

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

Allison Fernando Back

**MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA MARIA, SANTA MARIA – RS**

Santa Maria, RS
2020

Allison Fernando Back

**MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO
CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA – RS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva

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

Back, Allison Fernando
Modelagem Numérica de Fluxo das Águas Subterrâneas no
Campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa
Maria - RS / Allison Fernando Back.- 2020.
61 p.; 30 cm

Orientador: José Luiz Silvério da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Simulação de fluxo 2. MODFLOW 3. Sistema Aquífero
Guarani 4. Aquífero poroso I. Silva, José Luiz Silvério
da 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.

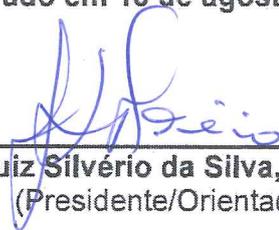
Declaro, ALLISON FERNANDO BACK, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, 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.

Allison Fernando Back

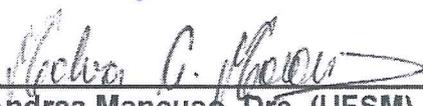
**MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO
CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA – RS**

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

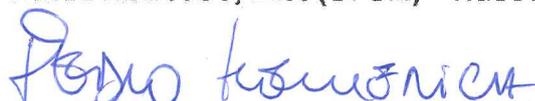
Aprovado em 18 de agosto de 2020:



José Luiz Silvério da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Malva Andrea Mancuso, Dra. (UFSM) - videoconferência



Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Dr. (UNIPAMPA) - videoconferência

Santa Maria, RS
2020

RESUMO

MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA – RS

AUTOR: Allison Fernando Back
ORIENTADOR: José Luiz Silvério da Silva

A água subterrânea representa um recurso hídrico de grande importância para o desenvolvimento social e econômico da população. Entretanto, o aumento da demanda e a falta de conhecimento dos aspectos hidrogeológicos acaba tornando o gerenciamento desses recursos hídricos um grande desafio. Esse gerenciamento depende da forma como são quantificados os fenômenos de fluxo e representadas as relações entre as entradas e saídas de água do sistema aquífero em análise, sendo a modelagem numérica uma das abordagens mais frequentemente utilizadas. Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo principal ampliar os conhecimentos sobre o comportamento hidrogeológico do sistema aquífero do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, por meio da modelagem numérica de fluxo em regime estacionário. O software livre QGIS Desktop, versão 2.18.21, e a interface FREEWAT foram utilizados para a elaboração do modelo numérico de fluxo e a execução do código MODFLOW-2005, que utiliza o método numérico das diferenças finitas para simular fluxo. O desenvolvimento da modelagem numérica foi dividido nas seguintes etapas: definição do propósito, construção do modelo conceitual, formulação do modelo matemático e seleção do código de modelagem, elaboração do modelo numérico, simulação e calibração do modelo, e análise de sensibilidade. O modelo conceitual foi discretizado em um domínio de 11,55 km² com 4620 células de 50 m². O processo de calibração foi realizado pelo método de “tentativa e erro” e análises estatísticas dos erros residuais entre as cargas hidráulicas observadas em campo e a simuladas pelo modelo. O modelo considerado calibrado apresentou valores de condutividade hidráulica de 0,29, 1,0, 2,5 e 6,36 m/dia em 4 zonas distintas e de recarga por precipitação de 6×10^{-5} e 0,0003 m/dia em duas zonas (afloramento dos Membros Alemoa e Passo das Tropas). A zona de afloramento do Membro Passos das Tropas apresentou uma taxa de recarga 16,70% (299,48 mm/ano), valor que é muito próximo da taxa mínima encontrada em outros estudos. O balanço hídrico subterrâneo estimado demonstrou uma participação de 69,55% da recarga por precipitação na entrada total de água e 44,08% dos poços de bombeamento na saída total de água do sistema. A análise de sensibilidade realizada com a variação isolada dos parâmetros apontou que a recarga no afloramento do Membro Passo das Tropas e os poços de bombeamento são os parâmetros mais sensíveis do modelo calibrado, o que demonstra a relevância e o cuidado que novas investigações precisam ter perante esses parâmetros.

Palavras-chaves: Simulação de fluxo; MODFLOW; Sistema Aquífero Guarani; aquífero poroso.

ABSTRACT

NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER FLOW IN THE CAMPUS OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA, SANTA MARIA - RS

AUTHOR: Allison Fernando Back
ADVISOR: José Luiz Silvério da Silva

Groundwater represents a resource of great importance for the social and economic development of the population. However, the increase in demand and the lack of knowledge of hydrogeological aspects ends up making the management of these water resources a great challenge. This management depends on how the flow phenomena is quantified and the relationships between the water inputs and outputs of the aquifer system under analysis are represented, with numerical modeling being one of the most frequently used approaches. Thus, the present research has as main objective to expand the knowledge about the hydrogeological behavior of the aquifer system of the campus of the Federal University of Santa Maria, Santa Maria - RS, through numerical modeling of flow in steady state. The free software QGIS Desktop, version 2.18.21, and the FREEWAT interface were used for the elaboration of the numerical flow model and the execution of the MODFLOW-2005 code, which uses the numerical method of finite differences to simulate flow. The development of numerical modeling was divided into the following steps: definition of purpose, construction of the conceptual model, formulation of the mathematical model and selection of the modeling code, elaboration of the numerical model, simulation and calibration of the model, and sensitivity analysis. The conceptual model was discretized in a domain of 11.55 km² with 4620 cells of 50 m². The calibration process was carried out using the "trial and error" method and statistical analysis of residual errors between hydraulic loads observed in the field and those simulated by the model. The model considered calibrated presented hydraulic conductivity values of 0.29, 1.0, 2.5 and 6.36 m/day in 4 different zones and precipitation recharge of 6x10⁻⁵ and 0.0003 m/day in two zones (outcrop of Alemoa Members and Passo das Troopas). The outcrop zone of the Member Passos das Troops showed a recharge rate of 16.70% (299.48 mm/year), a value that is very close to the minimum rate found in other studies. The estimated underground water balance showed a participation of 69.55% of the recharge due to precipitation in the total water inlet and 44.08% of the pumping wells in the total water outlet of the system. The sensitivity analysis carried out with the isolated variation of the parameters showed that the recharge in the outcrop of the Passo das Tropas Member and the pumping wells are the most sensitive parameters of the calibrated model, which demonstrates the relevance and the care that new investigations need to have before these parameters.

Palavras-chaves: Flow simulation; MODFLOW; Guarani Aquifer System; porous aquifer.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
1.1	OBJETIVOS.....	7
1.1.2	Objetivos geral.....	7
1.1.2	Objetivos específicos.....	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1	MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO.....	9
2.2	ETAPAS DA MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO.....	12
2.3	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL.....	12
2.4	MODELO NUMÉRICO DE FLUXO.....	13
2.4.1	Equação governante de fluxo.....	13
2.4.2	Condições de contorno.....	15
2.4.3	Condições iniciais.....	16
2.4.4	Método numérico de diferenças finitas.....	16
2.4.5	FREEWAT.....	18
2.5	PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.....	19
2.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	20
3	ARTIGO 1 - MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL DA REGIÃO DO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA-RS.....	21
4	ARTIGO 2 - MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA-RS.....	39
5	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam um recurso natural que é vital para o abastecimento de água potável de forma segura e econômica em regiões urbanas e rurais. Além disso, é fundamental para o bem-estar tanto dos seres humanos quanto de muitos ecossistemas aquáticos. Contudo, os aquíferos estão sob perigo cada vez maior de superexploração e/ou contaminação em decorrência da urbanização, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e das empresas de mineração.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, aproximadamente 63,7% dos municípios do Brasil apresentam como uma das formas de abastecimento a captação de águas subterrâneas através de poços profundos (IBGE, 2010). No mesmo ano, cerca de 145 mil fontes de abastecimento de água subterrânea haviam sido cadastradas, tendo como maioria os poços tubulares. Já no ano de 2016, os poços cadastrados totalizavam mais de 278 mil, com uma projeção que indica a ordem de 1,2 milhão, o que resultaria num aumento anual de mais de 22% em relação à estimativa de 2008. O aumento expressivo na quantidade de poços perfurados no Brasil tem sido influenciado, entre outros fatores, pela escassez hídrica dos últimos anos (ANA, 2017).

Com esse aumento na demanda, a pressão sofrida pelos recursos hídricos subterrâneos também acaba crescendo. Um dos exemplos mais comuns é a extração de volumes de água que superam a recarga natural e, conseqüentemente, acabam reduzindo a quantidade de água disponível. Isso pode afetar o escoamento básico dos rios, secar as nascentes, influenciar os níveis mínimos dos reservatórios, provocar afundamento dos terrenos, induzir o deslocamento de água contaminada, provocar impactos negativos na biodiversidade e, até mesmo, a exaurir completamente o aquífero.

Nesse contexto, um dos grandes desafios para a gestão e o gerenciamento de forma sustentável é alinhar a compreensão da importância que a água subterrânea apresenta para o desenvolvimento social e econômico com a deficiência no conhecimento do potencial e do estágio de exploração dos aquíferos. Devido a menor visibilidade que as águas subterrâneas têm em relação as superficiais, torna-se um processo mais difícil avaliar as condições reais de exploração, o que acarreta no desconhecimento da pressão sobre as reservas e no potencial prejuízo a todos os usuários que compartilham o aquífero. Por isso,

medidas que possibilitem ampliar os conhecimentos hidrogeológicos e estimar o comportamento do sistema de aquífero devem ser priorizadas na busca do uso racional e sustentável desses recursos.

Uma das ferramentas que frequentemente é utilizada para esse fim é a modelagem numérica. Por meio dela são quantificados os fenômenos de fluxo e de transporte de um sistema de aquífero, bem como, representadas as relações complexas entre as entradas, saídas e mudanças no armazenamento e movimento da água. Através de sua aplicação, torna-se possível determinar o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de uma bacia ou sistema de aquífero, pois permite a análise das reservas de água através de balanços de massa e a simulação de cenários de exploração.

Desta forma, a presente pesquisa pretende realizar a modelagem numérica de fluxo da água subterrânea no campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS. Na universidade a captação de águas subterrâneas é ativa e consiste em uma das principais fontes de abastecimento, o que demonstra a importância que esses recursos têm para o desenvolvimento das atividades da instituição. Algumas pesquisas realizadas nos últimos anos já demonstram os riscos, tanto em aspectos qualitativos quanto quantitativos, que as águas subterrâneas do campus vêm sofrendo, justificando a necessidade de novas medidas como fonte de informações para o planejamento e o gerenciamento que visam o uso racional e sustentável dos recursos subterrâneos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivos geral

A presente pesquisa tem como objetivo principal ampliar os conhecimentos sobre o comportamento hidrogeológico do sistema aquífero do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, por meio da modelagem numérica de fluxo em regime estacionário.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a região e construir um modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo;
- b) Calibrar o modelo numérico de fluxo em regime estacionário discretizado a partir de informações do modelo hidrogeológico conceitual;
- c) Estimar a participação da recarga por precipitação e do bombeamento dos poços tubulares em relação ao balanço hídrico subterrâneo do sistema aquífero em estudo.
- d) Analisar a sensibilidade das alterações dos parâmetros inseridos no modelo numérico de fluxo;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO

A modelagem numérica de fluxo das águas subterrâneas consiste em simular as cargas hidráulicas e as taxas de fluxo dentro e através dos limites de um sistema determinado, onde pode fornecer estimativas do balanço hídrico e tempos de transporte ao longo dos caminhos de fluxo. Além disso, os modelos fornecem informações adicionais sobre o comportamento do sistema que podem ajudar no desenvolvimento da compreensão conceitual e na previsão de resultados futuros, apoiando assim a tomada de decisões e permitindo a exploração de abordagens de gestão alternativas (BARNETT et al., 2012).

Nogueira e Kiang (2015) indicam que a aplicação de modelos numéricos em hidrogeologia tem sido uma ferramenta de grande auxílio para a representação de formações geológicas e estruturas complexas, bem como na melhor interpretação dos processos que ocorrem no aquífero.

Segundo Kalf e Woolley (2005), com a modelagem numérica é possível determinar o rendimento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de uma bacia ou sistema de aquífero, pois permite a análise das reservas de água através de balanços de massa e a simulação de cenários de exploração em intervalos de tempo que atendam horizontes de planejamento selecionados.

Como exposto por Cleary (1989), os modelos podem ser aplicados em águas subterrâneas como forma de:

- a) Compreender fenômenos de fluxo e de transporte em sistemas de aquíferos;
- b) Investigar alternativas de localização de poços de abastecimento;
- c) Delimitar área de proteção da zona de contribuição dos poços;
- d) Prever o destino e o transporte de contaminantes;
- e) Avaliar alternativas de remediação;
- f) Otimizar o gerenciamento de recursos hídricos.

Nessa perspectiva, inúmeros estudos nacionais utilizaram a modelagem numérica como forma de compreender o comportamento hidrogeológicos e, conseqüentemente, auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos de determinada área ou região.

Nogueira e Kiang (2015), por exemplo, utilizaram a construção de um modelo numérico como forma de ampliar o entendimento do Aquífero Rio Claro na região do campus da UNESP em Rio Claro/SP. Por meio de simulações realizadas, em regime permanente e transiente, analisaram a característica como a heterogeneidade litológica e hídrica da unidade aquífera. E, posteriormente, avaliaram o comportamento do sistema com a duplicação hipotética na taxa de exploração dos poços e a supressão parcial ou total da recarga, tendo como resultado uma grande alteração na sensibilidade do modelo e dos impactos ao aquífero estudado.

Por sua vez, Formentini (2018) com a aplicação de modelagem numérica buscou delimitar a Zona de Contribuição e os Perímetros de Proteção de Poço em área industrial localizada no distrito de Águas Claras no município de Viamão/RS. O principal aquífero dessa região é o Aquífero Coxilha das Lombas e nele ocorre a exploração das águas subterrâneas por empresa do setor industrial de produção de bebidas, a qual necessita de grandes volumes de água para atender aos padrões de qualidade exigidos. Os resultados indicaram a área para proteção e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas e também a contribuição de água de superfície (banhados e lagoas) para as captações de água subterrânea.

De forma similar, Gonçalves e Velásquez (2016), através de um modelo numérico de fluxo em regime permanente das águas subterrâneas, realizaram a avaliação do transporte advectivo de partículas como forma de identificar zonas de transporte até os poços tubulares. Com essa simulação de transporte advectivo indicaram as áreas vulneráveis à contaminação que podem atingir os poços e em quanto tempo os contaminantes dispostos nessas áreas podem afetar a qualidade da água bombeada.

No desenvolvimento de modelos numéricos tem-se inicialmente a construção de modelos conceituais, nos quais são organizados, analisados e sintetizados dados hidrogeológicos relevantes, muitas vezes com a ajuda de ferramenta como Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os componentes principais de um modelo conceitual incluem limites; hidroestratigrafia e estimativas de parâmetros hidrogeológicos; diretrizes gerais do fluxo de águas subterrâneas e fontes e sumidouros de água; e um balanço hídrico das águas subterrâneas baseado em campo (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Tais ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de SIG, permitem realizar análises complexas,

ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Segundo Gogu et al. (2001), os modelos de fluxo de águas subterrâneas e do transporte de contaminantes necessitam da representação espacial e temporal de processos físicos e químicos do aquífero. Sendo que, os parâmetros devem ser representados em camadas de informação tridimensionais ou quadridimensionais (x, y, z e tempo), o que pode criar um enorme volume de dados devido características dos sistemas estudados. Por essas razões, o gerenciamento desses dados através de ferramentas de SIG tornam o processo mais eficaz.

Para Rossetto et al. (2018), ferramentas que tornem o gerenciamento de dados mais eficiente são necessárias, de modo que as decisões tecnicamente corretas e com suporte da comunidade possam ser tomadas. Além disso, os autores acreditam que o desenvolvimento e a difusão de *softwares* livres constituem um elemento importante para melhorar o gerenciamento de águas subterrâneas, uma vez que, frequentemente, *softwares* comerciais são utilizados para esse escopo, mas devido aos seus custos acabam sendo inviáveis para muitos lugares do mundo.

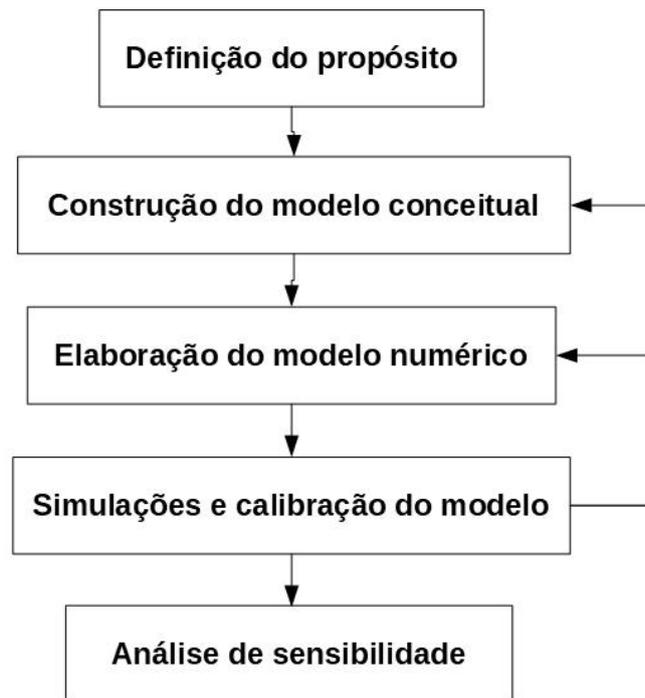
Os modelos numéricos tentam reproduzir as características mais importantes de um sistema real com representações matemáticas. Se construído corretamente, representam as relações complexas entre as entradas, saídas, mudanças no armazenamento, movimento da água no sistema e, possivelmente, outras características importantes. Isso possibilita a estimativa de respostas do sistema a várias alternativas e fornece informações para estratégias apropriadas de gerenciamento. No entanto, é uma representação simplificada do sistema real que possui limitações e necessita a avaliação dos resultados simulados (ALLEY; REILLY; FRANKE, 1999).

