

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

Jéssica Formentini

**DEFINIÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS PARA O SETOR
INDUSTRIAL A PARTIR DE MODELAGEM NUMÉRICA DO AQUÍFERO
COXILHA DAS LOMBAS, EM VIAMÃO, RS**

Santa Maria, RS
2018

Jéssica Formentini

**DEFINIÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS PARA O SETOR
INDUSTRIAL A PARTIR DE MODELAGEM NUMÉRICA DO AQUÍFERO
COXILHA DAS LOMBAS, EM VIAMÃO, RS**

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

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Malva Andrea Mancuso

Coorientador: Geól. Roberto Kirchheim

Santa Maria, RS
2018

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

Formentini, Jéssica
DEFINIÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS PARA O
SETOR INDUSTRIAL A PARTIR DE MODELAGEM NUMÉRICA DO
AQUÍFERO COXILHA DAS LOMBAS, EM VIAMÃO, RS / Jéssica
Formentini.- 2018.
57 p.; 30 cm

Orientadora: Malva Andrea Mancuso
Coorientador: Roberto Kirchheim
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2018

1. Água subterrânea 2. Perímetro de proteção de poço
3. Indústria 4. Aquífero Coxilha das Lombas I. Mancuso,
Malva Andrea II. Kirchheim, Roberto III. Título.

© 2018

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

E-mail: bioma.jf@gmail.com

Jéssica Formentini

**DEFINIÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS PARA O SETOR
INDUSTRIAL A PARTIR DE MODELAGEM NUMÉRICA DO AQUIFERO
COXILHA DAS LOMBAS, EM VIAMÃO, RS**

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

Aprovado em 27 de fevereiro de 2018:

Malva Andrea Mancuso, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Antonio Pedro Viero, Dr. (UFRGS)
(Examinador externo)

José Luiz Albuquerque Filho, Dr. (IPT)
(Examinador externo)

Santa Maria, RS
2018

À minha família, base e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, por ter mantido minha fé em todos os momentos e por ter me proporcionado conhecer e conviver com pessoas maravilhosas durante esta caminhada.

Aos meus pais, Rogério e Noemia, e minhas irmãs Graciela e Danuza, agradeço imensamente pelo apoio, compreensão, amor e cumplicidade em todos os momentos desta caminhada. Sem vocês a realização desse sonho não seria possível. Amo vocês!

A minha querida orientadora, Dr^a Malva A. Mancuso, agradeço pela paciência, dedicação e por não ter medido esforços para possibilitar a realização deste trabalho. Obrigada pela amizade e companheirismo.

Aos meus prezados coorientadores, Dr. José Luiz Albuquerque Filho e Geol. Roberto Kirchheim, agradeço pela orientação, dedicação, amizade e parceria desde o período de graduação.

À Fundação de apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (FIPT), pelo financiamento deste projeto por meio da concessão da Bolsa do Programa IPT Novos Talentos (Chamada 02/2015).

Ao Sr. Bruno Andreon, gerente de Meio Ambiente da Ambev, unidade de Águas Claras, Viamão, agradeço pela atenção dedicada no período de execução deste projeto.

Aos meus queridos primos, tios e ao Grupo Ostentando, pela amizade, cumplicidade e por entenderem minha ausência em vários momentos.

Aos mestres que auxiliaram na minha formação, agradeço pelo empenho dedicado e pela ajuda em todos os momentos em que precisei.

Agradeço a todos que estiveram comigo durante esta caminhada, vocês foram essenciais!

RESUMO GERAL

DEFINIÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS PARA O SETOR INDUSTRIAL A PARTIR DE MODELAGEM NUMÉRICA DO AQUÍFERO COXILHA DAS LOMBAS, EM VIAMÃO, RS

AUTOR: Jéssica Formentini

ORIENTADOR: Malva Andrea Mancuso

A proteção dos recursos hídricos subterrâneos envolve a manutenção da qualidade e quantidade da água para o uso das gerações atuais e futuras, a partir da adoção de medidas de gestão e planejamento que visem à conservação dos sistemas e o ordenamento adequado do uso do solo. Garante-se, assim, que as atividades potencialmente poluidoras não sejam implantadas nos locais de maior vulnerabilidade à contaminação do aquífero. O setor industrial de produção de bebidas demanda grandes volumes de água que atenda aos padrões de qualidade exigidos. Quando as fontes são subterrâneas, o aquífero necessita ter boa produtividade e qualidade hidroquímica, de forma a minimizar tratamento, resultando em redução de custos do produto final e, também, adequação para utilização no processo industrial e não comprometimento na qualidade exigida para o produto final. O setor industrial, objeto de estudo, está localizado no distrito de Águas Claras, município de Viamão, RS. O principal aquífero dessa região é o Aquífero Coxilha das Lombas, pertencente à província geomorfológica da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS), sendo composto por depósitos sedimentares do tipo “laguna-barreira”, que representa, ao mesmo tempo, uma importante área de recarga para os recursos hídricos superficiais da região. Por se tratar de uma zona costeira esta área apresenta inúmeras zonas de banhado que, por muitas vezes, apresentam interconexão com os sistemas subterrâneos. Frente a isso, o estudo objetivou a delimitação da Zona de Contribuição (ZC), zona através da qual afluí a água do aquífero para o poço e a definição dos Perímetros de Proteção de Poço (PPPs), perímetros de proteção pontual das captações de água subterrânea, sendo: o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), o Perímetro de Alerta (PA), o Perímetro de Prevenção (PP) e o Perímetro de Contribuição (PC), para a área da indústria de alimentos, que foi utilizada como estudo de caso na presente pesquisa. A fim de cumprir o objetivo traçado, inicialmente foi estruturado um modelo conceitual hidrogeológico para o Aquífero Coxilha das Lombas, na área industrial, e, posteriormente, realizadas simulações numéricas e de linhas de fluxo por meio dos *softwares* MODFLOW e MODPATH (interface GMS). Como resultados obtidos têm-se: (i) a presença de dois sistemas aquíferos (livre e semiconfinado), sendo o fluxo subterrâneo na direção NW-SE. (ii) a indústria utiliza uma área de recarga do aquífero 3,4 vezes maior que sua área privada para a manutenção do processo produtivo, (iii) ZC para o cenário atual de extração têm uma área de cerca de 2,84 km², (iv) PPPs em dimensões médias de: PIPS (radial de 10,0 m), PA (73,5 m x 40,9 m), PP (147,7 m x 47,7 m) e PC (2,84 km²) e (v) verificou-se a ocorrência da contribuição de água de superfície para as captações de água subterrânea.

Palavras-chave: Água Subterrânea. Perímetro de Proteção de Poço. Indústria.

GENERAL ABSTRACT

DEFINITION OF PROTECTION PERIMETERS OF WELLS TO THE INDUSTRIAL SECTOR THROUGH NUMERICAL MODELLING OF COXILHA DAS LOMBAS AQUIFER, IN VIAMÃO, RS

AUTHOR: Jéssica Formentini

GUIDANCE COUNSELOR: Malva Andrea Mancuso

Protecting underground hydric resources is an action which involves the conservation both of quality and quantity of water for the current and the next generations' usages. It can happen through an adoption of management and planning measures that seek conservation of systems and suitable ordering of ground usage. Thus, it is guaranteed that activities that are polluting will be not implemented in places that get major vulnerability to contamination of the aquifer. The industrial sector of beverage production demands large volumes of water that meets the required quality required. In the situations the water fountains are underground, the aquifers must have good productivity and hydrochemistry quality so it has its treatment minimized, which leads to reduction of costs on the end product, also, it is adequate to the usage during the industrial process in which the end product is not compromised regarding its demanded quality. The industrial sector we studies is located on the District of Águas Claras, which is located in Viamão, Rio Grande do Sul, Brazil. The main aquifer from this region is the Aquifer Coxilha das Lombas, which belongs to the geomorphological province of Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS – Rio Grande do Sul's Coastal Plain), which is composed by sedimentary storages of the "lagoon-barrier" type, which representes, at the same time, na important recharge area to the superficial hydric resources of that region. As it is a coastal zone, this area presents many reserve zones, which often present interconnection with the underground systems. This makes our study delimitates the Zona of Contribuição (ZC), a zone which converges the aquifer water to the well, and it defines the Perímetros de Proteção de Poço (PPPs), which are perimeters of punctual protection of the underground area, and they are: the Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), the Perímetro de Alerta (PA), the Perímetro de Prevenção (PP) and the Perímetro de Contribuição (PC) (in order, the Immediate perimeter of sanitary protection, the Perimeter of, the Perimeter of preservation and the Perimeter of contribution), all of them considered for the food industry, which was used as a case study in the present research. In order to do that, was initially structured a hydrogeological concept model to the Aquifer Coxilha das Lombas on the industrial area, and after that, we performed numerical simulations and flow lines through the softwares MODFLOW and MODPATH (GMS interface). We got the following results: (i) the presence of two aquifer systems (free and semiconfined), which has the underground flow on the NW-SE direction, (ii) the industry uses a recharging area of the aquifer that is 3,4 times bigger than its private area on its maintaining of the productive process, (iii) ZC to the current extraction scenario have na área of about 2.84 km², (iv) PPPs in rate dimensions of: PIPS (radial of 10.0 m), PA (73.5 m x 40.9 m), PP (147.7 m x 47.7 m) and PC (2.84 km²), and (v) it is verified the occurrence of surface water contribution to the underground water capitation.

Keywords: Groundwater. Protection Perimeters of Wells. Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1 – MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DO AQUIFERO COXILHA DAS LOMBAS, NA ZONA INDUSTRIAL DE VIAMÃO, RS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Localização da área de estudo em relação ao Estado do Rio Grande do Sul (Brasil) | 19 |
| Figura 2 – Seção geológica esquemática transversal (W-E) dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS) e fácies sedimentares associadas..... | 20 |
| Figura 3 – Geologia e hidrogeologia do Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha (também denominado de Aquífero Coxilha das Lombas)..... | 21 |
| Figura 4 – Perfil hidrogeológico esquemático do Sistema “Laguna-Barreira” I, Aquífero Coxilha das Lombas..... | 22 |
| Figura 5 – Localização das SEVs e dos poços perfurados na área de estudo que apresentaram dados hidrogeológicos utilizados para a elaboração do modelo conceitual da hidrodinâmica do Aquífero Coxilha das Lombas (RS, Brasil) | 25 |
| Figura 6 – Perfis estratigráficos do Aquífero Coxilha das Lombas na área industrial interpretados a partir do perfil geológico dos poços | 27 |
| Figura 7 – Análise comparativa entre: a) curva teórica tempo (t.log) x rebaixamento (s) indicada para poços de observação e testes de rebaixamento dos poços: b) VIM01 e c) VIM09. 28 | |
| Figura 8 – Mapa potenciométrico e de fluxo das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas, na porção central do município de Viamão (RS) | 29 |

ARTIGO 2 – MODELAGEM NÚMÉRICA APLICADA À DEFINIÇÃO DE PERIMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM ÁREA INDUSTRIAL COSTEIRA

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Seções geológicas do Aquífero Coxilha das Lombas na área industrial..... | 39 |
| Figura 2 – Mapa potenciométrico e de fluxo das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas, na porção central do município de Viamão (RS) | 40 |
| Figura 3 – Mapa de base do Aquífero Coxilha das Lombas na área de estudo..... | 45 |
| Figura 4 – Perímetro de Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), Perímetro de Alerta (PA) e Perímetro de Prevenção (PP) definido para cada poço na zona da indústria de alimentos | 49 |
| Figura 5 – Zona de Contribuição (ZC) dos poços para o cenário atual de extração da indústria de alimentos (20 anos) | 51 |
| Figura 6 – Perfis gerados na simulação numérica de fluxo de água para 50 dias (PA), 150 dias (PP) e ZC para o cenário atual de extração (20 anos) | 52 |

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 – MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DO AQUÍFERO COXILHA DAS LOMBAS, NA ZONA INDUSTRIAL DE VIAMÃO, RS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Poços de extração de água da zona industrial de Viamão (RS) e adjacências | 26 |
| Tabela 2 – Vazão de estabilização e os níveis de água registrados nos testes de bombeamento dos poços da área de estudo localizados na região central de Viamão (RS)..... | 30 |

ARTIGO 2 – MODELAGEM NÚMERICA APLICADA À DEFINIÇÃO DE PERIMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM ÁREA INDUSTRIAL COSTEIRA

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Dados do sistema de extração de águas subterrâneas da indústria de alimentos referentes ao primeiro semestre de 2016..... | 45 |
| Tabela 2 – Balanço hídrico para o modelo calibrado considerando o sistema de bombeamento dos poços da indústria de alimentos em funcionamento e para o sistema em estado natural (sem extração de água subterrânea) | 46 |
| Tabela 3 – Carga hidráulica dos poços: valores observados, calculados via MODFLOW e residual (diferença entre os valores observados x valores calculados)..... | 47 |
| Tabela 4 – Resultados da análise de sensibilidade para condutividade hidráulica (K) | 48 |
| Tabela 5 – Medidas de comprimento e largura dos PPPs calculado para cada poço..... | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INTRODUÇÃO GERAL

| | |
|------|--|
| PA | Perímetro de Alerta |
| PC | Perímetro de Contribuição |
| PIPS | Perímetro Imediato de Proteção Sanitária |
| PP | Perímetro de Prevenção |
| PPPs | Perímetros de Proteção de Poços |
| ZC | Zona de Contribuição |

ARTIGO 1 – MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DO AQUÍFERO COXILHA DAS LOMBAS, NA ZONA INDUSTRIAL DE VIAMÃO, RS

| | |
|--------|--|
| APA | Área de Proteção Ambiental |
| CE | Condutividade elétrica |
| FIPT | Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas |
| ND | Níveis dinâmicos |
| NE | Níveis estáticos |
| PCRS | Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul |
| SEVs | Sondagens Elétricas Verticais |
| SIAGAS | Sistema de Informações de Águas Subterrâneas |

ARTIGO 2 – MODELAGEM NÚMERICA APLICADA À DEFINIÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM ÁREA INDUSTRIAL COSTEIRA

| | |
|---------|---|
| GMS | Groundwater Modeling System |
| K | Condutividade hidráulica |
| MODFLOW | Modelo tridimensional de diferenças finitas |
| PA | Perímetro de Alerta |
| PC | Perímetro de Contribuição |
| PIPS | Perímetro Imediato de Proteção Sanitária |
| PP | Perímetro de Prevenção |
| PPPs | Perímetros de Proteção de Poços |
| ZC | Zona de Contribuição |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 13 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 15 |
| 2 | ARTIGO 1 – MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DO AQUÍFERO COXILHA DAS LOMBAS, NA ZONA INDUSTRIAL DE VIAMÃO, RS | 16 |
| 3 | ARTIGO 2 – MODELAGEM NÚMERICA APLICADA À DEFINIÇÃO DE PERIMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM ÁREA INDUSTRIAL COSTEIRA | 36 |
| | CONCLUSÃO GERAL | 56 |
| | REFERÊNCIAS GERAIS | 57 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

No século passado foram constatadas ocorrências crescentes de alterações significativas na biodiversidade das zonas costeiras, assim como foram observados crescentes índices de poluição nos seus ecossistemas, conforme mencionado no relatório intitulado “Ecossistemas e Bem-estar humano: Áreas Húmidas e Águas” (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

Esse estudo destacou, também, o impacto crescente das espécies invasoras e a superexploração dos recursos. Apesar da sua importância, o uso sustentável das águas subterrâneas não tem sido abordado no contexto do valor real do recurso (preço), assim como da implementação de ações que permitam a gestão adequada desse bem.

O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável alertou para o fato de que, caso os ecossistemas e seus serviços ambientais, tais como água, biodiversidade, fibras, comida e clima, viessem a ser degradados ou atingissem o desequilíbrio as empresas não conseguiriam operar (PERCY; LUBCHENCO, 2006).

Na região da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS) ocorre o predomínio de áreas úmidas, estas possuem extrema importância ecológica em conjunto com os demais ecossistemas naturais da área: dunas, campos, matas, lagoas costeiras e corpos de água (ZANK, 2013).

O desenvolvimento econômico e urbano das áreas costeiras foi possibilitado a partir do aproveitamento das águas subterrâneas, isto porque os aquíferos livres ali ocorrentes tendem a fornecer água de boa qualidade e de baixo custo de captação (GUEDES JÚNIOR, 2005).

Essas características também estão presentes na exploração de aquíferos na região da PCRS, conforme estudos realizados por Freitas et al. (2002), Rubbo (2004), Herlinger Jr e Viero (2004), Collischonn e Kirchheim (2006), Itaquy (2013) e Etchelar (2014), para o Aquífero Coxilha das Lombas.

