

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Milene Priebe e Silva

**MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-
HORÁRIA NO BIOMA PAMPA: NANOBACIA NA ESTAÇÃO
EXPERIMENTAL NA UFSM**

Santa Maria, RS
2020

Milene Priebe e Silva

MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA NO BIOMA PAMPA: NANOBAZIA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL NA UFSM

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Cabral Cruz

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Silva, Milene Priebe e
Monitoramento e modelagem hidrológica sub-horária no
Bioma Pampa: nanobacia na estação experimental na UFSM /
Milene Priebe e Silva.- 2020.
72 p.; 30 cm

Orientador: Rafael Cabral Cruz
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2020

1. Bioma Pampa 2. Pecuária 3. Modelagem Hidrológica 4.
Monitoramento I. Cruz, Rafael Cabral II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

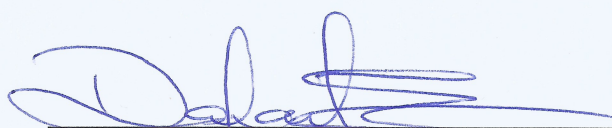
Declaro, MILENE PRIEBE E SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Milene Priebe e Silva

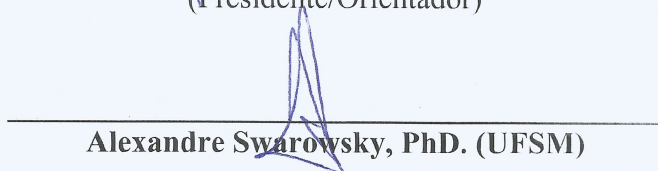
MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA NO BIOMA PAMPA: NANOBACIA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL NA UFSM

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Aprovado em 02 de março de 2020:



Rafael Cabral Cruz, Dr. (UFSM/UNIPAMPA)
(Presidente/Orientador)



Alexandre Swarowsky, PhD. (UFSM)



André Carlos Cruz Copetti, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por nunca me abandonar. Ele é bom o tempo todo!

A minha família, especialmente meu pai e minha irmã, que sempre me apoiam com todo amor.

Ao meu orientador, professor Rafael, por todo ensinamento e dedicação.

Ao Leonardo, pela paciência, apoio técnico e parceria nas visitas de campo.

Ao professor Alexandre Swarowsky que me ajudou diversas vezes, e seus alunos, Marcelo e Gabriel, que me auxiliaram em campo.

À professora Débora Roberti e ao pessoal do Departamento de Física da UFSM pelo fornecimento de dados.

Ao professor João Francisco Horn pelo empréstimo dos dataloggers.

À banca examinadora.

Aos amigos antigos e aos que fiz durante o mestrado.

À Juliana, da secretaria do curso, por buscar soluções para as minhas dúvidas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA NO BIOMA PAMPA: NANOBACIA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL NA UFSM

AUTORA: Milene Priebe e Silva

ORIENTADOR: Rafael Cabral Cruz

Conhecer o ciclo hidrológico é essencial para compreender as mudanças decorrentes de alterações no uso da terra, e, também, para auxiliar na melhor gestão dos recursos hídricos. Estes estudos costumam ser realizados em escala de bacia hidrográfica, podendo ser subdivididas em sub-bacias ou microbacias, que permitem caracterizar e identificar mais facilmente o local de interesse. Neste trabalho, adotou-se o termo nanobacia para diferenciar a área de estudo, de apenas 5,88 ha. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi contribuir para a geração de dados sobre a dimensão hidrológica dos serviços ecossistêmicos do campo nativo sob pecuária extensiva, através da instrumentação de uma bacia no Bioma Pampa, e utilizar os dados do monitoramento no modelo SWAT. A metodologia foi realizada por etapas, sendo a primeira a obtenção dos dados para inserção no banco de dados do SWAT, através da instrumentação da nanobacia, posteriormente, foram selecionados os eventos para a inserção no modelo e então realizadas as análises de sensibilidade, calibração e validação, por fim procederam-se as análises gráficas e estatísticas. Os resultados são apresentados em forma de uma nota técnica e um artigo, sendo o primeiro abordando as dificuldades encontradas durante o monitoramento, como níveis negativos, obstrução e extravasamento da estrutura medidora de vazão, fato que dificultou a obtenção de uma série contínua de dados; e o artigo discutindo o comportamento hidrológico na nanobacia e os resultados do teste utilizando o SWAT com a calibração de eventos. Para o artigo, foram selecionados 10 eventos de chuva, sendo 5 para calibração e 5 para validação. Na calibração, 3 eventos demonstraram resultados satisfatórios, porém na validação os resultados foram insatisfatórios, possivelmente por não haver informações das condições antecedentes de umidade do solo e porque o SWAT é um modelo contínuo. Ainda assim, os eventos selecionados caracterizaram muito bem o comportamento hidrológico na nanobacia, demonstrando períodos de vazões mínimas e de vazões máximas, além de seu comportamento intermitente. Ainda foi possível entender que esta área de campo nativo é fortemente influenciada pelo escoamento lateral, fato que pode estar relacionado ao horizonte B textural da área de estudo. Sugere-se a continuidade do monitoramento, a qual permitirá que novos testes sejam realizados e mais trabalhos possam ser desenvolvidos buscando subsidiar o processo de tomada de decisão referente às políticas de manejo no Bioma Pampa e auxiliar nas discussões quanto à disponibilidade hídrica em bacias tão pequenas.

Palavras-chave: Bioma Pampa. Pecuária. Modelagem Hidrológica. Monitoramento.

ABSTRACT

SUB-HOURLY MONITORING AND HYDROLOGICAL MODELING IN THE PAMPA BIOME: NANOBASIN AT THE EXPERIMENTAL STATION AT UFSM

AUTHOR: Milene Priebe e Silva

ADVISOR: Rafael Cabral Cruz

Knowing the hydrological cycle is essential to understand the changes resulting from changes in land use and also to assist in better management of water resources. These studies are usually carried out on a basin scale, and can be subdivided into sub-basins or microbasins, which allow to more easily characterize and identify the place of interest. In this work, the term nanobasin was adopted, to differentiate the study area, of only 5,88 ha. Thus, the main objective of this work was to contribute to the generation of data on the hydrological dimension of ecosystem services in the native grassland under extensive livestock, through the instrumentation of a basin in the Pampa Biome, and to use the monitoring data in the SWAT model. The methodology was carried out in stages, the first being obtaining the data for insertion in the SWAT database, through the instrumentation of the nanobasin and selecting the events. Subsequently, sensitivity, calibration and validation analyzes were performed, and finally, graphic and statistical analyzes were performed. The results are presented in the form of a technical note and an article, the first addressing the difficulties encountered during monitoring, such as negative levels, obstruction and overflow of the flow-measuring structure, a fact that made it difficult to obtain a continuous series of data; and the article discussing the hydrological behavior in the nanobasin and the test results using SWAT with event calibration. For the article, 10 rain events were selected, 5 for calibration and 5 for validation. In the calibration, 3 events demonstrated satisfactory results, but in the validation the results were unsatisfactory, possibly because there is no information on the previous conditions of soil moisture and because the SWAT is a continuous model. Even so, the selected events characterized the hydrological behavior in the nanobasin very well, showing periods of minimum and maximum flows, in addition to their intermittent behavior. this area of native grassland is strongly influenced by lateral flow, a fact that may be related to the textural horizon B of the study area. It is suggested to continue monitoring, which will allow new tests to be carried out, and more work can be developed seeking to support the decision-making process regarding management policies in the Pampa Biome and assist in discussions regarding water availability in basins as small.

Keywords: Pampa Biome. Livestock. Hydrological Modeling. Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Figura 3.1 – Nanobacia de estudo	27
Figura 3.2 – Perfil de solo na área experimental da UFSM	28

CAPÍTULO 4 - O DESAFIO DE OBTER DADOS HIDROLÓGICOS EM NANOBIACIAS

Figura 4.1 – Nanobacia de estudo	36
Figura 4.2 – (a) Implantação da Calha Parshall, (b) poço comunicante com sensor de nível, (c) barologger e (d) régua graduada em centímetros	37
Figura 4.3 – Dados negativos registrados em (a) 11/03/2019 e (b) 20/04/2019.....	38
Figura 4.4 – Nível marcado na Calha Parshall na nanobacia em 02/11/2019 às 13h30min	39
Figura 4.5 – Hidrogramas representado os níveis em (a) 30/06/2019 e 01/07/2019 e (b) 14/10/2019.....	41
Figura 4.6 – Evento de 17 de outubro às 18h30min em que a calha foi extrapolada.....	42
Figura 4.7 – Hidrograma da Calha Parshall extrapolada.....	42

CAPÍTULO 5 - MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA EM UMA NANOBIACIA DE CAMPO NATIVO

Figura 5.1 – Nanobacia de estudo	49
Figura 5.2 – Canal principal da nanobacia	55
Figura 5.3 – Hidrogramas dos eventos de calibração (a) 22/05 a 23/05/2019, (b) 31/08/2019, (c) 14/10/2019, (d)16/10/2019, (e) 20/10 a 21/10/2019; e validação (f) 05/05/2019 (g) 21/05/2019, (h) 27/05 a 28/05/2019 (i) 07/09/2019 e (j) 29/10/2019.....	59

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 2.1 – Classificação de qualidade da simulação da vazão em escala mensal.....22

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Tabela 3.1 – Características físico-hídricas da nanobacia.....29

CAPÍTULO 4 - O DESAFIO DE OBTER DADOS HIDROLÓGICOS EM NANOBIACIAS

Tabela 4.1 - Nível na Calha Parshall obstruída40

CAPÍTULO 5 - MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA EM UMA NANOBIACIA DE CAMPO NATIVO

Tabela 5.1 – Dados de solo.....50

Tabela 5.2 – Eventos selecionados para calibração e validação do modelo.....52

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros calibrados para cada evento54

Tabela 5.4 – Resultados das estatísticas.....57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
ANION_EXCL	Porosidade do solo em uma dada camada
ARS/USDA	<i>Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture</i>
CANMX	Quantidade máxima de água da chuva interceptada pela vegetação plenamente desenvolvida, disponível para evaporar sem atingir o solo (mm)
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning
CN2	Curva Número para a condição de umidade antecedente II
ENS	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea (dias)
GWQMN	Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência de fluxo de base (mm)
GW_REVAP	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a zona não saturada
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
HRU_SLP	Média da declividade de cada HRU ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)
HYDGRP	Grupos de saturação (A, B, C ou D)
LAT_TTIME	Tempo do escoamento lateral (dias)
MDE	Modelo digital de elevação
NLAYERS	Número de camadas o perfil do solo
PAST	Código usado para indicar uso do solo do tipo pastagem
PBIAS	Porcentagem bias (%)
Qobs	Vazão observada ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
Qsim	Vazão simulada ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer o revap ou percolação (mm)
R2	Coefficiente de determinação
SNAM	Classe de solo
SLSUBBSN	Comprimento de rampa médio para a sub-bacia (m)
SOL_ALB	Albedo em uma dada camada do solo
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_BD	Densidade aparente em uma dada camada do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

SOL_CBN	Carbono orgânico em uma dada camada do solo (%)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm.h^{-1})
SOL_Z	profundidade da camada de solo (mm)
SOL_ZMX	Profundidade máxima da raiz (mm)
SURLAG	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (h)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
USLE_K	Fator de erodibilidade K da equação de USLE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1.	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	BIOMA PAMPA	16
2.2	USO DO SOLO E HIDROLOGIA	17
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	18
2.3.1	Soil & Water Assessment Tool (SWAT).....	19
2.3.1.1	<i>Equacionamentos.....</i>	20
2.3.1.2	<i>Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação do modelo.....</i>	21
2.3.2	Pesquisas a nível mundial	22
2.3.3	Pesquisas a nível nacional	24
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.2	DADOS DE ENTRADA NO SWAT	29
3.2.1	Modelo Digital de Elevação (MDE).....	30
3.2.2	Classes de solo	30
3.2.3	Uso e ocupação	30
3.2.4	Séries históricas de dados meteorológicos e vazão.....	31
3.3	SIMULAÇÃO SUB-DIÁRIA DO MODELO SWAT	31
3.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	32
4	O DESAFIO DE OBTER DADOS HIDROLÓGICOS EM NANOBCIAS	33
4.1	INTRODUÇÃO	34
4.2	METODOLOGIA.....	35
4.2.1	Área de estudo.....	35
4.2.2	Coleta de dados de vazão	36
4.2.3	Análise e comparação de resultados	37
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
	REFERÊNCIAS	44

5	MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA EM UMA NANOBAZIA DE CAMPO NATIVO	47
5.1	INTRODUÇÃO	48
5.2	METODOLOGIA	49
5.2.1	Área de estudo	49
5.2.2	Modelo digital de elevação	49
5.2.3	Classes de solo	50
5.2.4	Classes de uso e ocupação do solo	50
5.2.5	Dados climatológicos e de vazão	51
5.2.6	Análise dos eventos de precipitação	51
5.2.7	Simulação sub-diária com o SWAT	52
5.2.8	Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo	53
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO GERAL

A ação do ser humano acerca do uso do solo pode ocasionar alterações nos processos hidrológicos terrestres, afetando em maior ou menor grau o uso dos recursos hídricos (TUCCI, 2002), que, somada à supressão vegetal, pode aumentar os picos de vazão, alterando a infiltração e diminuindo a evaporação, modificando o regime de um curso d'água, produzindo elevados picos de vazão durante o período chuvoso e baixos valores no período seco (BRUIJNZEEL, 1990). O Bioma Pampa, no Brasil, está localizado na porção sul e oeste do estado do Rio Grande do Sul, e tem significativa importância na conservação da biodiversidade (BINKOWSKI, 2009). Porém, a realidade encontrada neste Estado é de progressiva conversão de áreas de campo nativo em áreas agrícolas, descaracterizando o Bioma Pampa, que está cada vez mais ameaçado por estas práticas (BENCKE, 2006; CRUZ; GUADANIN, 2010).

Apenas cerca de 35% da área do Rio Grande do Sul tem solos classificados como aptos para culturas anuais intensivas, sendo a manutenção dos campos com pecuária a melhor opção de uso sustentável para produção de alimentos, com ganho de peso vivo até três vezes maior apenas com o manejo adequado da forragem, sem utilizar nenhum insumo além do conhecimento técnico (NABINGER et al., 2009). Assim, um campo nativo bem manejado pode ser benéfico tanto para a produção de biomassa e carne quanto na conservação do bioma e dos recursos hídricos, pois, de acordo com Nabinger et al. (2009), níveis adequados de forragem e o pastejo menos intenso permitem que a pastagem mantenha mais folhas, realize mais fotossíntese e cresça mais, evitando a erosão e melhorando as condições do solo através da deposição de material senescente, que aumenta a disponibilidade de nutrientes e de matéria orgânica, refletindo em maior capacidade de infiltração e de armazenamento de água.

Para compreender os fenômenos do ciclo hidrológico (precipitação, evaporação, infiltração e escoamento subterrâneo e superficial) tem-se, cada vez mais, desenvolvido modelos hidrológicos (SILVA, 2007), os quais permitem o entendimento do ciclo em escala de bacia hidrográfica e fatores que podem interferir no balanço hídrico. Na área ambiental, estes modelos estão em crescente uso, pois facilitam a compreensão causada pelas mudanças no uso da terra e preveem alterações futuras nos ecossistemas (RENNÓ; SOARES, 2000).

Os modelos são representações de um sistema (TUCCI, 2005) e a qualidade do modelo está relacionada à qualidade dos dados de entrada, os quais, muitas vezes, podem ser insuficientes, apresentar falhas ou até mesmo erros, isto quando se considera uma bacia monitorada, mas os problemas podem ser ainda maiores em pequenas bacias, que,

comumente, não têm medições. Por isso, é preciso ser criativo na elaboração de metodologias que possam responder aos objetivos do pesquisador.

O modelo SWAT possibilita realizar diversas simulações, como de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e bactérias, químicos agrícolas e aspectos de qualidade da água (NEITSCH et al., 2011), mas que tem se mostrado vantajoso pela capacidade de modelar os impactos relativos às mudanças nas práticas de manejo, clima e vegetação (GASSMAN et al., 2007).

No contexto deste problema, foi desenvolvido o projeto NEXUS-Pampa (PILLAR, 2017) para gerar dados sobre os serviços ecossistêmicos de diferentes usos da terra no bioma Pampa, incluindo segurança hídrica, alimentar e energética. O projeto visa assessorar a construção de políticas públicas relacionadas ao atendimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, da agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (provisão de água de boa qualidade-ODS 6, alimentos-ODS 2, sustentabilidade-ODS 15, menor uso de energia-ODS 7, melhoria de renda para as comunidades rurais e o desenvolvimento regional inclusivo e sustentável-ODS 1 e 8; MRE, 2019). Em nível nacional, o projeto almeja contribuir para a definição de critérios para as autorizações de supressão de vegetação nativa campestre (BRASIL, 2012b) e diretrizes para definição de zoneamento ecológico-econômico (BRASIL, 2002a).