Segundo Foster et al. (2006), os modelos numéricos são tecnicamente superiores aos outros métodos de modelagem de fluxo. Com ele é possível simular variações complexas na geometria, nas propriedades e nos padrões de recarga do aquífero, fornecendo portanto resultados mais próximos da realidade.

2.2 ETAPAS DA MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO

As etapas para a modelagem das águas subterrâneas seguem o método científico e apresentam um fluxo de trabalho que cria confiança no modelo. Esse fluxo de trabalho pode ser adaptados para melhor atender o propósito da modelagem (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Na Figura 2.1 é apresentado um fluxograma simplificado para a modelagem numérica de fluxo das água subterrâneas.

Figura 2.1 – Fluxograma para modelagem numérica de fluxo das águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de Anderson, Woessner e Hunt (2015).

2.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

O modelo hidrogeológico conceitual busca simplificar as informações de campo, conciliando representações da realidade hidrogeológica com formas que facilitem a aplicação do modelo numérico. Para isso, procura-se estabelecer a geometria do sistema hidrogeológico com suas camadas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas e suas recargas e descargas (CABRAL; DEMÉTRIO,

2008). Além disso, o modelo consolida a compreensão atual dos principais processos do sistema de águas subterrâneas, incluindo a influência de perturbações, e auxilia na compreensão de possíveis mudanças futuras (BARNETT et al., 2012).

Para Anderson, Woessner e Hunt (2015), os componentes mínimos de um modelo conceitual para a maioria das modelagens de fluxo de água subterrânea incluem informações sobre os limites; as propriedades hidroestratigráficas e hidrogeológicas; as direções de fluxo, recargas e descargas; e uma estimativa baseada em campo dos componentes do balanço hídrico das águas subterrâneas.

2.4 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO

Os modelos matemáticos de fluxo das águas subterrâneas são baseados em dois princípios básicos: a conservação da massa e a lei de Darcy. Através da derivação desses princípios é obtida a equação governante que representa processos dentro do domínio do problema; as condições de contorno que representam processos ao longo dos limites; e as condições iniciais que especificam valores das variáveis dependente em casos de modelos em regime transiente (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). A modelagem numérico desenvolvida com o código MODFLOW-2005 utiliza o método das diferenças finitas para simular fluxo em três dimensões (HARBAUGH, 2005).

2.4.1 Equação governante de fluxo

A equação governante para o fluxo de água subterrânea é tradicionalmente derivada aplicando o princípio da conservação de massa e a lei de Darcy a um volume elementar representativo de um aquífero, o que resulta em uma equação diferencial tridimensional para condições heterogêneas, anisotrópicas e de regime transiente (CLEARY, 1989; ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015), conforme a Equação 1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (1)$$

onde h é a carga total; K_x , K_y , K_z são os componentes principais do tensor da condutividade hidráulica; S_s é o coeficiente de armazenamento específico; e W representa fontes ou sumidouros de água dentro do aquífero.

Na Equação 1, a variável h é dependente e as variáveis x , y , z e t são independentes, enquanto que K_x , K_y , K_z , S_s e W são parâmetros. Os subscritos em K denotam que a condutividade hidráulica pode variar com a direção e a colocação de K dentro dos sinais diferenciais permite uma variação espacial na condutividade hidráulica, o que atribui características de anisotropia e heterogeneidade (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015)

Como as dimensões horizontais dos aquíferos são significativamente superiores às suas espessuras, muitos aquíferos exibem condições de fluxo horizontal através da maior parte de sua extensão. Sendo assim, as variações de carga ao longo da dimensão vertical podem ser consideradas desprezíveis quando comparadas as variações de carga ao longo de qualquer dimensão horizontal. Tal característica proporciona a modelagem por meio de uma equação bidimensional nas direções x e y (Equação 2) que é obtida através da integração sobre a dimensão z , o que matematicamente elimina as variações verticais e a carga resultante é chamada de carga hidráulica em vez de carga total (CLEARY, 1989).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (2)$$

Para o fluxo horizontal bidimensional através de um aquífero confinado calculado com a Equação 2, os parâmetros de transmissividade (T) e armazenamento (S) são integrados verticalmente, isto é, os componentes de transmissividade nas direções x e y são $T_x = K_x b$ e $T_y = K_y b$, respectivamente, e $S = S_s b$, onde b é a espessura do aquífero. O parâmetro W , torna-se um fluxo R , expresso como volume de água por área do aquífero por tempo (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Em teoria, a equação governante serve tanto para aquífero confinado quanto livre, contudo a superfície freática representa um contorno físico superior para o sistema. A medida em que a carga aumenta ou diminui ocorre a variação desse contorno físico, o que matematicamente resulta em um problema de contorno móvel para o qual não existe solução exata (CLEARY, 1989). Frequentemente na prática, a condição de contorno no lençol freático é simplificada para tornar a solução tratável

usando uma malha com nós fixos no espaço. Em modelos bidimensionais de aquíferos livres, isso é possível quando a carga no lençol freático é a variável dependente calculada como solução (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). A Equação 3 representa o fluxo horizontal bidimensional em um aquífero livre, anisotrópico e heterogêneo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3)$$

onde S_y é o rendimento específico e R é a taxa de recarga. A carga h é igual à elevação do lençol freático medido a partir da base do aquífero.

2.4.2 Condições de contorno

As condições de contorno são representações matemáticas das fronteiras que delimitam o modelo e através delas se define o fluxo de escoamento que entra e sai do domínio da modelagem. Essas fronteiras são distintas por características físicas ou hidráulicas. As fronteiras físicas são delimitadas pela presença física de unidades de baixa condutividade hidráulica ou impermeáveis, grandes corpos d'água ou interface entre água doce e água do mar. As fronteiras hidráulicas são delimitadas por linhas de fluxo (divisores de água subterrânea) ou linhas equipotenciais (linhas de carga constante) (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Os mesmos autores apresentam que as condições de contorno são matematicamente classificadas em três tipos:

- a) Limite de carga especificada (Condição de Dirichlet ou Tipo 1): onde a carga ao longo do limite é definida em um valor conhecido. Um limite de carga constante é um caso especial onde a carga ao longo do limite é definida pelo mesmo valor. Essa condição é utilizada para representar grandes corpos d'água (rios, lagos, reservatórios e oceanos) que não são afetados por estresses no sistema, tais como, bombeamento ou alterações na taxa de recarga;
- b) Limite de fluxo especificado (Condição de Neumann ou Tipo 2): onde o fluxo através do limite é especificado. Um limite sem fluxo é um caso especial onde o fluxo através do limite é zero. Essa condição é usada para representar

divisores de águas subterrâneas através do limite sem fluxo e recarga através do fluxo vertical com o lençol freático;

- c) Limite dependente de carga (Condição de Cauchy ou Tipo 3): onde o fluxo através do limite é calculado usando a diferença entre uma carga especificada e uma carga calculada pelo modelo. Essa condição pode representar uma ampla variedade de situações hidrogeológicas, incluindo o fluxo vertical de e para riachos, lagos, zonas úmidas e outras massas de águas superficiais; fluxo para drenos; evapotranspiração do lençol freático; fluxos limite lateral e inferior; e limites fora do domínio do modelo. Também pode ser chamada de condição de contorno mista por relacionar as condições de contorno anteriores.

2.4.3 Condições iniciais

As condições iniciais consistem em especificar como as cargas se distribuem em um determinado momento sobre o sistema. Essas cargas especificadas podem ser consideradas uma referência e as mudanças calculadas em determinado intervalo de tempo serão relativas a essas cargas. O instante no tempo que representa essas cargas iniciais torna-se o tempo inicial, geralmente especificado como zero, e o intervalo de tempo é calculado a partir desse tempo inicial (FRANKE; REILLY; BENNETT, 1987).

Como essas informações podem ser desconhecidas, na prática muitos modelos são construídos com uma carga constante média (CLEARY, 1989). No entanto, para modelos de regime transiente, a definição das condições iniciais influencia fortemente nos resultados encontrados e podem ser consideradas como uma condição de contorno no tempo. Usualmente são utilizadas as cargas geradas por um modelo em regime estacionário como as condições iniciais de um modelo de regime transiente (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

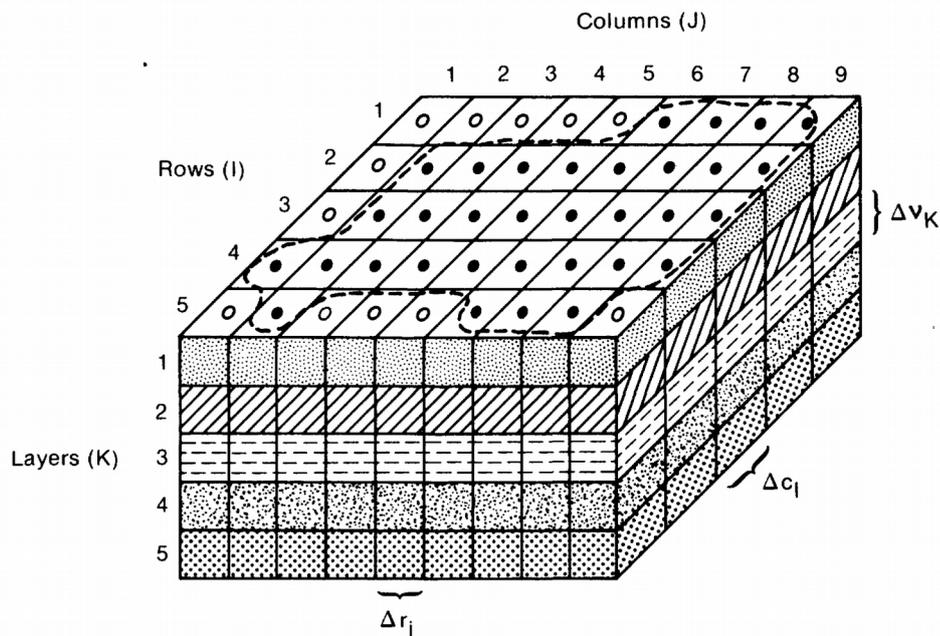
2.4.4 Método numérico de diferenças finitas

Os métodos numéricos são usados como forma aproximada da equação governante (Equação 1) para calcular a carga em locais selecionados. Dentre eles, o método de diferenças finitas é um dos mais usados na modelagem de água

subterrânea (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Nessa abordagem numérica, o sistema contínuo descrito pela Equação 1 é substituído por um conjunto finito de pontos discretos no espaço e no tempo, e as derivadas parciais são substituídas por termos calculados a partir das diferenças de valores da carga entre esses pontos (HARBAUGH, 2005).

No método, os pontos, também chamados de nós, são localizados no espaço tridimensional por meio de índices (i, j, k) que atribuem localizações relativas dentro de uma grade retangular. Esses índices representam, respectivamente, coluna, linha e camada, onde o espaçamento dos nós ao longo das linhas é designado por Δx , o espaçamento ao longo das colunas por Δy e o espaçamento entre as camadas é Δz (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Conforme apresenta a Figura 2.2, os nós são situados dentro das células da grade retangular.

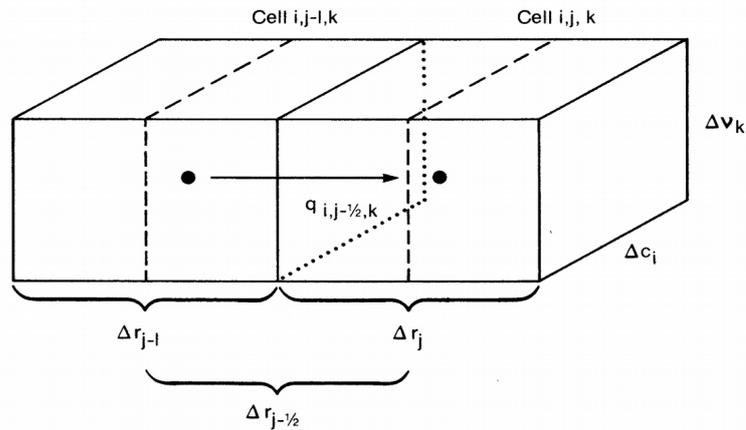
Figura 2.2 – Discretização de um sistema de aquífero hipotético.



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988).

De acordo com Harbaugh (2005), o desenvolvimento da equação do fluxo de água subterrânea na forma de diferenças finitas decorre da aplicação da equação de continuidade que considera equilíbrio de fluxo em cada célula. Seguindo essa convenção e a aplicação de lei de Darcy, o fluxo para a célula i, j, k na direção da linha da célula $i, j-1, k$ (Figura 2.3) é apresentado na Equação 4.

Figura 2.3 – Fluxo da célula i, j, k para a célula $i, j-1, k$.



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988).

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (4)$$

onde $h_{i,j,k}$ é a carga no nó i, j, k e $h_{i,j-1,k}$ é a carga no nó $i, j-1, k$; $q_{i,j-1/2,k}$ é a taxa de fluxo volumétrica através da face entre as células i, j, k e $i, j-1, k$ (L^3T^{-1}); $KR_{i,j-1/2,k}$ é a condutividade hidráulica ao longo da linha entre os nós i, j, k e $i, j-1, k$ (LT^{-1}); $\Delta c_i \Delta v_k$ é a área das faces da célula normal à direção da linha; e $\Delta r_{j-1/2}$ é a distância entre os nós i, j, k e $i, j-1, k$ (L).

A Equação 4 fornece o fluxo para um caso de estado estacionário unidimensional através de um bloco de aquífero que se estende do nó i, j, k para o nó $i, j-1, k$ e possui uma área transversal $\Delta c \Delta v$. De forma semelhante, a equação pode ser escrita para aproximar o fluxo na célula através das cinco faces restantes, como por exemplo, para o fluxo na direção da linha através da face entre as células i, j, k e $i, j+1, k$ (HARBAUGH, 2005).

2.4.5 FREEWAT

O FREEWAT é uma interface gratuita para planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, com atenção específica para águas subterrâneas, desenvolvida e integrada na forma de *plugin* ao *software livre* QGIS. A interface aproveita os recursos das ferramentas de geoprocessamento e pós-processamento do ambiente

SIG para análise de dados espaciais e os conecta diretamente ao código de simulação numérica (ROSSETTO et al., 2018).

De acordo com Rossetto et al. (2018), o FREEWAT aplica o código MODFLOW-2005 para simular o fluxo da água subterrânea em meios porosos e os seus pacotes para representar o fluxo associado com perturbações externas (tais como poços, recarga, evapotranspiração, drenos e rios), condições de contorno e fontes ou sumidouros.

O MODFLOW-2005 é uma nova versão do código de modelagem de fluxo de águas subterrâneas por diferenças finitas conhecido apenas como MODFLOW (HARBAUGH, 2005).

2.5 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

De acordo com Anderson, Woessner e Hunt (2015), a calibração é a etapa mais importante do processo de modelagem já que ajuda a estabelecer a legitimidade do modelo numérico e proporciona que o modelo calibrado sirva como base para as simulações de previsão.

O processo de calibração consiste em ajustar os parâmetros até que os resultados do modelo melhor se adaptem as observações históricas, de modo que o modelo possa ser aceito como uma boa representação do sistema físico de interesse (BARNETT et al., 2012). Usualmente, o alvo para o processo de calibração é a carga observada em diferentes locais da área de estudo (CLEARY, 1989) e o ajuste dos parâmetros é realizado manualmente por “*tentativa e erro*” através da alteração dos valores e avaliação após cada execução (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

A avaliação dos ajustes pode ser realizada por comparações visuais dos resultados simulados combinado com cálculos de estatística descritiva. A comparação visual mais simples é a construção de mapa da superfície potenciométrica observada e simulada. Além disso, a plotagem de gráficos de dispersão entre alvos de calibração versus valores simulados possibilita a avaliação rápida do ajuste do modelo e a visualização de tendência na calibração (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Os erros residuais (ou resíduos) também são úteis para a avaliação dos resultados da calibração. O erro residual é obtido pela diferença entre o valor

observado e valor simulado e tem aplicação nas estatísticas de Erro Médio (Equação 5), Erro Médio Absoluto (Equação 6) e Raiz do Erro Quadrático Médio (Equação 7).

$$\text{Erro médio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_o - h_s)_i \quad (5)$$

$$\text{Erro médio absoluto} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_o - h_s)_i| \quad (6)$$

$$\text{Raiz do erro quadrático médio} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_o - h_s)_i^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

onde n é o número de alvos; h_o é a carga observada; e h_s é a carga simulada.

