100000	Iraí	Rio Uruguai	61900 km ²	-27.18	-53.23	0.516	0.407	-6.057
76800000	Passo Mariano Pinto	Rio Ibicuí	42500 km ²	-29.31	-56.06	0.445	0.713	-7.872
76560000	Manoel Viana	Rio Ibicuí	29400 km ²	-29.60	-55.48	0.255	0.660	-5.008
76500000	Jacaquá	Rio Ibicuí	27800 km ²	-29.69	-55.20	0.277	0.664	-4.778
76310000	Rosário do Sul	Rio Santa Maria	12100 km ²	-30.24	-54.92	0.171	0.472	-9.400
73960000	Barra do Chapecó Aux.	Rio Chapecó	8240 km ²	-27.04	-52.95	0.695	0.548	4.773
76300000	Ponte Ibicui da Armada	Rio Ibicuí Da Armada	6010 km ²	-30.28	-54.90	0.256	0.383	-6.502
76750000	Alegrete	Rio Ibirapuitã	5868 km ²	-29.77	-55.79	0.335	0.410	-14.504
73770000	Porto Fae Novo	Rio Chapecó	5550 km ²	-26.82	-52.73	0.607	0.425	11.225
75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	5440 km ²	-28.36	-54.27	0.650	0.742	-9.876
74270000	Passo Rio da Várzea	Rio Da Várzea	5340 km ²	-27.28	-53.32	0.655	0.757	-0.163
75500000	Passo do Sarmiento	Rio Piratini	5230 km ²	-28.21	-55.32	0.793	0.806	-10.417
77500000	Quaraí	Rio Quaraí	4570 km ²	-30.38	-56.47	0.538	0.257	-21.582
72849000	Joaçaba I	Rio Do Peixe	3710 km ²	-27.16	-51.48	0.785	0.532	5.046
75700000	Passo do Novo	Rio Icaemaquã	3710 km ²	-28.68	-55.58	0.583	0.653	-33.059
71498000	Passo Marombas	Rio Das Marombas	3680 km ²	-27.33	-50.75	0.709	0.672	10.214
72680000	Passo Colombelli	Rio Apue Ou Ligeiro	3660 km ²	-27.56	-51.86	0.771	0.592	-5.872

75450000	Passo Santa Maria	Rio Piratini	3240 km ²	-28.58	-54.91	-0.549	-23.146	-99.574
71350001	Encruzilhada II	Rio Canoas	3230 km ²	-27.51	-50.11	-0.932	-38.587	-99.326
70200000	Invernada Velha	Rio Pelotas	2820 km ²	-28.44	-50.30	0.691	0.280	-13.953
72630000	Passo Santa Tereza	Rio Apue Ou Ligeiro	2800 km ²	-27.71	-51.89	0.764	0.553	-9.677
76100000	Vila Clara	Rio Toropi	2790 km ²	-29.56	-54.34	0.617	0.656	-9.355
76650000	Passo da Cachoeira	Rio Itu	2560 km ²	-29.31	-55.71	0.573	0.341	-9.210
76440000	Jaguari	Rio Jaguari	2320 km ²	-29.50	-54.69	0.654	0.516	-3.097
74610000	Cascata Burica - Nova	Rio Buricá	2260 km ²	-27.52	-54.23	0.565	-0.027	3.660
75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	2160 km ²	-28.39	-54.33	0.620	0.723	-4.894
74424500	Raigão Alto	Rio Peperi Guaçu	2090 km ²	-26.93	-53.71	0.725	0.578	-11.427
74370000	Palmitinho	Rio Guarita	2020 km ²	-27.33	-53.64	0.694	0.661	8.127
72810000	Tangará	Rio Do Peixe	2010 km ²	-27.09	-51.26	0.607	0.285	30.400
71300000	Rio Bonito	Rio Canoas	2000 km ²	-27.70	-49.84	-0.483	0.563	6.802
75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	1940 km ²	-28.29	-53.78	0.623	0.679	-9.873
73600000	Abelardo Luz	Rio Chapecó	1840 km ²	-26.56	-52.33	0.566	0.473	-3.960
72430000	Passo do Granzotto	Rio Forquilha Ou Inhanduva	1620 km ²	-27.88	-51.75	0.388	0.601	3.588
74470000	Três Passos	Rio Turvo	1540 km ²	-27.39	-53.88	0.683	0.596	-2.756
76085000	Cachoeira 5 Veados	Rio Toropi	1540 km ²	-29.43	-54.05	0.600	0.572	-4.081
73350000	Barca Irani	Rio Irani	1500 km ²	-27.17	-52.52	0.828	0.661	-9.207
74900000	Linha União	Rio Comandaf	1260 km ²	-27.93	-54.94	0.528	0.535	-22.501
79400000	Estância do Espantoso	Rio Negro	1180 km ²	-31.53	-54.29	-0.219	-39.251	-100.000
70300000	Fazenda Mineira	Rio Lava Tudo	1170 km ²	-28.09	-50.06	0.593	0.636	-11.368
74700000	Tucunduva	Rio Santa Rosa	1140 km ²	-27.67	-54.46	0.460	-0.299	-8.378
71200000	Vila Canoas	Rio Canoas	1010 km ²	-27.80	-49.78	0.330	0.040	-23.210
73820000	Passo Pio X	Rio Burro Branco	1010 km ²	-26.86	-52.90	0.584	0.252	-10.016
76460000	Ernesto Alves	Rio Jaquarizinho	926 km ²	-29.36	-54.74	0.480	0.450	-18.557
74880000	Passo São João	Rio Comandaf	817 km ²	-28.06	-54.76	0.650	0.707	-3.055
75200000	Conceição	Rio Conceição	811 km ²	-28.45	-53.97	0.778	0.807	6.974
72715000	Rio das Antas	Rio Do Peixe	801 km ²	-26.90	-51.08	0.597	0.370	4.813