Assim sendo, a presente pesquisa foi elaborada visando contribuir com a geração de dados sobre a dimensão hidrológica dos serviços ecossistêmicos do campo nativo sob pecuária extensiva, através da instrumentação de uma bacia, denominada nanobacia, que é composta de 100% campo nativo bem manejado e utilizada para produção pecuária, e utilizar os dados do monitoramento no modelo SWAT. A dissertação será apresentada, sequencialmente, pelos objetivos do trabalho, uma revisão bibliográfica dos temas pertinentes à pesquisa, como o Bioma Pampa, o uso do solo e a hidrologia, modelagem hidrológica e o modelo SWAT, a metodologia utilizada para elaboração da dissertação, e os resultados serão apresentados em forma de uma nota técnica e um artigo, o primeiro tratando do monitoramento hidrológico na nanobacia e as dificuldades encontradas na produção de dados confiáveis, e o segundo abordando a hidrologia da área de estudo e utilização do modelo SWAT com a calibração de eventos, finalmente, será realizada uma discussão integrada dos resultados obtidos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade do monitoramento com dados sub-horários, em uma nanobacia no Bioma Pampa, para compreender se a dinâmica do ciclo hidrológico em campo nativo pode ser representada através de eventos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Instrumentar uma nanobacia;
- Produzir dados hidrológicos;
- Testar o uso do SWAT para representação de eventos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BIOMA PAMPA

As regiões campestres situadas nos estados do Sul do Brasil, Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR), fazem parte de dois biomas, os campos da metade sul e oeste do RS, inseridos no Bioma Pampa, e a vegetação campestre do Planalto Sul-Brasileiro, na porção norte do RS e nos estados de SC e PR, que fazem parte do bioma Mata Atlântica (OVERBECK et al., 2015). O Bioma Pampa, no Brasil, localiza-se no estado do Rio Grande do Sul, ocupando uma área de 176.496 km² (IBGE, 2004), apresentando continuidade no território uruguaio e argentino (BOLDRINI et al., 2010).

O Pampa apresenta um papel significativo na conservação da biodiversidade, pois apresenta riqueza de flora e fauna ainda pouco pesquisadas (BINKOWSKI, 2009), ocorrência de mais de 2150 espécies de plantas (BOLDRINI et al., 2015), além de um número significativo de espécies de animais e plantas endêmicas (BENCKE, 2006).

Conforme Boldrini (2010), em razão da riqueza das condições geológicas e geomorfológicas do Bioma Pampa, encontram-se muitas classes de solo, dentre as quais pode-se citar os Neossolos, Latossolos, Gleissolos, Planossolos, Argissolos, Vertissolos e Chernossolos.

Os campos são as paisagens predominantes no Rio Grande do Sul, mais do que isso, são determinantes na economia e cultura desse povo (BOLDRINI et al., 2010). O Bioma Pampa era, basicamente, de atividade pecuária, mas foi a partir dos anos 1960, com a introdução da soja no norte do Estado e a sua expansão para o Sul, que o Pampa gaúcho teve suas atividades ligadas à agricultura, essencialmente, monoculturas de trigo e soja (VERDUM, 2006) e mais recentemente, a introdução da silvicultura extensiva no sul do estado (BENCKE, 2006; CRUZ; GUADANIN, 2010),

Cruz e Guadanin (2010) relatam quatro grandes ciclos de transformações ambientais ocorridas no Bioma Pampa, iniciando pela chegada do ser humano, após, a chegada do europeu com a introdução do gado e a adoção da agricultura industrial e, por fim, as mudanças climáticas induzidas pelas atividades humanas, sendo a paisagem atual resultado da coevolução entre o bioma e a cultura do gaúcho.

Hasenack (2006) realizou o mapeamento da cobertura vegetal deste bioma e constatou que cerca de 59% já foi modificado ou sofreu algum tipo de alteração. Estas áreas alteradas

devem ser observadas quanto à compatibilidade de uso enquanto as áreas intactas deverão ser conservadas (SILVA, 2012).

Como consequência das alterações ocorridas no Bioma Pampa, tem-se a desvalorização das áreas de campos, dizimando as tradições seculares, o que demonstra a importância da conservação deste bioma para manter o cenário característico de campos de pecuária a qual identifica a cultura gaúcha (BENCKE, 2006; CRUZ; GUADANIN, 2010). Por isso, torna-se importante conhecer a relação entre a hidrologia e o uso do solo.

2.2 USO DO SOLO E HIDROLOGIA

O uso do solo pode alterar os processos hidrológicos terrestres, interferindo nas vazões dos rios (TUCCI, 2002). As atividades humanas, como práticas agrícolas inadequadas, sobrecarga de animais, superutilização com culturas anuais e desmatamento, têm potencial de degradar a terra, o que conflita com os usos naturais e pode causar mudanças no balanço e fluxos dos ecossistemas pré-existentes (DALMOLIN; TEM CATEN, 2012).

No Bioma Pampa, passou a ser comum a conversão dos campos, tradicionalmente usados para a pecuária, em áreas de agricultura e, recentemente, a silvicultura passou a integrar as paisagens desta região (BENCKE, 2006; CRUZ; GUADANIN, 2010).

Os ganhos proporcionados pelo comércio internacional da soja e de outros grãos se sobrepuseram aos problemas socioambientais, acarretando em perda das características naturais da paisagem e da biodiversidade do Bioma Pampa, contaminação de solos e águas e, também, aumento da erosão (ZARTH; GERHARDT, 2009), os sedimentos, fertilizantes e agroquímicos causam assoreamento e poluição na rede hidrográfica, diminuindo a seção dos leitos dos rios e aumentando os riscos de cheias, comprometendo a perenidade dos cursos de água (SANTOS et al., 2010).

Já as conversões de áreas de campo nativo em lavouras arbóreas diminuem a disponibilidade de água no ambiente, reduzindo e até perdendo riachos e outros reservatórios hídricos, pois a interceptação da água das chuvas e as altas taxas de transpiração vegetal são típicas de cultivos como o eucalipto (SANTOS e TREVISAN, 2009).

Sabe-se da importância de manter e, também, de aumentar a produtividade das terras, mas deve-se respeitar os limites que a natureza impõe, e ter o cuidado com a preservação do solo e da água através do manejo adequado e da conservação dos recursos naturais (DALMOLIN; TEM CATEN, 2012), pois áreas submetidas ao manejo com o uso do fogo, máquinas agrícolas pesadas ou pisoteio intenso estão sujeitas a apresentar problemas nas

características físicas de seus solos, interferindo na retenção e na movimentação de água no solo (LEPSH, 2011).

As bacias florestadas são muito bem documentadas e se sabe que influenciam fortemente nas vazões através dos processos de infiltração, interceptação e transpiração vegetal (FARLEY et al., 2005; VAN DIJK; KEENAN, 2007; SANTOS; TREVISAN, 2009; BAUMHARDT, 2010; REICHERT et al. 2017), enquanto a hidrologia em áreas de campo nativo bem manejado é incipiente. Reichert et al. (2017) encontraram melhores condições estruturais e de cobertura do solo, maior infiltração e retenção de água no solo e maior recarga de água subterrânea em uma bacia com plantação de eucalipto quando comparada a uma bacia com pastagem degradada, porém ressaltam que estes resultados podem mudar quando as pastagens apresentam melhores propriedades físico-hídricas. Por isso, enfatiza-se, novamente, a importância de compreender as áreas de campo nativo bem manejadas no Bioma Pampa, sob aspectos hidrológicos e ecológicos, para a conservação deste bioma, e, para tal, utilizam-se modelos hidrológicos.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O conceito de modelo, para Tucci (2005) é “a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”. Ainda de acordo com o autor, os modelos hidrológicos são utilizados para representar processos que ocorrem na natureza, buscando entender as condições em que o meio está sujeito, e assim buscar propostas de mitigar possíveis impactos, auxiliando no planejamento e tomada de decisões na gestão de recursos hídricos.

Até meados da década de 60, a modelagem hidrológica envolvia apenas conceitos, teorias e modelos de componentes individuais do ciclo hidrológico, a partir daí, com a revolução digital (ocorrida nos anos 60), tornou-se possível a integração dos diferentes componentes deste ciclo (SINGH; WOOLHISER, 2002).

O modelo *Stanford Watershed Model* (SWM), desenvolvido por Crawford e Lindsley em 1966 (hoje, *Hydrological Simulation Program-Fortran*), talvez tenha sido a primeira tentativa de modelar virtualmente todo o ciclo hidrológico, simultaneamente, surgiram modelos como o de Dawdy e O’Donnel (1965) e Hydrologic Engineering Center HEC-1 (1968) (SINGH; WOOLHISER, 2002). Atualmente, existem outros modelos hidrológicos, dentre os de base física, cita-se como exemplo o *Topography-based hydrological Model*

(TOPMODEL) (BEVEN; KIRKBY, 1979), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998) e o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

A classificação dos modelos é realizada sob diferentes aspectos, sintetizado por Lima (2010), como: o tipo de variáveis utilizadas (estocásticos ou determinísticos), as relações entre estas variáveis (empíricas ou conceituais), a representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência de relações espaciais (concentrado ou distribuído) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Com a gama de modelos hidrológicos disponíveis, a escolha do modelo deve ser de acordo com o objetivo do estudo, sendo o mais adequado aquele que apresenta resultados mais próximos da realidade (DEVIA et al., 2015).

Dentre os modelos hidrológicos existentes, o SWAT vem se destacando, sendo amplamente utilizado em todo o mundo, provando que auxilia na gestão eficaz das bacias hidrográficas e no desenvolvimento de decisões políticas mais bem informadas (GASSMAN et al., 2007), e o Brasil, por conta de sua extensão e aptidão agrícola, pode ser considerado um “campo de testes” para o modelo SWAT, tornando-se uma alternativa interessante para se trabalhar com a simulação de diferentes cenários de uso do solo nas bacias hidrográficas brasileiras (CARVALHO, 2014).

2.3.1 Soil & Water Assessment Tool (SWAT)

O SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA), na década de 90, com o intuito de prever os impactos de práticas de manejo e uso do solo na água e a produção de sedimentos e aplicação de agroquímicos em bacias hidrográficas complexas com variados tipos de solos e condições de uso da terra (NEITSCH et al., 2011).

De acordo com Garrido (2003), o SWAT é um modelo de simulação matemática contínuo, em razão dos fenômenos ocorrerem continuamente no tempo; semidistribuído, já que as variáveis e parâmetros dependem do espaço ou do tempo; determinístico, pois as chances de ocorrência de um dado valor seguem uma lei definida e não a lei da probabilidade; e semiconceitual, porque são relacionados às características físicas dos processos, embora ainda apresentem parâmetros empíricos nas equações envolvidas.

O modelo é capaz de realizar simulações contínuas em escala de bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 1998). Inicialmente, foi desenvolvido para aplicação em mesoescala, mas se

mostra eficiente para a representação de diferentes processos físicos em escala de pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas (MITSUYA et al., 2015).

O SWAT permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a análise de diversos cenários, mas, para entender qualquer acontecimento na bacia, é fundamental que o ciclo hidrológico simulado pelo modelo esteja de acordo com o que acontece no local de estudo (NEITSCH et al., 2011).

A modelagem se inicia com a divisão da bacia em sub-bacias e estas em unidades de respostas hidrológicas (HRU), que têm em comum o tipo e uso do solo, além de uma única classe de declividade. É em nível de HRU que a maior parte das equações que descrevem os processos físicos são resolvidas pelo modelo (BENAMAN et al., 2005).

2.3.1.1 Equacionamentos

Para a simulação hidrológica da bacia hidrográfica, o SWAT possui duas divisões principais, a fase terrestre e a fase de propagação do ciclo hidrológico, que serão abordados de acordo com Neitsch et al. (2011).

A fase terrestre controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e descarga de pesticidas transportada de cada sub-bacia até o canal principal, e é baseada na equação do balanço hídrico (Eq. 2.1).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

SW_t é o armazenamento final da água no solo (mm);

SW_0 é o armazenamento inicial da água no solo no dia i (mm);

t é o tempo (dias);

R_d é a precipitação no dia i (mm);

Q_{sup} é o escoamento superficial no dia i (mm);

E_a é a evapotranspiração no dia i (mm);

W_{seep} é a percolação no dia i (mm);

Q_{gw} é o fluxo de retorno no dia i (mm).

Nesta fase, o SWAT necessita de dados específicos de clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do uso da terra ocorrentes na bacia.

O SWAT fornece os métodos de Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial. Quanto ao escoamento superficial são fornecidos o método Curva Número (CN) que requer dados de precipitação diários, e o método de infiltração Green & Ampt para dados sub-diários. O SWAT é um modelo contínuo projetado para simulações em escala diária. Jeong et al. (2010) propuseram a capacidade de simular processos hidrológicos em escala sub-horária.

A fase propagação do ciclo hidrológico se inicia após a o modelo determinar os acúmulos de água, sedimentos, nutrientes e descarga de pesticidas para o canal principal, os quais são encaminhados através da rede de curso de água da bacia hidrográfica até a descarga. Os métodos fornecidos para a propagação do escoamento são o método de propagação de Muskingum e o método de propagação por armazenamento variável.

2.3.1.2 Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação do modelo

A análise do desempenho do modelo reflete a confiabilidade dos dados e envolve análises de sensibilidade, calibração e validação. A análise de sensibilidade permite conhecer o grau de sensibilidade que a função resposta tem com relação à mudança nos parâmetros (TUCCI, 2005). A calibração é o ajuste dos parâmetros do modelo utilizando uma série de dados hidrológicos representativos de um período de interesse, enquanto a validação verifica os parâmetros ajustados em um período diferente do utilizado na calibração (PERAZZOLI et al., 2013).

A fase de calibração dos parâmetros exige que o usuário tenha entendimento do comportamento do modelo, dos parâmetros e da qualidade e representatividade dos dados utilizados (PEREIRA, 2013), garantindo que os parâmetros de entrada do modelo sejam mantidos dentro de uma faixa de incerteza realista, o que é fundamental (ARNOLD et al., 2012a).

Moriasi et al. (2007) constataram a inexistência de uma orientação abrangente para facilitar a avaliação dos modelos e, por isso, realizaram uma revisão minuciosa sobre este tema. Os autores recomendam a análise visual dos resultados e, além de hidrogramas e curvas de permanência, as estatísticas quantitativas do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS), viés percentual (PBIAS) e a razão entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados medidos (RSR). Uma tabela foi proposta para avaliar as estatísticas da simulação da vazão em escala mensal (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Classificação de qualidade da simulação da vazão em escala mensal

Classificação	RSR	ENS	PBIAS (%)
Muito bom	$0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$0,75 < \text{ENS} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$	$0,65 < \text{ENS} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < \text{RSR} \leq 0,7$	$0,5 < \text{ENS} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfatório	$\text{RSR} > 0,7$	$\text{ENS} \leq 0,5$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al. (2007)

Ainda conforme Moriasi et al. (2007), quando os modelos hidrológicos são avaliados na escala diária os limites podem ser menos rigorosos do que na escala de tempos maiores. Bonumá et al. (2013) adotaram $\text{ENS} > 0,50$, $\text{RSR} \leq 0,70$, e $\text{PBIAS} \pm 25\%$ e Oliveira (2014) adotou $\text{ENS} \geq 0,4$, $\text{RSR} \leq 0,70$, e $\text{PBIAS} \leq \pm 25\%$ como padrões aceitáveis para simulação de vazão diária. Jeong et al. (2010) considera que ENS acima de 0,65 para escala diária é considerado bom, mas em escala sub-diária os valores podem ser ainda menos exigentes. Jeong et al. (2010) e Maharjan et al. (2013) utilizaram também o R², que descreve a proporção da variação nos resíduos e varia de 0 a 1, sendo 1 o valor ideal.

2.3.2 Pesquisas a nível mundial

As aplicações do SWAT se expandiram mundialmente, sendo impulsionadas por projetos de várias agências governamentais, principalmente dos EUA e União Europeia (GASSMAN et al., 2007). O modelo tem diversas pesquisas de suas aplicações e técnicas de calibração/validação (ARNOLD et al., 1998; SRINIVASAN et al., 1998; GASSMAN et al., 2007; ARNOLD et al., 2012a), mas apresenta uma grande limitação, pois em alguns locais há escassez de parâmetros regionais para compor o banco de dados do modelo (LELIS; CALIJURI, 2010).

Srinivasan et al. (1997) buscaram entender a dinâmica do ecossistema de toda a bacia do Rio Grande/Rio Bravo, fronteira entre Estados Unidos e México. Os autores destacaram a necessidade de criar um banco de dados de solo para o México, já que o utilizado no SWAT se refere aos Estados Unidos. Este banco de dados contou com alguns parâmetros estimados, pois o lado mexicano contava apenas com informações básicas da pedologia. As medidas de vazão também foram um desafio, pois os dados existentes eram apenas do lado norte-

americano. Mesmo com as dificuldades relacionadas à disponibilidade de dados, foi possível realizar uma análise hidrológica geral da bacia.