As implicações no uso das águas subterrâneas podem se refletir em impactos na qualidade e quantidade desses recursos, essenciais para a manutenção do atendimento aos usos múltiplos e para a manutenção da descarga de base, que se materializa no nível d'água dos ecossistemas superficiais.

Diante de todo esse contexto, a segurança quali-quantitativa dos mananciais de águas subterrâneas dependerá da proteção em superfície das ações antrópicas ali desenvolvidas requerendo, na prática, a proteção pontual das captações de água subterrânea. Acredita-se que a definição dos Perímetros de Proteção de Poços (PPPs) se constitui em procedimento efetivo

para isso, pois os PPPs objetivam diminuir o risco de contaminação da água subterrânea, por meio da limitação das atividades, com considerável potencial poluidor em seu entorno e a adoção de medidas de forma antecipada a fim de evitar a dissipação do poluente no aquífero (LAUREANO, 2012).

Assim sendo, a presente pesquisa foi idealizada buscando aprofundar os estudos acerca do assunto na região de interesse e visando subsidiar o setor industrial estudado com ferramentas que possibilitassem a continuidade de forma sustentável da exploração de águas subterrâneas, com a garantia de segurança hídrica na fábrica estudada.

Nesse sentido, a dissertação está estruturada em dois artigos científicos. No primeiro, é apresentada a revisão bibliográfica acerca da geologia, hidrogeologia e hidrodinâmica subterrânea na área de estudo, bem como o modelo conceitual hidrogeológico, a potenciométrica e o balanço hídrico do sistema aquífero utilizado, considerando a extração atual de água subterrânea pela indústria de alimentos.

O segundo artigo, por sua vez, aborda a aplicação da modelagem numérica, que por meio de simulações, possibilitou a delimitação da Zona de Contribuição (ZC) dos poços para o cenário atual de extração e a definição de quatro Perímetros de Proteção de Poço (PPPs): (i) o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), definido para proteção da captação de água; (ii) o Perímetro de Alerta (PA), definido por meio da simulação de uma zona de captura de partículas com até 50 dias de trânsito, a fim de garantir a proteção microbiológica; (iii) o Perímetro de Prevenção (PP), definido a partir do tempo de trânsito das partículas de 150 dias; e (iv) o Perímetro de Contribuição (PC), definido a partir da verificação do trânsito das partículas para a situação atual de extração de água subterrânea dos poços utilizados pela indústria de alimentos.

1.1 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa compreendeu o estabelecimento de orientações necessárias para o uso sustentável das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas em zona de exploração industrial, por meio da orientação quanto à adoção da delimitação de Perímetros de Proteção de Poços (PPPs), com o propósito de garantir a sustentabilidade dos mananciais subterrâneos utilizados, bem como dos recursos hídricos superficiais adjacentes e a eles interconectados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foi necessário atender os seguintes objetivos específicos, na área de estudo:

- Caracterizar a natureza, a geometria, a estruturação e a distribuição espacial do Aquífero Coxilha das Lombas;
- Elaborar um modelo conceitual idealizando a arquitetura do aquífero de interesse e a circulação hídrica subterrânea do Aquífero Coxilha das Lombas;
- Caracterizar as demandas de exploração subterrânea para uso industrial;
- Definir a Zona de Contribuição (ZC) dos poços de uso industrial para o cenário atual de extração de água subterrânea; e
- Definir os Perímetros de Proteção de Poço (PPPs), considerando o uso integrado da bateria de poços de extração.

2 ARTIGO 1 – MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DO AQUIFERO COXILHA DAS LOMBAS, NA ZONA INDUSTRIAL DE VIAMÃO, RS

CONCEPTUAL FLOW MODEL OF THE COXILHA DAS LOMBAS' AQUIFER IN THE INDUSTRIAL AREA OF VIAMÃO, RS

Resumo

O uso das águas subterrâneas para o setor industrial de cerveja requer a extração de grande volume de água com boa qualidade. O estudo tencionou a elaboração do modelo conceitual de circulação e balanço hídrico subterrâneo do Aquífero Coxilha das Lombas, na zona de exploração da indústria de bebidas e adjacências, localizada no distrito de Águas Claras - Viamão, RS, Brasil. Para isto, foram utilizados dados obtidos junto à indústria e ao banco de dados do SIAGAS (CPRM), posteriormente processados. Destaca-se que na área de estudo há presença de dois sistemas aquíferos (livre e semiconfinado), sendo o fluxo subterrâneo na direção NW-SE. Constatou-se, também, que a indústria utiliza uma área de recarga do aquífero 3,4 vezes maior que sua área privada para a manutenção do processo produtivo. De acordo com as características hidrodinâmicas do sistema e da zona de extração, a extração de água pode vir a causar influência nos banhados não adjacentes à área de estudo.

Palavras-chave: Exploração industrial. Água subterrânea. Aquífero Barreira Marinha. Hidrodinâmica. Banhados.

Abstract

The use of groundwater on the sector of beer industry requires extraction of large volumes of water that present good quality. This study aimed the elaboration of a conceptual model of circulation and underground water balance of the Coxilha de Lombas' Aquifer, in the area of exploration of the beer industry and adjacencies, located in the district of Águas Claras - Viamão, RS, Brazil. In order to achieve it, we used data obtained from the industry and the SIAGAS database (CPRM), which was later processed. It is noted that in the studied area there are two aquifer systems (unconfined and semiconfined), while the groundwater flow comes from the NW-SE. It was also found that in order to keep beer production, it is necessary to use the regulatory reserves of 3.4 x the private area of the industry. According to the hydrodynamic characteristics of the system and of the extraction zone, the water extraction may cause influence in the wetlands not adjacent to the studied area.

Keywords: Industrial exploitation. Groundwater. Marine Barrier Aquifer. Hydrodynamic. Wetlands.

2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico do setor industrial de bebidas está diretamente relacionado com a qualidade da matéria-prima utilizada, a água. Em seu processo de produção, esse setor necessita de elevados volumes de água de boa qualidade, levando, em muitos casos, a extração excessiva para atender à demanda.

A superexploração de um aquífero pode ocasionar efeitos negativos relacionados à desativação e perda de poços, ao aumento do custo de produção da água, vinculado à diminuição da capacidade de produção das captações, a alteração da qualidade físico-química das águas e a riscos de subsidência do terreno. Além disso, a superexploração pode ocasionar a redução da descarga de água para as áreas úmidas adjacentes (ESTELLER; DIAZ-DELGADO, 2002; HANI et al., 2003; SIMONATO, 2008; SAHUQUILLO, 2016; PEDRERA et al., 2016).

As áreas úmidas são ecossistemas de extrema importância ecológica devido à diversidade de bens e serviços ambientais. Na região da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS), no sul do Brasil, ocorre o predomínio de ecossistemas de banhados, em áreas que se caracterizam também pela presença de dunas, campos, matas, lagoas costeiras e outros corpos hídricos superficiais (ZANK, 2013). Para a preservação dos recursos hídricos superficiais dessas zonas foram criadas, por meio do Decreto nº 38.917/98, a Área de Proteção Ambiental (APA) Banhado Grande - Chico Lomã, Banhado dos Pachecos e Banhado Grande (DMA, 2015), e pelo Decreto nº 41.559/2002, a Unidade de Conservação Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos (ICMBio, 2002).

Boa parte dos estudos realizados nessas áreas, na costa leste do Estado do Rio Grande do Sul, refere-se a temas relativos à conservação e proteção destes ecossistemas, sem considerar a integração das componentes hídricas superficiais e subterrâneas (BURGER, 2000; BRACK, 2006; CARVALHO; OSÓRIO, 2007; ETCHELAR, 2014; AYDOS, 2015).

Entretanto, a integração desses ecossistemas com os aquíferos subjacentes pode assumir uma relação de dependência, principalmente durante os períodos de estiagem, quando a manutenção dos níveis de água superficiais dessas áreas úmidas é garantida pela descarga de água oriunda dos aquíferos (RUBBO, 2004).

Carol et al. (2013) ressaltam que a exploração das águas subterrâneas pode causar a diminuição do fluxo de descarga subterrânea para as áreas úmidas, indicando a importância de considerar a integração dos sistemas de superfície e subterrâneos para a adequada gestão dos recursos naturais.

Uma das principais problemáticas observadas na região da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul diz respeito ao impacto do desenvolvimento urbano e econômico que ocorreu, principalmente, a partir de 1998. Segundo Martins (2014), a partir desta data, iniciou-se a instalação de cerca de 1.800 famílias em assentamento da Reforma Agrária, localizado na Unidade de Conservação Estadual Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos e, na zona adjacente, foi autorizada a implantação de duas importantes unidades industriais, a indústria de bebidas e a indústria produtora de embalagens, ambas com elevada demanda de água.

Destaca-se que as atividades industriais nessa região dependem da extração das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas, que também se constitui no principal manancial de água subterrânea para abastecimento público local. Segundo Herlinger Jr. e Viero (2004), o aquífero, nessa região, é importante fonte de água doce para os ecossistemas sobrejacentes, como é o caso do Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos.

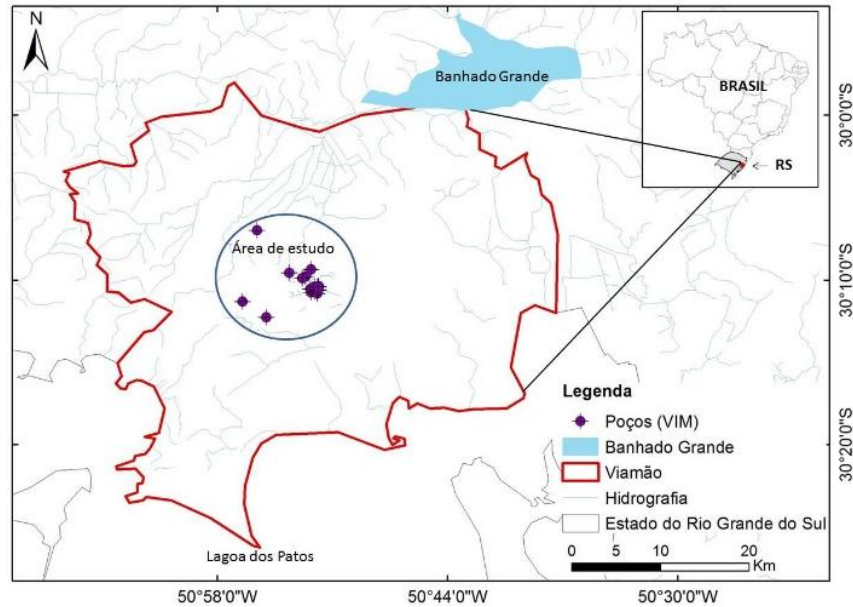
Tendo em vista a importância de considerar as águas subterrâneas como um recurso necessário para a manutenção de áreas úmidas e seus serviços ecossistêmicos, o presente estudo objetivou a elaboração do modelo conceitual de circulação e balanço hídrico subterrâneo do Aquífero Coxilha das Lombas, na zona de exploração da indústria de bebidas e adjacências, localizada no distrito de Águas Claras, município de Viamão, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

2.2 ÁREA DE ESTUDO

2.2.1 Aspectos gerais

A área de estudo está localizada na região leste do Estado do Rio Grande do Sul, no distrito de Águas Claras, município de Viamão, entre as coordenadas 50° 53'0'' de Longitude Oeste e 30°9'30'' de Latitude Sul (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo em relação ao Estado do Rio Grande do Sul (Brasil)



Ao Norte da área de estudo, o principal curso d'água da região é o Rio Gravataí, que constitui, inclusive, a mais importante feição hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. Este nasce na área do Banhado Grande, e seu sentido de escoamento regional é de leste para oeste, cruzando entre a Serra Geral e a Coxilha das Lombas, até desaguar no Delta do Jacuí, em direção ao lago Guaíba (BOURSCHEID, 2012).

Ao Sul, a área está inserida na Bacia do Litoral Médio (Figura 1), que pertence à Região Hidrográfica do Litoral e apresenta um grande número de lagoas, muitas delas interconectadas entre si. Devido à influência das águas salinas oceânicas, que atingem tais corpos d'água através da Lagoa dos Patos, o ecossistema é dependente de águas doces e apresenta elevada fragilidade (SEMA, 2010).

O município de Viamão é banhado pela Lagoa dos Patos a Sul e pelas águas do Rio Gravataí, a Norte. Observam-se distintas nascentes, áreas úmidas e corpos d'água como os arroios Alexandria, Estância, Dorneles, Feijó, Fiúza, Itapuã, Gravatá, Taquara, Varejão e São Gravatá (VIAMÃO, 2016).

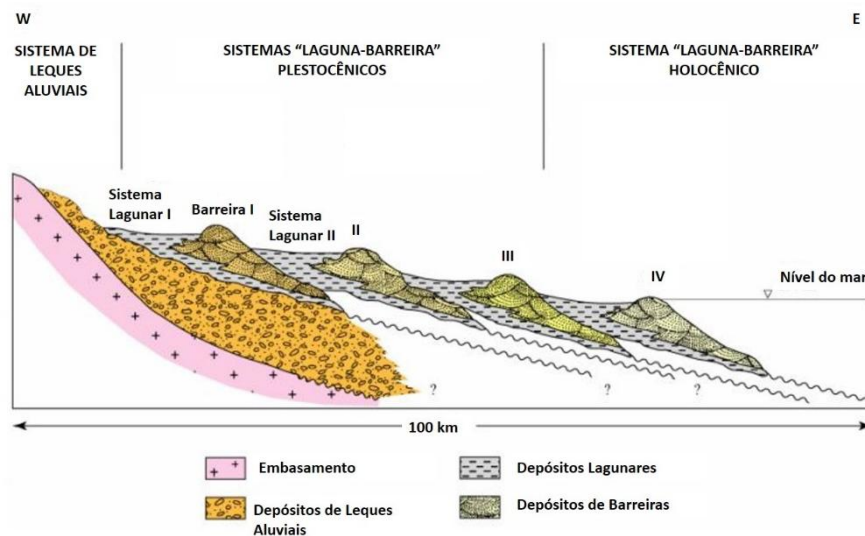
Em termos de demanda geral pelo uso da água, destaca-se, na região, o setor agrícola, que é o principal responsável pela extração de elevados volumes de água superficial na Bacia do Litoral Médio. Um exemplo é o consumo de água para a irrigação de arroz, que em 2007 atingiu uma demanda estimada em aproximadamente 1.202,08 hm³/ano, o equivalente a 99,28% do volume total demandado na bacia (1.210,75 hm³/ano). Quanto ao uso das águas subterrâneas,

75% da demanda total, equivalente a 2,93 hm³/ano, é destinada ao abastecimento público e 25%, ou 0,98 hm³/ano, é destinada ao setor industrial (ECOPLAN, 2007).

2.2.2 Aspectos geológicos e hidrogeológicos

O município de Viamão está localizado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), que tem a sua gênese relacionada às variações dos níveis d'água do Oceano Atlântico, ocorridas, principalmente, durante o Quaternário. Os sedimentos acumulados na planície deram origem a dois sistemas deposicionais distintos, sendo eles – o sistema de leques aluviais e os sistemas transgressivos-regressivos do tipo “laguna-barreira”, que constituem os Sistemas “laguna-barreira” Pleistocênico (I, II, III) e o Sistema “laguna-barreira” Holocênico (IV), (Figura 2) (VILLWOCK et al., 1986; TOMAZELLI; VILLWOCK, 2005).

Figura 2 – Seção geológica esquemática transversal (W-E) dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (PCRS) e fácies sedimentares associadas



Fonte: Tomazelli e Villwock, (2005).

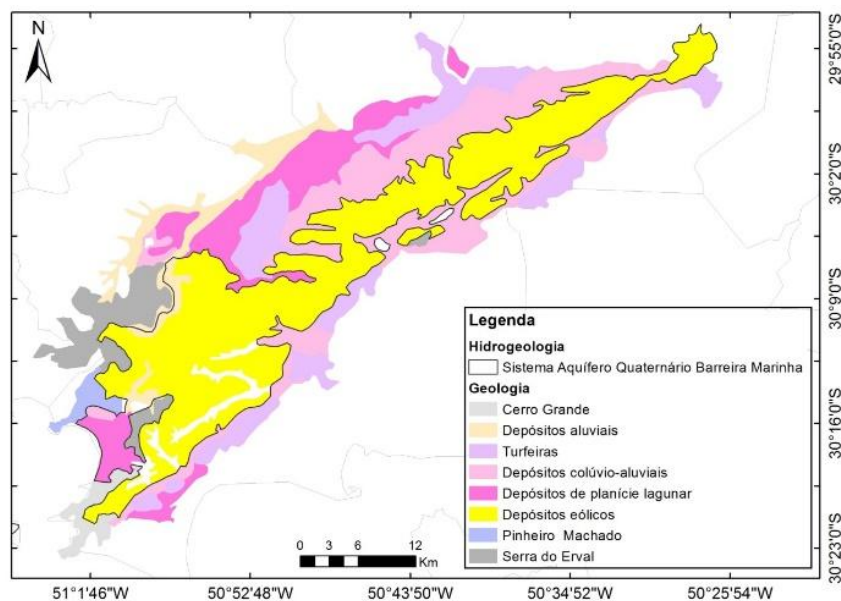
A área de interesse para este estudo é o Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha, conhecido, outrossim, como Aquífero Coxilha das Lombas, pertencente ao Sistema “laguna-barreira” Pleistocênico I, que é o registro do primeiro evento transgressivo-regressivo pleistocênico. Essa feição ocupa a porção noroeste da planície costeira (NE –SW), com cerca de 150 km de extensão e com 5 km a 10 km de largura, aproximadamente (TOMAZELLI; VILLWOCK, 2005).