73300000	Bonito	Rio Irani	654 km ²	-26.95	-52.18	0.66 2	0.528	8.398
74320000	Ponte do Sargento	Rio Sargento	609 km ²	-26.68	-53.29	0.61 1	0.565	-11.156
70500000	Coxilha Rica	Rio Pelotinhas	550 km ²	-28.16	-50.44	0.57 5	0.529	-32.693
70100000	Despraiado	Rio Pelotas	533 km ²	-28.37	-49.80	0.61 1	0.163	-24.830
74460000	Ponte do Rio Turvo	Rio Turvo	502 km ²	-27.82	-53.73	- 1.27 6	0.574	24.315
71250000	Ponte do Rio João Paulo	Rio João Paulo	489 km ²	-27.83	-49.63	0.30 8	0.310	-4.132
76251000	Dom Pedrito	Rio Santa Maria	462 km ²	-30.97	-54.69	- 0.00 9	-0.175	-78.125
74205000	Linha Cescon	Arroio Caturete	437 km ²	-27.81	-53.03	0.71 3	0.643	9.538
73900000	Saudades	Rio Saudades	418 km ²	-26.92	-53.01	0.52 8	0.356	9.430
75600000	Passo das Turmas	Rio Icamauã	378 km ²	-28.84	-54.86	0.18 5	0.295	-51.401
73765000	Passo Quilombo	Rio Do Ouro	266 km ²	-26.76	-52.75	0.46 7	0.208	-5.793

Mesmo com valores dos coeficientes de análise com grande erro na simulação, a aplicação da calibração automática consegue melhorar os resultados. Isso se deve porque o objetivo da ferramenta é o de otimizar, logo, ela não ajusta os valores conforme as características da bacia, apenas busca melhorá-los. Não sendo inferior à sua importância, pois, o grau de dificuldade para a calibração manual, é bastante complexo, principalmente para grandes áreas, isso porque, é necessário que o operador tenha conhecimentos das características da bacia de estudo, o que torna o modelo uma aplicação ainda restrita a grupos de pesquisa, e profissionais da área, que é sua principal designação.

O processo de calibração automática, visa obter melhores resultados, mas também pode-se escolher em qual dos coeficientes se pretende focar. Para o presente trabalho, o foco no coeficiente de Nash, não necessariamente ocorreu em alterações apenas nos seus valores, mas em todos, ocorrendo algumas piores para se obter melhores respostas ao erro volumétrico, e assim tendo vazões simuladas menos distantes das observadas pelas estações, o que mostra que mesmo com números acima de 0,7 em ambos os parâmetros, se houver distância nos valores volumétricos, ainda deve-se melhorar.

4.2.3 Comparação dos Resultados da Calibração

Para melhor observar as diferenças entre os resultados nos dois casos, comparou-se ambos os resultados tentando observar os ganhos nos coeficientes de Nash e NashLog, conforme apresentado no quadro 8, e as pioras associadas as melhoras nos valores dos erros volumétricos, com isso, algumas respostas tornarem-se piores do que anteriormente, mas outras melhoraram, equilibrando o conjunto, pois, a sequência de alterações a montante, sempre irá inferir em mudanças a jusante, ocasionando alterações nas vazões de entrada, e com os novos valores dos parâmetros de solo, o ciclo hidrológico se altera, principalmente no escoamento, que é onde há a maior mudança dos valores nos parâmetros que são empregados no modelo, já que, o comportamento do solo em grandes áreas é o mais complicado de ser alinhando a um valor único, mesmo em áreas menores de drenagem.

Quadro 8- Comparação dos valores entre a calibração Manual X Automática

Estação	Nome	Corpo Hídrico	Área de Drenagem	Coordenadas		Calibração Manual			Calibração automática			Comparação		
				Latitude	Longitude	Nash	Nashlog	Evol	Nash	Nashlog	Evol	Nash	Nashlog	Evol
77150000	Uruguaiana	Rio Uruguai	190000 km ²	-29.75	-57.09	-1.510	-158.380	-99.992	-1.510	-165.816	-99.991	0.000	7.436	-0.001
74800000	Porto Lucena	Rio Uruguai	95200 km ²	-27.85	-55.03	-0.821	-107.300	-99.958	-0.821	-102.697	-99.953	0.000	-4.603	-0.005
74100000	Iraí	Rio Uruguai	61900 km ²	-27.18	-53.23	0.501	0.333	-8.434	0.516	0.407	-6.057	0.015	0.074	-2.377
76800000	Passo Mariano Pinto	Rio Ibicuí	42500 km ²	-29.31	-56.06	0.650	0.767	-23.840	0.445	0.713	-7.872	-0.205	-0.054	-15.968
76560000	Manoel Viana	Rio Ibicuí	29400 km ²	-29.60	-55.48	0.580	0.752	-19.348	0.255	0.660	-5.008	-0.325	-0.092	-14.340
76500000	Jacaquá	Rio Ibicuí	27800 km ²	-29.69	-55.20	0.622	0.750	-19.510	0.277	0.664	-4.778	-0.345	-0.086	-14.732
76310000	Rosário do Sul	Rio Santa Maria	12100 km ²	-30.24	-54.92	0.466	0.587	-35.461	0.171	0.472	-9.400	-0.295	-0.115	-26.061
73960000	Barra do Chapecó Aux.	Rio Chapecó	8240 km ²	-27.04	-52.95	0.762	0.698	2.608	0.695	0.548	4.773	-0.067	-0.150	2.165
76300000	Ponte Ibicui da Armada	Rio Ibicuí Da Armada	6010 km ²	-30.28	-54.90	0.407	0.506	-31.393	0.256	0.383	-6.502	-0.151	-0.123	-24.891
76750000	Alegrete	Rio Ibirapuitã	5868 km ²	-29.77	-55.79	0.358	0.529	-38.322	0.335	0.410	-14.504	-0.023	-0.119	-23.818
73770000	Porto Fae Novo	Rio Chapecó	5550 km ²	-26.82	-52.73	0.722	0.576	8.883	0.607	0.425	11.225	-0.115	-0.151	2.342
75230000	Santo Angelo	Rio Ijuí	5440 km ²	-28.36	-54.27	0.757	0.697	-13.287	0.650	0.742	-9.876	-0.107	0.045	-3.411
74270000	Passo Rio da Várzea	Rio Da Várzea	5340 km ²	-27.28	-53.32	0.614	0.804	-3.583	0.655	0.757	-0.163	0.041	-0.047	-3.420
75500000	Passo do Sarmiento	Rio Piratini	5230 km ²	-28.21	-55.32	0.819	0.774	-19.243	0.793	0.806	-10.417	-0.026	0.032	-8.826
77500000	Quaraí	Rio Quaraí	4570 km ²	-30.38	-56.47	0.328	0.366	-46.112	0.538	0.257	-21.582	0.210	-0.109	-24.530
72849000	Joaçaba I	Rio Do Peixe	3710 km ²	-27.16	-51.48	0.839	0.763	2.592	0.785	0.532	5.046	-0.054	-0.231	2.454
75700000	Passo do Novo	Rio Icamaquã	3710 km ²	-28.68	-55.58	0.510	0.656	-44.172	0.583	0.653	-33.059	0.073	-0.003	-11.113
71498000	Passo Marombas	Rio Das Marombas	3680 km ²	-27.33	-50.75	0.798	0.653	7.849	0.709	0.672	10.214	-0.089	0.019	2.365
72680000	Passo Colombelli	Rio Apue Ou Ligeiro	3660 km ²	-27.56	-51.86	0.824	0.386	-9.396	0.771	0.592	-5.872	-0.053	0.206	-3.524
75450000	Passo Santa Maria	Rio Piratini	3240 km ²	-28.58	-54.91	-0.548	-23.384	-99.581	-0.549	-23.146	-99.574	0.001	-0.238	-0.007