2.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade deve ser realizada para comparar os resultados do modelo com diferentes conjuntos de estimativas de parâmetros razoáveis, tanto durante o período de calibração quanto durante as previsões. Na calibração pelo método de “*tentativa e erro*”, a análise de sensibilidade envolve estabelecer quanto as pequenas alterações dos parâmetros do modelo podem afetar as previsões futuras (BARNETT et al., 2012). Anderson, Woessner e Hunt (2015) complementam que a sensibilidade de um dado parâmetro é determinada quando os parâmetros de calibração são fixados em seus valores calibrados, com exceção do parâmetro selecionado, que terá a execução de variações percentuais acima e abaixo de seu valor calibrado.

3 ARTIGO 1 - MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA REGIÃO DO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA-RS

CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE CAMPUS REGION OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA, SANTA MARIA - RS

RESUMO

A água subterrânea representa um recurso hídrico de grande importância para o desenvolvimento social e econômico da população. Entretanto, o aumento da demanda e a falta de conhecimento dos aspectos hidrogeológicos acaba tornando o gerenciamento desses recursos subterrâneos um grande desafio. Uma abordagem frequentemente utilizada como forma de compreender os processos que ocorrem dentro de um sistema de aquífero é a modelagem numérica. A etapa inicial do processo de modelagem numérica é a construção de um modelo conceitual da região de interesse, sendo realizada com o intuito de organizar, analisar e sintetizar os dados hidrogeológicos relevantes. Nesse sentido, a presente pesquisa busca construir um modelo hidrogeológico conceitual com as informações da região do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, para que posteriormente seja desenvolvido um modelo numérico de fluxo. Com a construção do modelo conceitual foi identificado que a unidade hidroestratigráfica constituída pelo membro Passo das Tropas apresenta maior relevância, contudo a unidade Sanga do Cabral também apresentou características hidrodinâmicas similares em testes realizados em perfis aflorantes. Já a unidade constituída pelo membro Alemoa, responsável pelo confinamento do membro Passo das Tropas, é caracterizada como aquíclode. A potenciometria e direções gerais de fluxo da região apresentam sentido do Sul para o Norte, sendo que a região do campus atua como uma área de recarga indireta para a porção urbanizada de Camobi e também recebe recarga indireta de afloramento do Membro Passo das Tropas que encontra-se em área rural a Sudoeste. A universidade possui cerca de 17 poços tubulares de captação ativos, sendo que 15 desses, encontram-se na área de interesse deste estudo e captam volumes totais diário e anual superiores a, respectivamente, 614,40 e 224256 m³.

Palavras-chaves: Modelo conceitual; Sistema Aquífero Guarani; aquífero poroso.

ABSTRACT

Groundwater represents a water resource of great importance for the social and economic development of the population. However, the increase in demand and the lack of knowledge of hydrogeological aspects ends up making management of these underground resources a big challenge. An approach often used as a way to understand the processes that occur within an aquifer system is numerical modeling. The initial stage of the numerical modeling process is the construction of a conceptual model of the region of interest, being carried out in order to organize, analyze and synthesize the relevant hydrogeological data. Following that path, this research seeks to build a conceptual hydrogeological model with information from the campus region of the Federal University of Santa Maria, Santa Maria-RS, so that later a numerical flow model can be developed. With the construction of the conceptual model it was identified that the hydro-stratigraphic unit constituted by the unit Passo das Tropas is more relevant, however the Sanga do Cabral unit also showed similar hydrodynamic characteristics in tests performed on outcrop profiles. The unit constituted by the member Alemoa, responsible for the confinement of the member Passo das Tropas, is characterized as aquíclode. The potentiometry and general flow directions of the region have a direction from South to North, and the campus region acts as an indirect recharge area for the urbanized portion of Camobi and also receives indirect outcrop recharge from the Passo das Tropas Member. in a rural area to the southwest. The university has about 17 active tubular wells, 15 of which are in the area of interest for this study and capture total daily and annual volumes above, respectively, 614.40 and 224256 m³.

Keywords: Conceptual model; Guarani Aquifer System; porous aquifer.

3.1 INTRODUÇÃO

A importância das águas subterrâneas e, conseqüentemente, dos aquíferos ficou mais evidenciada com o aumento da demanda e a diminuição da disponibilidade das águas superficiais (HAGER et al., 2002). Entretanto, o caráter oculto, a natureza de recurso comum e a ausência de ações de gestão e fiscalização podem explicar as dificuldades de avaliar as condições reais de exploração (VILLAR, 2016). Hirata, Zoby e Oliveira (2010) destacam que um grande desafio para a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos é o contraste entre a importância que a água subterrânea apresenta para o desenvolvimento social e econômico e a deficiência no conhecimento do potencial e do estágio de exploração dos aquíferos.

Por essas razões, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, bem como, a proteção e a descontaminação de aquíferos, dependem da forma como são quantificados os fenômenos de fluxo e de transporte de um sistema aquífero, sendo a modelagem numérica uma das abordagens mais frequentemente utilizadas (CLEARY, 1989).

O processo de modelagem numérica é constituído por diversas etapas, distribuídas em um fluxo de trabalho, sendo a construção de um modelo conceitual a etapa inicial, na qual são organizados, analisados e sintetizados dados hidrogeológicos relevantes do local de interesse para a modelagem (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Esse modelo conceitual busca simplificar as informações de campo, conciliando representações da realidade hidrogeológica com formas que facilitem a aplicação do modelo numérico (CABRAL; DEMÉTRIO, 2008). Além disso, consolida a compreensão atual dos principais processos do sistema de águas subterrâneas e auxilia na compreensão de possíveis mudanças futuras (BARNETT et al., 2012).

Para Anderson, Woessner e Hunt (2015), os componentes mínimos de um modelo conceitual para a maioria das modelagens de fluxo de água subterrânea incluem informações sobre os limites do sistema; as propriedades hidroestratigráficas e hidrogeológicas; as direções de fluxo, recargas e descargas; e uma estimativa baseada em campo dos componentes do balanço hídrico das águas subterrâneas.

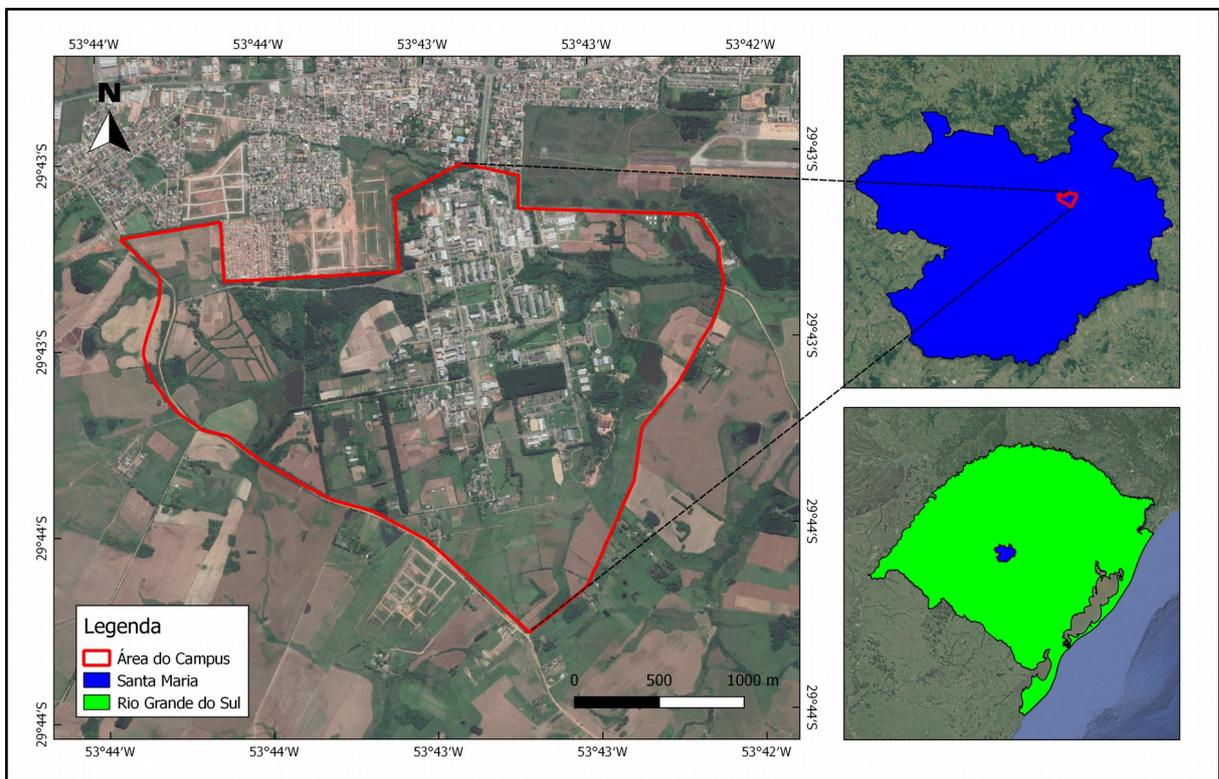
Nesse sentido, a presente pesquisa busca construir um modelo hidrogeológico conceitual com as informações da região do campus da Universidade

Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria-RS, para que posteriormente seja desenvolvido um modelo numérico de fluxo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da pesquisa situa-se no campus da UFSM, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, no município de Santa Maria, entre as coordenadas $29^{\circ}42'37.31''\text{S}$ e $29^{\circ}44'8.31''\text{S}$ de Latitude e $53^{\circ}42'7.23''\text{O}$ e $53^{\circ}44'19.17''\text{O}$ de Longitude (Figura 3.1). O campus encontra-se no bairro Camobi a aproximadamente 9 km do centro de Santa Maria e 290 km da capital Porto Alegre.

Figura 3.1 - Localização da área de estudo do campus da UFSM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O município situa-se na Depressão Central ou Periférica Sul-riograndense que é uma área deprimida na zona de contato entre os terrenos sedimentares e o embasamento cristalino. Geomorfologicamente, o campus é caracterizado por áreas de acumulação aluvial e por topografia colinosa de ondulações suaves, regionalmente conhecidas por coxilhas (ROSA; SARTORI; SILVEIRA, 2003). Nas

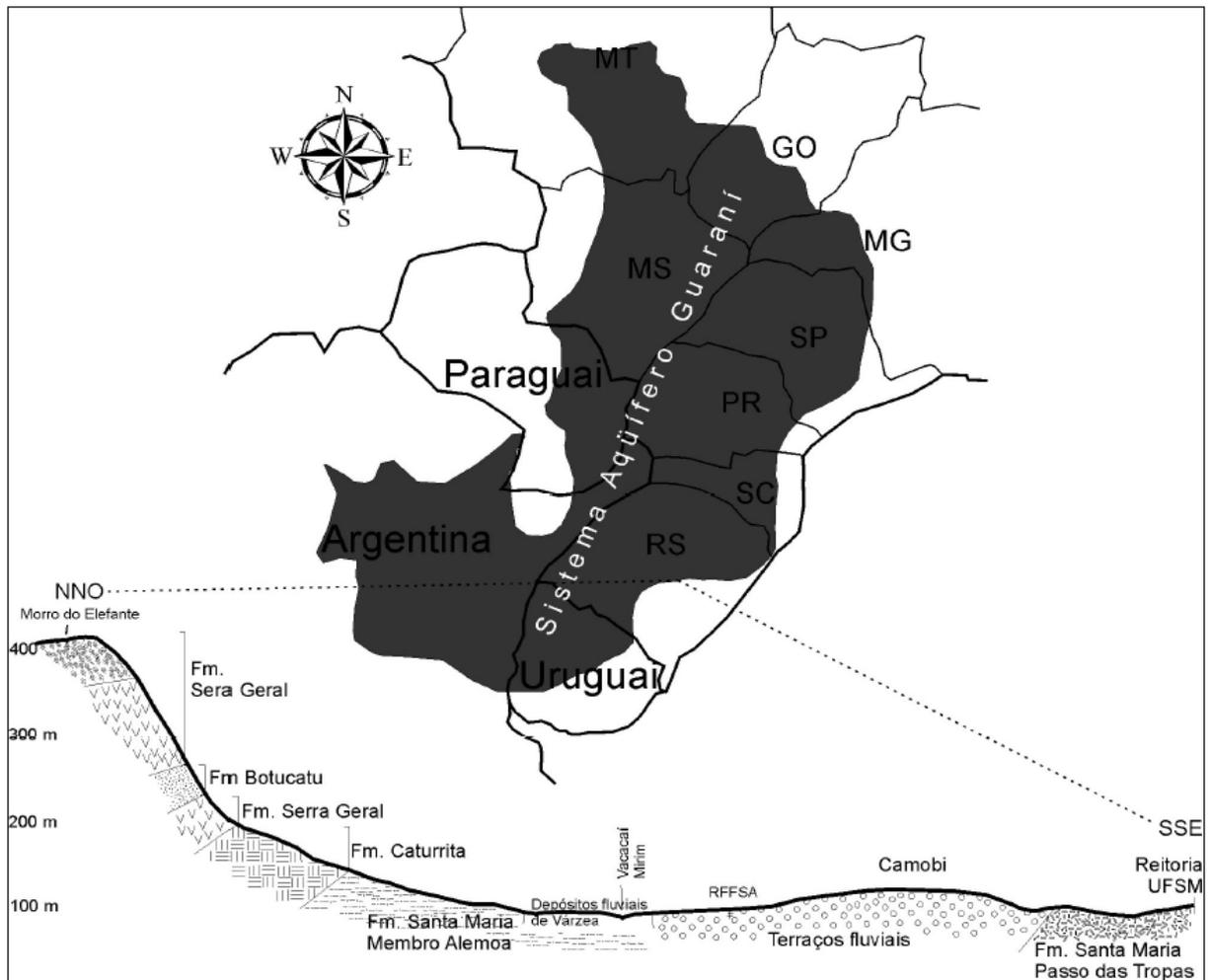
porções mais elevadas as vertentes são convexas com topos também suavemente convexos a planos e nas porções mais baixas as vertentes são côncavas. Os processos da dinâmica superficial relacionados a essas vertentes são tanto de acumulação quanto de deposição, pois, ao mesmo tempo em que sofrem os processos erosivos transportando material para os locais mais baixos, nas planícies fluviais, sofrem os processos de acumulação de sedimentos transportados dos locais mais altos que as circundam (NASCIMENTO; SOUZA, 2013).

Em relação à geologia, no município ocorrem as unidades estratigráficas: Formação Sanga do Cabral (correspondente a porção fluvial da antiga Formação Rosário do Sul), Formação Santa Maria, Formação Caturrita, Formação Botucatu e Formação Serra Geral. Além dessas ocorrem três unidades transportadas que recobrem as unidades anteriores: Depósitos Coluvionares, Depósitos Fluviais de Várzea e Depósitos Fluviais de Terraço (MACIEL FILHO, 1990). Na Figura 3.2 é apresentado o perfil geológico com a relação de altitudes das unidades estratigráficas e a localização junto ao Sistema Aquífero Guarani (SAG).

Conforme a Figura 3.2, a região encontra-se em área de afloramento do SAG, que no local de interesse é representado pelas unidades hidroestratigráficas Alemoa, Passo das Tropas e Sanga do Cabral. Devido ao fato do SAG ser composto por várias unidades hidroestratigráficas, suas litologias são muito variáveis, sendo localmente arenosas de granulometria média a grossa (Passo das Tropas) ou então muito finas com siltitos e arenitos argilosos (Alemoa e Sanga do Cabral) (MACHADO; FREITAS, 2005). A unidade Passo das Tropas representa o melhor aquífero da região. Por ser um aquífero contínuo de grande extensão, livre e/ou confinado, com excelentes vazões e água geralmente de boa qualidade, é o mais explorado pelos poços profundos instalados junto a zona urbanizada (MACIEL FILHO, 1990; MACHADO, 1994). Já as unidades Alemoa e Sanga do Cabral possuem menor importância hidrogeológica (MACHADO; FREITAS, 2005).

A bacia hidrográfica do campus situa-se em uma das nascentes do rio Vacacaí-Mirim e possui uma área de drenagem de aproximadamente 9,7km². A bacia está em sua totalidade alterada por processo de urbanização e de utilização do solo para a agricultura. O campus ocupa cerca de 65% da área da bacia, sendo a outra parte localizada a montante dessa região. Essa porção a montante é composta por núcleos de habitações populares e construções de elevado padrão, que são resultantes do intenso processo de urbanização (SILVEIRA et al., 2003).

Figura 3.2 - Perfil geológico mostrando corte (sentido NNO – SSE) e sua localização junto ao SAG.



Fonte: (MARION, 2009).