Govender e Everson (2005) selecionaram duas bacias experimentais, de 0.667 km² e 1.949 km², para avaliar a capacidade de simular áreas de pastagem e de crescimento florestal no modelo SWAT, na África do Sul. Os autores relatam resultados de simulação de vazões relativamente fortes para a bacia de pastagem, no entanto, o modelo não foi capaz de simular adequadamente o crescimento do *Pinus patula*, pois o modelo não contabilizou as taxas de evapotranspiração aumentadas em plantios maduros, constatando uma limitação para simular florestas com as condições climáticas da África do Sul.

Apesar das dificuldades, o SWAT vem sendo aplicado em vários países, como Peru (FRANCESCONI et al., 2018), Chile (STEHR et al., 2009; STEHR et al., 2010), Malásia (ALANSI et al., 2009), Irã (GHAFFARI et al., 2010), África do Sul (THAVHANA et al., 2018), Índia (VENKATESH et al., 2018) e Grécia (KOUTALAKIS et al., 2017).

No entanto, é pouco aplicada em escala sub-diária (MAHARJAN et al. 2013; SHANNAK 2017; BRIGHENTI et al. 2019). Alguns autores, dentre outros, que testaram o método de infiltração de Green e Ampt são: King et al (1999), Jeong et al. (2010), Kannan et al. (2007), Bauwe et al. (2016), Yang et al. (2016), Bauwe et al (2017), Boithias et al (2017), Shannak (2017) e Campbell et al. (2018) calibrando em escala diária ou sub-diária, porém, para a calibração por eventos de precipitação, foram encontrados os trabalhos de Di Luzio e Arnold (2004), Maharjan et al. (2013) e Yu et al. (2018).

Yu et al (2018) calibraram o modelo SWAT em escala diária e também com 24 eventos em escala sub-diária, para uma bacia de 30630 km². Além disso, os autores consideraram a heterogeneidade de cada sub-bacia com diferentes valores para os parâmetros dos hidrogramas unitários triangulares quando o SWAT, originalmente, atribui, para cada sub-bacia, o mesmo valor. O desempenho das simulações foi aceitável.

Di Luzio e Arnold (2004) estudaram uma bacia de 1233 km², simularam a vazão horária e compararam com dados medidos de 24 eventos. Os resultados foram bons para alguns eventos, sendo a maioria dos eventos de escoamento médio e alto melhor simulados.

Apenas Maharjan et al. (2013) estudaram uma bacia menor, com área de 0,8 ha e realizaram as simulações com 18 eventos de chuva, divididos entre calibração e validação. Obtiveram ENS e R2 satisfatórios e destacaram que com a validação adequada do escoamento previsto pelo SWAT sub-diário, a partir de uma nanobacia do tamanho de um campo, é possível garantir a precisão de uma bacia hidrográfica maior.

2.3.3 Pesquisas a nível nacional

Muitos trabalhos foram realizados para avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT em bacias brasileiras. Garbossa et al. (2011) identificaram, entre 1999-2010, 60 casos de estudos sobre vazão, sedimentos e nutrientes, aplicada para vários tamanhos de bacias, condições topográficas e diferentes regiões climáticas no Brasil, apresentando, em sua maioria, resultados satisfatórios, mesmo com as dificuldades encontradas na aquisição de dados. Destaca-se que apesar de o modelo ser capaz de simular a produção de sedimentos, transporte de pesticidas e qualidade da água, serão abordados, nesta pesquisa, apenas os trabalhos realizados com foco no estudo dos processos hidrológicos.

Durães et al. (2011) simularam o comportamento hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, de 10200 km², em Minas Gerais, sob diferentes usos e ocupação do solo propostos no Relatório Parcial do Plano Diretor da Bacia do Rio Paraopeba. Os autores encontraram ENS superior a 0,7 para as fases de calibração e validação e puderam simular cenários de uso do solo e prever alterações nas vazões ao longo do tempo.

Salles (2012) simulou, de forma satisfatória, as vazões médias mensais da bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau, de 235 km², no Distrito Federal. Os valores ENS e PBIAS foram de 0,67 e -6,7% para a calibração e de 0,79 e -21,49 para a validação.

Bonumá et al. (2013), encontraram falhas na simulação não calibrada ao descrever o balanço hídrico da bacia Arroio do Lino, de 4,8 km², localizada em Agudo-RS, mas nos períodos de calibração e validação do modelo obtiveram ENS de 0,87 e 0,76, respectivamente, e R²=0,9, para vazões mensais. Os autores conseguiram produzir estimativas adequadas dos diferentes componentes do ciclo hidrológico, com destaque as perdas por evapotranspiração, que chegaram a 41% da precipitação anual.

Castro (2013) avaliou a aplicabilidade do SWAT na bacia do Alto Rio Jardim, Distrito Federal, com área de 105 km² e um grande volume de dados monitorados. A calibração foi realizada para dados diários, apresentando ENS e R² de 0,60 e 0,66, respectivamente, satisfatórios para a calibração diária, enquanto na fase de validação os valores de ENS e R² foram -0,8 e 0,66, não sendo considerados bons resultados.

Pereira et al. (2014) calibraram e validaram, numa escala de tempo diária, o modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Córrego do Galo, de 943 km², no estado de Espírito Santo. Os valores de ENS e PBIAS na calibração e validação, respectivamente, foram de 0,65 e 7,2% e 0,70 e 14,1%, indicando desempenho satisfatório do modelo. Além disso, os autores conseguiram simular adequadamente as vazões mínimas diárias anuais e as vazões de

referência para outorga Q90 e Q95, porém, na simulação das vazões máximas diárias anuais não obtiveram bons resultados.

Fukunaga et al. (2015) destacam que o SWAT proporcionou resultados satisfatórios para a simulação de vazões diárias na bacia do rio Itapemirim, de 2237 km², no Espírito Santo, com ENS=0,75 e PBIAS=11% na calibração e ENS=0,67 e PBIAS=22% na validação, mas observaram que, após a fase de calibração, o SWAT forneceu melhores resultados para vazões mínimas e médias do que os picos de vazão.

Ferreira e Uagoda (2017) analisaram o desempenho do SWAT na predição do balanço hídrico na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF. Os autores consideraram que não conseguiram simular a vazão da bacia estudada de forma satisfatória sem a etapa de calibração. Após a calibração do modelo foi possível representar as vazões diárias de forma satisfatória, com ENS=0,53 e R²=0,63, e na fase de validação alcançaram os índices de desempenho de ENS=0,57 e R²=0,74. Apesar dos bons resultados, os autores ressaltam que um bom índice de calibração não indica necessariamente que o modelo está adequado, sendo necessário conhecer a realidade da bacia para não forçar um resultado positivo que gere um balanço hídrico equivocado.

Não foram encontrados resultados satisfatórios no Brasil para a simulação sem a fase de calibração, os parâmetros do SWAT precisam ser ajustados neste processo para alcançar bons resultados. Os parâmetros de maior sensibilidade encontrados nas pesquisas citadas foram: CN2 (SALLES, 2012; BONUMÁ et al., 2013; PEREIRA et al., 2014; FUKUNAGA et al., 2015), RCHRG_DP (SALLES, 2012), SOL_K (CASTRO, 2013), ALPHA_BF (BONUMÁ et al., 2013; CASTRO, 2013; PEREIRA et al., 2014), SURLAG (CASTRO, 2013), ESCO (BONUMÁ et al., 2013; FERREIRA; UAGODA, 2017; FUKUNAGA et al., 2015), GW_DELAY (FERREIRA; UAGODA, 2017), GWQMN (FUKUNAGA et al., 2015), SOL_AWC (FERREIRA; UAGODA, 2017), CH_N2 (PEREIRA et al., 2014).

Há uma grande quantidade de trabalhos realizados no Brasil utilizando o SWAT, porém, poucos utilizando o método de infiltração de Green e Ampt. Alguns trabalhos encontrados foram: Bressiani (2016), Brighenti et al. (2017), Iensen e Santos (2017) e Sari (2017), mas nenhum desses utilizou a calibração por eventos, proposta nessa pesquisa.

Bressiani (2016) tinha o objetivo de desenvolver um novo módulo para permitir a calibração automática de vazão no intervalo de tempo de hora no SWAT-CUP, para isso, utilizou em suas simulações entradas horárias de precipitação em uma bacia de 12600 km², localizada na região sudeste. Os resultados para calibração e validação de modelagem horária foram considerados satisfatórios.

Brighenti et al. (2017) realizaram uma análise de sensibilidade global para entrada de dados de chuva com resolução temporal de 10, 30 e 60 minutos e um dia, em Santa Catarina. Os autores encontraram um conjunto de seis parâmetros que são sempre sensíveis (CN2, CH_K2, CH_N2, CH_L2, GW_DELAY e GWQMN).

Sari (2017) utilizou dados de chuva horária para entrada no modelo, na bacia do Taboão, de 78 km², no Rio Grande do Sul. A autora utilizou para a calibração do modelo dados de vazão diária e mensal, encontrando resultados para ENS acima de 0,6, tanto na calibração quanto validação do modelo para a simulação dos processos hidrológicos.

Iensen e Santos (2017) simularam o escoamento de uma bacia de 0,1 km², em Santa Catarina, em base sub-diária (precipitação no intervalo de 60 minutos) e diária, com ENS de 0,70 e PBIAS -2,79 e ENS de 0,72 e PBIAS 0,80, para calibração sub-diária e diária, respectivamente. A validação não foi realizada.

O trabalho realizado por Brighenti et al. (2019) relata que a escala sub-diária ainda não foi totalmente explorada e que a disponibilidade de dados em alta resolução e contínuos é a maior dificuldade encontrada para simulação nesta escala.

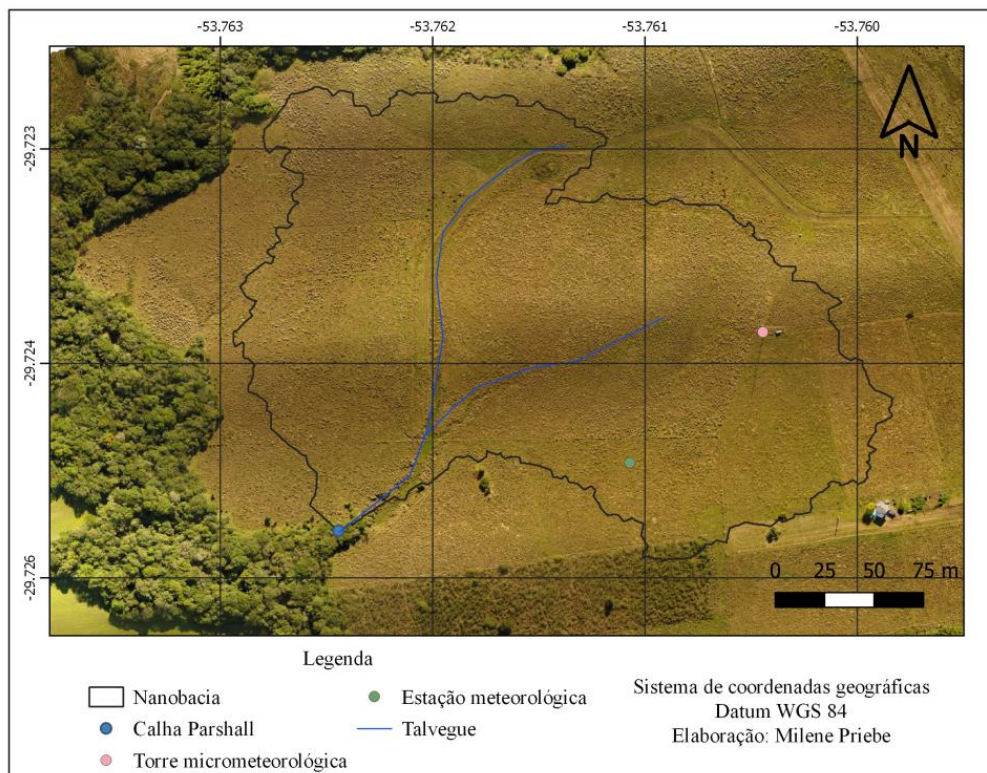
3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo pertence à Estação Experimental do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada na Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente no município de Santa Maria. A área experimental possui 22,5 ha no total e os experimentos são conduzidos em área de pastagem natural, a qual nunca apresentou indícios de preparo de solo para fins agrícolas, e foi utilizada, historicamente, como internada para cria e recria de bovinos de corte (QUADROS; PILLAR, 2001).

A partir do conhecimento da área através das visitas de campo, foi delimitada uma bacia, que em função de seu tamanho é denominada nanobacia. Seu exutório foi escolhido de forma que o uso do solo fosse 100% campo nativo, facilitando a compreensão dos processos hidrológicos que ocorrem na área. A área de estudo está apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Nanobacia de estudo



A nanobacia, de 5,88 ha pertence à bacia hidrográfica dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e possui escoamento intermitente. A declividade é predominantemente suave ondulada (3 a 8%), com desnível de 8m.

O solo da área experimental pertence à Formação Santa Maria (QUADROS; PILLAR, 2001) e é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (STRECK et al., 2008). Os Argissolos apresentam uma sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C e, tipicamente, perfil com um gradiente textural onde o horizonte B é mais argiloso, o que o faz menos permeável (STRECK et al., 2008), são de profundidade variável, desde bem drenados a imperfeitamente drenados (EMBRAPA, 2013), sendo as cores vermelho e vermelho-amarelas indicadoras de boa drenagem (STRECK et al., 2008).

As análises de solo foram realizadas até a profundidade de 1450 mm, sendo identificados 4 horizontes (A-AB-Bt-C), conforme ilustrado na Figura 3.2. As propriedades físico-hídricas do solo são apresentadas na Tabela 3.1. A textura do solo no primeiro horizonte foi dominada pela areia (45%), seguida pelo silte (36,55 %) e argila (18,45 %), no horizonte AB houve aumento da argila (21%) e um decréscimo da areia (41,2%), no horizonte Bt encontra-se o predomínio da argila (39,4%) e no horizonte C, silte (47,6%). A condutividade hidráulica saturada variou de 13,8 a 80 mm.h⁻¹, com valores mais baixos ocorrendo no horizonte Bt.

Figura 3.2 – Perfil de solo na área experimental da UFSM

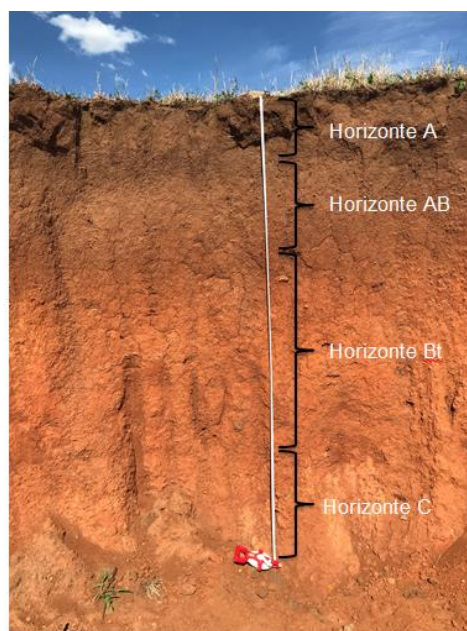


Tabela 3.1 – Características físico-hídricas da nanobacia

Propriedades	Camadas do solo			
	A	AB	Bt	C
Profundidade (mm)	100	250	1100	1450
Areia (%)	45,00	41,20	28,00	25,50
Silte (%)	36,55	37,80	32,60	47,60
Argila (%)	18,45	21,00	39,40	26,90
Condutividade hidráulica saturada (mm.h ⁻¹)	80	24,65	13,8	47,02

Fonte: Dados disponibilizados pelo Laboratório de Micrometeorologia do Departamento de Física da UFSM

O clima da região de estudo é classificado, conforme Köppen, como Cfa (subtropical úmido), com temperatura média anual de entre 17,9 e 19,2 °C, e precipitação média anual variando de 1.400 a 1.760 mm, sendo bem distribuída ao longo do ano (KÖNIG et al., 2002).

3.2 DADOS DE ENTRADA NO SWAT

Para inserção dos dados necessita-se de uma interface gráfica de um software de Sistema de Informações Geográficas (GIS). Neste estudo foi utilizado o QGIS 2.6.1, pois é um software livre e gratuito, com a extensão QSWAT 1.5.

Com o QSWAT, um novo projeto é criado, o qual conta com 4 componentes principais: 1) delineamento das bacias hidrográficas, 2) criação de Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), 3) abertura do Editor SWAT para completar a preparação de dados de entrada e executar o SWAT e 4) visualização dos resultados (DILE et al., 2016).