71350001	Encruzilhada II	Rio Canoas	3230 km ²	-27.51	-50.11	-0.935	-42.564	-99.472	-0.932	-38.587	-99.326	-0.003	-3.977	-0.146
70200000	Invernada Velha	Rio Pelotas	2820 km ²	-28.44	-50.30	0.684	-0.153	-16.691	0.691	0.280	-13.953	0.007	0.127	-2.738
72630000	Passo Santa Tereza	Rio Apue Ou Ligeiro	2800 km ²	-27.71	-51.89	0.812	0.280	-12.884	0.764	0.553	-9.677	-0.048	0.273	-3.207
76100000	Vila Clara	Rio Toropi	2790 km ²	-29.56	-54.34	0.677	0.674	-11.357	0.617	0.656	-9.355	-0.060	-0.018	-2.002
76650000	Passo da Cachoeira	Rio Itu	2560 km ²	-29.31	-55.71	0.689	0.378	-18.160	0.573	0.341	-9.210	-0.116	-0.037	-8.950
76440000	Jaguari	Rio Jaguari	2320 km ²	-29.50	-54.69	0.688	0.634	-4.759	0.654	0.516	-3.097	-0.034	-0.118	-1.662
74610000	Cascata Burica - Nova	Rio Buricá	2260 km ²	-27.52	-54.23	0.663	-0.449	-7.128	0.565	-0.027	3.660	-0.098	-0.422	-3.468
75295000	Colônia Mousquer	Rio Ijuizinho	2160 km ²	-28.39	-54.33	0.704	0.804	-8.665	0.620	0.723	-4.894	-0.084	-0.081	-3.771
74424500	Raigão Alto	Rio Peperi Guaçu	2090 km ²	-26.93	-53.71	0.740	0.556	-9.843	0.725	0.578	-11.427	-0.015	0.022	1.584
74370000	Palmitinho	Rio Guarita	2020 km ²	-27.33	-53.64	0.637	0.684	5.229	0.694	0.661	8.127	0.057	-0.023	2.898
72810000	Tangará	Rio Do Peixe	2010 km ²	-27.09	-51.26	0.660	0.486	27.296	0.607	0.285	30.400	-0.053	-0.201	3.104
71300000	Rio Bonito	Rio Canoas	2000 km ²	-27.70	-49.84	-0.570	0.551	5.733	-0.483	0.563	6.802	-0.087	0.012	1.069
75155000	Passo Faxinal	Rio Ijuí	1940 km ²	-28.29	-53.78	0.696	0.582	-12.613	0.623	0.679	-9.873	-0.073	0.097	-2.740
73600000	Abelardo Luz	Rio Chapecó	1840 km ²	-26.56	-52.33	0.717	0.640	-6.661	0.566	0.473	-3.960	-0.151	-0.167	-2.701
72430000	Passo do Granzotto	Rio Forquilha Ou Inhanduva	1620 km ²	-27.88	-51.75	0.571	0.423	-0.746	0.388	0.601	3.588	-0.183	0.178	2.842
74470000	Três Passos	Rio Turvo	1540 km ²	-27.39	-53.88	0.663	0.568	-7.457	0.683	0.596	-2.756	0.020	0.028	-4.701
76085000	Cachoeira 5 Veados	Rio Toropi	1540 km ²	-29.43	-54.05	0.604	0.544	-6.175	0.600	0.572	-4.081	-0.004	0.028	-2.094
73350000	Barca Irani	Rio Irani	1500 km ²	-27.17	-52.52	0.818	0.694	-10.037	0.828	0.661	-9.207	0.010	-0.033	-0.830
74900000	Linha União	Rio Comandáí	1260 km ²	-27.93	-54.94	0.537	0.548	-31.206	0.528	0.535	-22.501	-0.009	-0.013	-8.705
79400000	Estância do Espantoso	Rio Negro	1180 km ²	-31.53	-54.29	-0.219	-39.251	-	-0.219	-39.251	-	0.000	0.000	0.000
70300000	Fazenda Mineira	Rio Lava Tudo	1170 km ²	-28.09	-50.06	0.551	0.782	-16.369	0.593	0.636	-11.368	0.042	-0.146	-5.001
74700000	Tucunduva	Rio Santa Rosa	1140 km ²	-27.67	-54.46	0.705	-0.918	-18.241	0.460	-0.299	-8.378	-0.245	-0.619	-9.863
71200000	Vila Canoas	Rio Canoas	1010 km ²	-27.80	-49.78	0.387	-0.661	-24.094	0.330	0.040	-23.210	-0.057	-0.621	-0.884
73820000	Passo Pio X	Rio Burro Branco	1010 km ²	-26.86	-52.90	0.603	0.379	-11.570	0.584	0.252	-10.016	-0.019	-0.127	-1.554