Na universidade a captação de águas subterrâneas é ativa e consiste em uma das principais fontes de abastecimento, o que demonstra a importância que esses recursos têm para o desenvolvimento das atividades da instituição. Nesse sentido, Moreira (2005) aponta que dados históricos de níveis estáticos demonstram a ocorrência de rebaixamento e diminuição da vazão em alguns dos poços, o que prejudicaria a disponibilidade hídrica. Com a realização de diagnósticos da captação, Silva et al (2012) constataram a carência de dados hidrogeológicos e a necessidade de registros periódicos do nível da água. Também apresentam que a variação dos níveis estáticos dos poços pode ser associada, dentre outros fatores, ao aumento do consumo de água devido ao crescimento da infraestrutura e do número de usuários.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual da região do campus da UFSM foram utilizadas as seguintes fontes de informações:

- a) Cartográficas: Mapa Geológico da Folha de Camobi – RS, Escala 1:50.000 (MACIEL FILHO et al., 1988); Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria, Escala 1:100.000 (CPRM, 1994); Carta Topográfica de Camobi: Folha SH.22-V-C-IV/2-SO, Escala 1:25.000 (BRASIL, 1996);
- b) Bibliográficas: Poços cadastrados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM, 2019); Relatório técnico para obtenção de outorga do direito de uso de água subterrânea da UFSM (HIDROBRASIL, 2008); Poços cadastrados no Sistema de Outorga de Águas do Rio Grande do Sul - SIOUT/RS (SEMA, 2019); Pesquisas anteriores realizadas na área de estudo;

As informações coletadas foram organizadas e georreferenciadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), com a utilização do software livre QGIS, versão 2.18, no sistema de referência geodésica SIRGAS 2000 no fuso UTM 22S. A topografia da região foi estimada por interpolação com base nas curvas de nível e pontos cotados da Carta Topográfica de Camobi pelo método Topo To Raster presente no software ArcGIS. As demais interpolações foram realizadas com o método krigagem no software Surfer.

A potenciometria e as direções gerais de fluxo foram definidas a partir do nível da água monitorado em nove poços tubulares inativos dentro da área de interesse e, complementarmente, de dados de três poços externos cadastrados na plataforma SIAGAS (Tabela 3.1). Os nove poços tubulares inativos foram monitorados semanalmente durante o período de um ano, 19/02/2019 a 18/02/2020, com a finalidade de analisar o comportamento hidrodinâmico em relação aos eventos de precipitação e a captação de água subterrânea realizada no local. Os dados de precipitação foram obtidos da estação meteorológica automática presente no campus da UFSM (INMET, 2019).

Tabela 3.1 - Poços tubulares utilizados para construção da potenciometria e definição das direções gerais de fluxo do campus da UFSM.

Poço	Local	UTM E	UTM N	Profundidade (m)
PB01	Prédio 21	237068,96	6709463,77	270,0
PB03	Planetário	237064,78	6709177,85	49,0
PB05	CCS	237448,46	6709925,17	100,0
PB06	Antigo Almoxarifado	236981,98	6709636,71	100,0
PB12	Parque Exposição	237554,94	6708507,05	60,0
PB17	Biblioteca Central	237403,23	6709604,69	68,0
P01	Piscina Térmica	237807,64	6708962,68	70,0
P12	Suinocultura	236375,40	6708476,51	80,0
P20	Departamento Solos	237955,28	6709368,93	80,0
PB50	Camobi	238043,00	6710571,00	64,5
PB51	Camobi	237452,00	6710583,00	75,0
PAINS	Pains, Camobi	239600,00	6708100,00	40,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

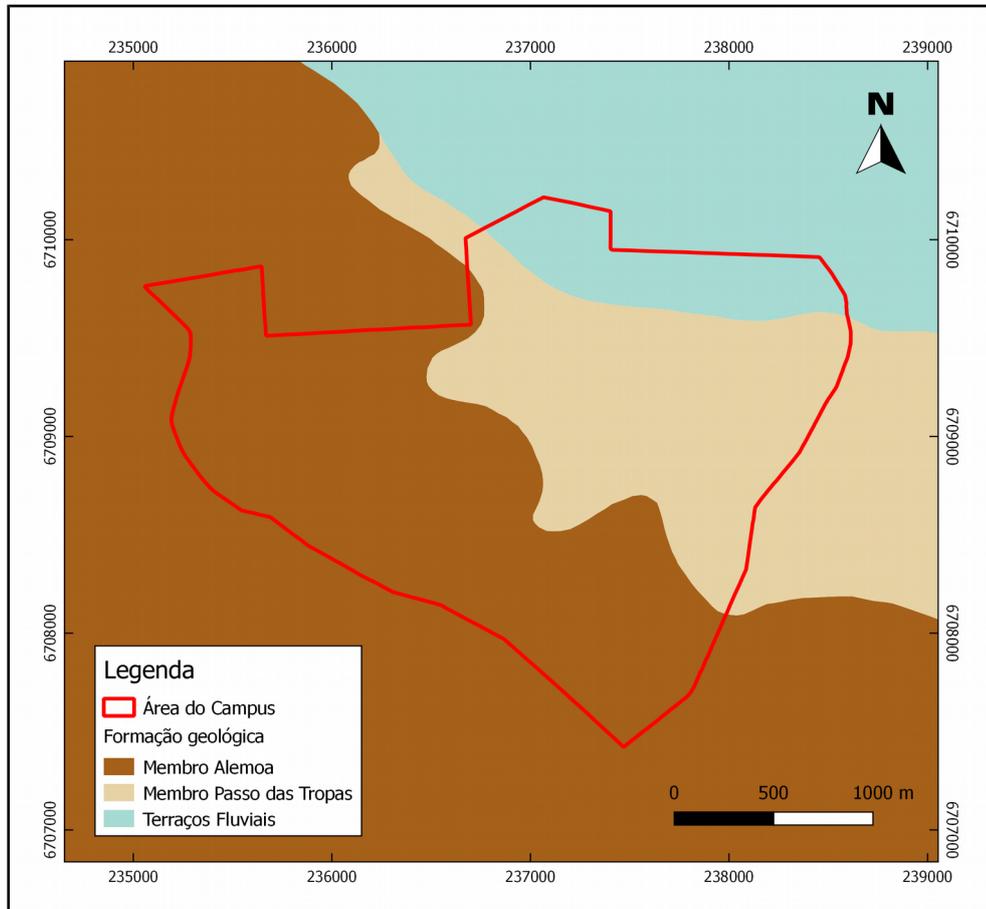
3.4.1 Definição das unidades geológicas e hidrogeológicas

Na área ocorrem os afloramentos das Formações Santa Maria e Terraços Fluviais, de acordo com o Mapa Geológico da Folha de Camobi - RS (MACIEL FILHO et al, 1988) e o Mapa Hidrogeológico Folha Santa Maria (MACHADO, 1994). A Formação Santa Maria é dividida em duas unidades geológicas, Membro Alemoa e Membro Passo das Tropas, que pertencem ao período Triássico Superior da era Mesozóica. Por sua vez, a Formação Terraços Fluviais pertence ao período Quaternário Pleistoceno da era Cenozóica (MACIEL FILHO et al, 1988).

De modo geral, a Formação Santa Maria caracteriza-se por ser delimitada na base por superfície erosional sobre a qual se depositam os arenitos de canais fluviais do Membro Passo das Tropas e no topo por litofácies pelíticas de planícies de inundação do Membro Alemoa (GIARDIN; FACCINI, 2004). Entretanto, como

demonstra a Figura 3.3, são encontrados afloramentos do Membro Passo das Tropas em algumas regiões.

Figura 3.3 - Mapa geológico da região do campus da UFSM.



Fonte: (MACIEL FILHO et al., 1988).

Segundo Maciel Filho et al. (1988), as litologias das unidades que constituem a Formação Santa Maria são descritas como: Membro Passo das Tropas - arenito feldspáticos médios a grosseiros, por vezes conglomeráticos, com estratificação cruzada acanalada na base, seguidos de siltitos arenosos roxo-avermelhados de ambiente fluvial, além de arenitos finos e siltitos laminados, de cor rosa a lilás, de ambiente flúvio-lacustre; e Membro Alemoa - siltitos argilosos maciços, de cor avermelhada, com níveis esbranquiçados de concreções calcárias, sub-horizontais de ambiente continental.

Os Terraços Fluviais, aflorantes na porção Nordeste do campus, são formações mais recentes com pequena espessura de até 10 m, e que encontram-se

sobre os siltitos argilosos do Membro Alemoa. Essas foram caracterizadas por Maciel Filho et al. (1988) como conglomerados, arenitos médios argilosos com estratificação cruzada e planar e siltitos arenosos de cores cinza-clara, rosa e amarela de ambiente fluvial.

Por sua vez, a Formação Sanga do Cabral não é aflorante na área de interesse, sendo encontrada através da análise dos perfis litológicos de alguns poços tubulares (GIARDIN; FACCIN, 2004; MOREIRA, 2005). Segundo Maciel Filho 1990, a Formação Sanga do Cabral é constituída por rochas sedimentares de origem fluvial como arenitos muito finos ou siltitos, com estratificação cruzada acanalada ou paralela contendo fraturas.

Em relação ao comportamento hidrogeológico, Machado (1994) aponta que, com litologia predominantemente arenosa e muito permeável, a unidade hidroestratigráfica constituída pelo Membro Passo das Tropas é o melhor aquífero da região e apresenta grande extensão, livre e/ou confinado. Contudo, Pinheiro, Nummer e Rauber (2017) com o método de piezômetro escavado encontraram condutividades hidráulicas que variam entre 0,1382 a 0,6048 m/dia para perfis aflorantes da unidade no município. Isso classifica a unidade como um aquífero pobre (DAEE/USP, 1992), o que pode ser resultante das intercalações argilosas encontradas nas camadas da unidade.

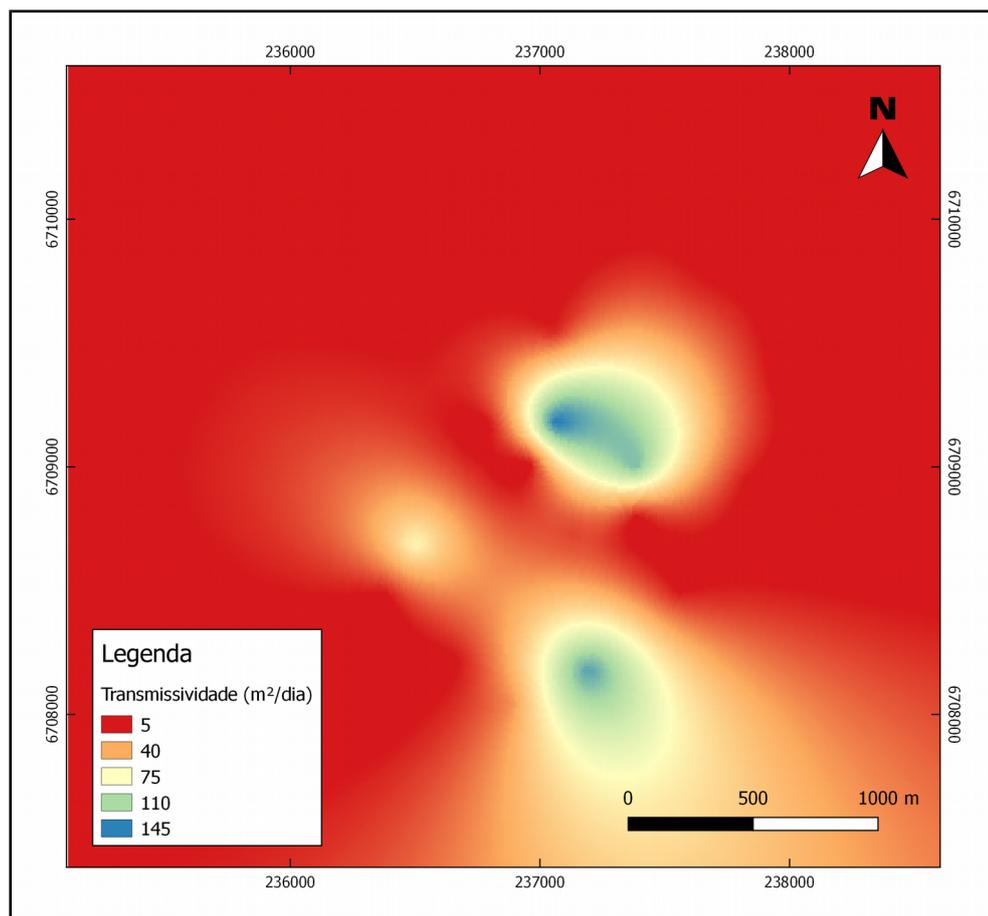
Por outro lado, a unidade constituída pelo Membro Alemoa é caracterizada como aquíclode, não armazena e nem transmite água, por apresentar basicamente siltitos impermeáveis (MACHADO, 1994). Em conformidade o mesmo estudo encontrou valores mais baixos de condutividade hidráulica na ordem de $7,60 \times 10^{-4}$ a $8,64 \times 10^{-4}$ m/dia. Isso se justifica pela predominância de materiais mais finos (siltes e argilas) em relação à fração areia (PINHEIRO; NUMMER; RAUBER, 2017).

A unidade Sanga do Cabral apresentou resultados similares a Passo das Tropas para os ensaios realizados nos perfis aflorantes, sendo encontrada uma condutividade hidráulica média de 0,2173 m/dia (PINHEIRO; NUMMER; RAUBER, 2017). Essa unidade possui litologia arenosa de granulometria muito fina, argilosa e permeabilidade baixa, sendo caracterizada com aquícardo (MACHADO, 1994).

Com ensaios de bombeamento realizados em 3 poços, Giardin e Faccin (2004) obtiveram valores de transmissividade de 3,6 e 150,48 m^2/dia . O maior valor foi obtido para o poço PB03 que situa-se ao centro da área do campus sobre o afloramento do Membro Passo das Tropas e é um dos poços mais rasos da região

com 49 m de profundidade. Já os outros dois poços (P09 e PB05) apresentaram o valor de transmissividade de aproximadamente 3,6 m²/dia. Além disso, ensaios de bombeamento realizados em 2008 pela Empresa Hidrobrasil e dados presentes na plataformas SIAGAS apresentam valores de transmissividade que variam de 0,42 a 135,06 m²/dia. Com essa consistência de dados foi possível construir a distribuição da transmissividade para a região de interesse (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Distribuição da transmissividade na região do campus da UFSM.



Fonte: (GIARDIN; FACCIN, 2004; HIDROBRASIL, 2008; CPRM, 2019).

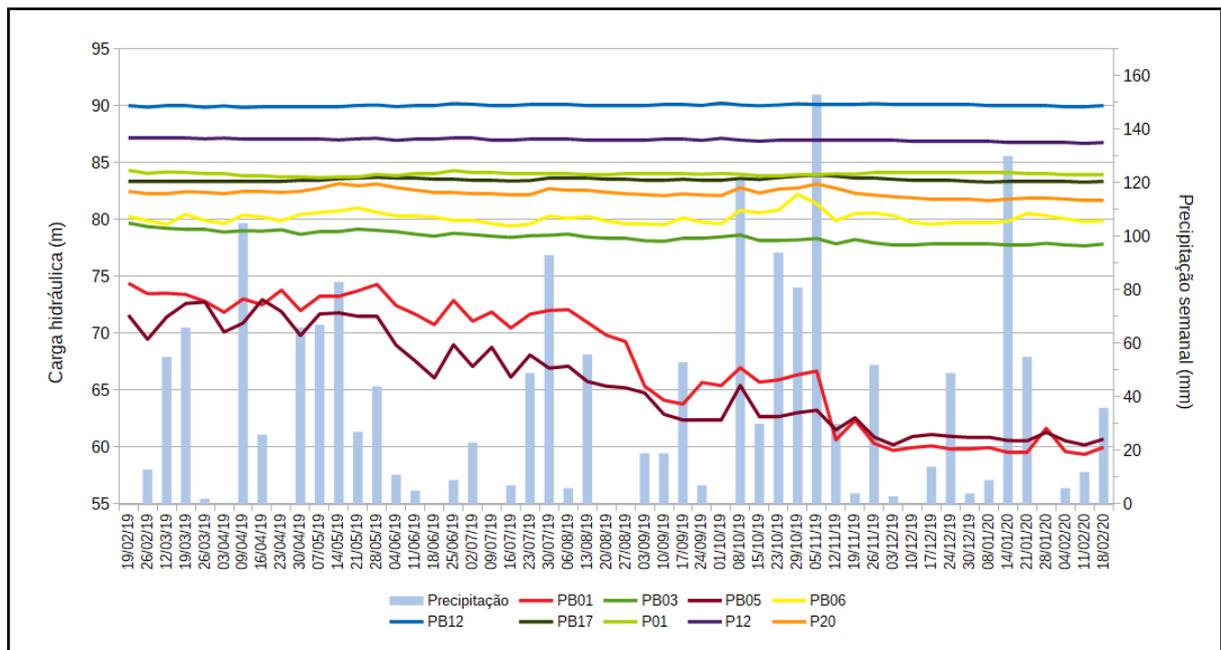
3.4.2 Definição do sistema de fluxo

A potenciometria e direções gerais de fluxo da região de Camobi, sem considerar a hidroestratigrafia ou as heterogeneidades faciológicas e tectônicas, apontam a área do campus da UFSM como sendo um divisor de águas subterrâneas (GIARDIN; FACCIN, 2004). Contudo, a análise local consideram apenas os poços

presentes no campus aponta para uma direção geral de fluxo no sentido do Sul para o Norte, demonstrando que a área atua como uma área de recarga indireta para a porção urbanizada de Camobi (MARION, 2009). Além disso, também recebe recarga indireta de afloramento do Membro Passo das Tropas que encontra-se em área rural a Sudoeste da área de interesse (WANKLER; FACCINI; SILVA, 2007).