O SWAT possui um banco de dados próprio, desenvolvido para os Estados Unidos (DILE et al., 2018), que difere das características encontradas no Brasil, principalmente no que se refere aos dados pedológicos. Dessa forma, foi desenvolvido um banco de dados para a área de estudo. Os dados de entrada exigidos pelo modelo são mapas de uso e ocupação do solo, tipo de solo e tabelas de pesquisa associadas, o modelo digital de elevação (MDE), e dados tabulares de precipitação (mm), temperaturas máximas e mínimas do ar (°C), velocidade do vento (m.s⁻¹), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (MJ.m²) (DILE et al., 2016), que serão descritos a seguir.

3.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O delineamento da bacia é realizado a partir do MDE fornecido e do ponto do exutório, o SWAT processa a área e formato da bacia, delimitação dos cursos d'água, divisão em sub-bacias, declividade, direção do fluxo e pontos de acumulação de água (CARVALHO, 2014). O MDE utilizado foi elaborado a partir de um levantamento aéreo com um drone DJI Phantom 4, com pixel de 30 cm x 30 cm.

3.2.2 Classes de solo

O mapa do tipo de solo foi construído com base nas informações do solo da área. Além do mapa, o SWAT requer uma série de parâmetros físicos e hidrológicos para a caracterização de solos, apresentados no Quadro 3.1, conforme a entrada exigida pelo modelo.

Quadro 3.1 – Parâmetros utilizados para caracterização do solo

Parâmetro	Descrição
SNAM	Classe de solo
NLAYERS	Número de camadas
HYDGRP	Grupo hidrológico (A, B, C e D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima de alcance da raiz (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (decimal)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g.cm^{-3})
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água do solo (mm.mm^{-1})
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm.hr^{-1})
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico (% peso do solo)
CLAY	Porcentagem de argila (%)
SILT	Porcentagem de silte (%)
SAND	Porcentagem de areia (%)
ROCK	Porcentagem de cascalho (%)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal)
USLE_K	Fator de erodibilidade K da equação de USLE

Fonte: Arnold et al. (2012b)

3.2.3 Uso e ocupação

O mapa de uso e ocupação do solo foi obtido a partir do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS), sendo a totalidade da área de

formação campestre. Além deste mapa, o SWAT exige uma tabela associada ao uso, neste estudo a área é de campo nativo de uso para pecuária, assim, o código utilizado foi “PAST”.

3.2.4 Séries históricas de dados meteorológicos e vazão

A área de estudo não contava com monitoramento de vazões anteriores a realização desta pesquisa, assim, foi necessário implantar uma estrutura hidráulica medidora de vazão. A estrutura adotada foi uma Calha Parshall de fundo liso de 1’’ com poço comunicante, onde foi instalado um sensor automático de medição de nível da água para coleta no intervalo de 10 minutos.

A partir da cota de 22,5 cm a vazão da calha é extrapolada, sendo necessária a obtenção de novas medições através de um micromolinete. Em função da dificuldade de monitorar todos os eventos extrapolados e disponibilidade do equipamento, foi considerado que a vazão extrapolada é de $115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Em maio de 2019, uma estação meteorológica foi instalada na área de estudo, assim foram obtidos os dados de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar.

Para a entrada destes dados no modelo, foram criados arquivos em formato **txt*. Os arquivos de precipitação foram confeccionados no intervalo de tempo de 30 minutos e os demais em escala diária, conforme exigido pelo modelo para simulação sub-diária (ARNOLD et al., 2012b).

3.3 SIMULAÇÃO SUB-DIÁRIA DO MODELO SWAT

Com o banco de dados completo foi iniciada a simulação do modelo, partindo do delineamento da bacia que foi realizado de forma automática a partir do MDE e da drenagem da área (opção *burn in*).

Posteriormente, na criação de unidades de resposta hidrológica, foram inseridos os mapas de uso e ocupação e tipo de solo, com suas respectivas tabelas. Em função da homogeneidade da bacia de estudo, optou-se pela não geração de sub-bacias e geração de unidades de resposta hidrológica baseada no critério de HRU dominante.

Para determinação do escoamento superficial foi utilizado o método de infiltração de Green & Ampt, o qual assume que o perfil do solo é homogêneo e a umidade antecedente é uniformemente distribuída no perfil e requer dados sub-diários de precipitação (GREEN &

AMPT, 1911 apud NEITSCH et al., 2011), para isso a entrada de dados de precipitação foi no intervalo de tempo de 30 minutos, marcando a opção a *sub-daily*, enquanto os demais dados foram em escala diária. Além disso, foi necessário modificar os arquivos *file.cio* e **.bsn*, permitindo a simulação sub-diária, conforme explicitado por Maharjan et al. (2013), os arquivos de saída foram gerados no intervalo de tempo de 30 minutos em formato **.txt* e posteriormente transferidos para o Excel 2010.

A evapotranspiração potencial foi calculada através do método de Penman-Monteith devido à disponibilidade de dados climáticos, e a propagação no canal foi simulada pelo método do armazenamento variável.

3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo foram realizadas de forma manual e os parâmetros escolhidos foram baseados na literatura (JEONG et al., 2010; MAHARJAN et al., 2013; BAUWE et al., 2017; SHANNAK, 2017), sendo eles: LAT_TTIME, SOL_K, SOL_BD, ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_N2, GWQMN, GW_REVAP, CANMX, SURLAG, REVAPMN, ESCO, CN2.

A sensibilidade foi realizada variando um parâmetro enquanto todos os outros eram mantidos fixos, e somente os parâmetros mais sensíveis baseados na variação do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe foram selecionados para o processo de calibração dos eventos, o qual contou apenas com a técnica de substituição direta. Após a calibração dos eventos foi efetuada a média de cada parâmetro para realização da validação.

As análises estatísticas utilizadas para verificar o desempenho do modelo foram Nash-Sutcliffe (ENS) e PBIAS, indicados por Moriasi et al. (2007), e R2 que foi utilizado por Jeong et al. (2010) e Maharjan et al. (2013) em simulação sub-diária. Para Jeong et al. (2010), o ENS diário superior a 0,65 é considerado bom, podendo encontrar valores ser mais baixos para resultados sub-diários, enquanto para o R2, que descreve a proporção da variação nos resíduos e varia de 0 a 1, tem melhores resultados a medida que o valor se aproxima de 1. Já PBIAS, de acordo com Moriasi et al. (2007), é classificado como “muito bom” quando $PBIAS < \pm 10$, “bom” para $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$, “satisfatório” para $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ e “insatisfatório” para $PBIAS \geq \pm 25$. Neste trabalho são considerados valores aceitáveis para a simulação com ENS superior a 0,5, $PBIAS \pm 25\%$ e R2 acima de 0,5.

4 O DESAFIO DE OBTER DADOS HIDROLÓGICOS EM NANOBACIAS

RESUMO

O monitoramento hidrológico é fundamental para o entendimento da hidrologia, mas a instrumentação de bacias hidrográficas pode ser trabalhosa e custosa, sobretudo se não houver literatura abrangente das dificuldades que serão encontradas durante as visitas de campo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a acuracidade de medições de vazões em escala sub-horária em uma nanobacia de campo nativo, localizada no Bioma Pampa e relatar as dificuldades encontradas durante o monitoramento. Para isso, uma nanobacia de 5,88 hectares foi instrumentada com uma calha Parshall e uma estação meteorológica, permitindo a obtenção dos dados para análise. Foram encontrados problemas durante o monitoramento como níveis negativos, obstrução e extravasamento da estrutura medidora de vazão. Apesar das dificuldades relatadas, foram encontradas soluções para garantir a qualidade dos dados, e, por isso, os eventos foram bem reproduzidos e mostraram a realidade da nanobacia de estudo, mas ainda assim são necessários equipamentos mais precisos para medição contínua em áreas tão pequenas.

Palavras-chave: Bioma Pampa. Monitoramento. Calha Parshall.

THE CHALLENGE OF PRODUCING HYDROLOGICAL DATA IN NANOBASINS

ABSTRACT

Hydrological monitoring is essential to understand hydrology, but river basin instrumentation can be laborious and costly, especially if there is no comprehensive literature on the difficulties that will be encountered during field visits. Therefore, the objective of this work was to evaluate the accuracy of flow measurements on a sub-hourly scale in a native grassland nanobasin, located in the Pampa Biome, and to report the difficulties encountered during the monitoring. For this, a 5,88 hectares nanobasin was instrumented with a Parshall flume and a meteorological station, allowing data to be obtained for analysis. Problems were encountered during monitoring such as negative levels, obstruction and overflow. Despite the reported difficulties, solutions were found to guarantee the quality of the data, and, therefore, the events were well reproduced and showed the reality of the study nanobasin, but even more accurate equipment is needed for continuous measurement in such small areas.

Keywords: Pampa Biome. Monitoring. Parshall flume.

4.1 INTRODUÇÃO

Conhecer o comportamento hidrológico de pequenas bacias é fundamental devido às rápidas respostas aos eventos de chuva que estas áreas têm e porque são nestas áreas que a adoção de práticas de manejo e conservação do solo são mais facilmente implementadas. Estas medidas podem melhorar a produtividade das pequenas propriedades, além disso, permitem a participação dos produtores rurais e auxiliam no entendimento da hidrologia através do estudo de pequenas bacias.

O termo microbacia é amplamente utilizado, porém, não há um limite bem definido destas áreas e nem um consenso em sua conceituação (BOTELHO, 2009). São encontradas com esta nomenclatura áreas de 5.973 ha (MACHADO E VETTORAZZI, 2003); 856,16 ha, 233,8 ha, 24 ha, 21 ha, 14,8 ha, 10,6 ha e 8,2 ha (LOPES, 2008); 21 ha e 92 ha (BAUMHARDT, 2010); 93 ha, 78 ha e 58 ha (NÓBREGA et al. 2015). Em função de não haver um entendimento sobre o tamanho destas bacias, chamaremos de nanobacias aquelas com área de drenagem menor que 20 ha como forma de diferenciar as áreas estudadas.

Áreas tão pequenas, muitas vezes também chamadas de bacias experimentais, precisam de monitoramento contínuo, pelo menos de precipitação e vazão (LOPES, 2008), além de todo um entendimento da área, com visitas em campo, escolha do exutório, estrutura hidráulica medidora de vazão e disponibilidade de recursos e pessoal que auxilie no monitoramento da área. Mota et al. (2016) trabalharam em uma bacia experimental florestal e relataram que são encontradas dificuldades que muitas vezes não são descritas na literatura e, ainda, ressaltaram a necessidade de mais detalhes sobre a prática em campo e as dificuldades que serão encontradas enquanto uma bacia é instrumentada.

Estudar uma nanobacia pode ser muito trabalhoso, sobretudo se não houver literatura indicando possíveis dificuldades a serem enfrentadas em diferentes áreas de estudo. Entendendo a importância de estudar processos hidrológicos e ecológicos em pequenas bacias, cita-se como exemplo os remanescentes do Bioma Pampa, localizado na porção sul e oeste do Rio Grande do Sul, que resultante das conversões de áreas de campo em áreas de soja e eucalipto (VERDUM, 2006; BENCKE, 2006; CRUZ e GUADANIN, 2010), hoje se encontra fragmentado, o que justifica a escolha de uma nanobacia para realização da pesquisa, composta das características e peculiaridades deste Bioma.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a acuracidade de medições de vazões em escala sub-horária em uma nanobacia de campo nativo, localizada no Bioma Pampa e relatar

as dificuldades encontradas durante o monitoramento, colaborando com a literatura e com pesquisadores que necessitem instrumentar outras áreas.

4.2 METODOLOGIA

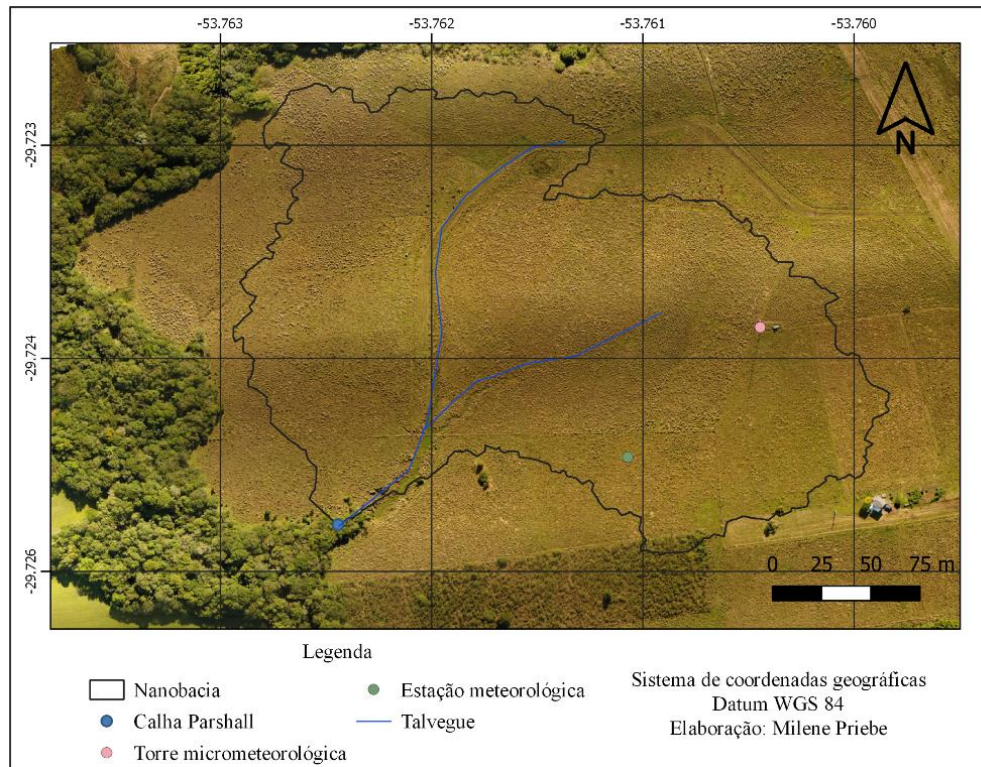
4.2.1 Área de estudo

A área de estudo pertence à Estação Experimental do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada na Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente no município de Santa Maria. A nanobacia de estudo possui 5,88 ha de área e é coberta de pastagem natural (Figura 4.1), a qual nunca apresentou indícios de preparo de solo para fins agrícolas, e foi utilizada, historicamente, como internada para cria e recria de bovinos de corte (QUADROS e PILLAR, 2001).

A partir do conhecimento da área, através das visitas de campo, foi delimitada uma bacia que, em função de seu tamanho, é denominada nanobacia. Seu exutório foi escolhido de forma que o uso do solo fosse 100% campo nativo, facilitando a compreensão dos processos hidrológicos que ocorrem na área.

Inicialmente, o local não era instrumentado, contava apenas com uma torre micrometeorológica que foi instalada pela equipe do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM, através do projeto SULFLUX (2019). Para obtenção dos dados meteorológicos foi instalada uma estação meteorológica em maio de 2019, por isso, dados de chuva anteriores a esta data são oriundos da estação do INMET localizada em Santa Maria-RS.

Figura 4.1 – Nanobacia de estudo



Fonte: Autora

4.2.2 Coleta de dados de vazão

A área de estudo não contava com monitoramento de vazões anteriores a realização desta pesquisa, assim, foi necessário implantar uma estrutura hidráulica medidora de vazão. A estrutura adotada foi uma Calha Parshall de fundo liso de 1'' com poço comunicante, devido a disponibilidade do material e facilidade de sua implantação. Além disso, a bacia de estudo apresenta, na maior parte do tempo, vazões tão baixas que são possíveis de medir através de sua curva-chave.

A Calha Parshall com poço tranquilizante (Figura 4.2-a) foi implantada em março de 2019 após as observações em campo para escolha do exutório. A delimitação da bacia ocorreu de forma que toda a área pertencesse ao mesmo uso do solo, campo nativo utilizado para pecuária.

A medição do nível da água ocorre desde março de 2019 na escala de tempo de 10 minutos, para isso foi instalado um sensor de nível no poço comunicante (Figura 4.2-b), que fornece a pressão absoluta e um sensor de pressão, instalado próximo a Calha Parshall, que

fornece a pressão atmosférica (Figura 4.2-c). A compensação da pressão é realizada através do *software Levelogger 4.4.0*, que fornece o nível medido na Calha Parshall. Além dos sensores e da régua de vazões, foi necessário fixar, também, uma régua graduada em centímetros para que fosse realizada a verificação do nível em campo (Figura 4.2-d).

Figura 4.2 – (a) Implantação da Calha Parshall, (b) poço comunicante com sensor de nível, (c) barologger e (d) régua graduada em centímetros



Fonte: Autora

Durante as chuvas mais intensas, em que a curva-chave foi extrapolada, foi utilizado um micromolinete para verificar a vazão extravasada. Esta medição foi realizada apenas uma vez e foi considerada para todas as extrapolações. A metodologia de medição segue o descrito em Santos et al. (2001).