76460000	Ernesto Alves	Rio Jaquarizinho	926 km ²	-29.36	-54.74	0.471	0.562	-21.228	0.480	0.450	-18.557	0.009	-0.112	-2.671
74880000	Passo São João	Rio Comandaí	817 km ²	-28.06	-54.76	0.752	0.709	-11.664	0.650	0.707	-3.055	-0.102	-0.002	-8.609
75200000	Conceição	Rio Conceição	811 km ²	-28.45	-53.97	0.745	0.753	4.637	0.778	0.807	6.974	0.033	0.054	2.337
72715000	Rio das Antas	Rio Do Peixe	801 km ²	-26.90	-51.08	0.652	0.578	1.253	0.597	0.370	4.813	-0.055	-0.208	3.560
73300000	Bonito	Rio Irani	654 km ²	-26.95	-52.18	0.735	0.660	7.737	0.662	0.528	8.398	-0.073	-0.132	0.661
74320000	Ponte do Sargento	Rio Sargento	609 km ²	-26.68	-53.29	0.601	0.691	-12.709	0.611	0.565	-11.156	0.010	-0.126	-1.553
70500000	Coxilha Rica	Rio Pelotinhas	550 km ²	-28.16	-50.44	0.492	0.605	-38.245	0.575	0.529	-32.693	0.083	-0.076	-5.552
70100000	Despraiado	Rio Pelotas	533 km ²	-28.37	-49.80	0.600	-0.281	-26.758	0.611	0.163	-24.830	0.011	-0.118	-1.928
74460000	Ponte do Rio Turvo	Rio Turvo	502 km ²	-27.82	-53.73	-1.936	0.386	19.051	-1.276	0.574	24.315	-0.660	0.188	5.264
71250000	Ponte do Rio João Paulo	Rio João Paulo	489 km ²	-27.83	-49.63	0.369	0.445	-5.208	0.308	0.310	-4.132	-0.061	-0.135	-1.076
76251000	Dom Pedrito	Rio Santa Maria	462 km ²	-30.97	-54.69	-0.035	-0.791	-86.315	-0.009	-0.175	-78.125	-0.026	-0.616	-8.190
74205000	Linha Cescon	Arroio Caturete	437 km ²	-27.81	-53.03	0.674	0.686	8.054	0.713	0.643	9.538	0.039	-0.043	1.484
73900000	Saudades	Rio Saudades	418 km ²	-26.92	-53.01	0.526	0.535	7.668	0.528	0.356	9.430	0.002	-0.179	1.762
75600000	Passo das Turmas	Rio Icamaquã	378 km ²	-28.84	-54.86	0.147	0.114	-56.761	0.185	0.295	-51.401	0.038	0.181	-5.360
73765000	Passo Quilombo	Rio Do Ouro	266 km ²	-26.76	-52.75	0.481	0.383	-7.615	0.467	0.208	-5.793	-0.014	-0.175	-1.822

O processo de calibração automática, visa obter melhores resultados, mas também pode-se escolher em qual dos coeficientes se pretende focar. Para o presente trabalho, o foco no coeficiente de Nash, não necessariamente ocorreu em alterações apenas nos seus valores, mas em todos, ocorrendo algumas pioras para se obter melhores respostas ao erro volumétrico, e assim tendo vazões simuladas menos distantes das observadas pelas estações, o que mostra que mesmo com números acima de 0,7 em ambos os parâmetros, se houver distância nos valores volumétricos, ainda deve-se melhorar.

Mesmo com valores dos coeficientes de análise com grande erro na simulação, a aplicação da calibração automática conseguiu melhorar os resultados. Isso se deve porque o objetivo da ferramenta é o de otimizar os valores já encontrados, logo, ela não ajusta os valores conforme as características da bacia, apenas busca melhorá-los. Não sendo inferior à sua importância, pois, o grau de dificuldade para a calibração manual, é bastante complexo, principalmente para grandes áreas, isso porque, é necessário que o operador tenha conhecimentos das características da bacia de estudo, o que torna o modelo uma aplicação ainda restrita a grupos de pesquisa, e profissionais da área, que é sua principal designação.

Os resultados obtidos mostram ainda precisam de refinamento nas etapas de caracterização da bacia, ajuste temporal de preenchimento de falhas para ter 100% de série em todas as estações, e ajustes das sub-bacias com as unidades de resposta hidrológica, que foi a principal maneira de alinhar a relação da interação do ciclo hidrológico em cada ponto de medida.

Em complemento às figuras 25 a 29 apresentam os hidrogramas das estações com os principais resultados obtidos na calibração manual, e como ficaram após a aplicação da calibração automática pela ferramenta do MGB-IPH em cada resultado destas.

