

Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS

Application of the GOD and POSH methods to determine the vulnerability and contamination risk of aquifers in Santa Maria, a city in the state of Rio Grande do Sul, Brazil

Submetido: 21/08/2015

Revisão: 20/11/2015

Aprovado: 23/11/2015

**Rinaldo J. B. Pinheiro, Ana Carla Carvalho Rauber
Andréa Valli Nummer, José Luis Silvério da Silva**

RESUMO: O estudo da vulnerabilidade dos diversos aquíferos no Município de Santa Maria é de muita importância devido às várias fontes potenciais de contaminação e a inexistência de rios de porte na região para abastecimento. O objetivo do trabalho foi realizar o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos em zona de afloramentos do Sistema Aquífero Guarani visando ampliar o conhecimento e sua proteção. As fases metodológicas compreenderam estudos de campo e de escritório, aplicação de ferramentas de geoprocessamento para a elaboração dos mapas temáticos e cartogramas em Sistema de Informações Geográficas; caracterizando as unidades geotécnicas e hidrogeológicas. A vulnerabilidade natural dos aquíferos foi realizada pelo método GOD com a utilização de dados de 36 poços tubulares. As fontes potenciais de contaminação foram classificadas através do método POSH, segundo a geração de cargas: elevada (fonte linear de contaminação), moderada (postos de combustível e aterros de resíduos) e reduzida (cemitérios e lagoas de tratamento). Espacializaram-se 35 postos de combustíveis, 6 cemitérios, 3 áreas de disposição de resíduos. A maioria das fontes potenciais de contaminação é pontual e muitas inseridas em áreas susceptíveis a poluição dos solos e dos aquíferos. Foram identificados 4 classes de vulnerabilidade dos aquíferos (insignificante, baixa, média e alta). Do total de poços analisados, 30% foram classificados de moderada a alta vulnerabilidade, situados ao sul e norte da área de estudo. Observou-se a ocorrência de várias altas e baixos potenciométricos sendo o fluxo subterrâneo de direção preferencial norte para sul e nordeste para sudoeste. A aplicação destes métodos forneceram subsídios para a gestão dos recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: mapeamento, índice de vulnerabilidade, risco à contaminação, aplicação, SAG.

ABSTRACT: It is very important to study the vulnerability of the various aquifers in the city of Santa Maria, because of the various potential sources of contamination and the absence of large rivers in the region for water supply. The aim of the study was to map the vulnerability to contamination of aquifers in outcrop zone of the Guarani Aquifer System to enhance understanding and protection. Methodological stages were followed by field and office studies, the application of the Geographic Information System and tools to prepare thematic maps and cartograms; describing the geotechnical and hydrogeological units. The natural vulnerability of aquifers by the GOD method was performed by using the data from 36 tube wells. Potential sources of contamination were classified using the Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically /POSH method, according to the generation of loads: high (linear source of contamination), moderate (gas stations and waste landfills) and reduced (cemeteries and treatment ponds). Spatialization was done with the approximately 35 gas stations, 6 cemeteries, 3 waste disposal sites. Most potential sources of contamination are isolated and inserted into many areas susceptible to soil and aquifer pollution. Four classes of aquifer vulnerability were identified (negligible, low, medium and high). Of the total wells analyzed, 30% were classified as moderate to high vulnerability, located south and north of the study area. Several highs and lows were observed on the potentiometric surface. The preferential direction of groundwater flows was north to south and northeast to southwest. The application of these methods helped manage the water resources.

KEYWORDS: mapping, vulnerability Index, risk to groundwater contamination, application, GAS.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam um recurso natural dotado de múltiplos usos e de importância

estratégica, portanto a avaliação da vulnerabilidade e risco a contaminação é fundamental para a gestão dos recursos hídricos de uma região. Segundo Nobre *et al.* (2008), devido às demandas crescentes de água,

sobretudo em áreas urbanas, o seu uso é economicamente viável se disponível em quantidade e qualidade adequadas. A exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos, a ocupação irregular do solo e ausência de normas legais põe em risco a qualidade natural das águas subterrâneas. Portanto, a avaliação da contaminação de aquíferos tem se tornado um dos problemas mais preocupantes nas questões de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, visto que são considerados reservatórios estratégicos para a humanidade, sendo uma das maiores preocupações internacionais (VILAR, 2007; CUTRIM; CAMPOS, 2010a; RIBEIRO *et al.*, 2011).