A Geologia na região é representada, principalmente, pelo Depósito de Barreira Pleistocênica I - Depósitos Eólicos (litotipo Q1e1) (Figura 3), e sendo o material composto por areia quartzosa fina a média, arredondada e bem selecionada, com rara laminação paralela ou estratificação cruzada (CPRM, 2006). Collischonn e Kirchheim (2006) caracterizam os depósitos como sedimentos inconsolidados, formados por areias quarto-feldspáticas avermelhadas, bem arredondadas, de granulação fina a média, com conteúdo variável de siltes e argilas.

Segundo Tomazelli e Villwock (2005), as terras baixas circunvizinhas ao sistema Barreira I são ocupadas pelo Sistema Lagunar I e Sistema Lagunar II, caracterizados pela presença de sedimentos de origem lagunar, paludial e fluvial de idades geológicas distintas (Figura 2).

O Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005) identifica o Aquífero Coxilha das Lombas como o Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha (bm) (Figura 3). O aquífero é caracterizado por areias inconsolidadas, vermelho-claro a esbranquiçadas, com granulometria fina a média, de pouca matriz argilosa. Quanto à produtividade, indica alta produtividade aquífera, com capacidades específicas superiores a $4\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Figura 3 – Geologia e hidrogeologia do Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha (também denominado de Aquífero Coxilha das Lombas)

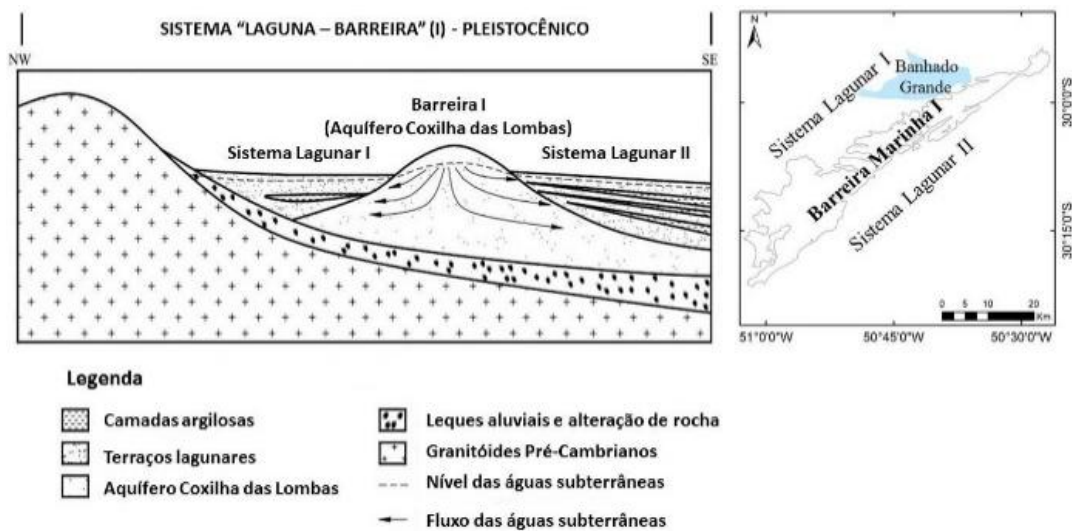


Fonte: CPRM, (2005, 2006).

No que se refere à hidrodinâmica do aquífero, as direções de fluxo das águas subterrâneas ocorrem do Sistema Barreira I para o Sistema Lagunar I e Lagunar II (Figura 4), que se constituem como zonas naturais de descarga para sistemas hidráulicos superficiais, como o do Rio Gravataí (localizado em terraços lagunares) e do Banhado Grande (localizado sobre uma zona semiconfinada por camadas argilosas intercaladas) (BOURSCHEID, 2012).

Herlinger Jr. e Viero (2004) destacam que ocorre descarga do Aquífero Coxilha das Lombas para os aquíferos adjacentes (confinados e livres) no sentido sudeste e noroeste. Contudo, indicam que durante períodos de estiagem, o aquífero recebe a contribuição de sistemas superficiais, observando-se uma inversão no fluxo.

Figura 4 – Perfil hidrogeológico esquemático do Sistema “Laguna-Barreira” I, Aquífero Coxilha das Lombas



Fonte: Herlinger Jr. e Viero, (2004).

Regionalmente, o aquífero possui características de aquífero livre, formado por sedimentos inconsolidados, com boa permeabilidade, porém, observa-se a ocorrência de lentes argilosas, que podem gerar condições de confinamento local (FREITAS et al., 2002). Em estudo realizado pelas empresas Georepp e Uniper, em 2008 (ITAQUY, 2013), identificou-se a presença de um aquitardo na área industrial, foco deste estudo, constituído por zonas com argilas-siltosas e argilas-arenosas, que armazenam volumes de água significativos de circulação lenta.

Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) realizadas em 1997, por Costa (1997, apud ITAQUY, 2013), permitiram estimar a espessura do Aquífero Coxilha das Lombas nessa área. A partir de 20 SEVs foram identificadas três camadas geoeletricas, sendo: (i) camada superficial

– não saturada, com cerca de 15 m de espessura e resistividade maior do que 2000 ohm.m, caracterizada por areias não saturadas; (ii) camada intermediária – saturada, com cerca de 100 m de espessura e resistividade maior do que 1000 ohm.m, caracterizada por areias saturadas; e (iii) camada inferior – impermeável, com resistividades que variaram de 25 ohm.m a 75 ohm.m, caracterizada por areias siltico-argilosas. Assim, estimou-se a espessura da zona saturada do aquífero entre 91 e 142 metros.

Ao norte da área de estudo, Rubbo (2004) realizou a caracterização geofísica entre o Banhado Grande e a Coxilha das Lombas, nas proximidades do município de Santo Antônio da Patrulha – RS, e constatou espessuras entre 37,0 m a 17,8 m para o aquífero, formado por areias saturadas (resistividades entre 865 ohm.m e 652 ohm.m). Resistividades inferiores a 100 ohm.m indicaram comportamento de confinamento em alguns trechos, caracterizando duas condições: a de aquífero livre (próximo à superfície com espessura da ordem de 17,8 m) e a de aquífero confinado, com drenança, e espessuras de até 37,0 m.

Outro estudo geofísico, realizado por Oliveira (2016), para a determinação do topo e da base do Aquífero Coxilha das Lombas, na porção central do município de Viamão, adjacente à área de estudo, permitiu a identificação de dois sistemas aquíferos, um em condição livre, com profundidade do nível d'água subterrânea variando entre 0,195 e 33,63 m, e outro com comportamento de aquífero confinado com drenança, e topo do sistema entre 6,06 e 56,02 m de profundidade. Neste estudo foram obtidas resistividades elétricas entre 74 e 9031 ohm.m.

Em aquíferos porosos inconsolidados homogêneos, a resistividade elétrica é atribuída especialmente em função da umidade e da qualidade da água subterrânea (TOOD, 1980).

Destaca-se que a condutividade elétrica (CE) da água subterrânea captada na área de estudo varia de 36,10 a 51,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 42,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CPRM, 2017). Essas águas possuem baixa capacidade de conduzir eletricidade, apresentando, conseqüentemente, elevada resistividade elétrica.

A baixa variabilidade de CE das águas subterrâneas indica que a variabilidade na resistividade do sistema provavelmente é devido à heterogeneidade geológica dos depósitos que constituem o aquífero.

Os Coeficientes de Transmissividade do Aquífero Coxilha das Lombas, estimados a partir de ensaios de bombeamento, variam de 96,0 a 2505,3 m^2/dia (ÁGUA E SOLO, 1998; FREITAS et al., 2002; Uniper, 2008 apud ITAQUY, 2013). Conforme Itaquy (2013), pode-se considerar uma transmissividade média de 1.200 m^2/dia para o aquífero, na área de estudo. Por sua vez, a Condutividade Hidráulica foi estimada em 12 m/d, considerando uma espessura

média para a zona saturada de 100 m; enquanto que a porosidade média do aquífero foi estimada em 30%, devido à elevada permeabilidade da formação (FREITAS et al., 2002).

No que diz respeito à recarga, Herlinger Jr e Viero (2004) aplicaram o Método do balanço de Cloretos e obtiveram o valor aproximado de 200 mm/ano, considerando a precipitação média anual de 1.330 mm/ano.

Collischonn e Kirchheim (2006) estimaram que a recarga meteórica, por precipitação, é de 163 mm/ano, considerando uma área de contribuição de 417 km², a evapotranspiração real média de 1.141mm/ano e a precipitação de 1.368 mm/ano.

Em estudo mais recente, Bourscheid (2012) aferiu a recarga do aquífero, por meio de balanço hídrico, em 131,58 mm/ano, considerando a precipitação anual de 1.375,0 mm, o escoamento superficial de 260,42 mm/ano e a evaporação em 983,0 mm/ano. A reserva renovável, estimada com base na área de ocorrência do aquífero e na taxa de infiltração, foi de $1,3 \times 10^5$ m³/km².

Já em relação à reserva permanente do Aquífero Coxilha das Lombas, foi estimada em $1,4 \times 10^7$ m³/km². A partir do balanço hídrico e considerando a espessura média do aquífero, a área de ocorrência de 417 km² e a porosidade efetiva de 15% (COLLISCHONN; KIRCHHEIM, 2006). Bourscheid (2012) calculou a reserva permanente em $9,0 \times 10^6$ m³/km², tendo como área total de ocorrência 152,04 km², a espessura da zona saturada em 60 m e a porosidade efetiva de 15%.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

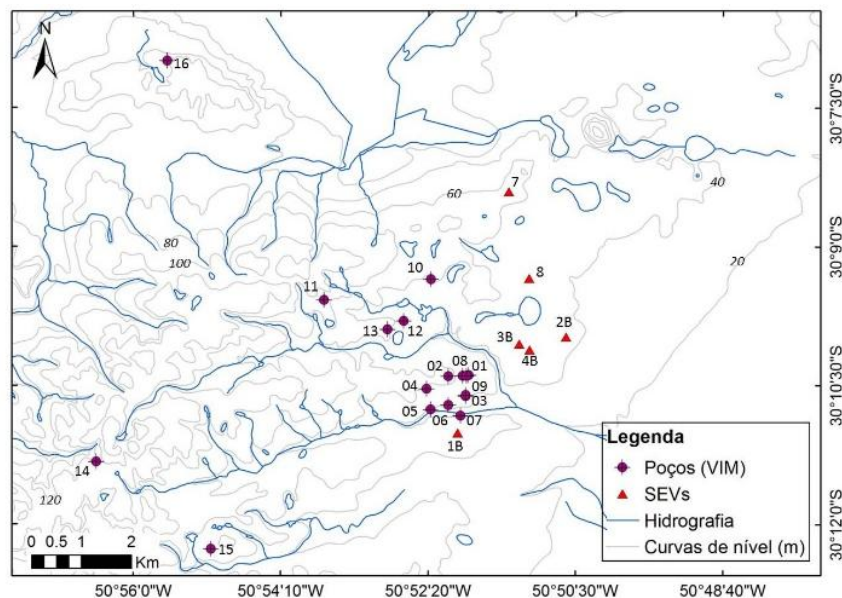
Para a elaboração do modelo hidrogeológico e hidrodinâmico conceitual do Aquífero Coxilha das Lombas, na região central de Viamão, foram utilizadas as seguintes bases de dados:

1. Cartografia: Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:750.000 (CPRM, 2005); Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:750.000 (CPRM, 2006); Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul, escala 1:50.00 (HASENACK; WEBER, 2010);
2. Hidrodinâmica subterrânea: Projeto executivo do sistema de bombeamento para exploração do manancial subterrâneo. Cervejaria Águas Claras do Sul, Viamão – RS (ÁGUA E SOLO, 1998); Documentação complementar referente à Portaria nº. 645/2007. Poço 08 (GEOREPP, 2007); Relatório Semestral – Sistema de captação de água subterrânea (AMBEV, 2016); Poços cadastrados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM, 2017).

A definição do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas e a identificação das unidades hidrogeológicas foram realizadas com base na análise de poços perfurados na área de interesse e nas informações de ensaios e caracterização hidrogeológica contidas em relatórios técnicos (ÁGUA E SOLO, 1998; GEOREPP, 2007; CPRM, 2017; AMBEV, 2016).

A potenciometria foi definida com base na análise dos níveis da água dos poços perfurados na zona industrial e a partir da interpretação de dados geofísicos (SEVs) provenientes do estudo de Oliveira (2016) (Figura 5).

Figura 5 – Localização das SEVs e dos poços perfurados na área de estudo que apresentaram dados hidrogeológicos utilizados para a elaboração do modelo conceitual da hidrodinâmica do Aquífero Coxilha das Lombas (RS, Brasil)



A integração das bases e análise de dados foi realizada a partir da utilização dos softwares ArcGIS 10.2.1 (ESRI, 2013) e Groundwater Modeling System - GMS 9.1 (AQUAVEO, 2014).

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 Modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Coxilha das Lombas na zona industrial de Viamão

Localizam-se na zona industrial 9 poços de exploração de água subterrânea utilizados no abastecimento da indústria de bebidas. Essa zona industrial concentra-se na produção de

cerveja (VIM01 a VIM09). Atualmente 2 encontram-se inativos. Adjacentes à área industrial estão localizados outros 7 poços (VIM10 a VIM16) com dados hidrogeológicos utilizados neste estudo (Tabela 1).

Os poços apresentam entre 84 e 140 m de profundidade, com média de 113,42 m, sendo que 75% destes foram perfurados em cotas topográficas entre 35 e 64 metros, e os restantes 25% entre 64 até 126,7 metros (Tabela 1).

A cota do nível da água (N.A) calculado varia de 23,94 a 114,0 metros, com média de 40,37 m. O poço VIM14 encontra-se a cerca de 6,6 km da área industrial, estando localizado em cota topográfica elevada (126,7 m), e apresenta seu nível estático próximo a superfície (12,7 m de profundidade).