Figura 25 - Resultado calibração automática para a estação Passo do Sarmento

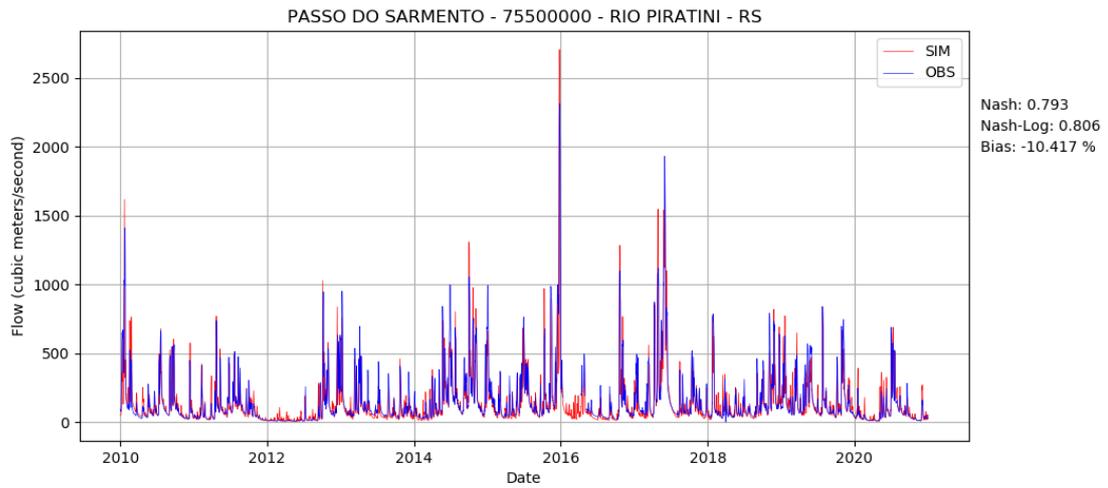


Figura 26 - Resultado calibração automática para a estação Joaçaba I

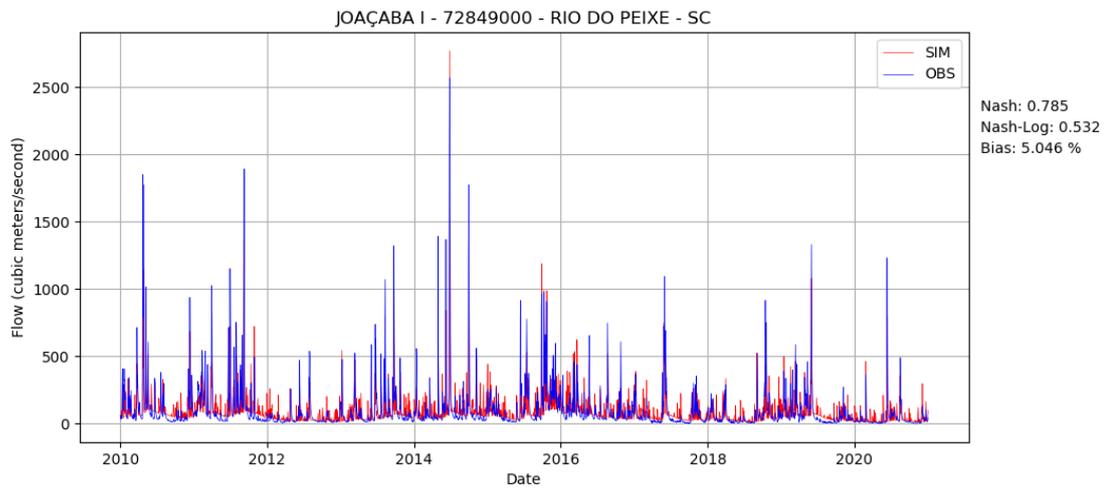


Figura 27 - Resultado calibração automática para a estação Colônia Mousquer

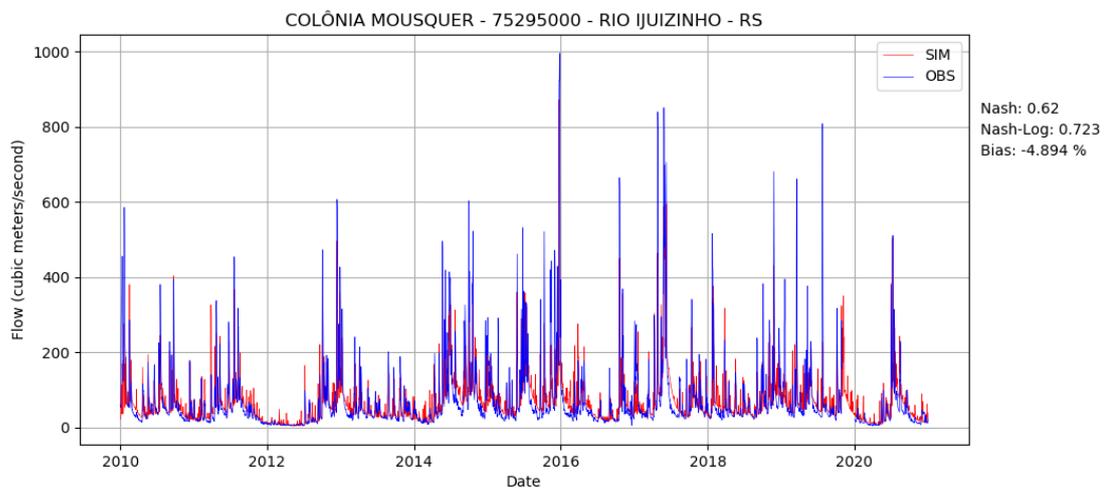


Figura 28 - Resultado calibração automática para a estação Passo São João

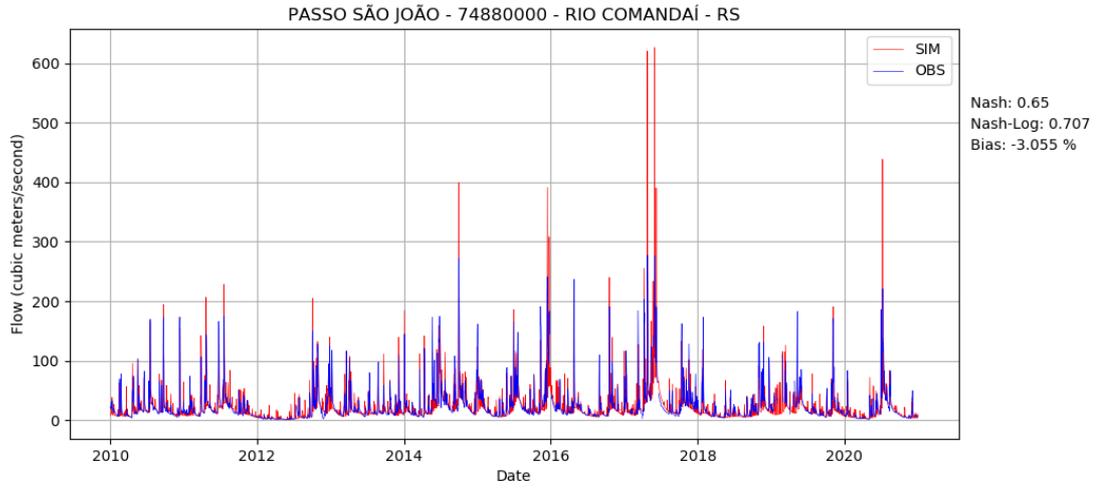
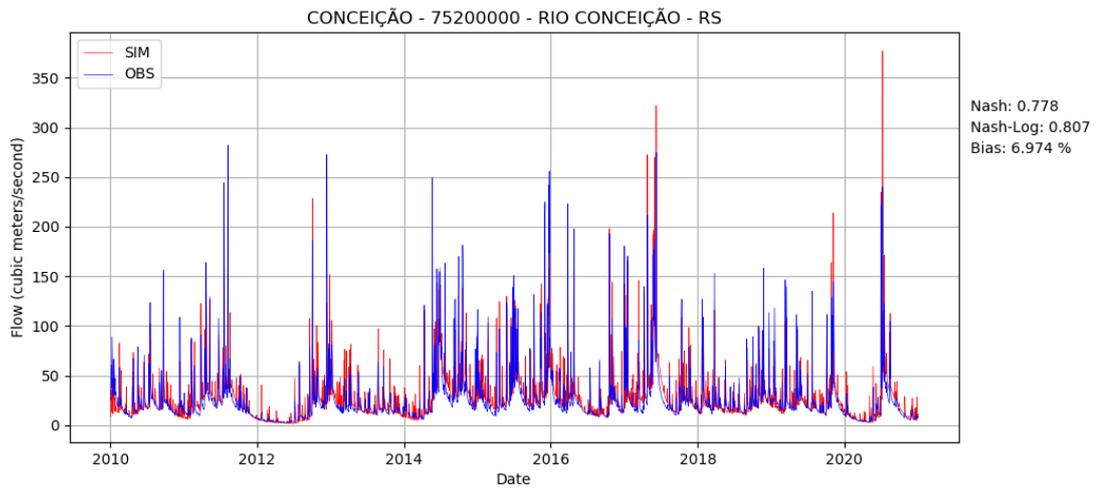


Figura 29 - Resultado calibração automática para a estação Conceição



5 CONCLUSÕES

Existem diversos modelos hidrológicos sendo utilizados, e alguns são bastante empregados em regiões específicas, como os europeus. A América do Sul, possui duas grandes opções para a maior parte de suas bacias hidrográficas, que são os modelos MGB e o SWAT, e podem aplicar outros para bacias de escalas menores, o sistema de alerta de inundações deve fazer uso destas ferramentas para prever eventos críticos e minimizar impactos de cheias.

A elaboração do banco de dados geográficos do estado do Rio Grande do Sul mostrou que a base cartográfica do estado é bem trabalhada e dispõe de acervo que permite a realização de estudos diversos, pois os dados são de fácil acesso e confiáveis, não sendo necessários dados de entidades federais ou internacionais para o desenvolvimento da pesquisa, o que ajuda em muito para aplicações em estudos futuros.

Os SIG vem sendo difundido em diversas esferas públicas e privadas, e regiões onde o acesso a essas informações são simplificadas permitem que se façam pesquisas de maior qualidade e com maiores proporções.