4.2.3 Análise e comparação de resultados

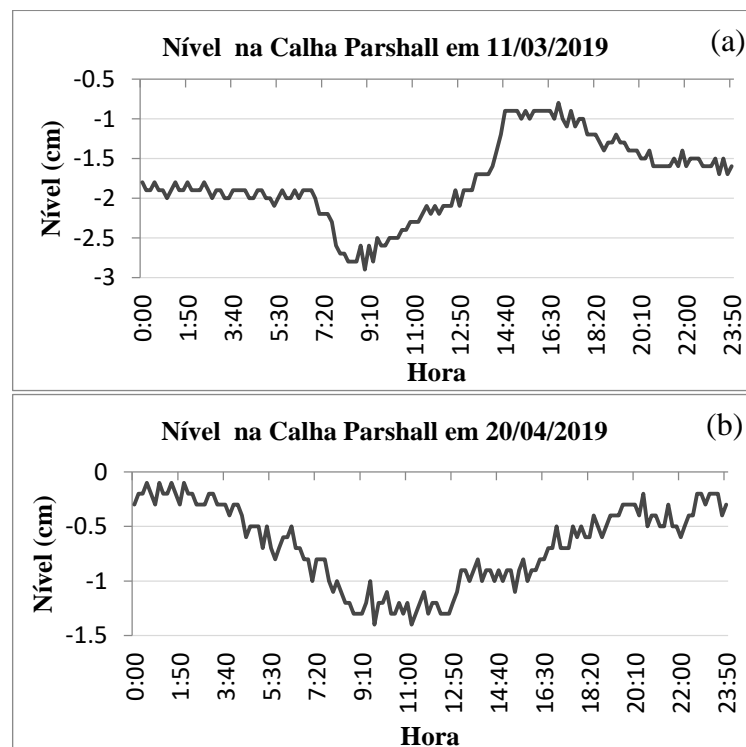
Foram selecionados eventos que contavam as medições citadas, principalmente

aqueles que continham erros, para que se pudesse fazer uma análise qualitativa dos dados obtidos.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o monitoramento na nanobacia foram encontradas diversas dificuldades, a primeira delas relacionada ao nível obtido após a compensação da pressão, que resultou em níveis negativos. Foram selecionados 2 dias em que o nível medido na calha variou negativamente, desde às 0h até 23h50min (Figura 4.3). Dia 11 de março não choveu, mas sabe-se que havia água na calha, mesmo que em nível muito baixo, pois nos dias anteriores (8 e 9 de março) foram 31,6 mm de chuva. O mesmo ocorreu em 20 de abril, que somou 26 mm nos dias 15, 16 e 17 de março. O nível no talvegue é mantido durante dias sem chuva e a vazão se torna nula apenas em épocas de estiagem, que não foi o ocorrido na data.

Figura 4.3 – Dados negativos registrados em (a) 11/03/2019 e (b) 20/04/2019



Fonte: Autora

Depois de constatar estes problemas nas medições, uma régua graduada em centímetros foi instalada para que se pudessem fazer observações no local. Em 08 de

setembro de 2019 decidiu-se alterar o nível do levellogger de forma que este ficasse afogado, mantendo sempre um nível de pelo menos 5,5 cm para verificar se as vazões mínimas, a partir de então, seriam detectadas. Além disso, as observações na régua passaram a ser mais frequentes com o objetivo de verificar se os níveis mais altos registrados no levellogger correspondiam aos níveis observados em campo. Percebe-se que até a ideia de modificar o nível do levellogger surgir, passaram-se alguns meses.

A Figura 4.4 ilustra que o problema permaneceu, pois o nível marcado, já compensando com o barologger, foi de -0,1, às 13h30min do dia 02 de novembro de 2019, mas a imagem, de mesma data e hora, mostra que havia vazão, mesmo que baixa.

Figura 4.4 – Nível marcado na Calha Parshall na nanobacia em 02/11/2019 às 13h30min



Fonte: Autora

Uma possível causa para este erro pode ser a compensação da pressão absoluta com a pressão atmosférica medida no barologger. Apesar de a pressão atmosférica ser medida a 1 metro do local onde a calha foi instalada, qualquer variação pode ser suficiente para que esta compensação torne o nível negativo, por isso, aconselha-se a manter o barologger o mais próximo possível do local de medição do nível. Além disso, o equipamento utilizado para estas medições, apesar de indicado também para água superficial, é comumente utilizado para medição de nível em poços de monitoramento, onde normalmente a coluna de água é maior quando comparada com a coluna existente na calha nos eventos de vazões mínimas do local de estudo.

Outro problema encontrado, em função do tamanho do estreitamento da calha, foi a obstrução causada por folhas e galhos, o que também foi relatado por Mota et al. (2016), em

um vertedor, e pode ser facilmente identificada na Tabela 4.1. Até às 15h40min do dia 25 de agosto de 2019 foi mantido um nível na calha, na coleta de dados procedeu-se com a limpeza e no mesmo momento o nível passou a diminuir, em função disso, após cada evento de chuva intensa era necessária a visita na nanobacia para que este tipo de problema não alterasse a qualidade dos dados. Evidentemente, as visitas na área de estudo eram frequentes, mas ressalta-se que nem sempre há disponibilidade de pessoal para fazer este tipo de observação em campo. Uma sugestão pode ser a instalação de uma tela como barreira para acúmulo de material, também indicado por Mota et al. (2016).

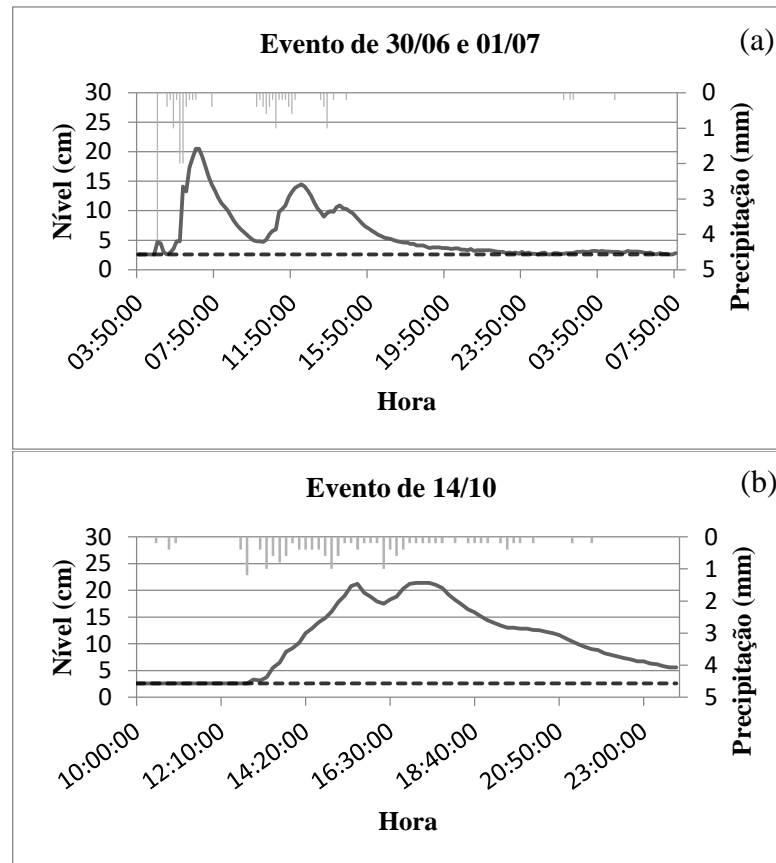
Tabela 4.1 - Nível na Calha Parshall obstruída

Data	Hora	Nível (cm)
25/08/2019	15:30:00	6,4
25/08/2019	15:40:00	6,4
25/08/2019	15:50:00	0,7
25/08/2019	16:00:00	0,7
25/08/2019	16:10:00	0,7
25/08/2019	16:20:00	0,7
25/08/2019	16:30:00	0,6
25/08/2019	16:40:00	0,6
25/08/2019	16:50:00	0,5
25/08/2019	17:00:00	0,4
25/08/2019	17:10:00	0,3
25/08/2019	17:20:00	0,3

Fonte: Autora

Porém, apesar de tantos problemas, notou-se que acima do nível de 2,8 cm os níveis observados em campo eram correspondentes ao medidos pelo levellogger, conferindo confiabilidade aos dados. Abaixo deste nível é sabido que a vazão varia entre 0 e 1 m³.h⁻¹ (verificado na curva-chave), dessa forma, os níveis menores que 2,6 cm foram todos alterados para 2,6 cm, que corresponde a 1 m³.h⁻¹. Apesar da incerteza agregada nas vazões mais baixas, foi a solução encontrada para que não houvesse falha nos dados. Dois hidrogramas são ilustrados na Figura 4.5 como forma de representar as vazões na bacia de estudo, sendo a linha pontilhada o marcador do nível de 2,6 cm.

Figura 4.5 – Hidrogramas representado os níveis em (a) 30/06/2019 e 01/07/2019 e (b) 14/10/2019



Fonte: Autora

Apesar da obtenção de bons hidrogramas, ainda enfrentou-se a extrapolação da calha Parshall (Figura 4.6) quando ocorriam eventos de chuva mais intensa. Após estes eventos também era necessário fazer a manutenção das laterais que desmoronavam em função da calha ser instalada apenas como solo compactado.

A Figura 4.7 ilustra o evento ocorrido em 17 de outubro (data de medição com o micromolinete) que registrou 25,8 mm de chuva, porém o solo já estava encharcado, visto que nos dias anteriores havia chovido também. A linha tracejada indica o nível acima da calha Parshall, onde a curva-chave começa a ser extrapolada, que corresponde a 22,5 cm.

Neste dia (17 de outubro) foram realizadas duas visitas na nanobacia, uma no início da manhã para verificar se a calha Parshall já havia extravasado e outra no fim da tarde, que foi quando a medição com o micromolinete ocorreu. O nível chegou a 30,5cm, por isso foi possível realizar a medição apenas em uma altura (60% da profundidade) (a metodologia de

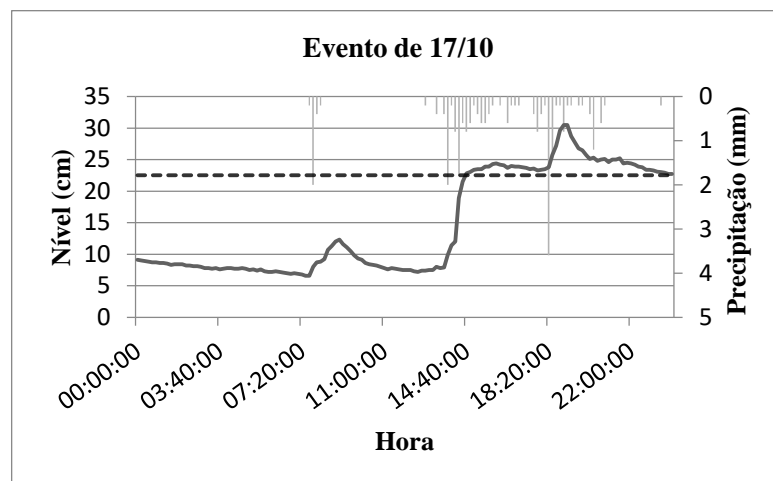
utilização do micromolinetete está especificada em Santos et al., 2001). Juntamente com a área da seção foi possível obter a vazão, a qual foi a mesma considerada para todas as extrapolações, correspondente a $115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Figura 4.6 – Evento de 17 de outubro às 18h30min em que a calha foi extrapolada



Fonte: Autora

Figura 4.7 – Hidrograma da Calha Parshall extrapolada



Fonte: Autora

A extrapolação da calha Parshall pode ser resolvida com a utilização do micromolinete, porém, seria necessário o deslocamento até a bacia de estudo sempre que houvesse previsão de chuvas mais intensas, o que torna esta prática inviável.

A extrapolação do limite máximo de medição das estruturas hidráulicas é comum no monitoramento hidrológico. Silveira e Tucci (1998) enfrentaram extravasamento das calhas Parshall utilizadas na pesquisa, porém não foi um problema para os autores, já que as vazões de interesse eram as de alta permanência. Tamiosso et al. (2013) monitoraram a vazão em 3 bacias, sendo 2 bacias com vertedor triangular de 90° e 1 bacia com calha Parshall de fundo plano, os autores também enfrentaram períodos onde a vazão extravasava a estrutura hidráulica nas 3 bacias monitoradas e como alternativa preencheram as falhas utilizando a equação de Manning.

Com tantas dificuldades é possível entender que o comportamento desta bacia é muito variável. Conforme Fortesa et al. (2020), há variabilidade da resposta hidrológica, na escala de eventos ocorridos em pequenas bacias de clima Mediterrâneo, ocasionada por diferentes fatores como a precipitação total, a interação entre a sazonalidade e a diversidade espacial da litologia e uso da terra.

Também é possível entender que as bacias de campo não são tão documentadas como bacias florestadas, que se sabe que influenciam fortemente nas vazões através dos processos de infiltração, interceptação e transpiração vegetal (FARLEY et al., 2005; VAN DIJK e KEENAN, 2007; SANTOS e TREVISAN, 2009; BAUMHARDT, 2010; REICHERT et al. 2017).

Reichert et al. (2017) encontraram melhores condições estruturais e de cobertura do solo, maior infiltração e retenção de água no solo e maior recarga de água subterrânea em uma bacia com plantação de eucalipto quando comparada a uma bacia com pastagem degradada, porém, ressaltaram que estes resultados podem mudar quando as pastagens apresentam melhores propriedades físico-hídricas.

Áreas utilizadas para pecuária com sobrecarga de animais afetam negativamente as propriedades físicas do solo, e, conseqüentemente, o escoamento nas bacias. Por isso, enfatiza-se que há diferença entre campo nativo degradado e campo nativo bem manejado. Isso evidencia a necessidade de monitoramento hidrológico em áreas de campo nativo bem manejado, não só do ponto de vista de produção pecuária, mas também de conservação do solo, contribuindo, assim, para produtividade das pequenas propriedades e para a organização territorial.

Apesar das dificuldades relatadas é importante salientar que os eventos foram bem reproduzidos e mostram a realidade da nanobacia de estudo. Durante todo o período de monitoramento, buscou-se reproduzir os acontecimentos hidrológicos minimizando possíveis erros, mas a dificuldade de monitoramento é muito grande por não poder estar sempre presente na área de estudo em eventos de chuva e pelos poucos relatos da hidrologia em áreas de campo nativo bem manejadas.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizadas visitas frequentes na nanobacia, mas nem sempre há pessoal/recurso financeiro para coleta de dados, dificultando o monitoramento, principalmente quando se trata de áreas maiores e de difícil acesso. A facilidade de chegar na área de estudo permitiu melhorar as observações.

Há necessidade do desenvolvimento de equipamentos mais precisos para medição em áreas pequenas e em escala sub-horária, que permitam a leitura simultânea da velocidade e do nível da água em uma seção hidrológica, evitando problemas que ocorreram neste estudo, como a obstrução e extrapolação da calha Parshal e desmoronamento de laterais.

A análise de dados foi realizada de forma qualitativa, pois é necessário um número maior de observações para que seja possível realizar análises estatísticas. Pretende-se continuar as medições na área de estudo para agregar maior confiabilidade aos dados.

A falta de trabalhos relatando problemas enfrentados nas medições dificultou a comparação com outros estudos, por isso, recomenda-se que os autores relatem os problemas enfrentados durante o monitoramento hidrológico para que erros não sejam repetidos.

REFERÊNCIAS

BAUMHARDT, E. **Balanço hídrico de microbacia com eucalipto e pastagem nativa na região da campanha do RS**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BENCKE, G A. Monoculturas podem decretar o fim dos pampas. **Revista do IHU**, v. 190, p. 10-14, 2006. Disponível em: <<http://www.ihuonline.unisinos.br/media/pdf/IHUOnlineEdicao190.pdf>> Acesso em: 12 de abril de 2018

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA A. J. T. et al.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos - conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009, Cap. 8, 4ed., p. 269-300

CRUZ, R. C.; GUADAGNIN, D. L. Uma pequena história ambiental do Pampa: proposta de uma abordagem baseada na relação entre perturbação e mudança In: COSTA, B. P et al. **A sustentabilidade da Região da Campanha-RS : Práticas e teorias a respeito das relações entre ambiente, sociedade, cultura e políticas públicas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, 2010. Cap.8, p. 154-178. Disponível em: < <http://w3.ufsm.br/ppggeo/files/ebook02/E-BOOK.pdf>> Acesso em: 20 de maio de 2018

FARLEY, K. A.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global change biology**, v. 11, n. 10, p. 1565-1576, 2005.

FORTESA, J. et al. Multiple Temporal Scales Assessment in the Hydrological Response of Small Mediterranean-Climate Catchments. **Water**, v. 12, n. 1, p. 1-27, 2020.

LOPES, N.H.Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008. 164 p. Dissertação (Mestrado em engenharia ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,SC, 2008.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 27, n. 4, p. 735-741, 2003.