Tabela 1 – Poços de extração de água da zona industrial de Viamão (RS) e adjacências

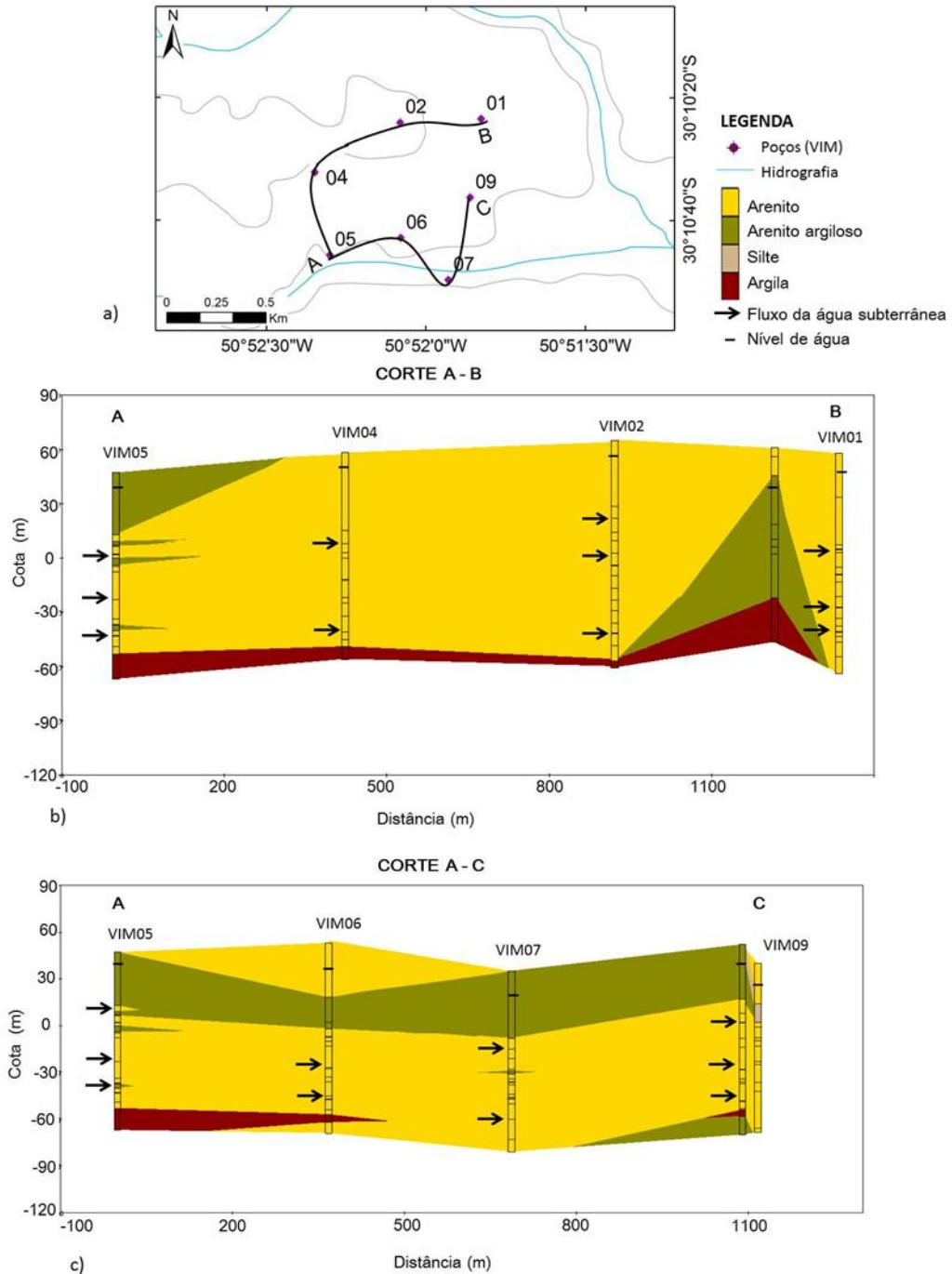
| LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS | ID CPRM | ID | UTM E | UTM N | Topo (m) | Prof. (m) | N.A (m) |
|--------------------------------|------------|-------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------|
| ÁREA DA INDÚSTRIA | 4300021010 | VIM01 | 513116 | 6662017 | 57,00 | 120,00 | 41,20 |
| | 4300021009 | VIM02 | 512708 | 6661999 | 64,00 | 124,00 | 39,93 |
| | 4300021014 | VIM03 | 513060 | 6661595 | 52,00 | 122,00 | 38,94 |
| | 4300021012 | VIM04 | 512277 | 6661749 | 58,00 | 114,00 | 44,78 |
| | 4300021016 | VIM05 | 512353 | 6661333 | 47,00 | 114,00 | 41,71 |
| | 4300021015 | VIM06 | 512711 | 6661419 | 53,00 | 122,00 | 33,49 |
| | 4300017814 | VIM07 | 512950 | 6661208 | 35,00 | 116,00 | 29,52 |
| | 4300017435 | VIM08 | 513000 | 6662000 | 60,00 | 106,00 | - |
| | - | VIM09 | 513060 ² | 6661622 ² | 40,00 ² | 108,50 ² | 24,45 |
| ADJACENTES A ÁREA DA INDÚSTRIA | 4300021908 | VIM10 | 512362 | 6663933 | 60,12 ¹ | 108,00 | 33,10 |
| | 4300021922 | VIM11 | 510225 | 6663522 | 88,80 ¹ | 140,00 | 34,60 |
| | 4300009466 | VIM12 | 511816 | 6663098 | 62,40 ¹ | 112,00 | 42,80 |
| | 4300009461 | VIM13 | 511498 | 6662934 | 61,40 ¹ | 115,00 | 36,33 |
| | 4300024361 | VIM14 | 505680 | 6660298 | 126,70 ¹ | 84,00 | 114,00 |
| | 4300017816 | VIM15 | 507968 | 6658546 | 67,94 ¹ | 124,00 | 23,94 |
| | 4300000801 | VIM16 | 507100 | 6668300 | 70,70 ¹ | 85,20 | 26,90 |

Fonte: CPRM (2017); Hasenack e Weber (2010); Georepp (2007).

Notas: ID CPRM: ID registrado no SIAGAS; UTM E e UTM N: Projeção Universal Transversa de Mercator Sistema de Coordenadas Cartesianas (Leste; Norte); Topo: cota topográfica; Prof.: profundidade do poço; N.A.: Cota do Nível da Água (estimada); ¹Cota topográfica estimada. ²Georepp, (2007).

O Aquífero Coxilha das Lombas é um aquífero regionalmente livre, constituído por areias de boa permeabilidade (FREITAS et al., 2002) (Figura 6a e 6b), e com zonas de semiconfinamento devido à presença das camadas menos permeáveis compostas, predominantemente, por siltitos e argilitos (Figura 6a e 6c). A presença de zonas com intercalações desse material mais fino foi observada em 62,5% dos poços (GEOREPP, 2007; CPRM, 2017).

Figura 6 – Perfis estratigráficos do Aquífero Coxilha das Lombas na área industrial interpretados a partir do perfil geológico dos poços



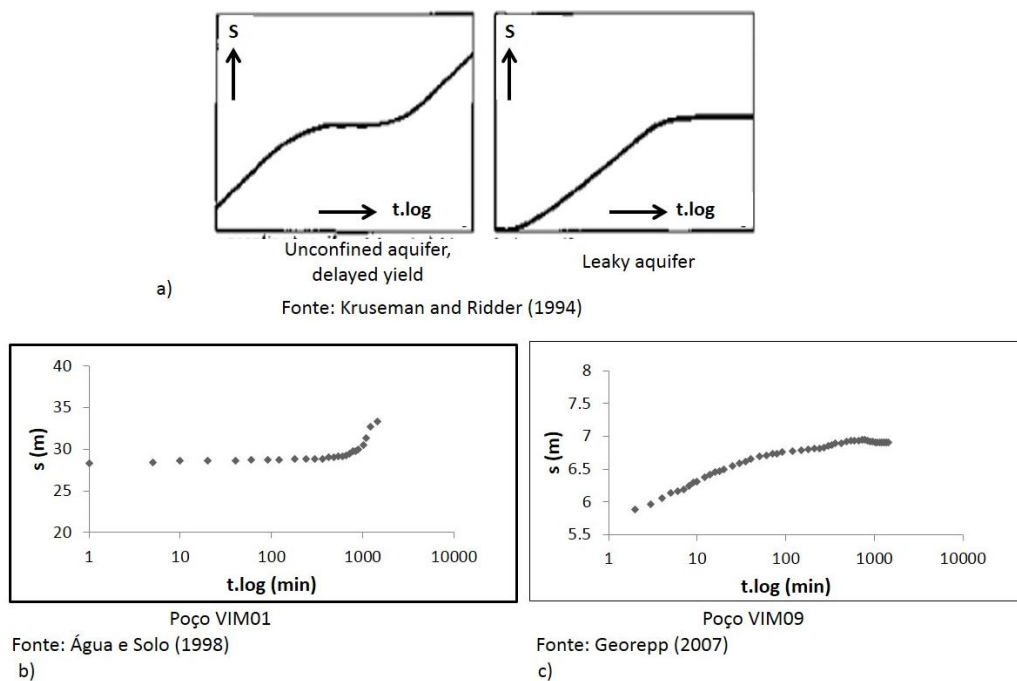
Fonte: (GEOREPP, 2007; CPRM, 2017).

Sendo: a) mapa de localização dos perfis A-B e A-C; b) perfil A-B; c) perfil A-C.

A partir da interpretação de ensaios de bombeamento realizados nos poços localizados na área de estudo (VIM01 a 03, VIM06 e VIM09) (ÁGUA E SOLO, 1998; GEOREPP, 2007)

é possível sugerir que o sistema tem comportamento de aquífero livre com vazão retardada (Figura 7b) e, do mesmo modo, apresenta, em outros casos, características de aquífero confinado drenante (Figura 7c). A análise comparativa foi realizada entre a curva teórica tempo x rebaixamento indicada para poços de observação e a curva observada nos poços bombeados na área de estudo (Figura 7a).

Figura 7 – Análise comparativa entre: a) curva teórica tempo (t.log) x rebaixamento (s) indicada para poços de observação e testes de rebaixamento dos poços: b) VIM01 e c) VIM09



O ensaio de bombeamento realizado no poço VIM01 indica comportamento de aquífero livre. Entretanto, observa-se retardo nas respostas dos níveis do rebaixamento, o que condiz com o esperado em função deste ser constituído, sobretudo, por arenitos finos, indicando a possibilidade da contribuição de água subterrânea com retardo (Figura 7b).

Já o poço VIM09 condiz com o comportamento de um aquífero confinado drenante ou semiconfinado. No local, observa-se uma camada de 12 m de espessura de siltes, localizada no topo do sistema (Figura 7c), indicando a possibilidade do fluxo vertical de água por drenança.

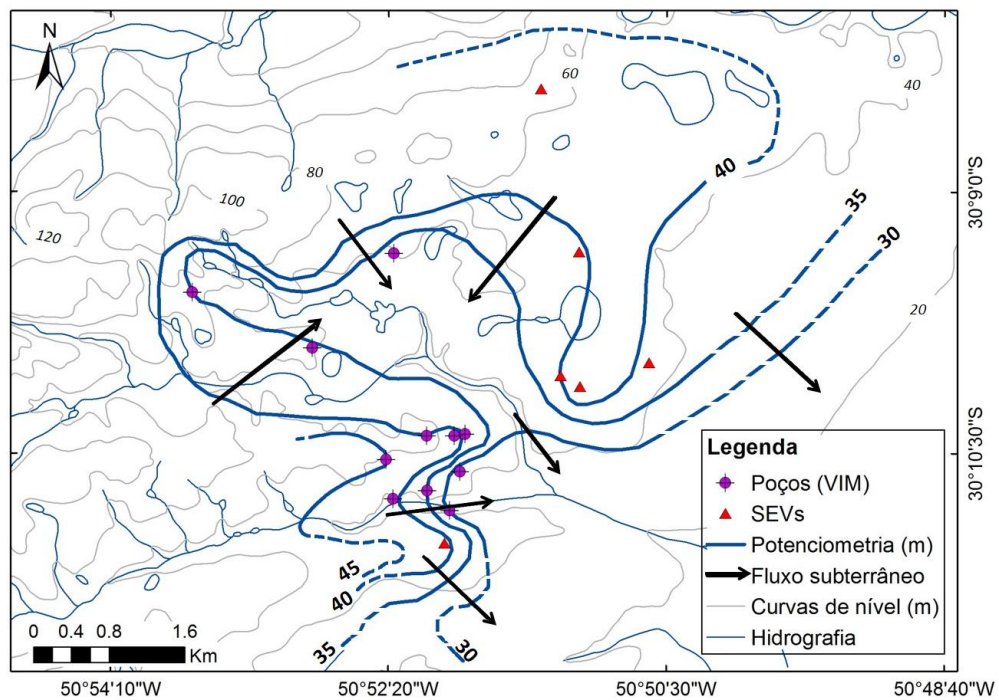
Foram identificados dois comportamentos hidrodinâmicos distintos, um de aquífero livre, constituído, maiormente, por arenitos, com espessuras entre 48 e 124 m (VIM10 e VIM15), e outro com zonas de semiconfinamento, caracterizada pela intercalação de camadas de arenitos, arenitos argilosos e siltes. As camadas semiconfinadas apresentam espessura de 4

a 115 m. Na base de 25% dos poços estudados foi identificado material argiloso à profundidades superiores a 82 m. Esta interpretação está de acordo com a apresentada por outros autores que caracterizam o Aquífero Coxilha das Lombas como um aquífero livre a semiconfinado (FREITAS et al., 2002; RUBBO, 2004).

Rubbo (2004) ao estudar a porção noroeste do aquífero Coxilha das Lombas, observou interconexões hidráulicas, sugerindo a ocorrência da exploração de água subterrânea de forma simultânea entre zonas livres e semiconfinadas do sistema.

A potenciometria do Aquífero Coxilha das Lombas, na área de estudo, indica cargas hidráulicas entre 30 e 45 m (Figura 8), inferidas com base em dados de geofísica. O fluxo subterrâneo ocorre na direção NW-SE, com sentido SE. Localmente, as águas subterrâneas contribuem com a descarga dos cursos d'água que drenam em direção a Lagoa dos Patos.

Figura 8 – Mapa potenciométrico e de fluxo das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas, na porção central do município de Viamão (RS)



2.4.2 Exploração do aquífero para uso da indústria de bebidas

A profundidade do nível da água (Nível Estático – N.E.) varia de 5,29 a 24,07 m, com média de 13,99 m, enquanto que o nível dinâmico (N.D.) dos poços atingiu profundidades entre 7,0 e 41,76 m, com média de 21,7 m. A vazão de estabilização dos testes de bombeamento

variou de 21,4 m³/h (VIM15) a 257,7 m³/h (VIM09), sendo que 88,89% dos poços apresentaram vazões entre 120 e 257,7 m³/h (todos utilizados para abastecimento industrial) (Tabela 2).

Tabela 2 – Vazão de estabilização e os níveis de água registrados nos testes de bombeamento dos poços da área de estudo localizados na região central de Viamão (RS)

| ID | Vaz. Est. (m ³ /h) | N.D. (m) | N.E. (m) |
|-------|----------------------------------|-------------|-------------|
| VIM01 | 120,00 | 41,76 | 15,80 |
| VIM02 | 138,46 | 34,19 | 24,07 |
| VIM03 | 120,00 | 21,00 | 13,06 |
| VIM04 | 120,00 | 18,00 | 13,22 |
| VIM05 | 120,00 | 9,50 | 5,29 |
| VIM06 | 120,00 | 21,70 | 19,51 |
| VIM07 | 120,00 | 19,50 | 5,48 |
| VIM08 | 21,40 | 7,00 | - |
| VIM09 | 257,70* | 22,58* | 15,55* |

Fonte: CPRM (2017); Georepp (2007).

Notas: Vaz. Est.: Vazão de Estabilização; N.D.: Nível Dinâmico; N.E.: Nível Estático. *Georepp, (2007).

Em relação à indústria de bebidas, desde a implantação do sistema de bombeamento de 7 poços na zona industrial de Viamão, a partir de 1998, a operação do sistema de poços de abastecimento ocorre em regime de revezamento, sendo exploradas as águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas em regime de bombeamento alternado (ÁGUA E SOLO, 1998).

O regime de operação do sistema depende da demanda, e nos meses de inverno ocorre uma redução do consumo de água subterrânea utilizada pela indústria em relação aos meses de verão. Por exemplo, em 2010 foram explotados, em média, 6016 m³/dia, durante o período de maio a agosto, e de 7706 m³/dia, durante o período de setembro a abril (ITAQUY, 2013).

Em 2005, com cinco poços em operação, a produção industrial de cerveja extraiu do aquífero 168.309 m³/mês (5533 m³/d aproximadamente) de água, o que resulta em 2.019.708 m³/ano (em torno, apesar dos elevados volumes extraídos, os autores destacam que o nível estático do Aquífero Coxilha das Lombas se manteve relativamente estável, com rebaixamento de, no máximo, 2 m durante o bombeamento) (COLLISCHONN; KIRCHHEIM, 2006).

Em 2009, o consumo anual de água subterrânea foi de aproximadamente 2.216.687 m³ e, em 2010, de cerca de 2.606.749 m³. O mês de menor consumo foi junho de 2009, com 4243 m³/dia, e de maior consumo foi dezembro de 2010, com 9012 m³/dia (ITAQUY, 2013).

Na primeira metade de 2016, a indústria extraiu 120.870,9 m³/mês de água subterrânea por meio da operação de 6 poços, com período de exploração diária de 1,2 a 10,7 h cada poço, em regime de bombeamento de 108,78 a 262,04 m³/h/poço. Os níveis de águas subterrâneas,

níveis estáticos (N.E) e dinâmicos (N.D), não indicaram a ocorrência de rebaixamentos regionais em decorrência da exploração da indústria de bebidas (AMBEV, 2016).

Considerando uma taxa de recarga para o Aquífero Coxilha das Lombas de 131,58 mm/ano, correspondendo a cerca de 9,56% do total precipitado na região (1.375 mm/ano), consoante estudos de Bourscheid (2012), e que a área privativa pertencente à indústria é de cerca de 3,49 km², estima-se que a reserva reguladora para a área da indústria é de 1,3x10⁵ m³/km² aproximadamente (4,6x10⁵ m³/ano). Todavia, com um consumo anual estimado em 2,0x10⁶ m³, a área necessária, para suprir a demanda anual da indústria para a produção de bebidas, é de cerca de 15,2 km², o que representa uma área de influência sobre o sistema de aproximada 3,4 vezes a área privativa.