Ainda carece de informações mais detalhadas da hidrografia do Uruguai e da Argentina, o que é comum ao se estudar bacias transfronteiriças, já que não há um sistema de cooperação bem estruturado para compartilhamento amplo dos dados entre os países, o que reduz o alcance de sistemas de previsão, e muitas vezes, diminui sua eficácia quando as nascentes estão em países diferentes dos do local de origem do estudo.

O modelo MGB requisita que o usuário possua conhecimentos prévios para sua utilização, mas também, é necessário avaliar a porção da bacia que será estudada, e a padronização dos dados de entrada é importante, pois deve-se adequar ao formato, tornando assim, possível as edições na fonte dos arquivos e sua análise em planilhas.

A etapa da caracterização é a que necessita maior atenção, pois quaisquer dados sem a correta delimitação ou formatação, não vão possibilitar a utilização destes para o modelo, tornando assim muito mais fechada a sua empregabilidade, pois demanda conhecimentos específicos da região que se pretende estudar.

A calibração dos parâmetros é a parte mais trabalhosa quando se está aplicando o modelo em uma bacia com grande área, pois a quantidade de parâmetros para serem ajustados manualmente é grande, e a falta de uma aplicação que consiga obter parâmetros a partir da comparação das características das unidades de resposta hidrológica com os dados e solo e vegetação tornam a utilização do modelo ainda bastante massiva.