Por meio do monitoramento das cargas hidráulicas observou-se que sete dos nove poços monitorados não apresentaram grandes variações durante o período. Desses, os poços PB12 e P12, localizados na região sul da área de interesse, apresentaram a menor variação observada. Em contrapartida, os poços PB01 e PB05, apresentaram um elevado grau de rebaixamento frente aos demais poços. Esse rebaixamento ocorreu com certa proporcionalidade entre os dois poços, o que pode demonstrar uma região de maior interação com a exploração que ocorre nos poços vizinhos. Além disso, cabe destacar também que os poços PB06 e P20, localizados na região mais central do afloramento da unidade Passo das Tropas, apresentaram a maior resposta aos eventos de precipitação. As variações da carga hidráulica e as estatísticas descritivas dos poços monitorados são apresentadas, respectivamente, na Figura 3.5 e na Tabela 3.2.

Figura 3.5 - Variação das cargas potenciométricas nos poços monitorados durante 19/02/19 a 18/02/20.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.2 - Estatísticas descritivas das cargas hidráulicas nos poços monitorados durante 19/02/19 a 18/02/20.

	Carga hidráulica (m)								
	PB01	PB03	PB05	PB06	PB12	PB17	P01	P12	P20
Máximo	74,42	79,71	72,98	82,24	90,26	83,94	84,34	87,24	83,18
Mínimo	59,38	77,71	60,20	79,44	89,87	83,30	83,71	86,71	81,68
Amplitude	15,04	2,00	12,78	2,80	0,39	0,64	0,63	0,53	1,50
Média	67,53	78,48	65,74	80,18	90,05	83,51	84,04	87,02	82,35
Mediana	69,57	78,46	65,40	80,11	90,07	83,49	84,04	87,02	82,34
Desvio Padrão	5,49	0,51	4,30	0,53	0,09	0,15	0,14	0,13	0,38

Fonte: Elaborado pelos autor.

Com os dados de carga hidráulica média (Tabela 3.2) e os dados dos 3 poços externos foi possível construir a potenciometria média da área de interesse para o período. Essa potenciométrica é consoante com a direção geral de fluxo no sentido Sul para o Norte e também apresenta a redução da carga hidráulica resultando do processo de exploração durante o período (Figura 3.6).

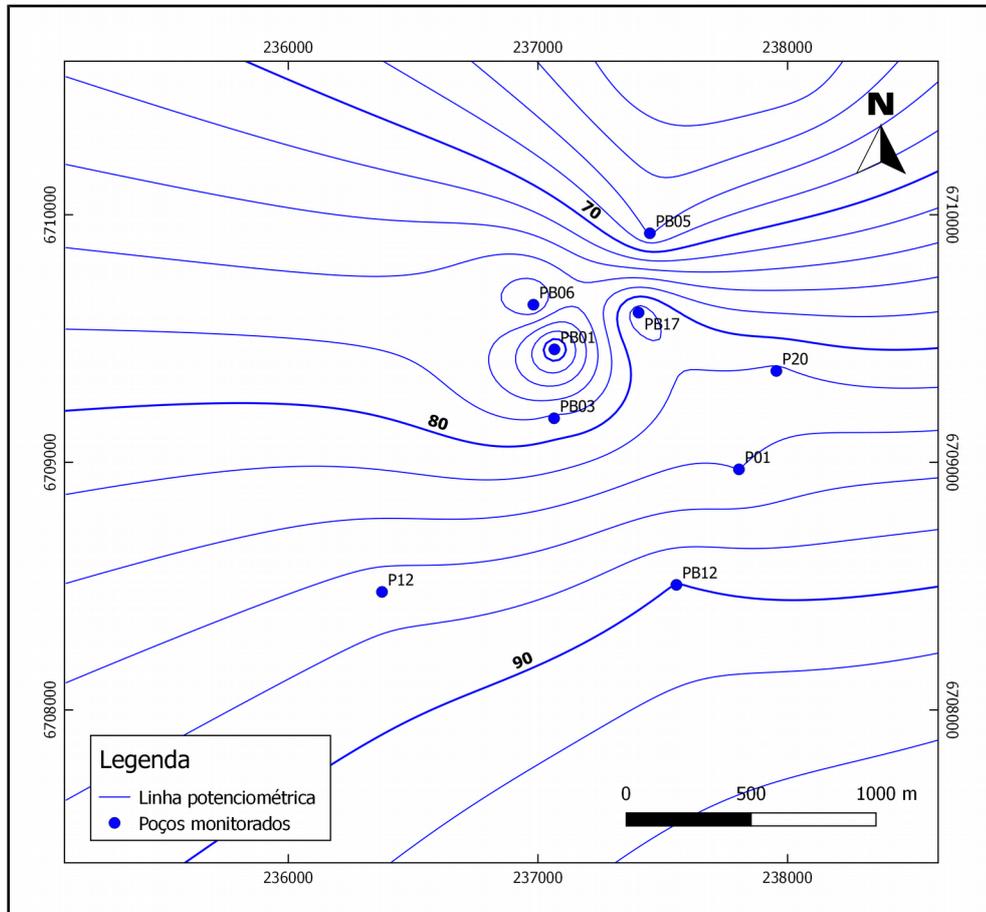
3.4.3 Recarga e exploração da água subterrânea

O clima da região segundo a classificação de Köppen é o Cfa - subtropical úmido sem estação seca definida, sendo o regime pluviométrico regional é bem distribuído durante as quatro estações do ano com precipitações médias anuais variando entre 1322 a 1769 mm (ZAMBERLAN, 2007). Com base nos dados levantados pelo INMET, durante o período monitorado ocorreu uma precipitação de 1794 mm.

A recarga da Unidade Passo das Tropas ocorre por drenança (gotejamento) a partir da Unidade Alemoa e diretamente em suas áreas de exposição, sendo o campus da UFSM uma das áreas de recarga direta para a região de Camobi (GIARDIN; FACCINI, 2004; WANKLER; FACCINI; SILVA, 2007). Com a utilização do método WTF (*Water Table Fluctuation*) para aquífero não confinados, constatou-se que a taxa de recarga varia entre 17,0% a 48,0% da precipitação total (LÖBLER,

2015). Considerando a precipitação no período, pode-se estimar uma recarga que varia na ordem de 304,98 a 861,12 mm.

Figura 3.6 - Potenciometria média do Campus da UFSM para o período monitorado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A universidade já possuiu um total de 24 poços de captação ativos, pois a cada prédio construído um poço era perfurado para abastecê-lo. Deve-se salientar que vários desses poços tubulares já foram lacrados e aterrados, possivelmente, devido à retirada em excesso da água subterrânea ou por desmoronamento e, posteriormente, novos poços foram perfurados (MOREIRA, 2005).

No ano de 2008 foi realizado pela Empresa Hidrobrasil ensaios para obtenção da outorga de uso da água subterrânea em 21 poços de captação ativos na época (HIDROBRASIL, 2008). Atualmente, existem cerca de 17 poços tubulares de captação ativos, dos quais 15 encontram-se na área de interesse deste estudo. Esse poços possuem profundidades de aproximadamente de 100 m e captam vazões que

variam de 3,2 a 10,3 m³/h. Na Tabela 3.3 são apresentados os volumes bombeados diariamente e anualmente para 11 desses poços tubulares, tendo como base um operação de 8 horas por dia.

Tabela 3.3 - Volume diário e anual captado por cada poço tubular do Campus da UFSM.

Poço	Local	UTM E	UTM N	Vazão (m ³ /h)	Hora/Dia	Volume Diário (m ³)	Volume Total Anual (m ³)
PB02	Centro Eventos	237391,74	6708793,21	6,00	08:00	48,00	17520
PB08	Estr. Jardim Botânico	236688,62	6709524,09	8,00	08:00	64,00	23360
PB11	Colégio Politécnico	237132,99	6708746,74	9,70	08:00	77,60	28324
PB15	Madame	237629,13	6709737,07	9,20	08:00	73,60	26864
PB16	Ginásio Didático	237844,39	6708921,42	3,20	08:00	25,60	9344
PB18	Reitoria	237382,56	6709002,58	4,80	08:00	38,40	14016
PB19	Torrão Paulista	236784,86	6709169,64	6,00	08:00	48,00	17520
PB21	Hospital Veterinário	237193,90	6708178,13	7,60	08:00	60,80	22192
PB22	Tambo	236889,33	6708046,01	10,30	08:00	82,40	30076
PB23	Setor Transporte	236825,11	6709770,82	6,40	08:00	51,20	18688
PB24	CCSH	236957,03	6709014,33	5,60	08:00	44,80	16352

Fonte: (HIDROBRASIL, 2008; SEMA, 2019).

Com base nesses dados se estima que os volumes totais diário e anual captados são, respectivamente, 614,40 e 224256 m³, embora deve-se considerar que os dados de 4 poços não estão contemplados nessa estimativa por esses foram perfurados posteriormente ao ano de 2008. Além disso, Ertel et al (2013) ao monitorarem o hidrômetro instalado no poço localizado no PB24 encontraram volumes explotados de 43.484,04 e 63.842,7 m³ para os respectivos anos de 2011 e 2012. Quando comparado aos dados cadastrados no SIOUT/RS (SEMA, 2019), isso representa um aumento de cerca de 3 vezes no volume explotado no poço em análise. Da mesma forma, considerando que nos últimos anos a universidade teve um crescimento em infraestrutura e número de usuários, o volume total explotado anualmente também pode ter sofrido um aumento proporcional em relação aos dados cadastrados que são referentes ao ano de 2008.

3.5 CONCLUSÕES

Com a construção do modelo hidrogeológico conceitual foi possível identificar que o sistema aquífero poroso da região do campus apresenta tanto características livres quanto confinadas. Nesse sistema, a unidade hidroestratigráfica constituída pelo Membro Passo das Tropas apresenta maior relevância por possuir litologia predominantemente arenosa e muito permeável. Entretanto, a unidade Sanga do Cabral apresentou características hidrodinâmicas similares em testes realizados em perfis aflorantes, mesmo possuindo litologia arenosa de granulometria muito fina e argilosa. Já a unidade constituída pelo Membro Alemoa, responsável pelo confinamento do Membro Passo das Tropas, é caracterizada como aquíclode por apresentar basicamente siltitos impermeáveis.

A potenciometria e as direções gerais de fluxo da região apresentam sentido do Sul para o Norte, sendo que a região do campus atua como uma área de recarga indireta para a porção urbanizada de Camobi e também recebe recarga indireta de afloramento do Membro Passo das Tropas que encontra-se em área rural a sudoeste da área de interesse. Essa recarga ocorre por drenança (gotejamento) a partir da Unidade Alemoa e diretamente em suas áreas de exposição com taxas que podem variar entre 17,0% a 48,0% da precipitação total.

Dos 21 poços tubulares utilizados para captação de água subterrânea em 2008, cerca de 17 ainda estão ativos no campus. Desses, 15 poços encontram-se na área de interesse deste estudo e captam volumes totais diário e anual superiores a, respectivamente, 614,40 e 224256 m³. Contudo, um estudo que monitorou um desses poços aponta que o volume explotado pode ser cerca de 3 vezes maior, o que pode ter ocorrido devido a universidade nos últimos anos ter sofrido um crescimento em infraestrutura e número de usuários.

3.6 AGRADECIMENTOS

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

3.7 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. 2. ed. Academic press, 2015.
- BARNETT, B. et al. **Australian groundwater modelling guidelines**. Waterlines report. National Water Commission. Canberra, 2012.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **Carta topográfica de Camobi: Folha SH.22-V-C-IV/2-SO**. Escala 1:25.000. Diretoria de Serviço Geográfico, 1996.
- CABRAL, J. J. da S. P; DEMÉTRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C. et al (Org./Coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Sistema de Informação de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/>>.
- CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: RAMOS, F. et al. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.
- DAEE/USP. **Projeto, perfuração e operação de poços perfurados: curso de formação e especialização**. São Paulo, 1992.
- ERTEL, T. et al. Avaliação da exploração de água em poço tubular do campus da UFSM. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves - RS. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2013.
- GIARDIN, A.; FACCINI, U. Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do Sistema Aqüífero Guarani: abordagem metodológica aplicada ao exemplo da área de Santa Maria-RS, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 18, n. 1, 2004.
- HAGER, F. P. V. et al. A problemática da gestão das águas subterrâneas no Brasil. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2002.
- HIDROBRASIL. **Relatório técnico para obtenção de outorga do direito de uso de água subterrânea da UFSM**. Relatório interno. Santa Maria, 2008.
- HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. de. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, C. E.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (Org.). **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Estação automática: A803 - Santa Maria**. Brasília, 2019. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/>>.

LÖBLER, C. A. **Avaliação quantitativa da recarga das águas subterrâneas da bacia escola do campus da Universidade Federal de Santa Maria**. 2015. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recurso Hídricos e Tecnologias Ambientais)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MACHADO, J. L. F. (Resp. Téc.) et al. **Mapa hidrogeológico folha Santa Maria**. Escala 1:100.000. Porto Alegre: CPRM, 1994.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: relatório final**. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MACIEL FILHO C. L. (Coord.) et. al. **Mapa geológico da folha de Camobi – RS**. Escala 1:50.000. Convênio: FINEP – UFSM. Santa Maria, 1988.

MACIEL FILHO C. L. **Carta geotécnica de Santa Maria**. Escala 1:25.000. Santa Maria: Imprensa Universitária - UFSM, 1990.

MOREIRA, C. M. D. **Aspectos qualitativos da água subterrânea no Campus da UFSM**. 2005. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

NASCIMENTO, M. D.; SOUZA, B. S. P. e. Estudo geomorfológico de detalhe do perímetro urbano do município de Santa Maria-RS. **CLIMEP - Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 8, n. 1, 2013.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria–RS. **Geociências** (São Paulo), v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

ROSA, J. L.; SARTORI, M. G. B; SILVEIRA, R. D. Caracterização geomorfológica do Campus da UFSM, Santa Maria-RS. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2003.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA - SEMA. **Sistema de Outorga de Água do Rio Grande do Sul - SIOUT/RS**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <<http://www.siout.rs.gov.br/>>.

SILVA, J. L. S. da et al. Captações de água subterrânea no campus da UFSM, Santa Maria–RS. **Revista Monografias Ambientais**, v. 9, n. 9, p. 1953-1969, 2012.

SILVEIRA, G. L. da et al. Balanço de cargas poluidoras pelo monitoramento qualitativo dos recursos hídricos em pequena bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 5-11, 2003.

WANKLER, F. L.; FACCINI, U. F.; SILVA, P. L. Contribuição ao estudo do aquífero passo das tropas, na região de Santa Maria, RS: compartimentação estrutural e sua influência no comportamento hidrogeológico. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2007.

VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, 2016.

ZAMBERLAN, J. F. **Caracterização de águas de reservatório superficial para uso em microirrigação**. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

4 ARTIGO 2 - MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, SANTA MARIA-RS

NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER FLOW IN THE CAMPUS OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA, SANTA MARIA - RS

RESUMO

As águas subterrâneas representam um recurso natural que é vital para o abastecimento de água potável de forma segura e econômica em regiões urbanas e rurais, sendo fundamental para o bem-estar de seres humanos e muitos ecossistemas aquáticos. Por essa razão, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos dependem da forma como são quantificados os fenômenos de fluxo do aquífero em análise, sendo a modelagem numérica uma das abordagens mais frequentemente utilizadas. A modelagem possibilita quantificar o fluxo em um sistema aquífero, bem como, representar as relações entre as entradas e saídas de água. Dessa forma, a presente pesquisa visa ampliar os conhecimentos hidrogeológicos e estimar a participação da recarga por precipitação e dos poços de bombeamento em relação ao balanço hídrico do sistema aquífero do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, por meio da modelagem numérica de fluxo em regime estacionário. O modelo foi desenvolvido com a interface FREEWAT que está integrada ao software livre QGIS. Essa utiliza o código de modelagem MODFLOW-2005, que simula o fluxo das águas subterrâneas com o método das diferenças finitas. Com um domínio investigado de 11,55 km² dividido em 4620 células de 50 m², o modelo foi calibrado pelo método “tentativa e erro” e análises estatísticas de ME, MEA e RSME. O modelo considerado calibrado apresentou valores de condutividade hidráulica de 0,29, 1,0, 2,5 e 6,36 m/dia e de recarga por precipitação de 6×10^{-5} e 0,0003 m/dia. O balanço hídrico subterrâneo estimado apresentou uma participação de 69,55% da recarga por precipitação e 44,08% dos poços de bombeamento em relação, respectivamente, as entradas e saídas de água do sistema aquífero. A análise de sensibilidade realizada com a variação isolada dos parâmetros apresentou que recarga nos afloramentos da unidade Passo das Tropas e o poços de bombeamento são mais sensíveis para os resultados do modelo, o que demonstra a relevância e o cuidado que novas investigações precisam ter em relação a esses parâmetros.

Palavras-chaves: Modelo numérico; Simulação de fluxo; MODFLOW, Sistema Aquífero Guarani; aquífero poroso.