2.5 CONCLUSÃO

A partir do modelo conceitual hidrogeológico foi possível identificar a presença de dois sistemas aquíferos na zona de estudo, sendo um com características de aquífero livre (com predominância de arenitos de espessuras entre 48 e 124 m); e outro, semiconfinado, contendo zonas com intercalações de materiais mais finos como siltes e argilas com espessuras variáveis entre 4 a 115 metros.

A potenciometria da área de estudo indica cargas hidráulicas variando entre 30 e 45 m e fluxo subterrâneo ocorre na direção NW-SE com sentido SE. Localmente, as águas subterrâneas contribuem com a descarga dos cursos d'água que drenam em direção à Lagoa dos Patos.

Em relação à influência do regime de exploração da indústria no Aquífero Coxilha das Lombas, o balanço hídrico indicou que para a manutenção do processo de produção de bebidas se faz necessária a utilização da reserva reguladora de uma área de recarga 3,4 vezes maior do que a área de propriedade da indústria.

Considerando a localização da zona de extração dos poços, alerta-se para a possibilidade da influência da exploração nos ecossistemas úmidos de banhados em áreas não adjacentes, visto que a extração de água subterrânea ocorre em zonas inferiores do sistema, indicando a possível contribuição de água para os poços proveniente da circulação regional, principalmente, na situação de semiconfinamento.

Ressalta-se a necessidade da realização de estudos hidrodinâmicos do aquífero como: monitoramento dos poços de extração da indústria de alimentos, e ainda a utilização de modelos de simulação numérica, para que seja validada tal hipótese.

2.6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa IPT Novos Talentos (Edital 02/2015), mantido pela Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT), pela bolsa de mestrado; à indústria AMBEV – unidade de Águas Claras, Viamão, pela gentileza expressada na cessão dos dados e ao Laboratório de Recursos Hídricos da UFSM/Campus de Frederico Westphalen, pelo espaço e disponibilização dos *softwares*.

2.7 REFERÊNCIAS

ÁGUA E SOLO. **Projeto executivo do sistema de bombeamento para exploração do manancial subterrâneo**. Cervejaria Águas Claras do Sul, Viamão – RS. Maio/1998.

AMBEV. **Relatório Semestral**: Sistema de captação de água subterrânea. Viamão, 2016.

AQUAVEO. **Groundwater Modeling System (GMS)**, v. 9.1. 2014.

AYDOS, B. B. **Produção rural em Unidades de Conservação: a situação da área de Proteção Ambiental do Banhado Grande, RS**. 2015. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BOURSCHEID. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí: Relatório Final** - RS. Porto Alegre: BOURSCHEID Engenharia e Meio Ambiente S. A., 2012.

BRACK, P. Vegetação e Paisagem do Litoral Norte do Rio Grande do Sul: patrimônio desconhecido e ameaçado. In: ENCONTRO SOCIOAMIENTAL DO LITORAL NORTE DO RS, 2., 2006, Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre, 2006. p. 46-71.

BURGER, M. I. **Situação e ações prioritárias para a conservação de banhados e áreas úmidas da zona costeira**. Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

CAROL, E. et al. Local and Regional Water Flow Quantification in Groundwater-dependent Wetlands. **Water Resour Manage**, v. 27, p. 807-817, 2013. DOI 10.1007/s11269-012-0216-9.

CARVALHO, A. B. P.; OSÓRIO, C. P. Avaliação sobre os banhados do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 1, p. 83-95, 2007.

COLLISCHONN, B.; KIRCHHEIM, R. Quantificação da recarga e das reservas do Aquífero Coxilha das Lombas (RS) através de balanço hídrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006, p. 18.

COSTA, A. F. U. **Estudo Geofísico no município de Viamão, RS, área de Águas Clara**. 1997.

DEPARTAMENTO DE MEIO AMBIENTE (DMA). **APA do Banhado Grande**. 2015. Disponível em: <http://meioambiente.pmsap.com.br/unidade/12>. Acesso em: 10 out. 2017.

ECOPLAN. **Relatório Síntese da Fase A – RSA: Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (PERH/RS). DRH/SEMA. Jun./2007.

ESRI. **ArcGIS for Server**, v.10.2.1. 2013.

ESTELLER, M. V.; DIAZ-DELGADO, C. Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. **Environmental Management**, v. 29, n. 2, p. 266-278, 2002. DOI 10.1007/s00267-001-0024-0.

ETCHELAR, C. B. **Análise do Processo Erosivo no Banhado Grande, município de Glorinha – RS**. 2014. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia)– Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

FREITAS, M A. de. et al. Estudo do comportamento e potencialidade do Aquífero relacionado à Barreira Marinha em Viamão-RS utilizando modelagem computacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2002, p. 17.

GEOREPP. HIDROGEOLOGIA AMBIENTAL. **Documentação complementar referente Portaria nº: 645/2007**. Poço 08. Outubro de 2007. 32 p.

HANI, A. et al. Impact of aquifer intensive use on groundwater quality and on wetlands on coastal aquifer. **Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos**. Madrid, 2003, p. 777-784. ISBN: 84-7840-470-8.

HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul**: escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto). ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

HERLINGER JR, R.; VIERO, P. A. Estimativa da recarga do Aquífero Coxilha das Lombas através do método balanço de cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2004, p. 11.

ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Decreto nº 41559, de 24 de abril de 2002**. Cria o Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br>. Acesso em: 10 out. 2017.

ITAQUY, B. M. **Utilização de técnicas de otimização para a gestão do uso da água subterrânea**: Aplicação na fábrica de águas Claras do Sul da AMBEV. 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

MARTINS, S. **Espaço periurbano fragmentado: dinâmica e desenvolvimento socioespacial em Águas Claras, Viamão/RS**. 2014. 212 f. Dissertação (Mestrado em

Geografia)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

OLIVEIRA, A. B. B. M. de. **Definição de topo e base da região central do Aquífero Coxilha das Lombas (Município de Viamão/RS) através da integração de dados geofísicos e geológicos**. 2016. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia)– Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

PEDRERA, A. et al. Unravelling aquifer-wetland interaction using CSAMT and gravity methods: the Mollina- Camorra aquifer and the Fuente de Piedra playa -lake, southern Spain. **Journal of Applied Geophysics**, v. 129, p. 17-27, 2016. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.03.018.

RUBBO, M. **Análise do potencial hidrogeológico do Aquífero Cenozóico da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí – RS**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.

SAHUQUILLO, A. La explotación intensa de los acuíferos en la cuenca Baja del Segura y en la cuenca del Vinalopó. **Ingeniería del Agua**, v. 20, n.1, p. 13-27, 2016. ISBN: 1134-2196.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMA). **Unidades de Conservação Estaduais: Área de Proteção Ambiental do Banhado Grande**. 2010. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=174>. Acesso em: 10 out. 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande Do Sul**. Escala 1:750.000. Porto Alegre, 2006.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. SOPS-SEMA-DRH/RS-CPRM. CPRM. Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial. Escala 1:750.000. Porto Alegre, 2005.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)**. Banco de dados. 2017.

SIMONATO, M. Água subterrânea em áreas urbanas: potencialidade, problemas e desafios. **Revista de Geociências**, São Paulo, v. 27, n.1, jan./mar. 2008. ISSN 0101-9082.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, Porto Alegre, n. 3, p. 109-115, 2005.

TOOD, D.K. **Groundwater Hydrology**. 2. ed. New York: John Wiley. 1980.

VIAMÃO. Câmara Municipal de Viamão. **História de Viamão**. 2016. Disponível em: <http://camaraviamao.rs.gov.br/site/historia_viamao.html>. Acesso em: 10 out. 2017.

VILLWOCK, J. A. et al. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: RABASSA, J. (Ed.). **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. Rotterdam: A.A. Balkema, v. 4, p. 79-97, 1986.

ZANK, C. **Diagnóstico de fauna do Litoral Médio do Rio Grande do Sul e Zoneamento Temático do Meio biótico**. Porto Alegre, 2013. Disponível em:<<http://www.biodiversidade.rs.gov.br/arquivos>>. Acesso em: 02 set. 2016.

3 ARTIGO 2 – MODELAGEM NÚMERICA APLICADA À DEFINIÇÃO DE PERIMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM ÁREA INDUSTRIAL COSTEIRA

NUMERICAL MODELLING APPLIED TO THE DEFINITION OF PERIMETERS OF PROTECTION OF WELL IN A COASTAL INDUSTRIAL AREA

Resumo

As implicações do uso das águas subterrâneas estão relacionadas aos impactos gerados na qualidade e quantidade deste recurso. Assim, a proteção dos sistemas de captação de água faz com que o risco de contaminação diminua e seja garantido o atendimento aos seus usos múltiplos. O estudo objetivou a delimitação da Zona de Contribuição (ZC) e dos Perímetros de Proteção de Poço (PPPs) utilizados para extração de água subterrânea na produção de cerveja, em Águas Claras, Viamão, RS. A simulação numérica tridimensional e das linhas de fluxo foi obtida a partir do MODFLOW e MODPATH (interface GMS). O modelo foi calibrado para a situação extração de água da indústria em 2016. A análise de sensibilidade baseou-se na variação dos valores de condutividade hidráulica (k). Como resultados têm-se: (i) a ZC para o cenário atual (20 anos) com cerca de 2,84 km², (ii) os PPPs, em: Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (radial de 10m), Perímetro de Alerta (73,5 m x 40,9 m), Perímetro de Prevenção (147,7 m x 47,7 m) e Perímetro de Contribuição (2,84 km²) e (iii) verificou-se a contribuição de água de superfície (banhados e lagoas) para as captações de água subterrânea.

Palavras-chave: Aquífero costeiro. Zona de contribuição. MODFLOW. Ecossistemas superficiais.

Abstract

The implications of the usage of underground waters are related to the impacts they apply on the quality and the quantity of this resource. Thus, protecting systems of water uptake decreases the contamination risk and guarantees benefits to its multiple uses. This study aims to delimitate the Zona de Contribuição (ZC) and of the Perimeters of Protection of Well (PPPs) used on the underground water extraction during the production of beer in Águas Claras, Viamão town, RS, Brazil. We obtained tridimensional numerical simulation and flow lines through MODFLOW and MODPATH (GMS interface). The model was calibrated to the situation water extraction of the industry in 2016. The analysis of sensibility was based on the variation on the values of hydraulic conductivity (k). We got the following results: (i) ZC to the current scenario (20 years) with about 2.84 km², (ii) the PPPs, in: Immediate Perimeter of Sanitary Protection (radial of 10 m), Perimeter of Alert (73.7m x 40.9m), Perimeter of Prevention (147.7 m x 47.7 m) and Perimeter of Contribution (2.84 km²), and (iii) it was verified the contribution of surface water (reserves and lagoons) to the capitation of underground water.

Keywords: Coastal aquifer. Contribution zone. MODFLOW. Surface ecosystems.

3.1 INTRODUÇÃO

A conservação dos sistemas aquíferos costeiros pode ser realizada a partir da adoção de medidas de gestão e planejamento territorial, visando ordenar o uso do solo, de forma a evitar que atividades potencialmente poluidoras sejam implantadas nos locais de maior vulnerabilidade hidrogeológica e assim, contaminem estes sistemas.

A restrição do uso do solo nos arredores de captações de água subterrânea, principalmente em meio urbano, é apresentada como a forma mais eficiente para a proteção das mesmas. Dessa forma, é possível regulamentar a seleção de locais mais adequados para a implantação de poços de captação, sugerindo que os mesmos sejam locados, de preferência, em zonas com baixa risco à contaminação (TOSCANO; SILVA, 2012).

A proteção do aquífero pode ser feita de forma geral ou pontual. Como exemplo de prática de proteção de caráter pontual às captações de água subterrânea, destaca-se a delimitação de Perímetros de Proteção de Poços (PPPs) (HIRATA; SUHOGUSOFF, 2004).

O objetivo da delimitação de PPPs é garantir a proteção dos poços a fim de que a água subterrânea captada mantenha a mesma qualidade encontrada no aquífero. Esta proteção ocorre por meio da limitação de atividades com considerável potencial poluidor no entorno dos poços a fim de evitar a dissipação de poluentes no aquífero (LAUREANO, 2012).

Como metodologia para a definição dos PPPs, enfatiza-se a aplicação de modelos numéricos. Estes possibilitam representar o comportamento do sistema aquífero de forma mais próxima à realidade. Trata-se de um método recomendado para áreas de estudo onde existe conhecimento hidrogeológico prévio (dados hidrogeológicos consistentes e sistematizados). Além disto, a partir da modelagem numérica, é possível avaliar as incertezas inerentes à delimitação das áreas de proteção e, conseqüentemente, seu uso como ferramenta na precaução e previsão de possíveis impactos no sistema aquífero (FOSTER et al., 2006).

Um exemplo de aplicação do método é o estudo realizado por Siarkos e Latinopoulos (2012), nele foram feitas simulações do fluxo da água do aquífero para 37 poços destinados ao abastecimento doméstico, no Aquífero de Nea Moundania, Grécia. Neste estudo foi aplicado o modelo tridimensional de diferenças finitas (MODFLOW), sendo que a delimitação das zonas de proteção foi gerada com o modelo MODPATH.

A presente pesquisa objetivou a aplicação de modelagem numérica para a definição da Zona de Contribuição (ZC) dos Poços e dos Perímetros de Proteção de Poços (PPPs) - Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, Perímetro de Alerta, Perímetro de Prevenção e Perímetro de

Contribuição dos poços de captação de água subterrânea utilizados na produção de cerveja, em Águas Claras, Viamão, RS.

3.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul, região leste do Estado, na município de Viamão, distrito de Águas Claras.

Ao Norte da área de estudo, o principal curso d'água da região é o Rio Gravataí, que constitui, inclusive, a mais importante feição hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. Este nasce na área do Banhado Grande, e seu sentido de escoamento regional é de leste para oeste, cruzando entre a Serra Geral e a Coxilha das Lombas, até desaguar no Delta do Jacuí, em direção ao lago Guaíba (BOURSCHEID, 2012).

Ao Sul, a área está inserida na Bacia do Litoral Médio, que pertence à Região Hidrográfica do Litoral e apresenta um grande número de lagoas, muitas delas interconectadas entre si. Devido à influência das águas salinas oceânicas, que atingem tais corpos d'água através da Lagoa dos Patos, o ecossistema é dependente de águas doces e apresenta elevada fragilidade (SEMA, 2010).

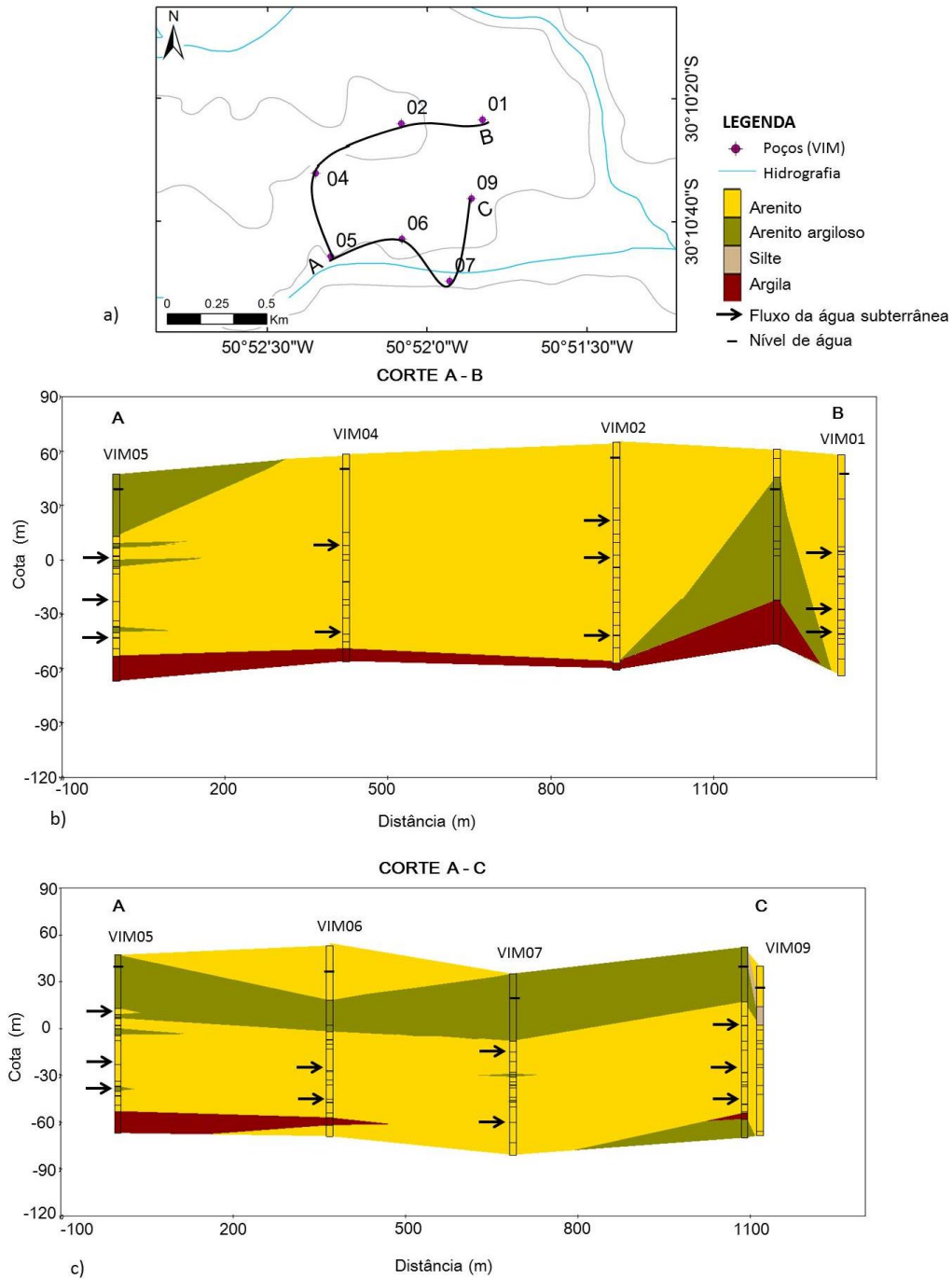
O município de Viamão é banhado pela Lagoa dos Patos a Sul e pelas águas do Rio Gravataí, a Norte. Observam-se distintas nascentes, áreas úmidas e corpos d'água como os arroios Alexandria, Estância, Dorneles, Feijó, Fiúza, Itapuã, Gravatá, Taquara, Varejão e São Gravatá (VIAMÃO, 2016).