Nos países desenvolvidos para evitar a contaminação dos aquíferos são tomadas medidas preventivas, pois uma vez contaminado, a recuperação pode ser extremamente difícil e onerosa. No entanto, para adotar medidas preventivas é necessário conhecer a vulnerabilidade à contaminação do aquífero, o que torna a aplicação de métodos de avaliação de vulnerabilidade uma prática comum e de grande contribuição (CUTRIM; CAMPOS, 2010b).

Segundo Foster *et al.* (2002), a poluição dos aquíferos ocorre nos pontos em que a carga contaminante gerada no subsolo por emissões e lixiviados produzidos pela atividade humana, provenientes das atividades urbanas, industriais, agrícolas e de mineração, é inadequadamente controlada, e em certos componentes excede a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura. Portanto, destaca-se a importância do conhecimento dos perfis litológicos do subsolo para atenuarem ativamente muitos poluentes da água e que, há muito tempo têm sido considerados potencialmente eficazes para o despejo seguro dos excrementos humanos e das águas residuais domésticas. No entanto, nem todos os perfis do subsolo e camadas subjacentes são igualmente eficazes na atenuação dos contaminantes, e os aquíferos serão particularmente vulneráveis à poluição nos lugares onde há, por exemplo, rochas muito fraturadas. Também nos terrenos formados por rochas sedimentares areno-siltosas, com baixa taxa de argilas formem aquíferos porosos intergranulares com elevada relação de porosidade/permeabilidade. Em aquíferos nessa condição podem difundir mais rapidamente os contaminantes.

O risco potencial de um determinado aquífero ser contaminado está relacionado ao tipo de contaminante e suas características, como: a litologia, a hidrogeologia e os gradientes hidráulicos, entre outros. A maior ou menor susceptibilidade de um aquífero à

contaminação e poluição é chamada de vulnerabilidade (BRASIL, 2007). Em hidrogeologia o conceito de vulnerabilidade começou a ser usado intuitivamente a partir da década de 1970, na França e de maneira mais ampla na década de 1980. Segundo Foster e Hirata (1987) uma definição importante, seria considerar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como um conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina a susceptibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície. Já perigo é a probabilidade que tem um aquífero de sofrer impactos negativos de uma determinada atividade antrópica, tornando sua água inaceitável para o consumo humano (CUTRIM; CAMPOS, 2010a).

Ainda, Cutrim e Campos (2010b) salientam que os estudos de vulnerabilidade e perigo à contaminação de aquíferos, a partir dos anos 90, tornaram-se ferramenta importante no planejamento e no manejo de aquíferos, principalmente nos países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento. Destacam-se a utilização destas ferramentas como instrumentos obrigatórios em programas de proteção pela agência ambiental americana (USEPA, 1997) e pela agência ambiental inglesa (ENVIRONMENT AGENCY, 1998), com políticas de zoneamento regional e uso do solo. No Brasil, somente alguns estados mais desenvolvidos tem sido utilizada essa metodologia, contudo, ainda em um número reduzido de estudos.

Segundo Nobre *et al.* (2008), a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97) não contempla a questão do gerenciamento dos mananciais subterrâneos com as especificidades necessárias que o assunto demanda. O principal instrumento de gestão desta lei, o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelece programas regionais que são adotados em unidades geográficas.

Frantz e Cruz (2010) apresentam que no estado do RS, a legislação referente à outorga foi aprovada no ano de 1994 de acordo com a Lei Estadual Nº10.350. Esta regulamenta o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água. Enquanto que o Decreto Nº42.047/2002 regulamentou as disposições dessa lei, com alterações, relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul.