ABSTRACT

Groundwater represents a natural resource that is vital for the supply of potable water in a safe and economical way on urban and rural regions, being fundamental to the well-being of humans and many aquatic ecosystems. For this reason, the planning and management of groundwater resources depends on how the phenomenon of flow inside the aquifer system under analysis are quantified, with numerical modeling being one of the most frequently used approaches. The modeling makes it possible to quantify the flow in an aquifer system, as well as to represent the relationships between water inlets and outlets. Thus, this research aims to expand hydrogeological knowledge and estimate the participation of recharge by precipitation and pumping wells in relation to the water balance of the aquifer system on the campus of the Federal University of Santa Maria, Santa Maria - RS, through modeling flow rate in steady state. The model was developed with the FREEWAT interface, which is integrated with the free software QGIS. It uses the MODFLOW-2005 modeling code, which simulates the flow of groundwater with the finite difference method. With an investigated domain of 11.55 km² divided into 4620 cells of 50 m², the model was calibrated by the “trial and error” method and statistical analyzes of ME, MEA and RSME. The calibrated compact model showed hydraulic conductivity values of 0.29, 1.0, 2.5 and 6.36 m / day and precipitation recharge of 6×10^{-5} and 0.0003 m / day. The estimated underground water balance accounted for a share of 69.55% of the recharge due to precipitation and 44.08% of the pumping wells in relation, respectively, to the inflows and outflows of the aquifer system. The sensitivity analysis carried out with the isolated variation of the parameters showed that recharge in the outcrops of the Passo das Tropas unit and the pumping wells are more

sensitive to the results of the model, which demonstrates the relevance and care that new investigations need to take towards to these parameters.

Keywords: Numerical model; Flow simulation; MODFLOW; Guarani Aquifer System; porous aquifer.

4.1 INTRODUÇÃO

A importância das águas subterrâneas e, conseqüentemente, dos aquíferos ficou mais evidenciada com o aumento da demanda e a diminuição da disponibilidade das águas superficiais (HAGER et al., 2002). Entretanto, o caráter oculto, a natureza de recurso comum e a ausência de ações de gestão e fiscalização podem explicar as dificuldades de avaliar as condições reais de exploração. Esses fatores acabam gerando uma pressão desconhecida sobre as reservas e prejudicando a todos os usuários que compartilham o aquífero (VILLAR, 2016).

Para a utilização sustentável dos aquíferos deve-se incorporar a ideia de conhecer e gerenciar o seu uso levando em consideração suas características e as condições que influenciam e/ou interagem com esse manancial subterrâneo (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2011). Por essa razão, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos dependem da forma como são quantificados os fenômenos de fluxo do aquífero em análise, sendo a modelagem numérica uma das abordagens mais frequentemente utilizadas (CLEARY, 1989).

Segundo Foster et al. (2006), os modelos numéricos são tecnicamente superiores aos outros métodos de modelagem de fluxo, pois possibilitam simular variações complexas na geometria, nas propriedades e nos padrões de recarga do aquífero, fornecendo portanto resultados mais próximos da realidade.

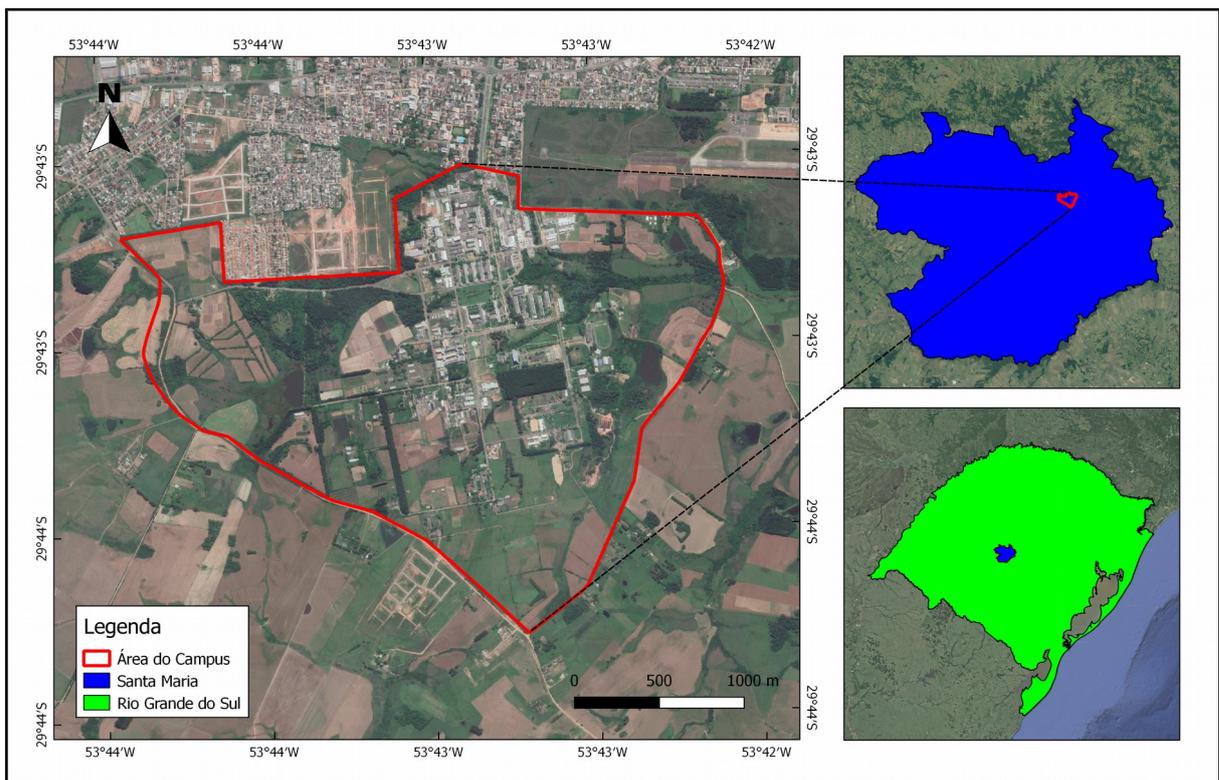
Com a modelagem numérica, por exemplo, é possível determinar o rendimento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de uma bacia ou sistema de aquífero, pois permite a análise das reservas de água por meio de balanços hídricos e a simulação de cenários de exploração em intervalos de tempo que atendam horizontes de planejamento selecionados (KALF; WOOLLEY, 2005). Também pode fornecer informações adicionais sobre o comportamento do sistema em estudo, apoiando assim a tomada de decisões e permitindo a exploração de abordagens alternativas de gestão (BARNETT et al., 2012).

Dessa forma, a presente pesquisa tem o objetivo de ampliar os conhecimentos sobre o comportamento hidrogeológico e estimar a participação da recarga por precipitação e bombeamento por poços tubulares frente ao balanço hídrico do sistema aquífero do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, por meio da modelagem numérica de fluxo em regime estacionário.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da pesquisa situa-se no campus da UFSM, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, no município de Santa Maria, entre as coordenadas $29^{\circ}42'37.31''\text{S}$ e $29^{\circ}44'8.31''\text{S}$ de Latitude e $53^{\circ}42'7.23''\text{O}$ e $53^{\circ}44'19.17''\text{O}$ de Longitude (Figura 4.1). O campus encontra-se no bairro Camobi a aproximadamente 9 km do centro de Santa Maria e a 290 km da capital Porto Alegre.

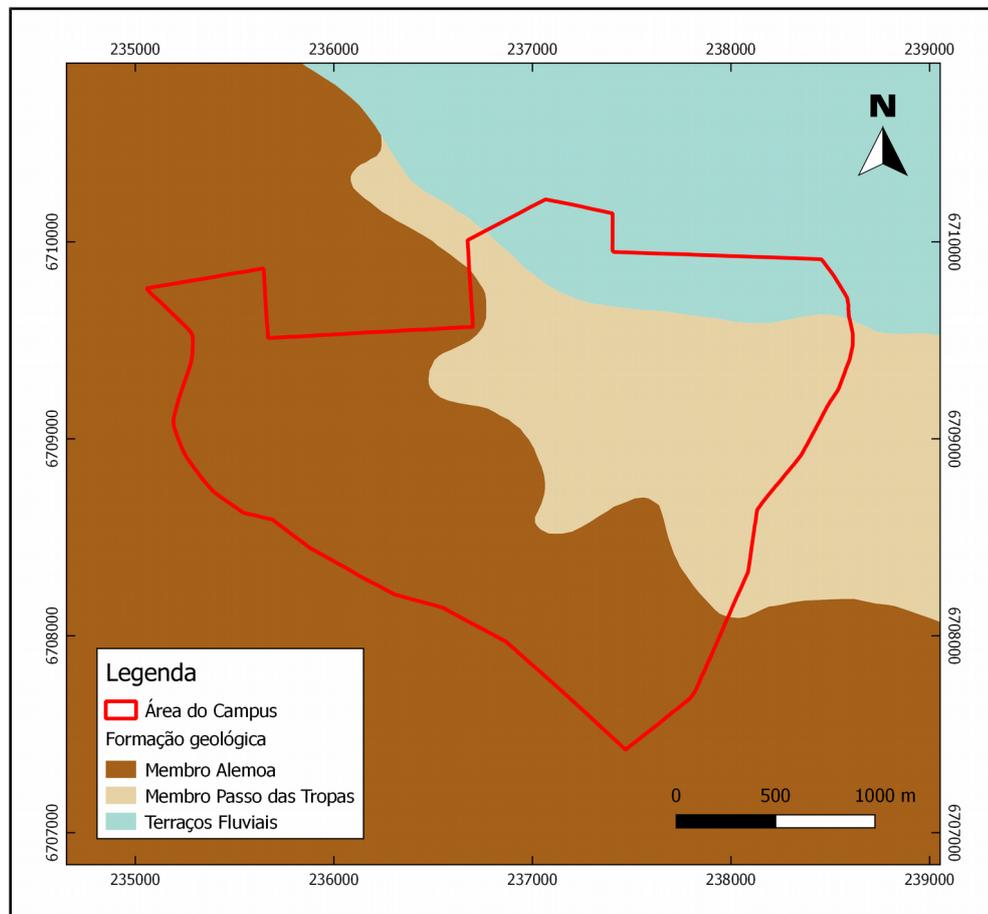
Figura 4.1 - Localização da área de estudo do campus da UFSM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O município situa-se na Depressão Central ou Periférica Sul-riograndense que é uma área deprimida na zona de contato entre os terrenos sedimentares e o embasamento cristalino (ROSA; SARTORI; SILVEIRA, 2003). Como demonstra a Figura 4.2, na área do campus ocorrem os afloramentos das Formações Santa Maria, dividida em Membro Passo das Tropas e Alemoa, e Terraços Fluviais (MACIEL FILHO et al, 1988). De modo geral, a Formação Santa Maria caracteriza-se por ser delimitada na base por superfície erosional sobre a qual se depositam os arenitos de canais fluviais do Membro Passo das Tropas e no topo por litofácies pelíticas de planícies de inundação do Membro Alemoa (GIARDIN; FACCINI, 2004). Os Terraços Fluviais são formações mais recentes de pequena espessura e que encontra-se sobre os siltitos argilosos vermelhos do Membro Alemoa.

Figura 4.2 - Mapa geológico da região do campus da UFSM.



Fonte: (MACIEL FILHO ET AL., 1988).

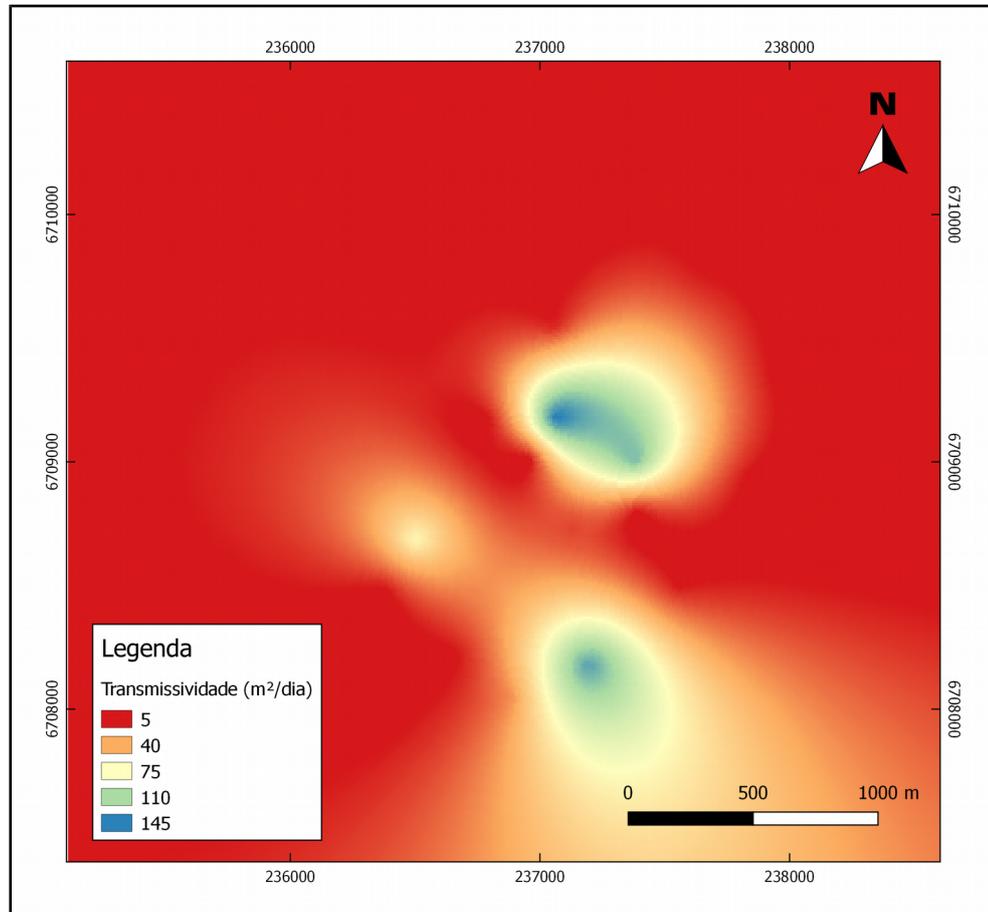
A análise dos perfis litológicos de alguns poços tubulares apontam para a presença da Formação Sanga do Cabral abaixo do Membro Passo das Tropas (GIARDIN; FACCIN, 2004; MOREIRA, 2005). Essa formação é constituída por rochas sedimentares de origem fluvial como arenitos muito finos e siltitos (MACIEL FILHO, 1990).

Nessa região encontra-se os afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), que no local de interesse é representado pelas unidades hidroestratigráficas Passo das Tropas, Alemoa e Sanga do Cabral. Como o SAG é composto por várias unidades, suas litologias são muito variáveis, sendo localmente arenosas de granulometria média a grossa (Passo das Tropas) ou então muito finas com siltitos e arenitos argilosos (Alemoa e Sanga do Cabral) (MACHADO; FREITAS, 2005). A unidade Passo das Tropas representa o melhor aquífero da região. Por ser um aquífero contínuo de grande extensão, livre e/ou confinado, com excelentes vazões e água geralmente de boa qualidade, é o mais explorado pelos poços profundos instalados junto a zona urbanizada (MACIEL FILHO, 1990; MACHADO, 1994). Por outro lado, a unidade constituída pelo Membro Alemoa é caracterizada como aquíclode, não armazena e nem transmite água, por apresentar basicamente siltitos impermeáveis (MACHADO, 1994). A unidade Sanga do Cabral com litologia arenosa de granulometria muito fina, argilosa e permeabilidade baixa é caracterizada como aquífero (MACHADO, 1994). Contudo, ensaios de condutividade hidráulica em perfis aflorantes apresentaram resultados médios similares a unidade Passo das Tropas (PINHEIRO; NUMMER; RAUBER, 2017). Cabendo destacar que o intervalo carece de informação hidrogeológica direta, pois nenhum dos poços da região extrai água exclusivamente desta unidade (GIARDIN; FACCIN, 2004).

Com ensaios de bombeamento realizados em 3 poços, Giardin e Faccin (2004) obtiveram valores de transmissividade de 3,6 e 150,48 m²/dia. O maior valor foi obtido para um poço que situa-se próximo o Planetário, sobre o afloramento do Membro Passo das Tropas e é um dos poços mais rasos da região com 49 m de profundidade. Já os outros dois poços apresentaram o valor de transmissividade de aproximadamente 3,6 m²/dia. Da mesma forma, ensaios de bombeamento realizados em 2008 para obtenção da outorga de uso da água subterrânea (HIDROBRASIL, 2008) e dados presentes na plataformas SIAGAS (CPRM, 2019) apresentam valores de transmissividade que variam amplamente de 0,42 a 135,06

m²/dia. Na Figura 4.3 é apresentada a distribuição da transmissividade para a região de interesse.

Figura 4.3 - Distribuição da transmissividade na região do campus da UFSM.



Fonte: (GIARDIN; FACCIN, 2004; HIDROBRASIL, 2008; CPRM, 2019).