Os parâmetros mais importantes para os trechos de escoamento superficial foram os ligados a vegetação e uso do solo, e para escoamento sub-superficial e infiltração os de tipo de solo, mantendo o comportamento normal, apresentando coerência com as respostas hidrológicas para cada situação, mas sendo que nos de escoamento de base, o que tem grande variação de valores é o W_m , devido ao seu maior espectro, e o de menor variação o “b”, mas as variações de ambos, mesmo que em proporções diferentes, sempre ocasionam em grandes mudanças nos resultados finais, e se propagam para os postos posteriores, indicando a fluidez do sistema de roteamento de fluxo.

Com a calibração automática, foi possível melhorar os valores, mas não é possível ver se ocorre um direcionamento para melhorar os parâmetros, pois há apenas uma otimização, o que ainda continua na linha de sua utilização após operação dos valores para cada condição de escoamento da água na sub-bacia simulada, o que torna o dispositivo ainda limitado.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É evidente que o estudo teve respostas que se limitam apenas a averiguar a aplicação do modelo na bacia estudada, e não de fato avaliar a capacidade dos resultados ótimos que o modelo consegue chegar, se aplicado de maneira extensa, contudo, evidencia que mesmo a ferramenta com maior amplitude de capacidade, e aplicação no país, ainda é um produto que vem sendo melhorado, mas está restrito a grupos de pesquisa e profissionais qualificados e experientes, o que enaltece o objetivo do sistema.

Os estudos com modelos hidrológicos devem ser mais buscados, e se realizar pesquisas para automatização e aplicações mais modernas, que visem a utilizar tecnologias como Machine-Learning, redes neurais artificiais, bancos de dados integrados, e automações para obtenção de parâmetros que cheguem a resultados de forma menos maçante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B. Computational hydraulics – Elements of the theory of free surface flows. **Pitman Advanced Publishing Program**, London, England, 326p, 1979.
- ADAMOWSKI, J. SUN, K. Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 390, p. 85–91, 2010.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura Recursos Hídricos do Brasil 2017 Relatório pleno. **Ministério do Meio Ambiente (MMA)**, p. 169, 2017. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura_completo.caf2236b.pdf>.
- BARNEZ, B. S. Discussion on analysis of runoff characteristics by O. H. Meyer. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, Transactions of the ASABE 105, 104–106, 1940.
- BAYLEY, P. B. Understanding large river-floodplain ecosystems. **Bioscience** 45(3), 153-158, 1995.
- BOOJI, M. J. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. **Journal of Hydrology** v. 303, pp. 176–198, 2005.
- CLARK, M. P. et al. Hydrological partitioning in the critical zone: Recent advances and opportunities for developing transferable understanding of water cycle dynamics. **Water Resources Research**, p. 1–28, 2015.
- CLARK, M. J. Putting water in its place: A perspective on GIS in hydrology and water management. **Hydrological Processes**, v. 12, n. 6, p. 823-834, 1998.
- COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COLLISCHONN, W. et al. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, v. 305, n. 1-4, p. 87-98, 2005.
- CRAWFORD, N. H. LINLEY JR, R. K. **Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV**. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, Tech. Rep. N. 39, 1966.
- CUMMINGS, N. W. Evaporation from water surfaces: Status of present knowledge and need for further investigations. **Transactions of the American Geophysical Union**, 507–510, 1935.
- CUNGE, J. A. et al. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. London: Pitman Advanced Publishing Program, 420p, 1980.
- ENGEL, B. et al. A Hydrologic/Water Quality Model Applicati1 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 5, p. 1223-1236, 2007.

ESCARIÃO, R. D. et al. Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.3, p. 81-91, 2012.

ESRI. 2019. ArcGIS Desktop: Release 10.7 Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**.

FAIR, G. M. HATCH, L. P. Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand. **Journal American Water Works Association**, v. 25, p. 1551–1565, 1933.

FLEENOR, W. E. JENSEN, M. R. Evaluation of Numerical Models... HEC-RAS and DHI-MIKE 11. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003.

FAN, F. M. et al. Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. 4, 196-227, 2015a.

FAN, F. M. et al. Flood forecasting on the Tocantins river using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. 9, 278-288, 2015b.

FAN, F. M. et al. Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. **Environmental Modelling & Software**. 64, 58-71, 2015c.

FARAMARZI, M. et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 85–101, 2012.

FERRIGO, S. 2014. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática—estudo de caso da bacia do lago descoberto-DF**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.

FERRIGO, S. et al. Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para a vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural. **X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Foz do Iguaçu, p. 1-18, 2012.

FOTHERINGHAM, S.; ROGERSON, P. (Ed.). **Spatial analysis and GIS**. CRC Press, 1994.

FRANCHINI, M. et al. Forecasting discharges at the downstream end of a river reach through two simple Muskingum based procedures. **Journal of Hydrology**, v. 399, p. 335–352, 2011.

GIRI, S. et al. Evaluation of targeting methods for implementation of best management practices in the Saginaw River Watershed. **Journal of Environmental Management**, v. 103, p. 24-40, 2011.

GLAVAN, M. et al. Water quality targets and maintenance of valued landscape character e Experience in the Axe catchment, UK. **Journal of Environmental Management**, v. 103, p. 142-153, 2012.

GOODCHILD, M. HAINING, R.; WISE, S. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 6, n. 5, p. 407-423, 1992.

GREEN, W. H. AMPT, G. A. Studies on Soil Physics. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

HODGES, B. R. Challenges in continental river dynamics. **Environmental modelling & software**, v. 50, p. 16-20, 2013.

HOUBORG, R. et al. Drought indicators based on model-assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) terrestrial water storage observations. **Water Resources Research**, v. 48, n. 7, 2012.

HORTON, R. E. Rainfall interception. **Monthly Weather Review**, v. 47, n. 9, p. 603-623, 1919.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, v. 145, p. 446-460, 1933.

HOSSEINI, M. et al. Application of Soil and Water Assessment Tools Model for Runoff Estimation. **American Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 5, p. 486-494, 2011.