Foster e Hirata (1987; 1988) definem o perigo de contaminação da água subterrânea, como sendo a probabilidade de que a água subterrânea atinja níveis inaceitáveis de contaminação, em decorrência

das atividades antrópicas. A vulnerabilidade e perigo a contaminação podem ser representados na forma de mapas, permitindo aos órgãos regulamentadores e demais interessados fazerem a melhor avaliação sobre novas propostas de desenvolvimento e sobre prioridades no controle de poluição da água subterrânea e monitoramento da qualidade. Portanto, o estudo de meios aquíferos pode ser definido sobre vários aspectos, implicando numa maior probabilidade de alteração negativa da qualidade da água em consequência das atividades humanas (GOMES *et al.*, 2010).

Existem vários métodos para avaliar ou mapear a vulnerabilidade natural de aquíferos quanto ao risco de contaminação. Dentre eles destacam-se entre os mais utilizados o modelo DRASTIC de Aller *et al.* (1987), que se constitui num sistema padronizado a partir de dados decodificados em planos de informações e é um dos índices de vulnerabilidade mais difundidos atualmente. Autores portugueses, como Ribeiro (2005) adotaram o *Land Use*, uma modificação do método DRASTIC aplicado a áreas intensamente agricultáveis, com uso intensivo de fertilizantes nitrados.

Já o método GOD de Foster e Hirata (1993) e aperfeiçoado por Foster *et al.* (2002; 2006), trata da vulnerabilidade natural ou intrínseca associada ao meio aquífero.

Algumas aplicações do método GOD para avaliação da vulnerabilidade à contaminação em diferentes aquíferos foram realizados no Estado do Rio Grande do Sul por Silvério da Silva *et al.* (2010; 2013); Riffel e Silvério da Silva, (2011); Pinheiro *et al.* (2012; 2013); Lobler *et al.* (2013; 2014) e Feron e Reginato (2014). Já o método POSH foi aplicado por Cutrim e Campos (2010a;b) no Estado do Mato Grosso e Meira *et al.* (2014) e Pereira Junior *et al.* (2015) no Estado do Goiás.

Este trabalho teve como objetivo principal realizar o mapeamento em Sistema de Informações Geográficas/SIG da vulnerabilidade e do perigo à contaminação dos Aquíferos Caturrita e Passo das Tropas, na cidade de Santa Maria, RS. A vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos foi avaliada através do método GOD o qual permite identificar as classes de vulnerabilidade associada aos parâmetros do meio aquífero. As fontes pontuais de contaminação foram classificadas pelo método POSH (*Pollutant Originand its Surcharge Hydraulically*) em três níveis quantitativos de geração de carga contaminante. Portanto, a metodologia consiste no mapeamento da

vulnerabilidade de aquíferos, seus fluxos subterrâneos preferenciais e na definição de áreas de maior risco, a partir do reconhecimento de atividades humanas que oferecem perigo de contaminação às águas subterrâneas.

ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Santa Maria encontra-se situada no centro geográfico do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 53°19'32" e 54°19'32" longitude oeste, e 29°20'28" e 30°00'16" latitude sul. A área do município compreende aproximadamente 1.782 km², possui uma altitude média de 113 m em relação ao nível do mar, constituindo o Bioma Mata Atlântica e Pampa. Situa-se a aproximadamente a 290 km da capital do estado, Porto Alegre.

Segundo estimativa do IBGE (2015), o município possuía 276.108 mil habitantes permanentes, sendo que, cerca de 95% desta população encontra-se na zona urbana. A figura 1 apresenta a localização do município de Santa Maria situado na Depressão Central do Estado, na Borda da Bacia Sedimentar do Paraná. As cotas altimétrica variam entre cerca de 40 até cerca de 200m, considerando-se um pacote de sequências de rochas sedimentares porosas formadoras da Zona de Afloramento (ZA) do SAG (OEA/PEA, 2009), passando para a zona de transição para os derrames de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral de composições básicas e ácidas. A área do estudo pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí - Vacacaí-Mirim (G-60) a qual tem direção para Leste até o Lago Guaíba (SEMA, 2005).