A potenciometria e direções gerais de fluxo no Campus apresentam um sentido do sul para o norte, demonstrando que a área do Campus atua como uma área de recarga indireta para a porção urbanizada de Camobi (MARION, 2009). Além disso, o Campus também recebe recarga indireta de afloramento do Membro Passo das Tropas que encontra-se em área rural a sudoeste da área de interesse (WANKLER; FACCINI; SILVA, 2007). Na Figura 4.4 é apresentada a potenciometria média da área de interesse tendo como base dados médios de carga hidráulica de poços monitorados durante o período de um ano, 19/02/19 a 18/02/20, e dados de 3 poços externos ao campus.

operação de 8 horas por dia, são estimado, respectivamente, 614,40 e 224256 m³ (SEMA, 2019).

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da modelagem numérica de fluxo da área de interesse envolveu as seguintes etapas: (i) definição do propósito, (ii) construção do modelo conceitual, (iii) formulação do modelo matemático e seleção do código de modelagem, (iv) elaboração do modelo numérico, (v) simulação e calibração do modelo, (vi) análise de sensibilidade (ANDERSON; WOESSNER, 1992; ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Sendo descritas nessa pesquisa as etapas a partir da etapa de elaboração do modelo numérico.

Por meio do software livre QGIS Desktop, versão 2.18.21, a interface FREEWAT (ROSSETTO et al. 2018) foi utilizada para a elaboração do modelo numérico de fluxo e a execução do código MODFLOW-2005 (HARBAUGH, 2005), que utiliza o método numérico das diferenças finitas para simular fluxo em três dimensões. De acordo com Harbaugh (2005), nessa abordagem numérica o sistema contínuo descrito pela equação governante é substituído por um conjunto finito de pontos discretos no espaço e no tempo e as derivadas parciais são substituídas por termos calculados a partir das diferenças de valores da carga entre esses pontos.

4.3.1 Parâmetros iniciais

Os parâmetros hidráulicos iniciais empregados no modelo numérico foram:

- a) Condutividade hidráulica (K): 0,10 a 6,36 m/dia dividida em 4 zonas;
- b) Recarga por precipitação (R): 0,000835 m/dia (304,98 mm/ano), considerando a precipitação anual de 1794 mm;
- c) Sistema de bombeamento: 819,52 m³/dia distribuídos em 15 poços tubulares;

4.3.2 Calibração do modelo numérico

O processo de calibração do modelo foi feito manualmente pelo método da “tentativa e erro”, o qual consiste no ajuste dos parâmetros hidráulicos até que os resultados do modelo melhor se adaptem as cargas hidráulicas médias observadas

no 9 poços tubulares desativados do campus (Figura 04). Sendo os resultados da calibração avaliados por meio dos erros residuais encontrados em cada um dos poços e da análise estatística dos ME (*mean error*), MAE (*mean absolute error*) e RMSE (*root mean squared error*). Complementarmente, o modelo foi considerado calibrado quando a discrepância no balanço de massas foi inferior a 1% (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

4.3.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade deve ser realizada para comparar os resultados do modelo com diferentes conjuntos de estimativas de parâmetros razoáveis. Na calibração pelo método de “tentativa e erro”, a análise de sensibilidade envolve estabelecer quanto às alterações dos parâmetros podem afetar o comportamento do modelo (BARNETT et al., 2012). Dessa forma, os parâmetros hidráulicos foram alterados $\pm 50\%$ em relação aos parâmetros do modelo considerado calibrado.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

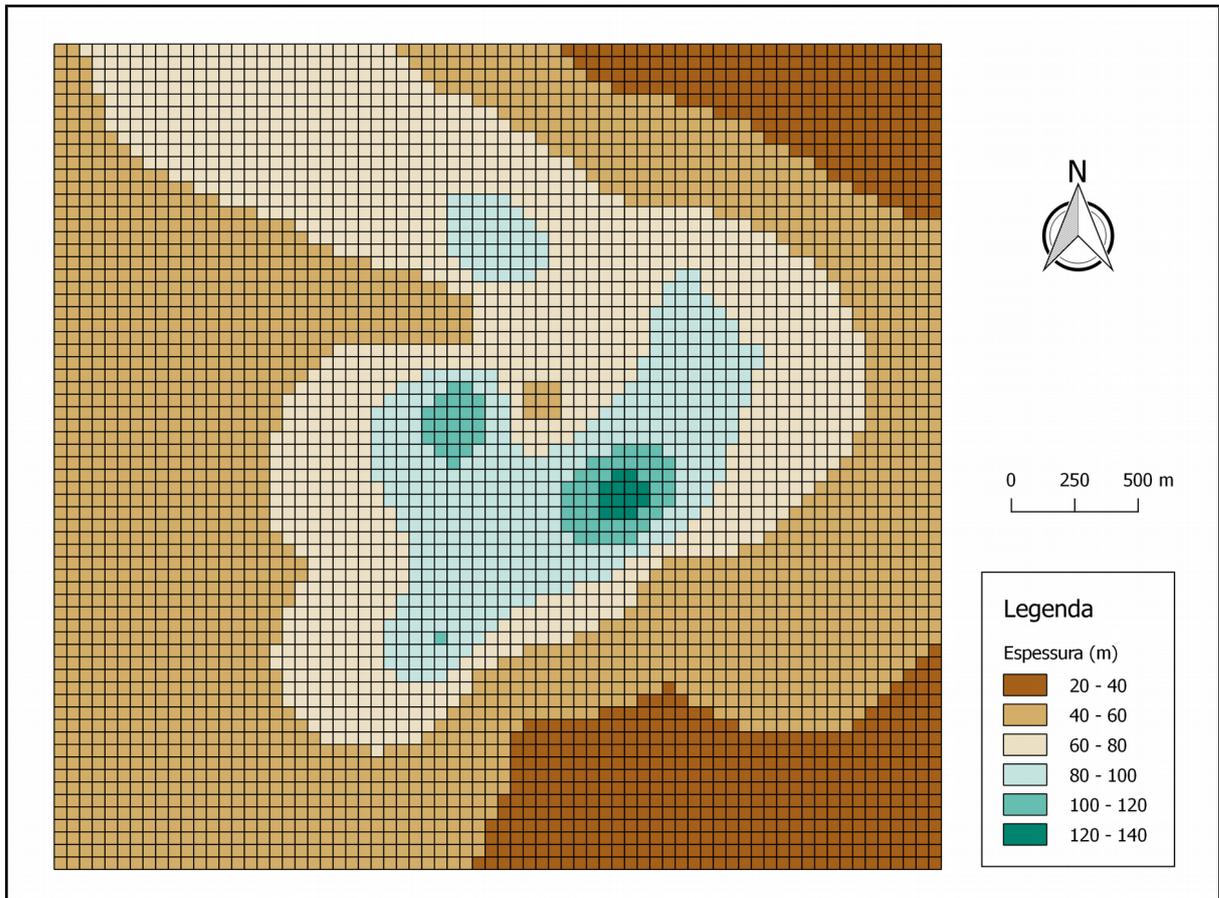
4.4.1 Elaboração do modelo numérico de fluxo

A elaboração do modelo numérico de fluxo teve início com a definição das condições de contorno do domínio e a grade horizontal. As condições de contorno foram representadas pelas seguintes condições hidrodinâmicas: entrada de fluxo pela fronteira sul, saída de fluxo pela fronteira norte e sem fluxo pelas fronteiras leste e oeste. O domínio investigado possui uma área de 11,55 km² dividida em 4620 células de 50 m², o que resulta em uma grade horizontal de 66 linhas e 70 colunas. Essa configuração horizontal foi adotada por apresentar melhor desempenho computacional no processamento dos dados.

O modelo é definido como conversível por apresentar comportamento tanto de aquífero confinado quanto não confinado dentro do domínio investigado. A parte superior da camada foi definida por meio de dados topográficos para a região de afloramento e dados estratigráficos para a região de confinamento do aquífero. A parte inferior foi definida por meio das profundidades dos poços de bombeamento distribuídos pela área de interesse. Esses dados foram interpolados a fim de

produzir dados raster com as respectivas elevações do modelo e, conseqüentemente, a espessura de cada células do modelo (Figura 4.5).

Figura 4.5 - Espessura do aquífero para cada célula do modelo numérico de fluxo.



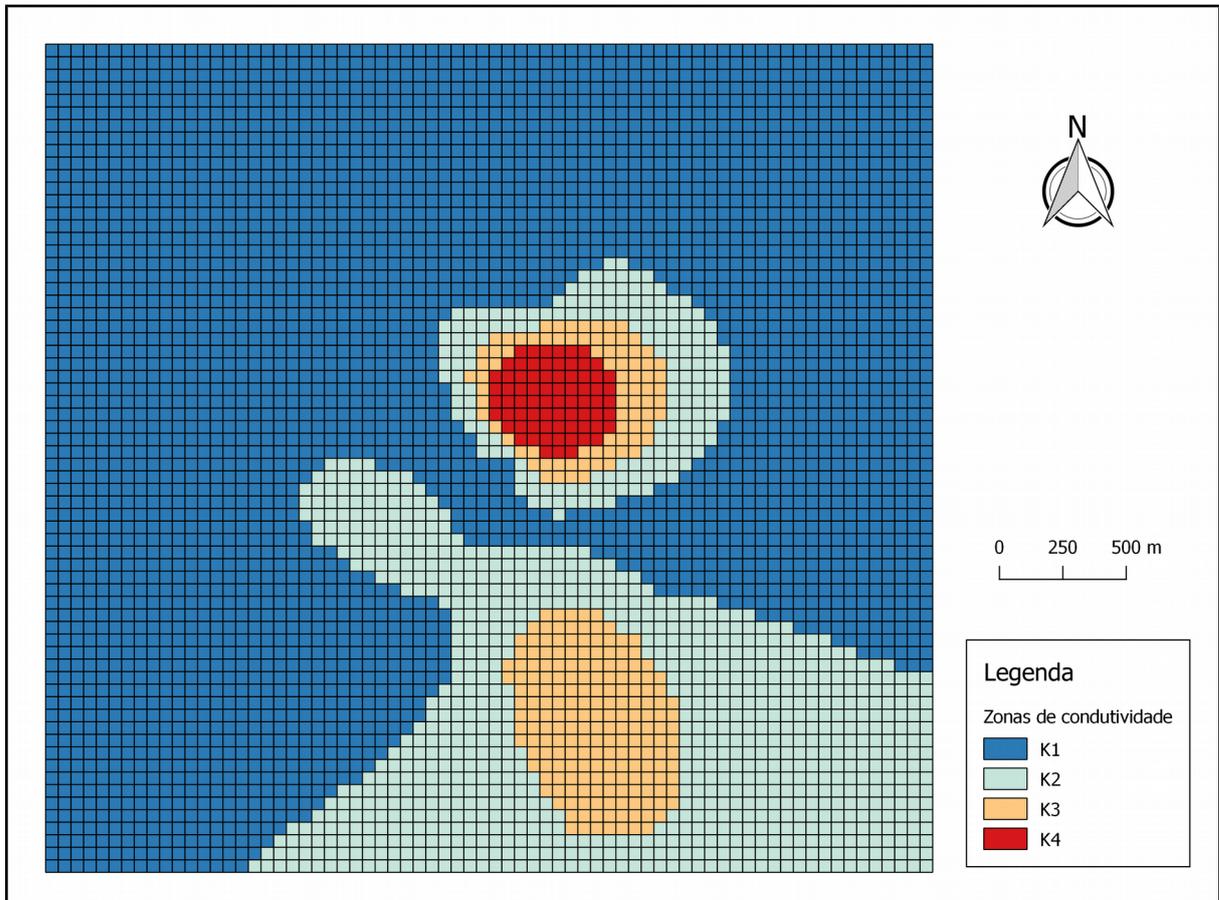
Fonte: Elaborado pelo autor.

A camada do modelo representa um aquífero heterogêneo constituído pelas unidades hidroestratigráficas Passo das Tropas e Sanga do Cabral. Essa configuração se justifica pela falta de informações sobre a profundidade dos filtros nos poços tubulares de bombeamento, o que não permite definir com exatidão a utilização de cada unidade. Marsily et al. (2005) salientam que um estudo de fluxo que pretende analisar a captação de água subterrânea pode admitir a utilização de condutividade hidráulica equivalente para um grupo de camadas e mesmo assim obter um modelo bem-sucedido.

Com os dados de transmissividade (Figura 4.3) e espessura do aquífero (Figura 4.5) foi possível estabelecer 4 zonas de condutividade hidráulicas, conforme

mostra a Figura 4.6. Essas zonas distintas foram estabelecida para facilitar o processo de calibração do modelo.

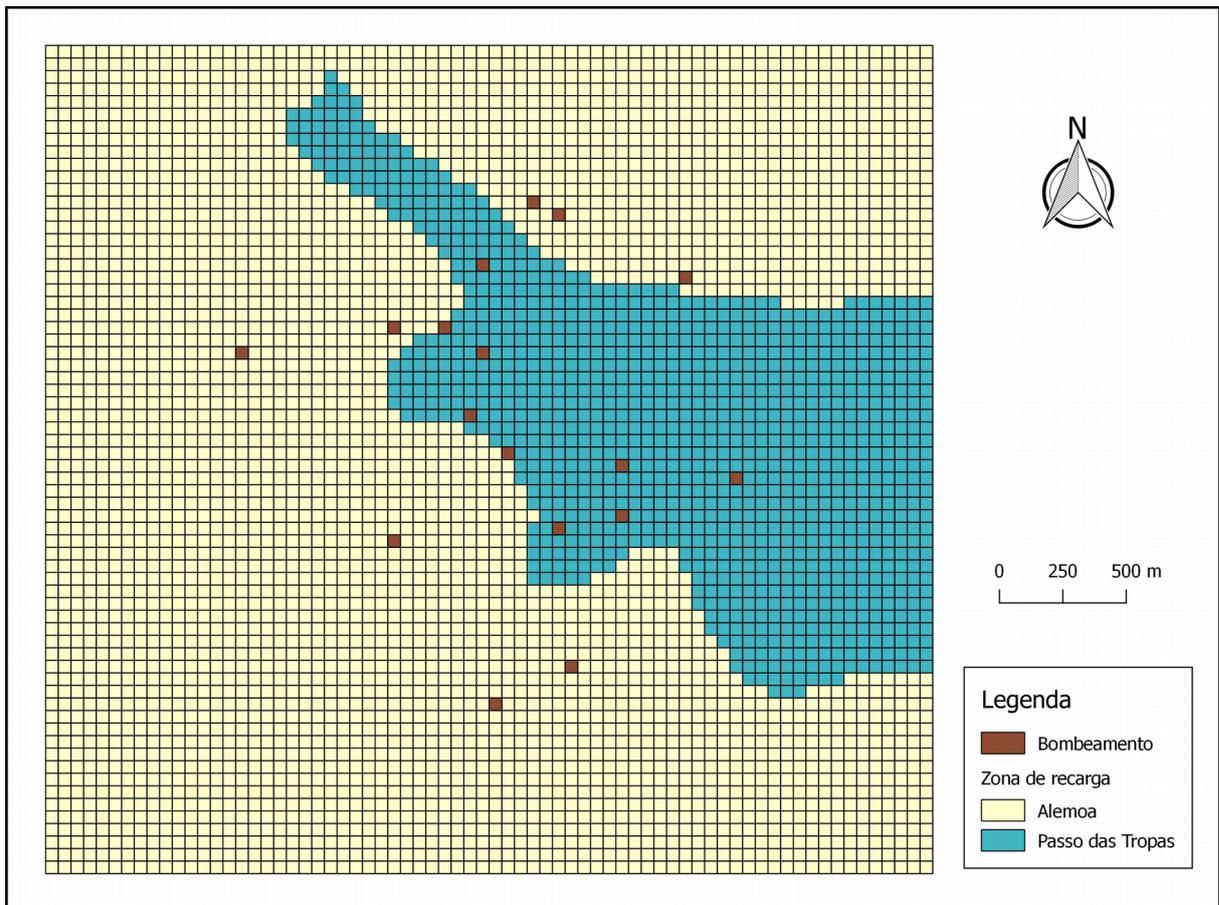
Figura 4.6 - Zonas de condutividade hidráulica para a área de interesse.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As zonas de recarga por precipitação foram estabelecidas tendo como base os afloramentos das unidades hidroestratigráficas (Figura 4.2). Conforme é demonstrado na Figura 4.7, o afloramento da unidade Passo das Tropas (R2) ocupa cerca de 24,74% da área superficial do modelo, estando situada na região onde se encontram mais da metade dos poços tubulares de captação do campus. O restante da área superficial foi considerado como afloramento da unidade Alemoa (R1), mesmo na região que corresponde ao afloramento da Formação Terraços Fluviais, visto que essa é uma formação mais recentes e de menores espessuras.