É nessa região central de Viamão que está instalada uma indústria de alimentos, foco desta investigação, que extrai água subterrânea do Aquífero Coxilha das Lombas, como matéria-prima para a produção de cerveja.

No primeiro semestre de 2016, a indústria em estudo extraiu 120.870,9 m³/mês de água subterrânea por meio da operação de 7 poços, com período de exploração diária de 1,2 a 10,7 h cada poço, em regime de bombeamento de 108,78 a 262,04 m³/h/poço.

O aquífero Coxilha das Lombas se apresenta, regionalmente, como um aquífero livre formado por arenitos com espessuras entre 48 e 124 metros. Entretanto, localmente, observam-se zonas de semiconfinamento, onde ocorrem intercalações de arenitos e estratos de sedimentos siltosos e argilosos, com espessuras entre 4 e 115 m (Figura 1).

Figura 1 – Seções geológicas do Aquífero Coxilha das Lombas na área industrial

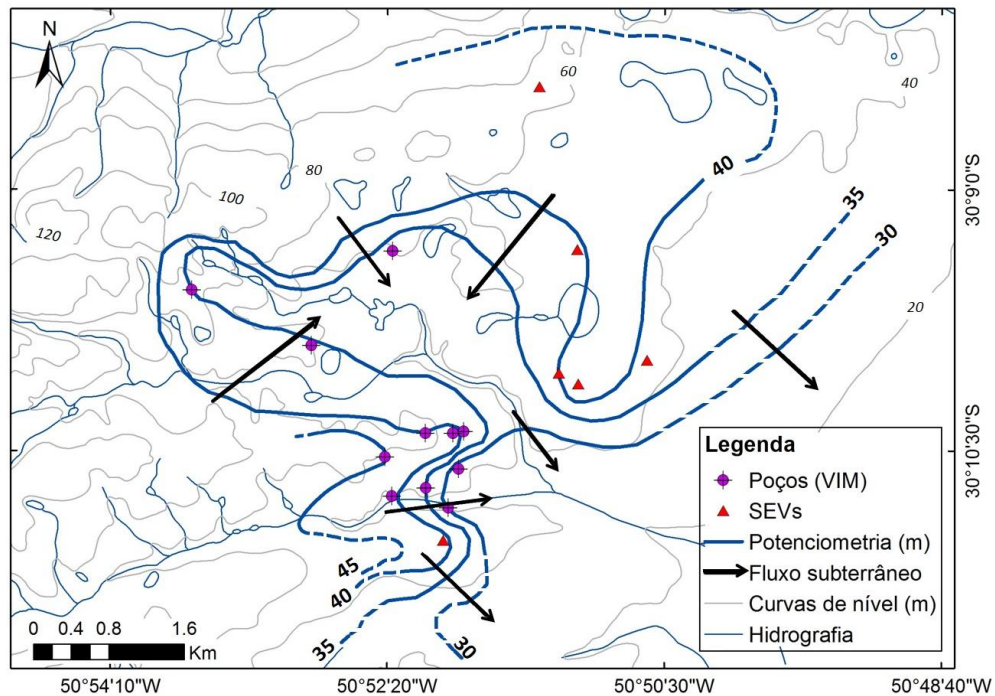


Fonte: (GEOREPP, 2007; CPRM, 2017).

Sendo: a) mapa de localização dos perfis A-B e A-C; b) perfil A-B; c) perfil A-C.

Os níveis estáticos de água subterrânea na região em estudo variam entre 30 e 45 m acima do nível do mar e o fluxo subterrâneo ocorre na direção NW-SE com sentido SE (Figura 2), inferido com base nos dados de geofísica. Localmente, as águas subterrâneas contribuem com a descarga dos rios que drenam na direção da Lagoa dos Patos.

Figura 2 – Mapa potenciométrico e de fluxo das águas subterrâneas do Aquífero Coxilha das Lombas, na porção central do município de Viamão (RS)



De acordo com o balanço hídrico realizado para o Aquífero Coxilha das Lombas, a taxa básica de recarga é de 131,58 mm/ano e representa cerca de 9,56% do total precipitado na região (1.375 mm/ano), conforme estudos de Bourscheid (2012).

A indústria de alimentos possui uma propriedade de 3,49 km² e estima-se que a reserva reguladora anual na área seja de 1,3x10⁵ m³/km², perfazendo um volume de 4,6x10⁵ m³/ano. Todavia, com um consumo anual estimado em 2,0x10⁶ m³, a área necessária para suprir a demanda anual da indústria para a produção de bebidas foi estimada em 15,2 km², o que representa uma área de influência sobre o sistema de aproximados 3,4 vezes o tamanho da propriedade atual.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem numérica de um aquífero envolve diversas etapas, sendo: (i) definição do objetivo/proposta, (ii) elaboração do modelo conceitual, (iii) elaboração do modelo matemático, (iv) escolha do pacote computacional, (v) esquematização do modelo, (vi) (vii) calibração e verificação e (viii) previsão/simulação (ANDERSON; WOESSNER, 1992). Feitosa e Manoel Filho (2008) ressaltam que a escolha do modelo a ser utilizado depende dos objetivos da

modelagem e que a qualidade dos resultados está diretamente vinculada à qualidade e a quantidade dos dados disponíveis para a simulação.

Os modelos numéricos permitem, por exemplo, a observação do deslocamento da água até sua captação, por meio do caminhamento das partículas, produzindo linhas de trajetória (fluxo) calculadas a partir de um tempo específico, o que faz com que esta técnica seja a base para a definição exata das zonas de proteção (FOSTER et al., 2006).

Este modelo faz uso de um sistema de equações diferenciais, sendo o método mais utilizado o das diferenças finitas. Este considera vários pontos no domínio (aquífero) a ser modelado, ou seja, faz a discretização deste e atribui a cada ponto escolhido aleatoriamente a denominação de “nó”. Em cada um dos nós do modelo são atribuídos os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero e estes são considerados constantes na área da célula, sendo assim, quanto maior o número de pontos maior a representatividade do modelo (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

O uso do SIG aliado aos modelos numéricos torna-se uma ferramenta capaz de fornecer suporte a gestão e proteção dos aquíferos, uma vez que possibilita a simulação de diferentes cenários de mudança da qualidade deste recurso. Em estudo desenvolvido no aquífero poroso Angad, Marrocos (HUNT, 2006), o autor, demonstra a delimitação das zonas de proteção de poço a partir do transporte de lixiviado de um aterro sanitário.

A partir de um modelo numérico é possível realizar a delimitação de áreas de proteção de poço, e o limite entre as diferentes zonas pode ser estabelecido por meio do tempo de transporte das partículas, da condutividade hidráulica, da porosidade efetiva e das leis de fluxo (lei de Darcy), (MARCELINO, 1999).

O roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poços de abastecimento público, elaborado por Iritani e Ezaki (2010), cita o uso de modelos numéricos matemáticos, baseados no método das diferenças finitas, como um dos métodos para a delimitação dos PPP. Destarte, segundo as autoras, é possível simular as condições hidrogeológicas de forma tridimensional, a partir do uso de programas de livre acesso como o MODFLOW.

Com a simulação concluída, o modelo matemático requer somente a atualização das informações hidrogeológicas para que a avaliação do sistema em estudo seja representativa da realidade observada, facilitando, assim, a gestão e manutenção da qualidade da água subterrânea captada (IRITANI, 1999).

3.3.1 Definição da Zona de Contribuição e dos Perímetros de Proteção de Poços

A metodologia utilizada, na definição da Zona de Contribuição (ZC) dos poços e dos Perímetros de Proteção de Poços (PPPs), foi adaptada a partir de estudos realizados por Marcelino (1999) (itens iii e iv) e Iritani e Ezaki (2010) (itens i e ii), sendo definidos conforme segue:

A Zona de Contribuição (ZC) é calculada por meio das linhas de trajetória das partículas em tempo regressivo, estimado a demora em chegar até o centro da célula onde está inserido o poço. Neste caso, o período investigado foi de 7300 dias (20 anos), considerando a data de início do projeto executivo do sistema de bombeamento para exploração do manancial subterrâneo (ÁGUA E SOLO, 1998).

Já os Perímetros de Proteção de Poços podem ser subdivididos da seguinte forma:

(i) Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS): definido como uma distância radial de 10 metros ao redor da captação, obtido utilizando o comando *buffer* do ArcGis, com distância radial definida em 10 metros;

(ii) Perímetro de Alerta (PA): definido por meio da simulação de uma zona de captura de partículas com até 50 dias de trânsito, a fim de garantir a proteção microbiológica;

(iii) Perímetro de Prevenção (PP): determinado a partir do tempo de trânsito das partículas de 150 dias, a fim de estimar o tempo ideal para minimizar os impactos de uma possível contaminação do aquífero, e;

(iv) Perímetro de Contribuição (PC): definido a partir da verificação do trânsito das partículas para um tempo infinito. Neste caso, para verificar o cenário atual de extração de água da indústria de alimentos.

As características hidrodinâmicas e hidrogeológicas do aquífero Coxilha das Lombas, na região em estudo, foram sintetizadas de forma a desenvolver um modelo conceitual. As simulações numéricas foram executadas com a aplicação do modelo tridimensional de diferenças finitas MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1998), e do pós-processador MODPATH (POLLOCK, 1989), ambos por meio da interface Groundwater Modeling System (GMS), versão 9.1 (AQUAVEO, 2014). Os mapas foram elaborados a partir da utilização do software ArcGIS 10.2.1 (ESRI, 2013).

3.3.2 Parâmetros iniciais e calibração do modelo numérico (MODFLOW)

Os parâmetros hidráulicos iniciais utilizados para a calibração do modelo numérico foram obtidos a partir de bibliografia, sendo estas:

- (i) Condutividade hidráulica do meio saturado considerando um aquífero predominantemente arenítico: 12 m/d (ITAQUY, 2013);
- (ii) Porosidade média do aquífero: estimado em 22%, conforme estudo desenvolvido na época de implantação da indústria de alimentos (BOURSCHEID, 2012);
- (iii) Condutância dos drenos: calculada em 50 m²/d, considerando o comprimento médio dos canais em 25 m, largura em 1 m, a espessura dos sedimentos que compõe o leito em 1 m e condutividade hidráulica vertical dos sedimentos em 2 m/d;
- (iv) Recarga de precipitação: estimada em 131,58 mm/ano (0,00036 m/d) considerando valores médios anuais de precipitação de 1.375,0 mm, escoamento superficial de 260,42 mm e a evaporação em 983,0 mm (BOURSCHEID, 2012), calculada em 12371,59 m³/d para o sistema regional modelado (34,36 km²);
- (v) Sistema de bombeamento de água: constituído por 7 poços (item 2), os quais foram alocados na terceira camada do sistema modelado;
- (vi) Cargas hidráulicas de calibração (piezometria): as cotas relativas ao topo do aquífero (topo da primeira camada) foram estimadas com base na topografia do terreno (HASENACK; WEBER, 2010). Já as cargas relativas ao nível estático, extraído das informações dos poços foram extraídas do mapa potenciométrico (Figura 2).

O processo de calibração do modelo foi feito pelo método da “tentativa e erro”, o qual é baseado no ajuste manual dos parâmetros hidráulicos, sendo que na relação do residual das cargas hidráulicas observadas e das calculadas pelo modelo, a porcentagem de resíduo aceitável deve ser inferior a 10% de acordo com Iritani (1999). No balanço de massas (quantidade de água de entrada e saída) o modelo foi considerado calibrado quando o valor de discrepância resultou ser inferior a 1% de acordo com diretrizes de Anderson e Woessner (1992).

3.3.3 Análise de sensibilidade (MODFLOW)

A incerteza do modelo e dos resultados obtidos no processo de calibração foi quantificada a partir da análise de sensibilidade da condutividade hidráulica (K) do aquífero, realizada por meio da alteração sistemática dos valores em 10%, em uma faixa entre -99,99% a +99,99%.

3.3.4 Simulação da trajetória das partículas (MODPATH)

A partir do modelo calibrado para as condições atuais de extração de água pela indústria, estimaram-se as zonas de captura das partículas considerando diferentes tempos de trânsito, e com apoio do software MODPATH, os seguintes cenários foram avaliados:

- 50 dias: simulação do Perímetro de Alerta (PA);
- 150 dias: simulação do Perímetro de Prevenção (PP);
- 7300 dias: simulação do cenário atual de extração de água da indústria, o que corresponde a 20 anos (1998 – 2018).

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Modelo numérico (MODFLOW)

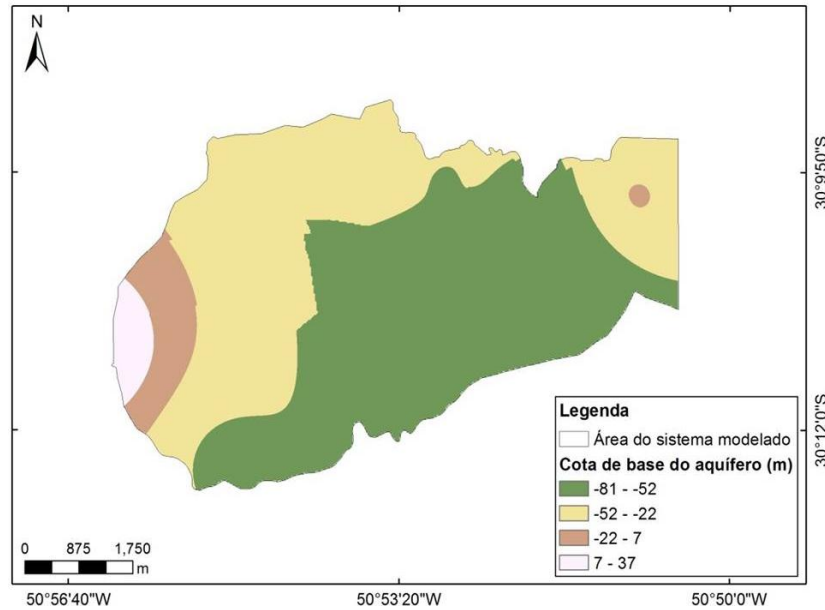
O modelo numérico foi desenvolvido a partir do modelo hidrogeológico conceitual (item 2) e dos parâmetros iniciais do aquífero (item 3.1). A área de estudo foi discretizada espacialmente em um modelo de abrangência regional, com 100 linhas na direção x (100,0 m de comprimento cada), 100 colunas na direção y (66,0 m de largura cada) e 3 camadas na direção z.

As condições de contorno foram definidas como limites de fluxo específicos. A norte, sul, sudeste, oeste e sudoeste as condições de contorno foram definidas pelos limites de fluxo naturais (rios e lagoas) com cotas estimadas a partir da base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul, escala 1:50.00 (HASENACK; WEBER, 2010). A noroeste, nordeste e leste foram adotados condições de fluxo nulo (divisores de água).

As cargas hidráulicas (piezometria) foram estimadas com base na topografia do terreno (topo do aquífero) e a espessura dos sistemas obtidos a partir dos perfis geológicos e da interpolação do mapa potenciométrico da área (Figura 2).