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

O Município de Santa Maria apresenta seu substrato formado por rochas sedimentares, além de rochas de origem vulcânica em menor quantidade. As rochas sedimentares representam os vários ciclos deposicionais em área continental, com variações definidas pelas diferentes facies nas sequências de mesma idade e por trocas climáticas nas sequências de idades diferentes (OLIVEIRA, 2004). Esta sequência sedimentar está representada por uma sequência de camadas vermelhas depositadas em ambientes fluvial e lacustre alternados. Após um longo período de erosão continental (Jurássico), o ambiente desértico estabelecido e iniciado com a sedimentação de arenitos eólicos foi seguido, no início do Cretáceo, por extensa atividade vulcânica relacionada à abertura do Atlântico Sul, o que recobriu parcialmente essa sequência

sedimentar de forma transgressiva - inicialmente com derrames de lavas básicas e posteriormente com lavas ácidas (SARTORI, 2009). As rochas vulcânicas formam derrames sucessivos de lavas originados durante o Mesozóico que recobriu a Bacia Sedimentar Intracratônica do Paraná. As rochas mais antigas encontradas no município correspondem a um pacote de rochas sedimentares Triássicas, as quais podem conter camadas contendo fósseis répteis.

Um trabalho pioneiro que serve de ponto de partida para o estudo da geologia da região, foi realizado

por Bortoluzzi (1974). Maciel Filho (1990) apresenta a caracterização geotécnica das formações sedimentares de Santa Maria, o que resultou na publicação da carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria. A coluna estratigráfica adotada no trabalho de Maciel Filho foi aquela proposta por Bortoluzzi no ano de 1974 e também adotada na presente pesquisa.

As unidades estratigráficas que interessam à geologia local são as Formações: Rosário do Sul/Sanga do Cabral, Santa Maria, Caturrita, Botucatu e Serra Geral. Essas constituem unidades *hidroestratigráficas*