MOTA, A. A.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araponga. **Eng Sanit Ambient**, v. 22, n. 1, p. 73-8, 2016.

NÓBREGA, R. L. B., et al. Identifying hydrological responses of micro-catchments under contrasting land use in the Brazilian Cerrado, **HESS**, v.12, p. 9915–9975, 2015.

QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. de P. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência rural**, v. 31, n. 5, p. 863-868, 2001.

REICHERT, J. M. et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237–238, p. 282-2951, 2017.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento. 2001.

SANTOS, T.; TREVISAN, R. Eucaliptos versus Bioma Pampa: compreendendo as diferenças entre lavouras de arbóreas e o campo nativo. In: TEIXEIRA FILHO, A. (Org.). **Lavouras da destruição: a (im)posição do consenso**. . Pelotas: RS, 2009. p. 299-332. Disponível em: < http://inga.org.br/wp-content/uploads/2016/02/Livro_Lavouras_de_Destruicao.pdf>

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

SULFLUX. Rede Sul-Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudança Climática. *SULFLUX*. Disponível em: <<http://www.sulflux.ufsm.br/sulflux/>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

TAMIOSSO, M. F. et al. Preenchimento de falhas de dados observados de vazão utilizando a equação de Manning. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 1-9, 2007.

VERDUM, R. O pampa: ainda desconhecido. **Revista do IHU**, v. 190, p. 4-9, 2006. Disponível em: <<http://www.ihuonline.unisinos.br/media/pdf/IHUOnlineEdicao190.pdf>> Acesso: 12 abr. 2018.

5 MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA EM UMA NANOBACIA DE CAMPO NATIVO

RESUMO

Um banco de dados foi confeccionado para a nanobacia de estudo e aplicado no modelo SWAT em escala sub-horária com a calibração de eventos. Foram selecionados 10 eventos de chuva, sendo 5 para calibração e 5 para validação. Na calibração, 3 eventos demonstraram resultados satisfatórios, porém, na validação os resultados foram insatisfatórios, possivelmente por não haver informações das condições antecedentes de umidade do solo e porque o SWAT é um modelo contínuo. Ainda assim, os eventos selecionados caracterizaram muito bem o comportamento hidrológico na nanobacia, demonstrando períodos de vazões mínimas e de vazões máximas, além de seu comportamento intermitente. Ainda foi possível entender que esta área de campo nativo é fortemente influenciada pelo escoamento lateral, fato que pode estar relacionado ao horizonte B textural da área de estudo. Ressalta-se a necessidade de continuar o monitoramento para obtenção de uma série contínua de dados em escala sub-horária para que novos testes sejam realizados.

Palavras-chave: Bioma Pampa. Pecuária. Modelagem Hidrológica.

SUB-HOURLY HYDROLOGICAL MODELING IN A NATIVE GRASSLAND NANOBASIN

ABSTRACT

A database was created for the study nanobasin and applied to the SWAT model on a sub-hourly scale with event calibration. 10 rain events were selected, 5 for calibration and 5 for validation. In the calibration, 3 events demonstrated satisfactory results, but in the validation the results were unsatisfactory, possibly because there is no information on the previous conditions of soil moisture and because the SWAT is a continuous model. Even so, the selected events characterized the hydrological behavior in the nanobasin very well, showing periods of minimum and maximum flows, in addition to their intermittent behavior. It was also possible to understand that this area of native grassland is strongly influenced by lateral flow, a fact that may be related to the textural B horizon of the study area. It is emphasized the need to continue monitoring to obtain a continuous series of data on a sub-hourly scale so that new tests can be performed.

Keywords: Pampa Biome. Livestock. Hydrological Modeling

5.1 INTRODUÇÃO

Os processos hidrológicos em pequenas áreas, aqui denominadas nanobacias, ocorrem muito rapidamente e estas áreas, que têm o tempo de concentração de alguns minutos, exigem o monitoramento em alta resolução temporal (escala sub-horária) para aplicação nos modelos com a finalidade de entender e prever o ciclo hidrológico.

O entendimento da hidrologia em pequenas bacias de campo se explica pelo fato de que é nesta escala que a adoção de práticas de manejo e conservação do solo e da água são facilitadas, e são essas medidas que podem melhorar a produtividade das pequenas propriedades, além disso, permitem a participação dos produtores rurais e ainda contribuem para a organização e o planejamento territorial. No Rio Grande do Sul, os campos são as paisagens predominantes fazendo parte da economia e cultura do povo (BOLDRINI et al., 2010).

Com a gama de modelos hidrológicos disponíveis, a escolha do modelo deve ser de acordo com o objetivo do estudo, sendo o mais adequado aquele que apresenta resultados mais próximos da realidade (DEVIA et al., 2015), e mesmo com tantos modelos, sabe-se que nem todos são aplicáveis à realidade de nanobacias, não sendo adequados para a escala espacial ou temporal que estas áreas exigem.

Dentre os modelos hidrológicos existentes, o SWAT vem se destacando, sendo amplamente utilizado em todo o mundo, provando que auxilia na gestão eficaz das bacias hidrográficas e no desenvolvimento de decisões políticas mais bem informadas (GASSMAN et al., 2007). O modelo permite a simulação do escoamento superficial pelos métodos da Curva Número (CN) que requer dados de precipitação diários, e pelo método de infiltração Green & Ampt, para dados sub-diários (NEITSCH et al. 2011). Apesar das várias aplicações, o uso da escala sub-diária ainda não foi totalmente explorado (BRIGHENTI et al. 2019).

Dentre alguns trabalhos que utilizaram a escala sub-diária, destaca-se King et al (1999), Jeong et al. (2010), Kannan et al. (2007), Bauwe et al. (2016), Yang et al. (2016), Bauwe et al. (2017), Boithias et al. (2017), Shannak (2017) e Campbell et al. (2018), calibrando em escala diária ou sub-diária, porém, para calibração por eventos de precipitação foram encontradas as pesquisas de Di Luzio e Arnold (2004), Maharjan et al. (2013) e Yu et al. (2018).

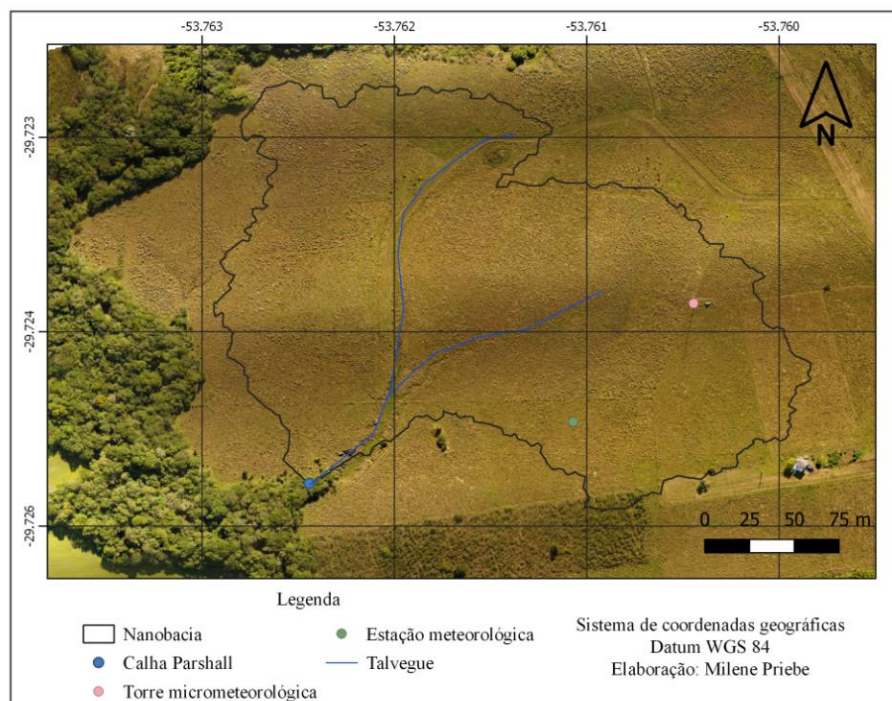
Considerando que as nanobacias têm tempo de resposta muito rápido e que exigem monitoramento em curtos intervalos de tempo, o objetivo deste trabalho foi testar o modelo SWAT, em escala sub-horária com calibração de eventos.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo pertence à Estação Experimental do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada na Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente no município de Santa Maria. A nanobacia de estudo possui 5,88 ha de área e é coberta de pastagem natural (Figura 5.1), a qual nunca apresentou indícios de preparo de solo para fins agrícolas, e foi utilizada, historicamente, como internada para cria e recria de bovinos de corte (QUADROS e PILLAR, 2001).

Figura 5.1 – Nanobacia de estudo



Fonte: Autora

5.2.2 Modelo digital de elevação

O MDE utilizado foi elaborado a partir de um levantamento aéreo com um drone DJI Phantom 4, com pixel de 30 cm x 30 cm, o qual o foi utilizado para delimitação da bacia hidrográfica.

5.2.3 Classes de solo

O solo da área experimental pertence à Formação Santa Maria (QUADROS; PILLAR, 2001) e é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (STRECK et al., 2008). As análises foram realizadas até a profundidade de 1450 mm, sendo identificados 4 horizontes (A-AB-Bt-C). As propriedades físico-hídricas do solo são apresentadas na Tabela 5.1. A textura do solo no primeiro horizonte foi dominada pela areia (45%), seguida pelo silte (36,55 %) e argila (18,45 %), no horizonte AB houve aumento da argila (21%) e um decréscimo da areia (41,2%), no horizonte Bt encontra-se o predomínio da argila (39,4%) e no horizonte C, silte (47,6%). A condutividade hidráulica saturada variou de 13,8 a 80 mm.h⁻¹, com valores mais baixos ocorrendo no horizonte Bt.

Os parâmetros que não possuíam análises para a área foram caracterizados conforme Baldissera (2005) para o mesmo solo da área de estudo. A profundidade máxima de alcance das raízes (SOL_ZMX) foi assumida como sendo a profundidade mais baixa da camada mais profunda do perfil do solo e a fração de porosidade do solo (ANION_EXCL) foi definida como o valor padrão de 0,5 (ARNOLD et al., 2012).

Tabela 5.1 – Dados de solo

Propriedades	Nomenclatura SWAT	Camadas do solo			
		Z1	Z2	Z3	Z4
Profundidade (mm)	SOL_Z	100	250	1100	1450
Areia (%)	SAND	45,00	41,20	28,00	25,50
Silte (%)	SILT	36,55	37,80	32,60	47,60
Argila (%)	CLAY	18,45	21,00	39,40	26,90
Porcentagem de cascalho (%)	ROCK	0	0	0	0
Condutividade hidráulica (mm.h ⁻¹)	SOL_K	80	24,65	13,8	47,02
Densidade aparente	SOL_BD	1,50	1,30	1,43	1,45
Capacidade de retenção de água do solo (mm.mm ⁻¹)	SOL_AWC	0,22	0,2	0,12	0,27

Fonte: Dados disponibilizados pelo Laboratório de Micrometeorologia do Departamento de Física da UFSM

5.2.4 Classes de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi obtido a partir do Projeto de Mapeamento

Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2019), sendo a totalidade da área de formação campestre. Além deste mapa, o SWAT exige uma tabela associada ao uso, neste estudo a área é de campo nativo de uso para pecuária, assim, o código utilizado foi “PAST”.

5.2.5 Dados climatológicos e de vazão

Os dados de precipitação (mm), temperaturas máximas e mínimas do ar (°C), velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e radiação solar ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) foram obtidos da estação meteorológica instalada área de estudo.

Os dados de vazão foram obtidos da Calha Parshall implantada na área de estudo. Durante o monitoramento de vazão foram encontradas algumas dificuldades com as vazões mínimas, por isso, adotou-se que níveis menores que 2,6 cm corresponderiam a vazão de $1 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Já para as vazões máximas, acima de 22,5 cm, a vazão foi medida com um micromolinete e corresponde a vazão de $115 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

5.2.6 Análise dos eventos de precipitação

Foram selecionados 10 eventos de precipitação ocorridos entre maio e novembro de 2019 que coincidem com os dados de monitoramento de vazão, sendo 5 eventos para calibração e 5 eventos para validação do modelo. Os eventos e a precipitação ocorrida são demonstrados na Tabela 5.2. A escolha dos eventos foi baseada na inexistência de falhas e com a representação de diferentes hidrogramas. Nos eventos de 21/05/2019, 16/10/2019 e 29/10/2019 houve extravasamento calha Parshall.

Tabela 5.2 – Eventos selecionados para calibração e validação do modelo

Evento	Precipitação (mm)	Período
05/05/2019	8,6	Validação
21/05/2019	28,4	Validação
22/05/2019 a 23/05/2019	13	Calibração
27/05/2019 a 28/05/2019	12,4	Validação
31/08/2019	17	Calibração
07/09/2019	10,6	Validação
14/10/2019	19,6	Calibração
16/10/2019	47,2	Calibração
20/10/2019 a 21/10/2019	18,4	Calibração
29/10/2019	26	Validação

Fonte: Autora

5.2.7 Simulação sub-diária com o SWAT

A simulação ocorreu utilizando o *software* QGIS 2.6 (<https://qgis.org/en/site/>) e o QSWAT versão 1.5 (<https://swat.tamu.edu/software/qswat/>).

O delineamento da bacia foi realizado de forma automática a partir do MDE gerado com levantamento aéreo e pixel de 30 cm. Em função do tamanho da bacia houve necessidade de maior precisão para que a bacia fosse corretamente delimitada. Além disso, utilizou-se dos canais previamente desenhados (opção *burn in*) para gerar a drenagem de acordo com a área de estudo.

Posteriormente, na criação de unidades de resposta hidrológica (HRU), foram inseridos os mapas de uso e ocupação e tipo de solo, com suas respectivas tabelas. Em função da homogeneidade da bacia de estudo optou-se pela não geração de sub-bacias e geração de unidades de resposta hidrológica baseada no critério de HRU dominante.

Para determinação do escoamento superficial foi utilizado o método de infiltração de Green & Ampt, o qual assume que o perfil do solo é homogêneo e a umidade antecedente é uniformemente distribuída no perfil e requer dados sub-diários de precipitação (GREEN E AMPT, 1911 apud NEITSCH et al., 2011), para isso a entrada de dados de precipitação foi no intervalo de tempo de 30 minutos, marcando a opção a *sub-daily*, enquanto os demais dados foram em escala diária. A interface do QSWAT permite apenas a saída de dados em escala diária, por isso foi necessário modificar os arquivos *file.cio* e **.bsn*, conforme explicitado por

Maharjan et al. (2013). Os arquivos gerados em *.txt foram transferidos para o Excel 2010.

5.2.8 Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo

A análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo foram realizadas de forma manual e os parâmetros escolhidos foram baseados na literatura (JEONG et al., 2010; MAHARJAN et al., 2013; BAUWE et al., 2017; SHANNAK, 2017), sendo eles: LAT_TTIME, SOL_K, SOL_BD, ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_N2, GWQMN, GW_REVAP, CANMX, SURLAG, REVAPMN, ESCO, CN2.

A sensibilidade foi realizada variando um parâmetro enquanto todos os outros eram mantidos fixos, e somente os parâmetros mais sensíveis baseados na variação do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe foram selecionados para o processo de calibração dos eventos, o qual contou apenas com a técnica de substituição direta. Após a calibração dos eventos foi efetuada a média de cada parâmetro para realização da validação.

As análises estatísticas utilizadas para verificar o desempenho do modelo foram Nash-Sutcliffe (ENS) e PBIAS, indicados por Moriasi et al. (2007), e R2 que foi utilizado por Jeong et al. (2010) e Maharjan et al. (2013) em simulação sub-diária. Para Jeong et al. (2010), o ENS diário superior a 0,65 é considerado bom, podendo encontrar valores ser mais baixos para resultados sub-diários, enquanto para o R2, que descreve a proporção da variação nos resíduos e varia de 0 a 1, tem melhores resultados a medida que o valor se aproxima de 1. Já PBIAS, de acordo com Moriasi et al. (2007), é classificado como “muito bom” quando $PBIAS < \pm 10$, “bom” para $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$, “satisfatório” para $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ e “insatisfatório” para $PBIAS \geq \pm 25$. Neste trabalho foram considerados valores aceitáveis para a simulação com ENS superior a 0,5, $PBIAS \pm 25\%$ e R2 acima de 0,5.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros que interferem nos processos hidrológicos e que foram escolhidos para calibração do modelo foram LAT_TTIME, SOL_K, SOL_BD, ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_N2, GWQMN, GW_REVAP, SURLAG (Tabela 5.3). As faixas de variação de cada parâmetro seguem o manual do SWAT (ARNOLD et al., 2012).

Apesar de REVAPMN, ESCO, CN2, CANMX serem calibrados em outros trabalhos (MAHARJAN et al., 2013; BAUWE et al., 2017; SHANNAK, 2017), não demonstraram

sensibilidade na área de estudo. Na Tabela 5.3 estão representados os eventos e os valores adotados na calibração, assim como o valor médio utilizado para a validação do modelo.