Assim foram definidas três camadas de células representativas do aquífero: (i) a primeira camada, com 20 m de espessura, representando o aquífero com características de livre, (ii) a segunda camada, de menor permeabilidade com 10 a 15 metros de espessura, e (iii) uma terceira camada com espessura de até 70 metros, representando o aquífero com características de semiconfinamento, sendo a base da mesma calculada por interpolação. A partir do modelo conceitual (item 2), as cotas da base deste aquífero varia de -81 a 37 metros (Figura 3).

Figura 3 – Mapa de base do Aquífero Coxilha das Lombas na área de estudo



O modelo foi calibrado para as condições de extração de água pela indústria, em estado estacionário de fluxo, considerando uma bateria de 7 poços em funcionamento, com extração média diária de 569,43 m³ por poço e regime de operação de bombeamento de 1,2 a 10,7 horas por dia, com volume diário de extração de água subterrânea de 3.986,03 m³, totalizando 72.5225,45 m³ no primeiro semestre de 2016 (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados do sistema de extração de águas subterrâneas da indústria de alimentos referentes ao primeiro semestre de 2016

| Mês | Poços em operação* | Volume extraído (m ³ /mês) | Volume extraído (m ³ /dia) |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Janeiro | 7 | 190.915,06 | 6.158,55 |
| Fevereiro | 7 | 156.914,73 | 5.410,85 |
| Março | 7 | 155.111,26 | 5.003,59 |
| Abril | 3 | 88.401,22 | 2.946,71 |
| Maio | 3 | 61.669,95 | 1.989,35 |
| Junho | 3 | 72.213,23 | 2.407,11 |
| Volume médio (m³) | | 12.0870,90 | 3.986,03 |

Fonte: Ambev, 2016.

*O número de poços em operação varia conforme o regime do sistema e a demanda de produção.

A calibração do modelo foi realizada pelo método da “tentativa e erro”, com variação da condutividade hidráulica (K) nas 3 camadas. Inicialmente foi considerado K uniforme de 12 m/d, e ao ser atingido um valor de discrepância de -0,009229%, inferior ao máximo aceitável

de 1% (0,01), o modelo foi considerado calibrado. As condutividades hidráulicas finais foram: 80 m/d na primeira camada, entre 32 e 8 m/d na segunda camada e 20 m/d na terceira camada.

A condutividade hidráulica (K) de sedimentos não consolidados, como areias bem distribuídas podem apresentar valores de K na faixa de 10^{-3} a 10^{-1} cm/s, o que equivale a valores compreendidos entre 0,86 m/d e 86,4 m/d (FETTER et al., 1998 *apud* FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

O balanço hídrico do modelo considera as entradas e saídas de água do sistema. Foi obtido um balanço para o modelo calibrado ponderando o sistema de bombeamento dos poços da indústria de alimentos em funcionamento e outro para o sistema em estado natural, ou seja, sem extração de água subterrânea (Tabela 2).

Em observação ao balanço hídrico obtido (volumes de entrada subtraídos de volumes de saída), fica demonstrado que no sistema natural há um volume maior de saída, para o nível constante em 377,96 m³/d e para os drenos (rios e lagos) em 3608,05 m³/d. Isso indica, que o sistema de bombeamento está extraindo o volume de 3986,01 m³/d da água de contribuição do nível constante e dos drenos (rios e lagos).

Tabela 2 – Balanço hídrico para o modelo calibrado considerando o sistema de bombeamento dos poços da indústria de alimentos em funcionamento e para o sistema em estado natural (sem extração de água subterrânea) em m³/d

| | SISTEMA COM EXTRAÇÃO | | | SISTEMA NATURAL | | |
|-----------------|----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | Entrada | Saída | Entrada - Saída | Entrada | Saída | Entrada - Saída |
| Nível constante | 1297971,76 | 346140,04 | 951831,72 | 1297655,22 | 346201,46 | 951453,76 |
| Drenos | 0,00 | 960338,25 | 960338,25 | 0,00 | 963946,30 | 963946,30 |
| Poços | 0,00 | 3986,00 | 3986,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Recarga | 12371,59 | 0,00 | 12371,59 | 12371,59 | 0,00 | 12371,59 |
| Total | 1310343,36 | 1310464,31 | -120,95 | 1310026,82 | 1310147,76 | -120,94 |

O residual da carga hidráulica médio para os poços, obtido a partir da diferença entre os valores observados a campo e os calculados pelo modelo calibrado foi de -2,92 m. Os poços VIM06 e VIM07 apresentaram os maiores valores residuais, -6,48 e -8,64 m, respectivamente, devido aos valores observados de carga hidráulica nestes poços ser menores em relação aos demais (Tabela 3).

Tabela 3 – Carga hidráulica dos poços: valores observados, calculados via MODFLOW e residual (diferença entre os valores observados x valores calculados)

| CARGA HIDRÁULICA | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Poços | Observada | Calculada | Residual* |
| VIM05 | 41,71 | 41,67 | 0,04 |
| VIM06 | 33,49 | 39,97 | -6,48 |
| VIM07 | 29,52 | 38,16 | -8,64 |
| VIM09 | 38,94 | 38,37 | 0,57 |
| VIM01 | 41,20 | 38,63 | 2,57 |
| VIM02 | 39,93 | 41,78 | -1,85 |
| VIM04 | 44,78 | 44,44 | 0,33 |
| Residual médio | | | -2,92 |

* O residual de carga hidráulica calculado pelo modelo para a diferença dos níveis de água (observada X calculada) com 95% de confiabilidade (erro máximo de 5%).

3.4.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade da condutividade hidráulica (K) realizada a partir do modelo calibrado indica que a partir do acréscimo nos valores de K a discrepância no balanço de massa diminui o que indica o melhor funcionamento do modelo, porém valores de K superiores a 86,4 m/d já são considerados valores referentes a condutividades hidráulicas relativas a cascalhos bem distribuídos (10^{-2} cm/s a 10^0 cm/s) (FETTER et al., 1998 *apud* FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008), situação que não condiz com a realidade da área. Já o residual médio de carga hidráulica dos poços sofre um pequeno aumento, de cerca de 0,04 m (Tabela 4).

Já com o decréscimo na variação dos valores de K, a discrepância no balanço de massa e o valor residual médio de carga hidráulica dos poços também aumenta de -2,92 para -2,99 observadas às variações em até -80%. Se observados os valores obtidos da variação a partir de K em -90%, percebe-se a redução significativa de circulação de água no modelo, e o valor obtido para o residual médio de carga hidráulica dos poços já indica que o modelo não está funcionando dentro do intervalo de confiança (95%).

Tabela 4 – Resultados da análise de sensibilidade para condutividade hidráulica (K)

| Variação de K (%) | Valores de K (m/d) | | | Balanço de massas | | | Carga hidráulica dos poços |
|-------------------|--------------------|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------------|
| | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 | Entrada (m³/d) | Saída (m³/d) | Discrepância (%) | Residual médio (m) |
| +99,99 | 159,992 | 63,997 a 15,999 | 39,998 | 2486874,59 | 2486873,11 | 0,00006 | -2,96 |
| +90 | 152,00 | 60,80 a 15,20 | 38,00 | 2373192,15 | 2373190,66 | 0,00006 | -2,94 |
| +80 | 144,00 | 57,60 a 14,40 | 36,00 | 2258611,74 | 2258610,35 | 0,00006 | -2,94 |
| +70 | 136,00 | 54,40 a 13,60 | 34,00 | 2143316,90 | 2143315,49 | 0,00006 | -2,93 |
| +60 | 128,00 | 51,20 a 12,80 | 32,00 | 2027170,34 | 2027168,94 | 0,00006 | -2,93 |
| +50 | 120,00 | 48,00 a 12,00 | 30,00 | 1910221,13 | 1910220,21 | 0,00004 | -2,92 |
| +40 | 112,00 | 44,80 a 11,20 | 28,00 | 1792254,26 | 1792268,68 | 0,0008 | -2,92 |
| +30 | 104,00 | 41,60 a 10,40 | 26,00 | 1673307,37 | 1673335,46 | -0,001 | -2,92 |
| +20 | 96,00 | 38,40 a 9,60 | 24,00 | 1553197,07 | 1553313,35 | -0,007 | -2,92 |
| +10 | 88,00 | 35,20 a 8,80 | 22,00 | 1432336,02 | 1432455,57 | -0,008 | -2,92 |
| 0* | 80,00 | 32,00 a 8,00 | 20,00 | 1310343,36 | 1310464,31 | 0,009229 | -2,92 |
| -10 | 72,00 | 28,80 a 7,2 | 18,00 | 1187158,16 | 1187278,51 | -0,010 | -2,93 |
| -20 | 64,00 | 25,60 a 6,40 | 16,00 | 1062698,59 | 1062816,22 | -0,011 | -2,94 |
| -30 | 56,00 | 22,40 a 5,60 | 14,00 | 936913,19 | 937025,83 | -0,012 | -2,95 |
| -40 | 48,00 | 19,20 a 4,80 | 12,00 | 809755,41 | 809860,69 | -0,013 | -2,95 |
| -50 | 40,00 | 16,00 a 4,00 | 10,00 | 681200,17 | 681295,58 | -0,014 | -2,96 |
| -60 | 32,00 | 12,80 a 3,20 | 8,00 | 551105,30 | 551187,93 | -0,015 | -2,96 |
| -70 | 24,00 | 9,60 a 2,40 | 6,00 | 419437,65 | 419304,09 | -0,016 | -2,97 |
| -80 | 16,00 | 6,40 a 1,60 | 4,00 | 285338,58 | 285384,85 | -0,016 | -2,99 |
| -90 | 8,00 | 3,20 a 0,80 | 2,00 | 149071,26 | 149092,41 | -0,017 | > 5% |
| -99,99 | 0,008 | 0,0032 a 0,0008 | 0,002 | 11349,71 | 113447,21 | -0,022 | > 5% |

*Valores de K calibrados para cada uma das 3 camadas; Carga hidráulica dos poços: valor médio obtido para o conjunto de poços.

3.4.3 Perímetros de Proteção de Poços (PPPs) e Zona de Contribuição (ZC)

Foram delimitados os seguintes perímetros: (i) Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) em uma distância radial de 10 m, (ii) o Perímetro de Alerta (PA) com dimensão média de 50,5 m de comprimento e 38,0 m de largura e (iii) o Perímetro de Prevenção (PP) de dimensão média de 74,0 m de comprimento e 51,0 m de largura (Figura 4, Tabela 5).

Figura 4 – Perímetro de Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), Perímetro de Alerta (PA) e Perímetro de Prevenção (PP) definido para cada poço na zona da indústria de alimentos

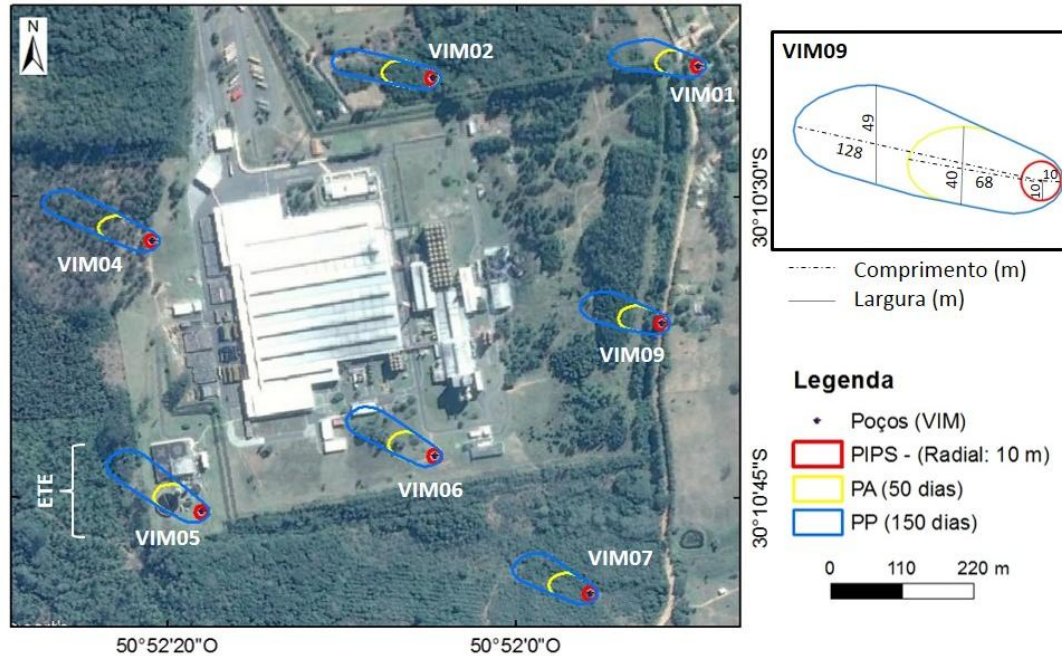


Tabela 5 – Medidas de comprimento e largura dos PPPs calculado para cada poço

| Poços | PA* | | PP* | |
|-------|-------|-------|-------|------|
| | C (m) | L (m) | C (m) | L(m) |
| VIM01 | 66,9 | 39,3 | 137,6 | 49,1 |
| VIM02 | 79,2 | 37,9 | 157,5 | 39,8 |
| VIM04 | 85,3 | 41,7 | 178,7 | 43,7 |
| VIM05 | 76,6 | 44,0 | 162,8 | 53,5 |
| VIM06 | 72,5 | 42,0 | 146,0 | 48,7 |
| VIM07 | 65,8 | 41,3 | 123,0 | 50,0 |
| VIM09 | 68,0 | 40,0 | 128,0 | 49,0 |

*PIPS: Perímetro de Proteção Sanitária; PA: Perímetro de Alerta; PP: Perímetro de Prevenção; C: Comprimento (m); L: Largura (m).

O **Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS)**, definido pela distância radial de 10 metros ao redor da captação, ou seja, em todos os poços o perímetro possui um raio de 10 m (Figura 4).

O PIPS possui como finalidade a proteção da captação e suas instalações, apresentando restrição quanto ao uso do solo (restrição da implantação/operação de atividades com potencial poluidor) (LAUREANO, 2012).

No Estado do Rio Grande do Sul, o PIPS é definido pelo Decreto nº 52.035/2014, e especificado em seu Art. 30, como sendo uma laje de concreto com dimensão mínima de 1 m² e espessura de 10 cm concêntrica ao tubo de revestimento e com declividade para as bordas, e a proteção por uma área mínima de 4m² ao redor da captação, com cerca, para restringir o acesso de pessoas não autorizadas e/ou infiltração de poluentes (RIO GRANDE DO SUL, 2014). Comparando o aplicado no estudo e a legislação do RS, o PIPS com distância radial proporciona a proteção de cerca de 314,16 m² enquanto o que é exigido em Decreto é de 4 m².

No Estado de São Paulo, o Decreto Estadual 32.955/1991, apresenta como ideal que a PIPS seja delimitada por um raio de 10 metros a partir do ponto de captação. Já para Oleaga, Pacheco e Feller (2009), é ainda mais restritivo, e recomenda o uso de um raio de 20 metros, visto que essa delimitação deve ser dependente das condições geológicas locais.

O **Perímetro de Alerta (PA)** foi definido por meio da simulação de uma zona de captura de partículas com 50 dias de trânsito (Figura 4) e possui a finalidade de garantir a proteção microbiológica da água que é captada. Em média, cada poço possui seu perímetro com comprimento de 73,5 metros e a largura de cerca de 40,9 metros.

O Decreto 52.035/2014 estabelece o Perímetro de Alerta contra a poluição, por meio de estudos hidrogeológicos e do cálculo do tempo de trânsito de contaminantes, sendo possível aplicar restrições de uso ao perímetro (RIO GRANDE DO SUL, 2014). Porém não faz especificação de qual seria o tempo de trânsito ideal.

Segundo Laureano (2012), o PA é a área exterior ao PIPS, e sua área é variável e dependente das condições do aquífero, onde as atividades podem ser restritas ou condicionadas de forma a reduzir a poluição das águas subterrâneas.

Para a efetiva proteção microbiológica, Lewis et al. (1982 apud FOSTER et al., 2006), Marcelino (1999) e Iritani e Ezaki (2010) indicam que o tempo de sobrevivência do patógeno (bactérias, vírus e parasitas patogênicos) no subsolo pode variar entre 20 e 400 dias, sendo indicado o valor mínimo de 50 dias, período adequado para minimização deste tipo de contaminação e proteção da saúde pública.