Figura 4.7 - Zonas de recarga por precipitação com base nos afloramentos das unidades hidroestratigráficas e distribuição dos poços de bombeamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Simulação e calibração do modelo

O modelo de fluxo foi simulado em estado estacionário considerando a recarga por precipitação para o período de um ano e captação em 15 poços ativos. A calibração do modelo foi realizada pelo método da “tentativa e erro”, com variação da condutividade hidráulica (K) nas 4 zonas e da recarga por precipitação (R) nas duas zonas de afloramento. Inicialmente foi considerada uma faixa ideal de variação para cada zona de K e um R uniforme de 0,0008 m/d, e ao ser atingido um valor de discrepância de 0,00016%, inferior ao máximo aceitável de 1%, o modelo foi considerado calibrado. As condutividades hidráulicas e a recarga por precipitação finais foram: 0,29 m/dia para zona K1; 1,0 m/dia para zona K2; 2,5 m/dia para zona K3; 6,36 m/dia para zona K4; 6×10^{-5} m/dia para zona R1 (Alemoa); e 0,0003 m/dia para zona R2 (Passo das Tropas).

Os erros residuais encontrados através da comparação das cargas hidráulicas observadas nos 9 poços desativados com os valores simulados pelo modelo são apresentados na Tabela 4.1. A análise estatística desses residuais indicou valores de ME de -2,89, MAE de 3,98 e RMSE de 6,40 para o sistema modelado. Apesar da carga hidráulica simulada não coincidir exatamente com as observações em campo, o modelo ainda apresenta uma correlação entre os valores (Figura 4.8) e a direção geral de fluxo no sentido sul para o norte.

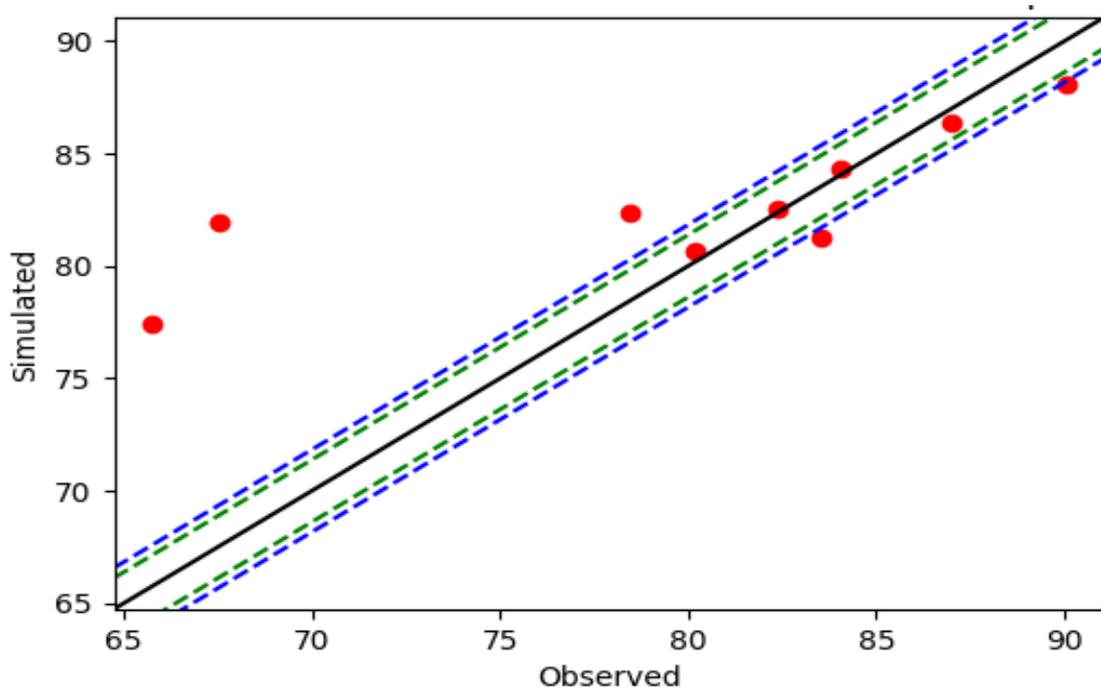
Tabela 4.1 - Valores de carga hidráulica observados e simulada para cada poço e a diferença residual entre eles.

Poço	Carga hidráulica		Erro residual
	Observada	Simulada	
PB01	67,53	81,92	-14,39
PB03	78,48	82,35	-3,87
PB05	65,74	77,42	-11,68
PB06	80,18	80,67	-0,49
PB12	90,05	88,10	1,95
PB17	83,51	81,23	2,28
P01	84,04	84,32	-0,28
P12	87,02	86,37	0,65
P20	82,35	82,58	-0,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os poços PB01 e PB05 apresentaram os maiores valores de erros residuais devido às cargas hidráulicas observadas em campo nesses poços serem significativamente menores em relação aos demais (Tabela 4.1). A análise estatística desconsiderando esses dois poços demonstra menores valores de ME, MAE e RMSE, os quais são, respectivamente, 0,00, 1,39 e 1,88.

Figura 4.8 - Correlação entre as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo e as observadas em campo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O balanço hídrico do modelo considera as entradas e saídas de água do sistema com uma discrepância de 0,00016%. A recarga por precipitação correspondeu a 470.652,00 m³ (40,75 mm/ano), o que representa 69,55% da entrada total de água no sistema. O resultado representa uma taxa de recarga de 2,27% da precipitação total do período, sendo essa inferior à taxa mínima encontrada para a área (LÖBLER, 2015). Considerando apenas a recarga na região de afloramento do Membro Passo das Tropas, a taxa de recarga sobe para 16,70% (299,48 mm/ano). O bombeamento realizado em 15 poços tubulares correspondeu a 298.305,28 m³, o que representa 44,08% da saída total de água do sistema. O balanço hídrico do modelo considerado calibrado é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Balanço hídrico do modelo numérico de fluxo considerado calibrado.

Componentes	Volume acumulado (m³)	Volume diário (m³/dia)
Entrada de água		
Carga hidráulica constante	206.095,69	566,20
Poços	0,00	0,00
Recarga	470.652,00	1.293,00
Total	676.747,69	1.859,20
Saída de água		
Carga hidráulica constante	378.441,31	1,039,67
Poços	298.305,28	819,52
Recarga	0,00	0,00
Total	676.746,00	1.859,19
Entrada – Saída	1,0625	0,003
Discrepância	0,00016%	0,00016%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade realizada com a variação de $\pm 50\%$ para cada parâmetro hidráulico isolado tem seus resultados apresentados na Tabela 4.3. Para essa análise foram considerados os erros residuais encontrados em 7 dos poços observados, sendo desconsiderados os 2 poços que apresentaram uma carga hidráulica muito abaixo dos demais.

Os resultados demonstram uma maior sensibilidade para os parâmetros R2 (afloramento Passo das Tropas) e Q, isso se justifica pela maior representatividade que esses parâmetros têm em relação a entrada e saída de água no sistema (Tabela 4.2). Além disso, o parâmetro K1 apresentou a maior sensibilidade em relação às demais zonas de condutividade hidráulicas por ocupar a maior extensão do modelo e suas alterações prejudicam a velocidade do fluxo de saída de água do modelo.

Tabela 4.3 - Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros hidráulicos.

Parâmetro	Variação	ME	MEA	RMSE	Discrepância (%)
Modelo calibrado	-	0,00	1,39	1,88	0,00016
	0,5K1	-1,83	1,95	2,55	0,00017
	1,5K1	1,05	1,89	2,23	0,00009
	0,5K2	1,00	1,78	2,16	0,00010
Condutividade hidráulica (K)	1,5K2	-0,60	1,45	1,97	0,00016
	0,5K3	0,55	1,50	2,01	0,00013
	1,5K3	-0,31	1,40	1,89	0,00015
	0,5K4	0,02	1,38	1,90	0,00027
Recarga (R)	1,5K4	-0,01	1,40	1,88	0,00007
	0,5R1	0,53	1,47	1,95	0,00018
	1,5R1	-0,52	1,45	1,97	0,00015
	0,5R2	1,92	2,40	2,61	0,00023
Bombeamento (Q)	1,5R2	-1,88	2,09	2,81	0,00008
	0,5Q	-2,21	2,33	3,09	0,00020
	1,5Q	2,27	2,57	2,85	0,00017

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 CONCLUSÕES

A modelagem numérica de fluxo apontou os parâmetros e as características de maior incerteza do sistema modelado. Os parâmetros como a condutividade hidráulica estão diretamente relacionados à distribuição da litologia e às velocidades do fluxo do local. Nesse sentido, é possível afirmar que as simplificações do arcabouço hidrogeológico não demonstraram-se como fatores limitantes para a representação do sistema, porém sua divisão em zonas de homogeneidade hidráulica pode ter contribuído para imprecisões na modelagem. Devido às frequentes intercalações das camadas argilosas, esses parâmetros hidrodinâmicos precisam ser melhor investigados em modelagens futuras.

Por meio do modelo foi possível estimar uma participação de 69,55% da recarga por precipitação na entrada total de água e 44,08% dos poços de bombeamento na saída total de água do sistema. Por sua vez, a análise de sensibilidade apontou que esses parâmetros são os mais sensíveis para os

resultados do modelo, sendo a recarga por precipitação mais afetada por alterações nos afloramentos do Membro Passo das Tropas. Isso demonstra a relevância que os parâmetros têm frente ao balanço hídrico das águas subterrâneas do local e o cuidado que novas investigações devem ter perante eles.

A interface FREEWAT demonstrou-se uma ferramenta muito útil e de fácil acesso, principalmente por estar integrada a um software livre de ampla utilização. Isso proporciona que a modelagem numérica se torne um instrumento mais acessível para a realização de melhores práticas de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

4.6 AGRADECIMENTOS

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

4.7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. et al. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53-61, 2011.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. San Diego: Academic Press, 1992.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. 2. ed. Academic press, 2015.

BARNETT, B. et al. **Australian groundwater modelling guidelines**. Waterlines report. National Water Commission. Canberra, 2012.

BEAR, J.; BELJIN, M. S.; ROSS, R. R. **Fundamentals of ground-water modeling**. EPA/540/S-92/005. United States Environmental Protection, Washington, DC, 1992.

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: RAMOS, F. et al. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. 2019. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>.

FOSTER, S. et al. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Washington, DC: Banco Mundial, 2006.

GIARDIN, A.; FACCINI, U. Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do Sistema Aquífero Guarani: abordagem metodológica aplicada ao exemplo da área de Santa Maria-RS, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 18, n. 1, 2004.

GOGU, R. et al. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. **Hydrogeology Journal**, v. 9, n. 6, p. 555-569, 2001.

HAGER, F. P. V. et al. A problemática da gestão das águas subterrâneas no Brasil. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2002.

HARBAUGH, A. W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. **U.S. Geological Survey**, v. 6, n. A16, 253 p., 2005.

HIDROBRASIL. **Relatório técnico para obtenção de outorga do direito de uso de água subterrânea.** Relatório interno, 2008.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas: gráficos.** 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>.

KALF, F. R. P.; WOOLLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. **Hydrogeology journal**, v. 13, n. 1, p. 295-312, 2005.

LÖBLER, C. A. **Avaliação quantitativa da recargas das águas subterrâneas na bacia escola do campus da Universidade Federal de Santa Maria.** 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MACHADO, J. L. F. (Resp. Téc.) et al. **Mapa hidrogeológico folha Santa Maria.** Escala 1:100.000. Porto Alegre: CPRM, 1994.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final.** Porto Alegre: CPRM, 2005.

MACIEL FILHO C. L. (Coord.) et. al. **Mapa geológico da folha de Camobi – RS.** Escala 1:50.000. Convênio: FINEP – UFSM. Santa Maria, 1988.

MACIEL FILHO C. L. **Carta geotécnica de Santa Maria.** Escala 1:25.000. Santa Maria: Imprensa Universitária - UFSM, 1990.

MARSILY, G. DE. et al. Dealing with spatial heterogeneity. **Hydrogeology Journal**, v. 13, n. 1, p. 161-183, 2005.

MOREIRA, C. M. D. **Aspectos qualitativos da água subterrânea no Campus da UFSM**. 2005. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria–RS. **Geociências** (São Paulo), v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

ROSA, J. L.; SARTORI, M. G. B; SILVEIRA, R. D. Caracterização geomorfológica do Campus da UFSM, Santa Maria-RS. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2003.

ROSSETTO, R. et al. Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management. **Environmental Modelling & Software**, v. 107, p. 210-230, 2018.

WANKLER, F. L.; FACCINI, U. F.; SILVA, P. L. Contribuição ao estudo do aquífero passo das tropas, na região de Santa Maria, RS: compartimentação estrutural e sua influência no comportamento hidrogeológico. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2007.

VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, 2016.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um modelo numérico de fluxo em regime estacionário como forma de investigar o comportamento hidrogeológico do campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, proporcionou confrontar diversas configurações de parâmetros hidrodinâmicos aceitáveis e analisar as incertezas provenientes dessas combinações para o sistema aquífero estudado.

Com a construção do modelo hidrogeológico conceitual foi identificado que o sistema aquífero poroso da região do campus apresenta tanto características livres quanto confinadas, sendo a unidade hidroestratigráfica Passo das Tropas a mais relevante por possuir litologia predominantemente arenosa e muito permeável. Entretanto, a unidade Sanga do Cabral apresentou características hidrodinâmicas similares em testes realizados em perfis aflorantes, mesmo possuindo litologia arenosa de granulometria muito fina e argilosa. Já a unidade Alemoa, responsável pelo confinamento da unidade Passo das Tropas, é caracterizada como aquíclode por apresentar basicamente siltitos impermeáveis.

O modelo apresenta uma correlação entre os valores e a direção geral de fluxo no sentido Sul para o Norte, apesar das cargas hidráulicas simuladas não coincidir exatamente com as observadas em campo. Dessa forma, desconsiderando os dois poços que apresentaram cargas hidráulicas muito abaixo dos demais, a análise estatística apresentou 0,00 de ME, 1,39 de MAE e 1,88 RMSE. Isso permitiu estabelecer as condutividades hidráulicas de 0,29 m/dia para zona K1, 1,0 m/dia para zona K2, 2,5 m/dia para zona K3 e 6,36 m/dia para zona K4. Como o sistema apresenta frequentes intercalações de camadas argilosas, a representação em zonas de homogeneidade hidráulica pode ter sido fator limitante para o processo de calibração do modelo.

As recargas por precipitação de 6×10^{-5} m/dia para zona R1 (Alemoa); e 0,0003 m/dia para zona R2 (Passo das Tropas) foram obtidas quando o modelo foi considerado calibrado. A zona R2 apresentou uma taxa de recarga 16,70% (299,48 mm/ano), valor este que é muito próximo da taxa mínima encontrada em outros estudos. Entretanto, quando analisamos a taxa de recarga para a área toda, esse percentual fica em torno de 2,27% da precipitação total.

Em relação ao balanço hídrico, o modelo calibrado apresentou que a recarga por precipitação corresponde a 470.652,00 m³ (40,75 mm/ano), o que representa

69,55% da entrada total de água no sistema. Por outro lado, o bombeamento realizado em 15 poços tubulares corresponde a 298.305,28 m³, o que representa 44,08% da saída total de água no sistema. Dentro dos pressupostos adotados, esses resultados demonstram que a área do campus serve como um importante local de recarga indireta para a parte urbanizada de Camobi.

Recomenda-se que para a realização de modelagem futuras sejam realizadas investigações mais detalhadas com intuito de enriquecer o arcabouço hidrogeológico do local, principalmente se os estudos visarem avaliar o transporte de contaminantes.

Cabe destacar também que a interface FREEWAT demonstrou-se uma ferramenta muito útil e de fácil acesso, principalmente por estar integrada a um software livre de ampla utilização como o QGIS. Essa interação proporciona que a modelagem numérica se torne um instrumento mais acessível para a realização de melhores práticas de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2017.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. et al. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53-61, 2011.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. **Sustainability of ground-water resources**. US Department of the Interior, US Geological Survey, 1999.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling**: simulation of flow and advective transport. 2. ed. Academic press, 2015.
- BARNETT, B. et al. **Australian groundwater modelling guidelines**. Waterlines report. National Water Commission. Canberra, 2012.
- CABRAL, J. J. da S. P; DEMÉTRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C. et al (Org./Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: RAMOS, F. et al. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.
- FORMENTINI, J. **Definição de Perímetro de Proteção de Poços para o setor industrial a partir de modelagem numérica do Aquífero Coxilha das Lombas, em Viamão, RS**. 2018. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- FOSTER, S. et al. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Washington, DC: Banco Mundial, 2006.
- FRANKE, O. L.; REILLY, T. E.; BENNETT, G. D. Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems: an introduction. **U.S. Geological Survey**, v. 5, n. B5, 15 p., 1987.
- GOGU, R. et al. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. **Hydrogeology Journal**, v. 9, n. 6, p. 555-569, 2001.
- GONÇALVES, L. G. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Modelagem hidrogeológica de fluxo e transporte advectivo na Bacia do Engenho Nogueira, Campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte, MG. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 2, p. 269-288, 2016.

HARBAUGH, A. W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. **U.S. Geological Survey**, v. 6, n. A16, 253 p., 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico**: 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

KALF, F. R. P.; WOOLLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. **Hydrogeology journal**, v. 13, n. 1, p. 295-312, 2005.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. **U.S. Geological Survey**, v. 6, n. A1, 576 p., 1988.

NOGUEIRA, G. E. H.; KIANG, C. H. Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas do aquífero rio claro, porção nordeste do município de Rio Claro, SP. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 2, p. 175-190, 2015.

ROSSETTO, R. et al. Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management. **Environmental Modelling & Software**, v. 107, p. 210-230, 2018.