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros calibrados para cada evento

Evento Parâmetro	22/05 a 23/05	14/10	16/10	31/08	20/10 a 21/10	Média
GW_DELAY	7	11	10	10	8	9,2
LAT_TTIME	1,2	0,6	1,1	0,6	0,5	0,8
ALPHA_BF	1	1	1	1	1	1
GW_REVAP	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
GWQMN	100	100	100	100	100	100
SOL_K	50,6	58,9	30,43	88,5	83,0	62,28
SOL_BD	1,6	1,6	1,28	1,58	1,61	1,538
CH_N2	0,225	0,25	0,18	0,22	0,24	0,22
SURLAG	0,5	0,5	0,32	0,40	0,35	0,41
HRU_SLP	0,06	0,06	0,05	0,05	0,07	0,058
SLSUBBSN	61,4	62,1	76,46	65,46	62,00	65,48

Fonte: Autora

As observações em campo demonstraram que a vazão subterrânea é grande responsável por manter o canal com água em maior parte de seu tempo. Para corrigir a vazão de base que foi subestimada pelo modelo foram calibrados os parâmetros ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN e GW_REVAP.

O GW_REVAP foi fixado em 0,02, pois este parâmetro representa a transferência de água da zona saturada para a zona não saturada, seja por evaporação da franja capilar ou retirada de água do solo através das plantas com raízes profundas (ARNOLD et al., 2012). Sá (2019) encontrou um baixo valor de GW_REVAP para a bacia hidrográfica do rio Marombas e defende que um dos fatores para o baixo valor deste parâmetro é o predomínio de áreas com vegetação rasteira de raízes curtas, como as pastagens e cultivos agrícolas anuais que se encontram na sua bacia de estudo.

O parâmetro GWQMN refere-se à profundidade de água subterrânea requerida para que o retorno do fluxo ocorra, assim, valores mais baixos indicam maior fluxo de base

(KANNAN et al., 2007). A nanobacia é fortemente dependente do escoamento subterrâneo, por isso, este parâmetro ficou mantido em 100 mm para os eventos selecionados.

GWDELAY é o tempo de recarga do aquífero raso e foi mantido com valores baixos, pois seu aumento indica recarga mais lenta.

ALPHA_BF é o fator do fluxo de base, ou seja, o tempo que a água demora para voltar ao rio, então, quanto maiores os valores, mais rápidas as respostas do fluxo de águas subterrâneas. Este parâmetro também é utilizado para corrigir possíveis deslocamentos nos hidrogramas (ANESI, 2014).

LAT_TTIME representa o tempo do escoamento lateral e a média dos parâmetros foi de 0,8 dias, pois se sabe que a área de estudo tem interferência do escoamento lateral, sendo este grande parte do que chega no exutório devido a presença do horizonte B textural.

Sá (2019) verificou em seus resultados que maiores valores de CH_N2 reproduzem uma resposta mais lenta na bacia, Dakhlalla e Parajuli (2019) demonstraram que valores de CH_N2 maiores que 0,2 tendem a melhorar o desempenho do modelo, no caso destes autores, indicando que o canal principal seria natural revestido com capim. A área de estudo apresenta o mesmo comportamento relatado pelos autores (Figura 5.2), assim, o valor médio de CH_N2 foi de 0,22.

Figura 5.2 – Canal principal da nanobacia



Fonte: Autora

De acordo com Dakhlalla e Parajuli (2019), valores mais baixos para SURLAG apresentam melhores desempenhos do modelo. Este parâmetro representa o armazenamento de parte do escoamento superficial, retardando a entrada de água no canal principal e suavizando o hidrograma (NEITSCH et al. 2011).

Após a calibração dos eventos, o parâmetro SOL_K teve média de $62,28 \text{ mm.h}^{-1}$ no horizonte A. Apesar de a análise realizada demonstrar condutividade hidráulica saturada de 80 mm.h^{-1} neste horizonte, sabe-se que há heterogeneidade espacial deste parâmetro, sendo necessária sua alteração para calibração do modelo, o qual influencia nos processos de percolação, fluxo lateral e dinâmica da água subterrânea (ANESI, 2014).

Apesar de ser uma área bem maneja, há pisoteamento do gado e por isso o parâmetro SOL_BD teve altos valores na calibração, ficando em média $1,53 \text{ g.cm}^{-3}$. O local onde foram realizadas as análises de condutividade hidráulica saturada e densidade aparente do solo podem ter influenciado nos resultados obtidos, e por isso estes parâmetros foram de difícil calibração.

Após a calibração dos parâmetros mais sensíveis, notou-se que a vazão de base ainda era subestimada nos eventos e também indicou um atraso no pico, então, conforme sugerido por Shannak (2017), que também encontrou este problema em suas simulações, aumentou-se a declividade (HRU_SLP) e diminuiu-se a taxa de fluxo terrestre para corrigir o atraso no escoamento superficial (SLSUBBSN). Ressalta-se que este último procedimento foi realizado porque o manual do SWAT relata que o parâmetro é superestimado pelo modelo (ARNOLD et al., 2012).

As estatísticas referentes ao processo de calibração e validação são demonstradas na Tabela 5.4, onde se pode perceber que os eventos no período de calibração possuem valores aceitáveis para NSE, R2, exceto os eventos de 22/05 a 23/05/2019 e 16/10/2019 para NSE. Para o primeiro, possivelmente porque houve mais de um pico de vazão e pela recessão não chegar a um nível constante até o novo evento ocorrer, enquanto para o evento de 16/10/2019 pelo extravasamento da calha Parshall, que pela falta de medições foi adotado apenas um valor de vazão.

Através dos hidrogramas (Figura 5.3-a-b-c-d-e) é possível perceber que há uma coerência entre vazão simulada e observada, representada também pelos valores de R2. Para PBIAS os valores foram aceitáveis nos eventos de 16/10 e 31/08, enquanto os demais não ficaram na faixa de $\pm 25\%$.

Já no período de validação, o NSE foi insatisfatório para todos os eventos, sendo todos os resultados negativos. O R2 foi aceitável em 3 eventos, com valores maiores que 0,5, mas

também demonstra uma coerência entre vazão observada e simulada, que pode ser verificada nos hidrogramas (Figura 5.3-f-g-h-i-j). Já para PBIAS, não foi satisfatório, pois não ficou na faixa de $\pm 25\%$. A validação insatisfatória não permite que sejam simulados diferentes cenários de alteração no uso e ocupação do solo.

Tabela 5.4 – Resultados das estatísticas

EVENTO	NSE	R2	PBIAS	Período
22/05 a 23/05	-1,20	0,71	85,90	Calibração
31/08/2019	0,59	0,60	13,98	
14/10/2019	0,61	0,76	26,54	
16/10/2019	0,34	0,76	-19,04	
20/10 a 21/10	0,64	0,68	48,57	
05/05	-5,12	0,73	90,20	Validação
21/05	-0,13	0,45	81,68	
27/05 a 28/05	-0,54	0,75	80,44	
07/09	-0,31	0,72	74,67	
29/10	-0,14	0,47	84,95	

Fonte: Autora

Conforme Sari (2017), a calibração manual é subjetiva e apresenta dificuldades para encontrar o momento exato de cessá-la. Analisando os hidrogramas, é possível notar que o modelo subestimou as vazões (exceto no evento de 16/10), e, sabe-se que seria possível encontrar um parâmetro que elevasse os picos, mas isto não representaria a realidade da bacia. Neste momento optou-se por cessar a calibração manual, pois a mudança de novos parâmetros não seria, de fato, o que ocorre nesta área de estudo.

Além disso, é possível observar que as vazões de base também não foram bem representadas em alguns eventos, possivelmente porque os eventos ocorrem muito rapidamente, a recessão não chega a estabilizar, e logo acontece um novo evento. Isto pode ser observado principalmente nas Figuras 5.3-a-f-h. Este é um problema da simulação por eventos, mas no caso desta nanobacia era a única opção viável, visto que não havia disponibilidade de uma série contínua de dados de chuva e de vazão. Yu et al. (2018) também relataram que as condições de umidade anteriores de um evento de inundação próximo podem influenciar no evento posterior. Horn (2015), que estudou nas proximidades da área deste

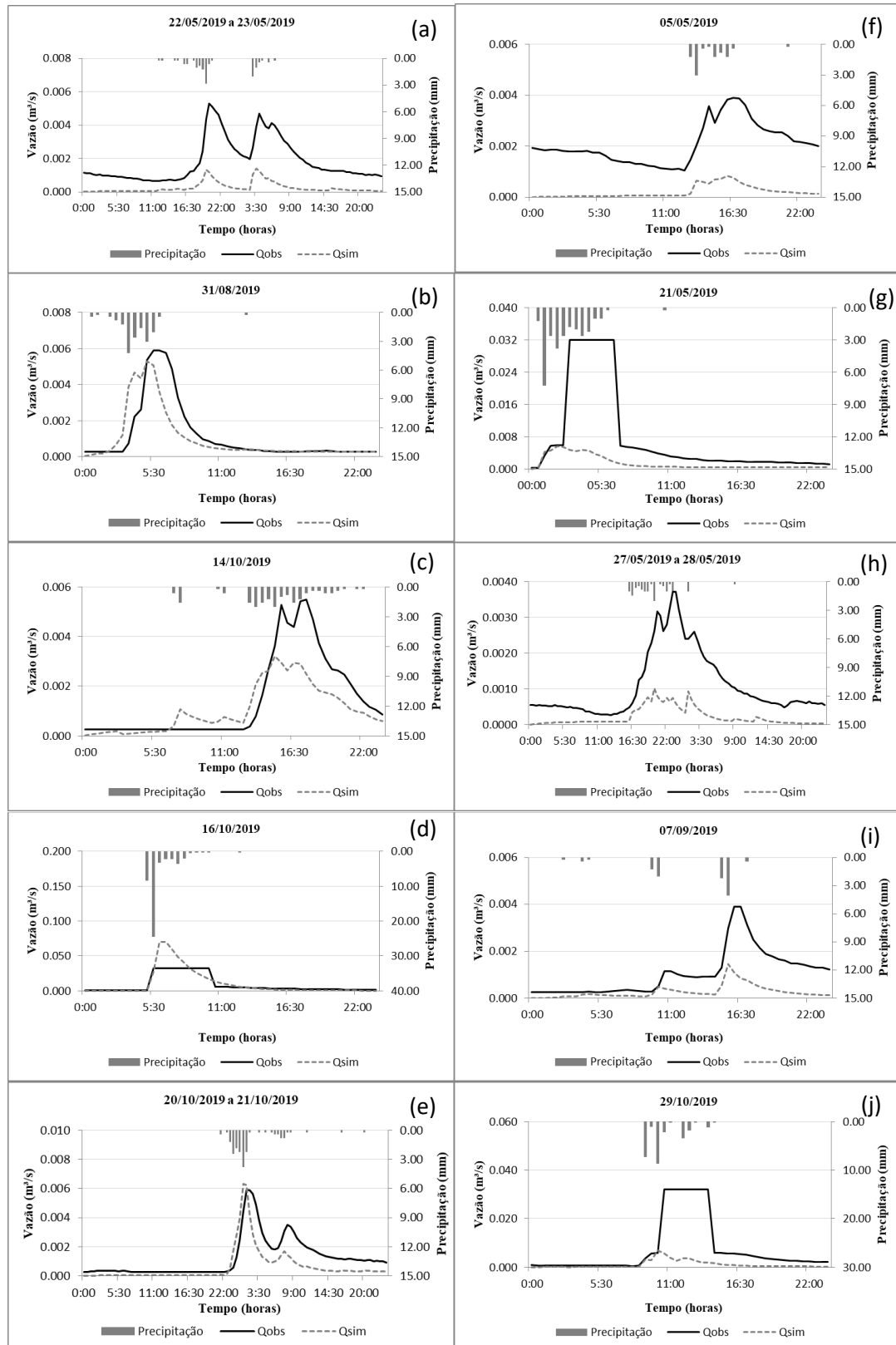
trabalho, verificou contribuição subterrânea para uma bacia vizinha da sua, destacando a influência das características hidrogeológicas do local.

Outra possível causa dos resultados insatisfatórios é a falta de um período de aquecimento (*warm-up*), utilizado para diminuir as incertezas das condições iniciais de umidade do solo, recomendado pelo manual do SWAT (ARNOLD et al., 2012). Porém, em função dos dados disponíveis não foi possível fazer este aquecimento.

O método de Green-Ampt considera a duração da chuva como um passo no tempo para resolver a equação de infiltração, então, quando a taxa de infiltração é maior que a intensidade da chuva, toda a precipitação infiltra nesse intervalo de tempo, logo, o método de Green e Ampt permite que mais água seja mantida no perfil do solo (KING et al., 1999, KANNAN et al. 2007), sendo outra possível causa de os resultados demonstrarem que o modelo subestimou as vazões.

A validação adequada do escoamento previsto pelo SWAT a partir de uma nanobacia de campo com simulação sub-diária pode garantir a precisão dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica maior (MAHARJAN et al., 2013). Os resultados nesta nanobacia permitem identificar que a escolha dos eventos não foi adequada. A calibração manual foi uma vantagem, pois contou com o conhecimento obtido durante as visitas de campo, porém a validação foi insatisfatória possivelmente pela escolha dos eventos. A continuidade do monitoramento permitirá que novos testes sejam realizados, visto que apenas eventos estavam disponíveis em função das dificuldades encontradas e do pouco tempo de monitoramento desde a instrumentação da bacia.

Figura 5.3 – Hidrogramas dos eventos de calibração (a) 22/05 a 23/05/2019, (b) 31/08/2019, (c) 14/10/2019, (d) 16/10/2019, (e) 20/10 a 21/10/2019; e validação (f) 05/05/2019 (g) 21/05/2019, (h) 27/05 a 28/05/2019 (i) 07/09/2019 e (j) 29/10/2019



Fonte: Autora

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se compreender o comportamento hidrológico em uma área de 5,88 ha de campo nativo utilizada para produção pecuária, denominada nanobacia, além de testar o modelo hidrológico SWAT em escala sub-diária, com precipitação no intervalo de 30 minutos e calibração de eventos.

Os 10 eventos selecionados conseguiram refletir o comportamento hidrológico da bacia, a qual possui respostas muito rápidas aos eventos de chuva. Além disso, foi possível reproduzir os eventos extremos ocorridos, tanto para vazões mínimas, quanto para máximas.

Quanto à aplicação do SWAT, o modelo não conseguiu reproduzir os processos na bacia, mas ressalta-se que este trabalho demonstrou resultados preliminares de uma nanobacia que iniciou seu monitoramento recentemente. No geral, o modelo obteve melhores resultados para a calibração, mas resultados insatisfatórios para a validação, com o modelo subestimando as vazões, o que inviabiliza a criação de cenários de alteração de uso da terra.

Sugere-se continuar o monitoramento nesta área de estudo a fim de obter uma série contínua para uma nova simulação, pois assim seria possível um período de aquecimento para obter as condições antecedentes de umidade no solo. Além disso, foi possível identificar que, assim como o pico, a recessão ocorre muito rapidamente, e em um dia ocorre mais de um evento, o que pode ter influenciado nos resultados da modelagem.

A continuidade do monitoramento é essencial para que novos testes sejam aplicados nesta área de estudo, a qual apresenta remanescentes do Bioma Pampa, que vem sofrendo grandes alterações em sua paisagem. O estudo pode subsidiar o processo de tomada de decisões referente às políticas de manejo neste bioma e também auxiliar nas discussões quanto à disponibilidade hídrica em nanobacias, pois é crescente o aproveitamento de água nestes locais.

REFERÊNCIAS

ANESI, H. D. **Influência do preenchimento de falhas de dados horários de precipitação por redes neurais artificiais (RNAs) na simulação hidrológica de base física em uma bacia rural**. 2014. 123f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ARNOLD, J.; KINIRY, J.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.; HANEY, E.; NEITSCH, S. **SWAT 2012 Input/Output Documentation**, Texas Water Resources Institute, 2012.

- BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BAUWE, A.; KAHLE, P.; LENNARTZ, B. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 311–321, 2016.
- BAUWE, A.; TIEDEMANN, S.; KAHLE, P.; LENNARTZ, B. Does the temporal resolution of precipitation input influence the simulated hydrological components employing the SWAT model? **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, n. 53, p. 997–1007, 2017.
- BOITHIAS, L.; SAUVAGE, S.; LENICA, A.; ROUX, H.; ABBASPOUR, K.C.; LARNIER, K.; DARTUS, D.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.M. Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. **Water** v. 9, p. 1–25, 2017.
- BOLDRINI, I. I. et al. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Editora Pallotti, 2010. 64 p.
- BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; SRINIVASAN, R.; CHAFFE, P. L. B. Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p.1415-1423, 2019.
- CAMPBELL, A. et al. Assessing the impact of urbanization on flood risk and severity for the Pawtuxet watershed, Rhode Island. **Lake and Reservoir Management**, v. 34, n. 1, p. 74–87, 2018.
- DAKHLALLA, A. O. e PARAJULI, P. B. Assessing model parameters sensitivity and uncertainty of streamflow, sediment, and nutrient transport using SWAT. **Information processing in agriculture**, v. 6 n. 1, p. 61-72, 2019.
- DEVIA G. K.; GANASRI B. P.; DWARAKISH G. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.
- DI LUZIO, M.; ARNOLD, J.G. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input. **Journal of Hydrology**, v. 298, p. 136–154, 2004.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.
- GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.
- JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L.; SRINIVASAN, R. Development and integration of sub-hourly rainfall–runoff modeling capability within a watershed model. **Water Resources Management**, v. 24 n. 15, p. 4505-4527, 2010.