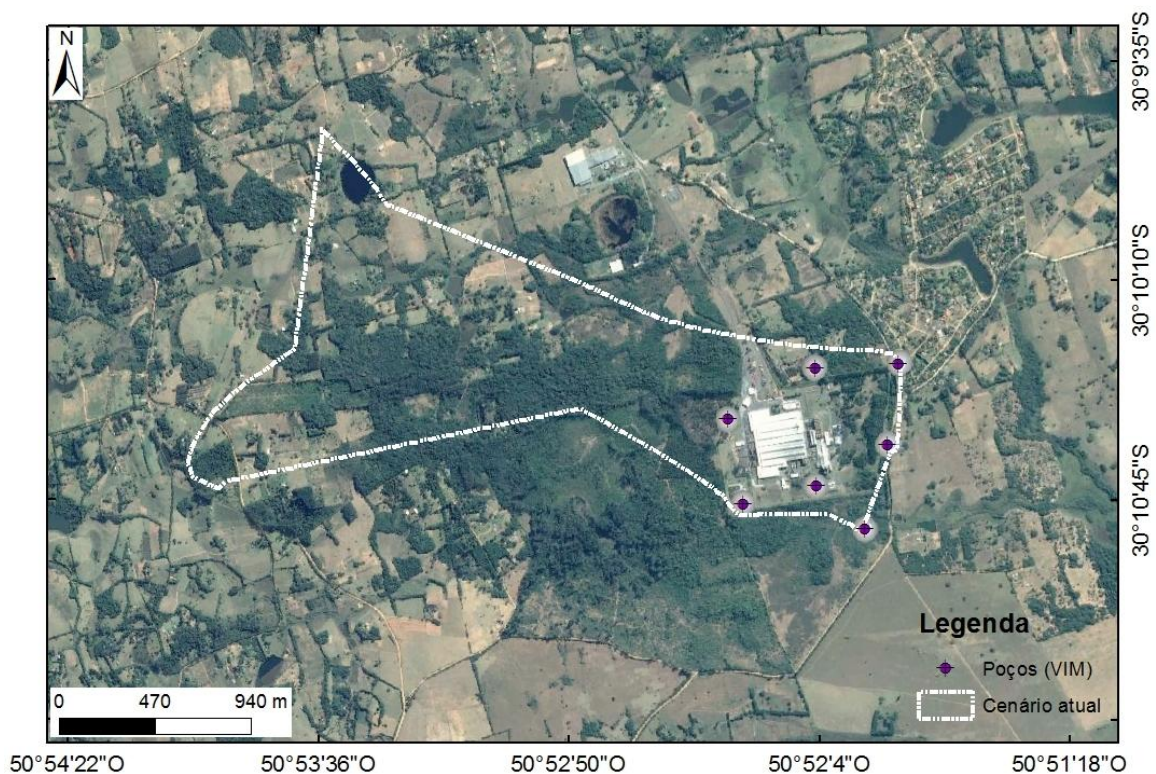
O **Perímetro de Prevenção (PP)** foi determinado a partir da simulação do tempo de trânsito das partículas para um período de 150 dias (Figura 4), com dimensões médias de 147,7 metros de comprimento e 47,7 m de largura.

A definição do PP em 150 dias de trânsito é o tempo ideal para minimizar os impactos de uma possível contaminação do aquífero, pois é possível a coleta, a análise e o controle da qualidade das águas subterrâneas exploradas (MARCELINO, 1999).

Em observação aos perímetros estabelecidos, o poço VIM05, localizado próximo à Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria de alimentos, é o que necessita de maior atenção quanto ao regime de extração de água. Isto porque caso ocorra um vazamento na ETE, este contaminante pode chegar à captação em um período entre 50 e 150 dias.

A **Zona de Contribuição (ZC)** e o **Perímetro de Contribuição (PC)** foram definidos a fim de identificar a extensão da área de influência dos poços bombeando utilizados pela indústria de alimento para o cenário atual de extração, um período de 20 anos (7300 dias). Indicam, dessa maneira, a área para proteção e monitoramento da qualidade das águas dos poços existentes no perímetro. Esta área possui aproximadamente 2,84 km².

Figura 5 – Zona de Contribuição (ZC) dos poços para o cenário atual de extração da indústria de alimentos (20 anos)



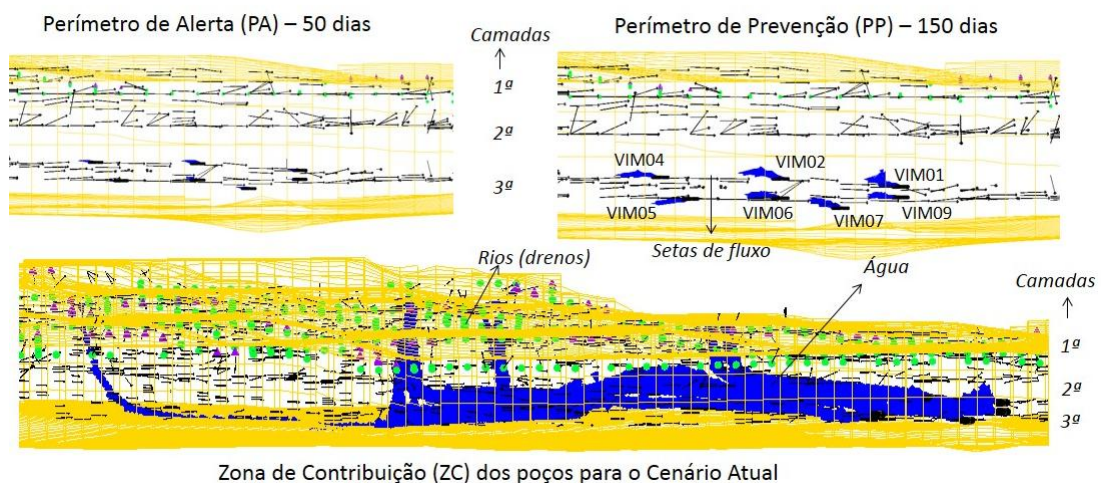
A partir do modelo também foram gerados perfis para as simulações numéricas de fluxo de água para 50 dias (PA), 150 dias (PP) e para a ZC no cenário atual de extração (20 anos) (Figura 6).

As simulações de extração de água para períodos de 50 e 150 dias, considerados curtos, resultaram na identificação de pequenas áreas de influência para cada um dos poços, todavia o conhecimento da sua dimensão e direção de fluxo é de suma importância para que, caso ocorram

vazamentos de contaminantes nestas áreas, sejam tomadas as providências cabíveis evitando a captação de água contaminada e possível injeção desta no processo produtivo da indústria.

Já para o cenário atual, observou-se a partir da linha de trajetória das partículas, a possível contribuição para as captações de água provenientes das áreas úmidas superficiais (banhados e lagoas), o que pode influenciar de forma negativa nos ecossistemas úmidos de banhados adjacentes à área de estudo, em decorrência da redução de descarga e aumento da contribuição águas superficiais – águas subterrâneas. Também, essa situação aumenta o risco de contaminação do aquífero no caso das fontes superficiais estarem contaminadas, considerando o fluxo influente do sistema hídrico conectado.

Figura 6 – Perfis gerados na simulação numérica de fluxo de água para 50 dias (PA), 150 dias (PP) e ZC para o cenário atual de extração (20 anos)



3.5 CONCLUSÃO

A aplicação do modelo numérico possibilitou a definição da Zona de Contribuição dos poços (ZC) para o cenário atual de extração da indústria de alimentos, respeitando as particularidades do aquífero estudado. Devido ao método empregado, requer a utilização de dados hidrogeológicos e hidrodinâmicos observados no sistema aquífero. A simulação deste cenário definiu a área de influência para a extração atual de água subterrânea, esta possui em média cerca 2,84 km², sendo indicada como uma área para proteção e monitoramento da qualidade das águas.

Também foi possível definir os quatro Perímetros de Proteção dos Poços (PPPs), sendo o primeiro, Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), delimitado em uma distância

radial de 10 m ao entorno da captação. O segundo perímetro, o Perímetro de Alerta (PA), delimitado pelo tempo de trânsito de partículas de 50 dias, em média, cada poço possui seu perímetro com comprimento de 73,5 metros e a largura de cerca de 40,9 metros. O terceiro perímetro, o Perímetro de Prevenção (PP), delimitado pelo tempo de trânsito de partículas de 150 dias, com dimensões médias de 147,7 metros de comprimento e 47,7 de largura. E, por fim, o Perímetro de Contribuição (PC) poços mede, em média, 2,84 km².

A partir cenário atual, foi possível identificar a contribuição de água de superfície (banhados e lagoas) para as captações de água subterrânea, o que pode influenciar de forma negativa os ecossistemas úmidos adjacentes à área de estudo, em decorrência da redução de descarga e aumento da contribuição águas superficiais – águas subterrâneas. Também, essa situação aumenta o risco de contaminação do aquífero no caso das fontes superficiais estarem contaminadas, considerando o fluxo influente do sistema hídrico conectado.

Com isso, atenta-se ao monitoramento da qualidade e dos níveis de água, tanto para os recursos subterrâneos quanto superficiais, a fim de que estes recursos sejam preservados para o atendimento das demandas futuras.

3.6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa IPT Novos Talentos (Edital 02/2015), mantido pela Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT), pela bolsa de mestrado; à indústria AMBEV – unidade de Águas Claras, Viamão, pela gentileza expressada na cessão dos dados e ao Laboratório de Recursos Hídricos da UFSM/Campus de Frederico Westphalen, pelo espaço e disponibilização dos *softwares*.

3.7 REFERÊNCIAS

ÁGUA E SOLO. **Projeto executivo do sistema de bombeamento para exploração do manancial subterrâneo**. Cervejaria Águas Claras do Sul, Viamão – RS. Maio/1998. 8p.

AMBEV. **Relatório Semestral**: Sistema de captação de água subterrânea. Viamão, 2016.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling**: simulation of flow and advective transport. San Diego: Academic Press, 1992. 381 p.

AQUAVEO. **Groundwater Modeling System (GMS)**, v. 9.1. 2014.

- BOURSCHEID. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí: Relatório Final** - RS. Porto Alegre: BOURSCHEID Engenharia e Meio Ambiente S. A., 2012.
- ESRI. **ArcGIS for Server**, v.10.2.1. 2013.
- FEITOSA, F. A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.
- FOSTER, S. et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea**. Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington, D.C. 2006. 104 p.
- FREITAS, M A. de. et al. Estudo do comportamento e potencialidade do Aquífero relacionado à Barreira Marinha em Viamão-RS utilizando modelagem computacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Anais...** Florianópolis, 2002, p. 17.
- GEOREPP. HIDROGEOLOGIA AMBIENTAL. **Documentação complementar referente Portaria nº: 645/2007**. Poço 08. Outubro de 2007. 32 p.
- HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul**: escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto). ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.V. A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004.
- HUNT, R. J. Ground Water Modeling Applications Using the Analytic Element Method. **Ground Water**, v. 44, n. 1, p. 5 - 15, 2006.
- IRITANI, M. A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. 1999. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)– Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço**. São Paulo: Instituto Geológico, 2010.
- ITAQUY, B. M. **Utilização de técnicas de otimização para a gestão do uso da água subterrânea**: Aplicação na fábrica de águas Claras do Sul da AMBEV. 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.
- LAUREANO, Z. M. C. P. S. **Metodologia para delimitar perímetros de proteção de captações de água subterrânea. Aplicação ao Aquífero Mio-Pliocénico do Tejo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Água)– Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.
- MARCELINO, M. B. **Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços tubulares (PPP) empregando a técnica de modelagem numérica tridimensional**. 1999. Dissertação

(Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)– Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. A Modular Three Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model. **Techniques of Water-Resources Investigations**, v. 6, n. A1, 1988.

OLEAGA, A.; PACHECO, F.; FELLER, M. **Determinação de Perímetros de Proteção de Poços e Vulnerabilidade e Risco de Contaminação de Aquíferos**. Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. 2009.

POLLOCK, D. W. **Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U. S. Geological Survey nodular three dimensional finite-difference ground-water model**. USGS, Open File Report 89-381, 1989. 81 p.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 52.035, de 19 de Novembro de 2014**. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMA). **Unidades de Conservação Estaduais: Área de Proteção Ambiental do Banhado Grande**. 2010. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=174>. Acesso em: 10 out. 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)**. Banco de dados. 2017.

SIARKOS, I.; LATINOPOULOS, P. Delineation of wellhead protection zones for de control of point pollution sources in the aquifer of N. Moundania, Greece. **European Water**, v. 40, p. 3-17, 2012.

TOSCANO, G. L. G.; SILVA, T. C. da. Uso do solo em zonas de proteção de poços para abastecimento público na cidade de João Pessoa (PB). Nota. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, p. 357 -362, out/dez 2012.

VIAMÃO. Câmara Municipal de Viamão. **História de Viamão**. 2016. Disponível em: <http://camaraviamao.rs.gov.br/site/historia_viamao.html>. Acesso em: 10 out. 2017.

CONCLUSÃO GERAL

O modelo conceitual hidrogeológico indicou a presença de dois sistemas aquíferos na zona de estudo, sendo um com características de aquífero livre, e outro, semiconfinado (intercalações de siltes e argilas), com níveis potenciométricos variando entre 30 e 45 m e fluxo subterrâneo na direção NW-SE, sentido SE.

Os resultados do modelo hidrogeológico desenvolvido neste estudo indicam que o regime de exploração da indústria de alimentos no Aquífero Coxilha das Lombas, necessário para a manutenção do processo de produção de bebidas, é possível, mediante a utilização da reserva reguladora de uma área de recarga 3,4 vezes maior do que a área de propriedade da indústria. Do ponto de vista hidrodinâmico, as consequências desse consumo são, principalmente, a redução da descarga de águas subterrâneas para os sistemas hídricos superficiais.

A partir da aplicação da modelagem numérica foi possível definir a Zona de Contribuição dos poços (ZC) para o cenário atual de extração da indústria de alimentos, sendo que a simulação deste cenário definiu a área de influência para a extração atual, em média cerca de 2,84 km², orientada no sentido NW, indicada como uma área para proteção e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

O modelo numérico hidrogeológico também permitiu definir os quatro Perímetros de Proteção dos Poços (PPPs): (1) Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) com distância radial de 10 m ao entorno da captação, (2) o Perímetro de Alerta (PA) em média comprimento de 73,5 metros e a largura de cerca de 40,9 metros; (3) Perímetro de Prevenção (PP) com dimensões médias de 147,7 metros de comprimento e 47,7 de largura, (4) Perímetro de Contribuição (PC) estimado a partir dos poços, com cerca de 2,84 km².

Finalmente, observou-se a contribuição de água de superfície (banhados e lagoas) para as captações de água subterrânea, o que pode influenciar de forma negativa nos ecossistemas úmidos adjacentes à área de estudo, em decorrência da redução de descarga. Considerando o aumento do fluxo influente do sistema hídrico rio-aquífero, além da redução na descarga de superfície, essa situação aumenta o risco de contaminação do aquífero no caso das fontes superficiais estarem contaminadas.

Recomenda-se a realização de uma investigação mais detalhada sobre a hidrodinâmica do sistema local, em relação aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, a fim de que estes sejam explorados de forma sustentável.

REFERÊNCIAS GERAIS

- COLLISCHONN, B.; KIRCHHEIM, R. Quantificação da recarga e das reservas do Aquífero Coxilha das Lombas (RS) através de balanço hídrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006, p. 18.
- ETCHELAR, C. B. **Análise do Processo Erosivo no Banhado Grande, município de Glorinha – RS**. 2014. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia)– Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.
- FREITAS, M. A. de. et al. Estudo do comportamento e potencialidade do Aquífero relacionado à Barreira Marinha em Viamão-RS utilizando modelagem computacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2002, p. 17.
- GUEDES JÚNIOR, A. **Áreas de Proteção Ambiental para poços de abastecimento público em aquíferos costeiros**. 2005. 184 f. Tese (Doutorado)– Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- HERLINGER JR, R.; VIERO, P. A. Estimativa da recarga do Aquífero Coxilha das Lombas através do método balanço de cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2004, p. 11.
- ITAQUY, B. M. **Utilização de técnicas de otimização para a gestão do uso da água subterrânea: Aplicação na fábrica de águas Claras do Sul da AMBEV**. 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.
- LAUREANO, Z. M. C. P. S. **Metodologia para delimitar perímetros de proteção de captações de água subterrânea. Aplicação ao Aquífero Mio-Pliocénico do Tejo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Água)– Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: wetlands and water. World Resources Institute, Washington, 2005.
- PERCY, S.; LUBCHENCO, J. **Avaliação Ecológica do Milênio**. Ecosistemas e Bem-Estar Humano: Oportunidades e Desafios para as Empresas e a Indústria. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável Ministério do Meio Ambiente. CEBDS: 2006.
- RUBBO, M. **Análise do potencial hidrogeológico do Aquífero Cenozóico da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí – RS**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.
- ZANK, C. **Diagnóstico de fauna do Litoral Médio do Rio Grande do Sul e Zoneamento Temático do Meio biótico**. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://www.biodiversidade.rs.gov.br/arquivos>>. Acesso em: 02 set. 2016.