HU, Y. et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain. **Journal of Hydrology**, v. 393-394, p. 219-232, 2010.

HUANG, S. et al. Evaluation of an ensemble of regional hydrological models in 12 large-scale river basins worldwide. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 381-397, 2017.

JACOB, C. E. Correlation of ground-water levels and precipitation on Long Island, New York. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 24, n. 2, p. 564-573, 1943.

JACOB, C. E. Correlation of ground-water levels and precipitation on Long Island, New York. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 25, n. 6, p. 928-939, 1944.

JOHNSON, L. E. **Geographic information systems in water resources engineering**. CRC Press, 2016.

KAUFFELDT, A. et al. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 68-76, 2016.

KRYSANOVA, V., et al. Modelling climate and land use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. **Hydrological Sciences Journal**, 2014.

LAM, Q. D. et al. Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, Northern Germany. **Journal of Hydrology**, v. 438-439, p. 137-147, 2012.

LINS, R. C. A. et al. Integração de um Modelo Hidrológico a um SIG para Avaliação da Qualidade da Água na Bacia do Rio Doce. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.4, p. 171-181, 2012.

MACHADO, R. E. 2003. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, p. 154.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for Water Resources**, ESRI, Imprensa Redlands, California, United States of America, 203p, 2002.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**, McGraw-Hill, 1400p, 1993.

MAHESWARAN, R.; KHOSA, R. Wavelet–Volterra coupled model for monthly stream flow forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 450, p. 320–335, 2012.

MCDONNELL, R. A. Including the spatial dimension: using geographical information systems in hydrology. **Progress in Physical Geography**, v. 20, n. 2, p. 159-177, 1996.

MELLER, A. 2012. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MINOTI, R. T. 2006. **Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). UFSCar, São Carlos, São Paulo, p. 247.

MOORE, I. D. Hydrologic modeling and GIS. **GIS and environmental modeling: Progress and research issues**, p. 143-148, 1996.

MOORE, R. J. et al. Forecasting for Flood Warning. *Comptes Rendus Geoscience - External Geophysics*, **Climate and Environment** 337, 203-217, 2005.

NASA. Constellation Partners. **NASA Website**, 2015. Disponível em <<https://pmm.nasa.gov/GPM/constellation-partners>>.

OGDEN, F. L. et al. GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 6, p. 515-523, 2001.

PANAGOPOULOS, Y. et al. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. **Ecological Modelling**, v. 222, p. 3500– 3512, 2011.

PAIVA, R. C. D. et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.

PAIVA, R. C. D. et al. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, 406, 170–181, 2011a.

PAIVA, R. C. D. 2013. Hydrologie du bassin amazonien: compréhension et prévision fondées sur la modélisation hydrologique-hydrodynamique et la télédétection. Tese de Doutorado. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

PAZ, A. R., et al. Large-Scale Hydrodynamic Modeling of a Complex River Network and Floodplains. **Journal of Hydrologic Engineering** 15, 2, 152–165, 2010.

PAZ, A. R. 2010. **Simulação Hidrológica de Rios com Grandes Planícies de Inundação**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Porto Alegre.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PERRIM, J. et al. Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. **Journal of Hydrology**, v. 460-461, p. 143–155, 2012.

PITMAN, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 23, n. 5, p. 479-510, 2003.

PISINARAS, V. et al. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). **Desalination** v. 250, pp. 274–286, 2010.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Conservação de Volume em Modelos Simplificados de Propagação de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 83-96, 2012.

POSTEL, S. RICHTER, B.D. **Rivers for Life: Managing Water for People and Nature**. Island Press, Washington DC, 2003.

PULS, L. G. Flood regulation of the Tennessee River. **In Proceedings of the 70th Congress**, 1st Session, House Document 185, Part 2, Appendix B, 1928.

RYU, J. H. et al. The impacts of climate change on local hydrology and low flow frequency in the Geum River Basin, Korea. **Hydrological Processes** v. 25, p. 3437–3447, 2011.

SINGH, V. P. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, v. 5, n. 1, p. 1-18, 2018.

SINGH, V. P. WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.

SINGH, V. P. FIORENTINO, M. (Eds.). **Geographical Information Systems in Hydrology**. Water Science and Technology Library, 1996.

SHERMAN, L. K. Stream flow from rainfall by the unit graph method. **Engineering News-Record**, v.108, p. 501–505, 1932.

SHI, Z. H. et al. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China. **Journal of Hydrology**, 438-439, pp. 156–167, 2012.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) 1972. Supplement A, Section 4, Chapter 10, Hydrology. **National engineering handbook**, USDA, Washington, D.C.

SUI, D. Z. MAGGIO R. C. Integrating GIS with Hydrological Modeling: Practices, Problems, and Prospects. **Computers, Environment and Urban Systems**, 23: 33 – 51, 1999.

THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. **Transactions American Geophysical Union**, v. 16, p. 519–524, 1935.

THIELEN, J. et al. The European flood alert system—part 1: concept and development. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 2, p. 125-140, 2009.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geography review, v. 38, p. 55–94, 1948.

TODINI, E. Rainfall-runoff modeling—Past, present and future. **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1-3, p. 341-352, 1988.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4), 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 669, 1998.

TUCCI, C. E. M. et al. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, 2003.

VISSMAN, JR. W. LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. Fifth Edition. Pearson Education, Inc. p. 612, 2002.

WHITEAKER, T. L. et al. **Integrating Arc Hydro Features with a Schematic Network**. Transactions in GIS, 10(2): 219-237, 2006.

WMO. The Dublin Statement and Report of the Conference. **International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st Century**. 26-31, Dublin, Ireland, 1992.

WOOD, Andrew W. et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. ACL 6-1-ACL 6-15, 2002.

WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P.; ZARTARIAN, V. G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D3, p. 2717–2728, 1992.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br