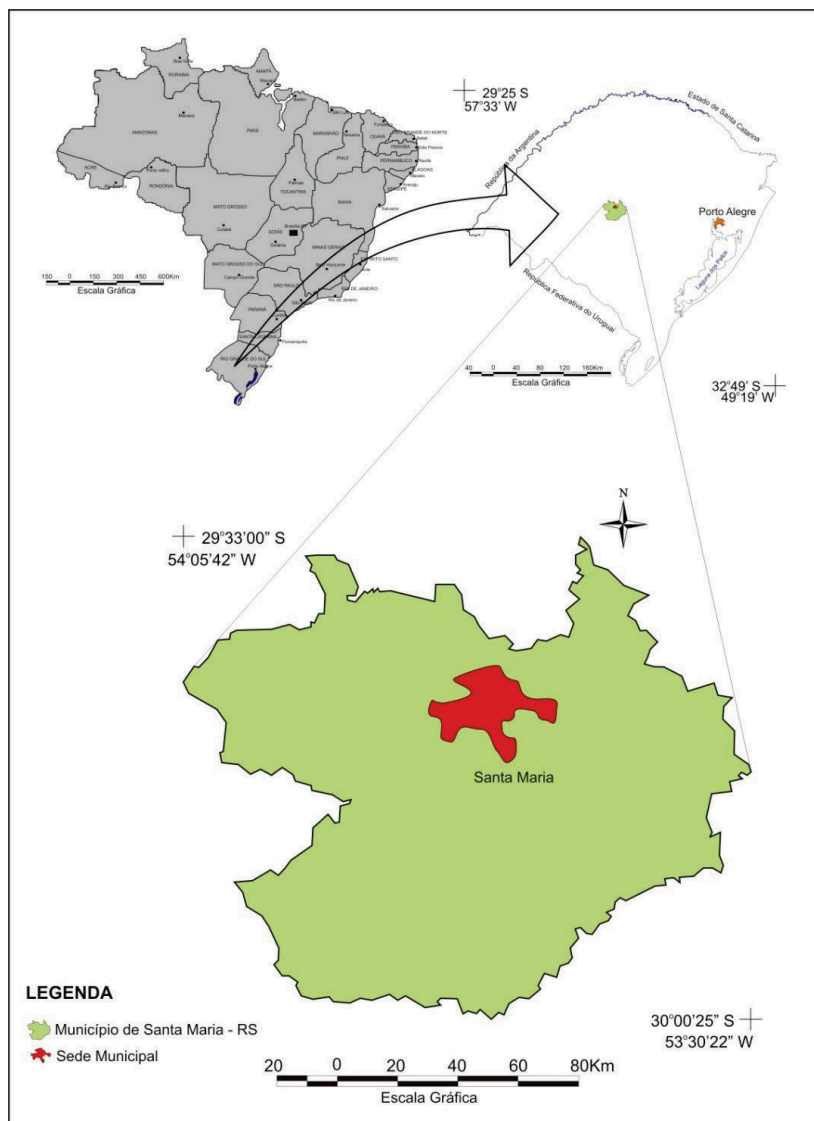


FIGURA 1. Mapa de localização da cidade de Santa Maria, Depressão Central do Estado do RS.

as quais podem formar aquíferos, aquíferos, aquíferos, aquíferos. A tabela 1 apresenta uma síntese da história natural de Santa Maria, com as litologias, condições hidrogeológicas e formas do relevo.

Segundo Sutuli *et al.* (2009) a análise da rede de drenagem de Santa Maria permite identificar duas peculiaridades. Uma delas é o fato de que o município não é cortado por nenhum curso de água digno de nota. O Vacacaí, maior rio existente na região, não atravessa o território municipal, delimitando apenas sua fronteira sul, enquanto o Vacacaí-Mirim e o Arroio Cadena, ambos situados integralmente na

área do município, não têm as características de um grande rio, porém são perenes. Por outro lado, o abastecimento da população com água potável provém, em grande medida, de contribuintes do Rio Ibicuí, componente da bacia hidrográfica do Rio Uruguai. As principais barragens destinadas a abastecer a cidade situam-se fora dos seus atuais limites territoriais, no leito do Ibicuí-Mirim. As águas servidas, no entanto, são direcionadas para a bacia do Rio Jacuí e submetidas, apenas em parte, a processos de tratamento de efluentes. Tais singularidades deveriam servir para aumentar a responsabilidade do poder público e da

TABELA 1
Síntese da história natural de Santa Maria (adaptado de SARTORI, 2009; CPRM, 1994)

Formação geológica		Litologia	Condições hidrogeológicas	Forma do relevo
Depósitos de Aluvião		Areia grossa, média e fina. Cascalho na zona de encosta.	Aquífero contínuo, livre, de grande extensão, vulnerável a poluição.	Planícies aluviais dos arroios e dos rios.
Terraços Fluviais e Patamares		Conglomerado, arenito, com silte e argila. Depósitos de colúvio de encosta da serra.	Aquíferos irregulares, livres. Poços de pequena profundidade.	Terraços de algumas coxilhas e Patamares.
Formação Serra Geral	Seqüência Ácida Superior	Derrames de vitrófiro e granófiro, de composição acidotítica e riolítica.	Aquífero de fissura. Fontes nas zonas de fraturamento horizontal, nas vertentes dos morros.	Topo de morro e cerros.
	Seqüência Básica Inferior	Derrames de basalto e andesito tholeiíticos. Soleiras de diabásio.	Aquífero, em zonas de fratura, constituindo fontes.	Morros e topo de morros.
Formação Botucatu		Arenito médio a fino eólico.	Não se comporta como aquífero.	Parte média das vertentes e morros testemunhos.
Formação Caturrita		Arenito médio a fino, com camadas de siltito argiloso, em direção ao topo.	Aquífero contínuo livre (5m ³ /h), bastante poluído.	Coxilhas alongadas mais altas do que as da Formação Santa Maria.
Formação Santa Maria	Membro Alemoa	Siltito argiloso vermelho. Maciço, com lentes arenosas.	Aquicludo impermeável.	Coxilhas, algumas com ravinas e voçorocas nas vertentes.
	Membro Passo das Tropas	Arenito fino a médio, conglomerático na base, feldspático, com intercalações de siltito e pelito.	Aquífero contínuo livre (3,5 a 10m ³ /h) na área de afloramento, e confinado (30 a 60m ³ /h) para o norte.	Coxilhas ao sul.
Formação Rosário do Sul / Sanga do Cabral		Arenito fino, com intercalações de pelito e siltito.	Aquífero com baixas vazões (3m ³ /h).	Coxilhas no centro-sul.