HORN, J. F. C.; SILVEIRA, G. L. Monitoramento fluviométrico de duas bacias hidrográficas vizinhas: comparação de vazões em períodos concomitantes. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, 809-816, 2015.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 3-4, p. 456-466, 2007.

KING, K. W.; ARNOLD, J. G.; BINGNER, R. L. Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 4, p. 919-926, 1999.

MAHARJAN, G. R.; PARK, Y. S.; KIM, N. W.; SHIN, D. S.; CHOI, J. W.; HYUN, G. W.; JEON, J.; OK, Y.S.; LIM, K. J. Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v.7, p. 109–119, 2013.

MAPBIOMAS. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>> Acesso em: 20 de junho de 2019.

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

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. de P. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência rural**, v. 31, n. 5, p. 863-868, 2001.

SÁ, E A. S. **Estimativa da vazão e produção de sedimentos por erosão hídrica em nível de bacia hidrográfica, em dois cenários climatológicos**. 2019. 209 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

SARI, V. **Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul**. 2017. 312 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

SHANNAK, S. The effects of green infrastructure on exceedance of critical shear stress in Blunn Creek watershed. **Applied Water Science**, v. 7, p. n. 1, 21-27, 2017.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

YANG, X.; LIU, Q.; HE, Y.; LUO, X.; ZHANG, X. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, p. 959–972, 2016.

YU, D. et al. Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily time scale. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 5001-5019, 2018.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante que possibilita a adoção de técnicas mais eficientes no planejamento do uso da terra integrada à gestão de recursos hídricos, mas, para utilização de modelos, é essencial que haja dados confiáveis e de qualidade, porém a área de estudo adotada para a pesquisa não estava instrumentada, por isso, foi necessária a implantação de um sistema de monitoramento para a obtenção de dados e posterior utilização de um modelo hidrológico.

O monitoramento na nanobacia iniciou no ano de 2019, apenas. Sendo a calha Parshall instalada em março e a estação meteorológica instalada em maio do mesmo ano, dificultando a obtenção de uma série longa e contínua, tanto pela data de início de monitoramento quanto pelas dificuldades encontradas ao longo do tempo.

Além disso, pretendeu-se demonstrar a viabilidade de aplicar o modelo SWAT em escala de nanobacias com a entrada de dados de precipitação de 30 minutos e calibração através de eventos. Os resultados não foram satisfatórios para a validação, possivelmente por não haver informações das condições antecedentes de umidade do solo e porque o SWAT é um modelo contínuo, o que está relacionado a maior dificuldade de utilização do modelo: a obtenção de dados contínuos e em alta resolução. Portanto, o SWAT não foi um modelo adequado para criação de cenários futuros nesta nanobacia.

Ainda assim, foi possível compreender o comportamento da bacia pelos eventos obtidos neste tempo de monitoramento. Nestes 7 meses, foi possível obter 10 eventos de chuva/vazão, os quais caracterizaram muito bem o que ocorre na bacia, demonstrando períodos de vazões mínimas e de vazões máximas, além de seu comportamento intermitente. Ainda, é possível entender que esta área de campo nativo é fortemente influenciada pelo escoamento lateral, fato que pode estar relacionado ao horizonte B textural nesta área de estudo.

A nanobacia também demonstrou rápidas respostas aos eventos de chuva, mesmo sendo uma bacia plana, o que pode estar relacionado ao uso do solo no local, a pecuária. Apesar de ser uma área bem manejada, ainda há compactação do solo, por isso, enfatiza-se a importância de continuar o monitoramento no local de estudo, permitindo que haja comparações com pesquisas em áreas de campo degradado.

Este trabalho demonstra resultados preliminares de uma nanobacia que iniciou seu monitoramento recentemente. Considerando as dificuldades enfrentadas durante o monitoramento e os resultados obtidos, pode-se considerar um resultado satisfatório para esta

pesquisa, porém, ressalta-se a importância de continuar o monitoramento na área para que mais trabalhos possam ser desenvolvidos buscando subsidiar o processo de tomada de decisão no Bioma Pampa e auxiliar nas discussões quanto à disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas.

A estação experimental da UFSM agora conta com uma área instrumentada para seguir as pesquisas em área de campo nativo utilizado para produção pecuária, característica do Bioma Pampa, mas, ainda sugere-se o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento que permitam a leitura simultânea da velocidade e do nível da água em uma seção hidrológica, que não corram o risco de terem os problemas de obstrução, desmoronamento de laterais e extrapolação, os mesmos relatados nesta pesquisa.

Há necessidade de sensores que permitam a leitura sub-horária, em função das rápidas respostas de nanobacias, e que sejam de baixo custo, fácil instalação e remoção para outras áreas, permitindo monitoramento em diversas áreas apenas com a curva-chave da seção, o que não demandaria tantas visitas em campo. Estas novas tecnologias permitiriam o monitoramento de áreas experimentais em escala de manejo e a calibração e validação de modelos hidrológicos para desenvolvimento de cenários de alteração do uso e cobertura da terra.

REFERÊNCIAS

- ALANSI, A. W. et al. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 6, n. 6, p. 7581-7609, 2009.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development . **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012a.
- ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Soil And Water Assessment Tool - Input/Output Documentation, Version 2012**. Texas Water Resources Institute, TR-439, 2012b. 654p.
- BAUMHARDT, E. **Balanço hídrico de microbacia com eucalipto e pastagem nativa na região da campanha do RS**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- BAUWE, A.; KAHLE, P.; LENNARTZ, B. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 311–321, 2016.
- BAUWE, A.; TIEDEMANN, S.; KAHLE, P.; LENNARTZ, B. Does the temporal resolution of precipitation input influence the simulated hydrological components employing the SWAT model? **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, n. 53, p. 997–1007, 2017.
- BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A; HAITH, D. A. 2005. Calibration and validation of Soil and Water Assessment Tool on na agricultural watershed in upstate New York. **J. Hydrol. Eng.** v.10, n.5 p. 363-374, 2005.
- BENCKE, G. A. Monoculturas podem decretar o fim dos pampas. **Revista do Instituto Humanitas Unisinos**, v. 190, p. 10-14, 2006.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrol. Sci. Bull**, v.24, n.1, p. 43-69, 1979.
- BINKOWSKI, P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na “Metade Sul” do Rio Grande do Sul**. 2009. 212 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BOITHIAS, L.; SAUVAGE, S.; LENICA, A.; ROUX, H.; ABBASPOUR, K.C.; LARNIER, K.; DARTUS, D.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.M. Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. **Water** v. 9, p. 1–25, 2017.

BOLDRINI, I. I. et al. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Editora Pallotti, 2010. 64 p.

BOLDRINI, I. I. et al. Biodiversidade de plantas. In: PILLAR, V. de P.; LANGE, O. **Os Campos do Sul**. Porto Alegre : Rede Campos Sulinos – UFRGS, 2015. Cap. 5, p. 53-58.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. **Applied engineering in agriculture**, v. 29, n. 2, p. 189-200, 2013.

BRASIL. Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002.. Regulamenta o art. 9º, inciso II, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 de julho de 2002a. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4297.htm>. Acesso em: 09 de outubro de 2019.

_____. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 de maio de 2012b. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>. Acesso em: 09 de outubro de 2019.

BRESSIANI, D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting** 2016. 224 p. Dissertação (Doutorado em Hidráulica e Engenharia Sanitária) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B.; GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do o modelo SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; SRINIVASAN, R; CHAFFE, P. L. B. Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p.1415-1423, 2019.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological impacts of (de)forestation. In: BRUIJNZEEL, L. A. **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: IAHS, 1990. Cap. 4. p 67-125.

CAMPBELL, A. et al. Assessing the impact of urbanization on flood risk and severity for the Pawtuxet watershed, Rhode Island. **Lake and Reservoir Management**, v. 34, n. 1, p. 74–87, 2018.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 2014. 154 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2014.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. 2013. 122 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2013.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Hydrologic simulation of large basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

CRUZ, R. C.; GUADAGNIN, D. L. Uma pequena história ambiental do Pampa: proposta de uma abordagem baseada na relação entre perturbação e mudança In: DA COSTA, B. P et al. **A sustentabilidade da Região da Campanha-RS : Práticas e teorias a respeito das relações entre ambiente, sociedade, cultura e políticas públicas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, 2010. Cap.8, p. 154-178.

DALMOLIN, R. S. D.; TEN CATEN, A. Uso da terra dos biomas brasileiros e o impacto sobre a qualidade do solo. **Entre-Lugar**, Dourados, v. 3, n. 6, p. 181-193, 2012.

DEVIA G. K.; GANASRI B. P.; DWARAKISH G. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

DI LUZIO, M.; ARNOLD, J.G. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input. **Journal of Hydrology**, v. 298, p. 136–154, 2004.

DILE, Y. T. et al. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. **Environmental modelling & software**, v. 85, p. 129-138, 2016.

DILE, Y. T.; SRINIVASAN, R; GEORGE, C. **QGIS Interface for SWAT (QSWAT)**. Versão 1.5, 2018. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/software/qswat/>> Acesso em: 10 de abril de 2018.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. **Cerne**, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

FARLEY, K. A.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global change biology**, v. 11, n. 10, p. 1565-1576, 2005.

FERREIRA, R. S.; UAGODA, R. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT (Analysis of hydrological balance in Gama watershed, Distrito Federal/Brazil, using SWAT model). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 880-893, 2017.

FRANCESCONI, W. et al. Modeling for management: A case study of the Cañete watershed, Peru. In: RIVERA, D.; GODOY-FAUNDEZ, A.; SAAVEDRA, M. (Ed.). **Andean Hydrology**. Boca Raton: CRC Press. 2018. Cap. 4, p.84-101.

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GARBOSSA, L. H. P. et al. 2011. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: 2011 International SWAT Conference & Workshops, 2011, Toledo. **Anais...** Bryan: Texas A&M University, 2011.

GARRIDO, J. M. **Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à bacia do rio Jiquiriçá–Bahia**. 2003. 197 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003.

GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GHAFFARI, G. et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 24, n. 7, p. 892-903, 2010.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 19, n. 3, p. 683-692, 2005.

HASENACK, H. **Mapeamento da cobertura vegetal do Bioma Pampa**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Sumário Executivo do mapeamento da cobertura vegetal dos biomas brasileiros. Brasília: MMA/SBF. 2006. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>> Acesso em: 15 de outubro de 2018.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em: de 15 abril de 2018

IENSEN, I. R. R.; SANTOS, I. Simulação sub-diária e diária de escoamento com o modelo SWAT em pequena bacia experimental. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2017.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L.; SRINIVASAN, R. Development and integration of sub-hourly rainfall–runoff modeling capability within a watershed model. **Water Resources Management**, v. 24 n. 15, p. 4505-4527, 2010.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 3-4, p. 456-466, 2007.

KING, K. W.; ARNOLD, J. G.; BINGNER, R. L. Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 4, p. 919-926, 1999.

KONIG, F. G. et al. Avaliação da sazonalidade da produção de serapilheira numa Floresta Estacional Decidual no município de Santa Maria-RS. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 429-435, Ago. 2002.

KOUTALAKIS, P. et al. Application of the SWAT model on torrents of the Menoikio, Greece. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 26, n. 2, p. 1210-1215, 2017.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. A. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LEPSH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos. 2011.

LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado**. 2010. 312 f. Tese(Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

MAHARJAN, G. R.; PARK, Y. S.; KIM, N. W.; SHIN, D. S.; CHOI, J. W.; HYUN, G. W.; JEON, J.; OK, Y.S.; LIM, K. J. Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v.7, p. 109–119, 2013.

MAPBIOMAS. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>> Acesso em: 20 de junho de 2019.

MITSUYA, R. T. Dados de Entrada e Configuração do SWAT na Microbacia do Córrego Pito Aceso, RJ. In: III Seminário da Rede AgroHidro e I Workshop do projeto Os impactos da agricultura e das mudanças climáticas nos recursos hídricos 2015, Corumbá. **Anais...** Corumbá, 2015. p. 31.

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

MRE. Ministério das Relações Exteriores. **Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)**. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>> Acesso em: 09 de outubro de 2019.

NABINGER, C. et al. Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. Cap. 13. In: PILLAR, V. de P. et al. **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap, 13, p. 175-198.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. 2014.

OVERBECK, G. E. et al. Fisionomia dos campos. In: Pillar, V.P.; Lange, O (Ed.). **Os Campos do Sul**. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos-UFRGS, 2015. Cap. 3, p. 33-41.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia-SC. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 859-869, 2013.

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, MG, 2013.

PEREIRA, D. R. et al. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 789-799, 2014.

PILLAR, V. de P. (Coord.). **Cenários de conversão da vegetação nativa e a sustentabilidade de agroecossistemas no Bioma Pampa**. Chamada MCTI/CNPq n. 20/2017-Nexus II: Pesquisa e desenvolvimento em ações integradas e sustentáveis para a garantia da segurança hídrica, energética e alimentar nos Biomas Pampa, Pantanal e Mata Atlântica. Porto Alegre:UFRGS, 2017. 40p.

QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. de P. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência rural**, v. 31, n. 5, p. 863-868, 2001.

REICHERT, J. M. et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237–238, p. 282-2951, 2017.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - Relatório técnico parcial. MCT/INPE. São José dos Campos: INPE, 2000. 60p.

SALLES, L. de A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do Ribeirão Pipiripau**. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.115–123, 2010.

SANTOS, T.; TREVISAN, R. Eucaliptos versus Bioma Pampa: compreendendo as diferenças entre lavouras de arbóreas e o campo nativo. In: TEIXEIRA FILHO, A. (Org.). **Lavouras da destruição: a (im)posição do consenso**. . Pelotas: RS, 2009. p. 299-332. Disponível em: <http://inga.org.br/wp-content/uploads/2016/02/Livro_Lavouras_de_Destruicao.pdf>

SARI, V. **Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul**. 2017. 312 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

SHANNAK, S. The effects of green infrastructure on exceedance of critical shear stress in Blunn Creek watershed. **Applied Water Science**, v. 7, p. n. 1, 21-27, 2017.

SILVA, L. P. E. **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2007.

SILVA, M. D. da. Os cultivos florestais do pampa, no sul do Rio Grande do Sul: Desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 215-226, 2012. .

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

SRINIVASAN, R. et al. Hydrologic Modeling of the Rio Grande/Rio Bravo Basin, **Texas Natural Resources Conservation Commission**, 1997. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.37.2215&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 16 de outubro de 2018.

SRINIVASAN, R.; RAMANARAYANAN, T. S.; ARNOLD, J. G.; BEDNARZ, S. T . Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 91-101, 1998.

STEHR, A. et al. Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin.. **Hydrological sciences journal**, v. 54, n. 6, p. 1053-1067, 2009.

STEHR, A. et al. Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1963-1977, 2010.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

THAVHANA, M. P.; SAVAGE, M. J.; MOELETSI, M. E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 105, p. 115-124, 2018.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2002. 150p. Disponível em: <<https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/6/23336/InBr02902.pdf>> Acesso em: 15 de junho de 2018.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 1-9, 2007.

VENKATESH B. et al. Modeling of a River Basin Using SWAT Model. In: SINGH V., et al. (Eds). **Hydrologic Modeling**. Singapore, Springer. v. 81. p. 707-714, 2018.

VERDUM, R. O pampa: ainda desconhecido. **Revista do Instituto Humanitas Unisinos**, v. 190, p. 4-9, 2006. Disponível em: <<http://www.ihuonline.unisinos.br/media/pdf/IHUOnlineEdicao190.pdf>> Acesso em: 12 de abril de 2018.

YANG, X.; LIU, Q.; HE, Y.; LUO, X.; ZHANG, X. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, p. 959–972, 2016.

YU, D. et al. Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily time scale. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 5001-5019, 2018.

ZARTH, P. A.; GERHARDT, M. Uma história ambiental do Pampa do Rio Grande do Sul. In: TEIXEIRA FILHO, A. (Org.). **Lavouras da destruição: a (im)posição do consenso**. Pelotas, RS, 2009. p. 249-295. Disponível em: <http://inga.org.br/wp-content/uploads/2016/02/Livro_Lavouras_de_Destruicao.pdf>