Obs. Maciel Filho e Nummer (2014) consideram aquífero (rochas ou solos saturados de água e permeáveis, isto é, que permitem o fluxo de água). Aquicludos são as rochas ou solos impermeáveis que podem ou não conter água e os aquíferos são constituídos por estratos semipermeáveis.

população da cidade quanto ao uso da água e igualmente quanto às condições de seu descarte.

Ainda deve-se informar que a localização do Município de Santa Maria situa-se em um interflúvio, logo os cursos de água e os aquíferos podem ter fluxos, tanto para a porção leste em direção a Bacia Hidrográfica do Guaíba, quanto na direção oeste em direção a Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.

SOLOS

O uso racional do meio ambiente, de acordo com o princípio de sustentabilidade, requer o conhecimentos específicos sobre o solo e demais elementos que definem a paisagem regional (DALMOLIN; PEDRON, 2009). O município de Santa Maria caracteriza-se por apresentar significativa diversidade

de solos, com diferentes potenciais de uso. Segundo Pedron *et al.* (2006), os Argissolos, Planossolos, Gleissolos e Neossolos são os que mais se destacam na região, tendo uma grande variabilidade nas suas características mineralógicas, químicas, físicas e morfológicas.

A figura 2 apresenta o a relação solo-paisagem no município de Santa Maria. Nesta figura verifica-se que na região ocorrem feições geomorfológicas com declividades fortes chegando a relevo escarpado (Rebordo do Planalto), seguidas por coxilhas sedimentares com relevo suave ondulado a forte ondulado e várzeas de depósitos fluviais recentes com relevo plano que apresentam lençol freático raso (SARTORI, 2009; DALMOLIN; PEDRON, 2009).

No Rebordo do Planalto encontram-se os Neossolos nas áreas de relevo ondulado a escarpado. No

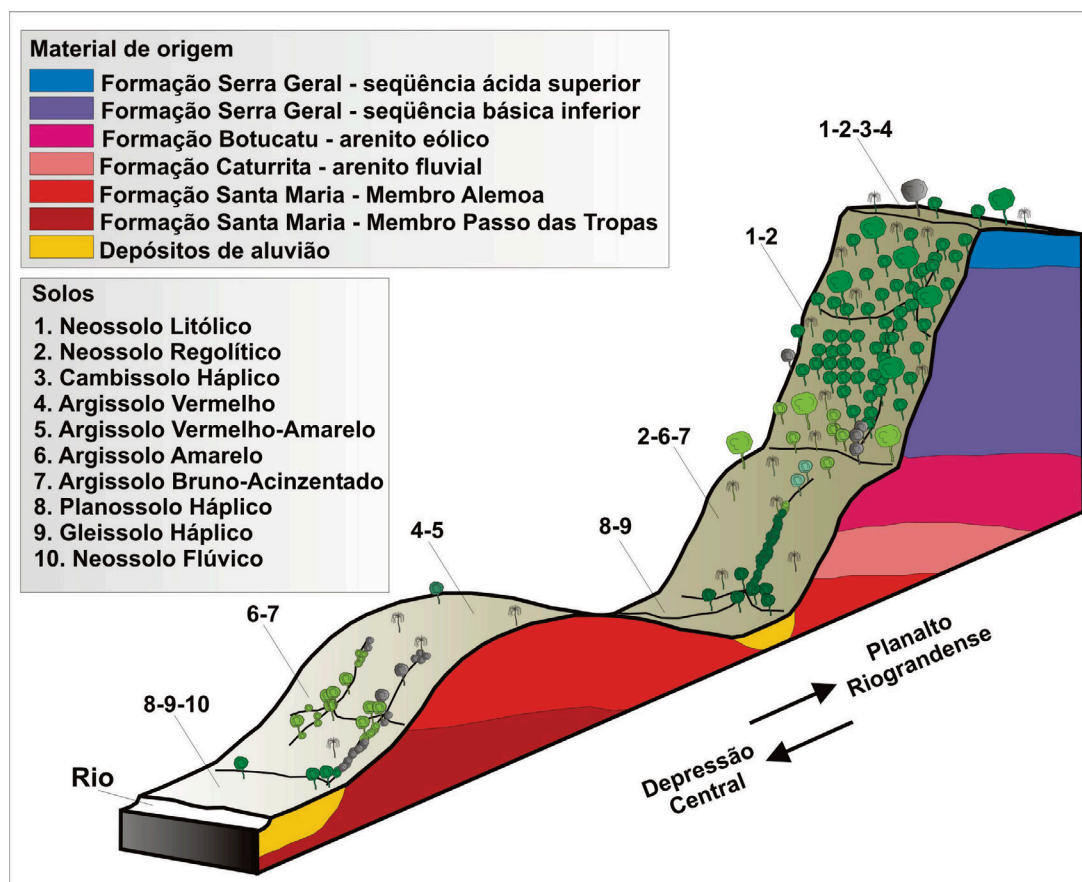


FIGURA 2. Relação solo-paisagem no município de Santa Maria (PEDRON *et al.*, 2006).

topo dos morros ocorrem associações de Neossolos, Cambissolos, Chernossolos e Argissolos vermelhos. No terço médio inferior do rebordo, predominam os Argissolos. Na Depressão Central, onde se situa grande parte da área urbana da cidade, predominam nas áreas bem drenadas no terço superior, das coxilhas sedimentares os Argissolos vermelho e vermelho-amarelo. Nestas mesmas coxilhas, no terço inferior aparecem os Argissolos amarelos, acinzentados e bruno-acinzentados. Nas várzeas fluviais predominam os Planossolos, em geral, associados aos Gleissolos e Neossolos (PEDRON *et al.*, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção do mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos da cidade de Santa Maria e o perigo a contaminação foi aplicado o método GOD e POSH (FOSTER *et al.*, 2002)

Metodo GOD e POSH

Segundo Cutrim e Campos (2010a), o método GOD proposto por Foster *et al.* (2002; 2006) é amplamente aplicado nos países da América Latina em virtude do seu bom desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos nele utilizados.

Para estabelecer o índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos inicialmente realizou-se um cadastro de 40 poços tubulares na área de estudo, mas devido à aglomeração de alguns poços em determinadas regiões e por apresentarem características geológicas

semelhantes, optou-se por espacializar 36 poços. Todos os poços cadastrados apresentaram as informações necessárias para a aplicação da metodologia GOD, ou seja: o Grau de confinamento, a Ocorrência de substrato litológico e a Distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea.

Segundo o Plano Ambiental Municipal (PMSM, 2002), o município possui em torno de 90% dos poços profundos perfurados ilegalmente, podendo estar essas águas normalmente contaminadas por coliformes fecais. Porém, salienta-se que os poços selecionados nesta pesquisa são os poços que estavam disponíveis no cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS (2012), com diâmetros iguais ou superiores a 4" (polegadas), operados com bomba submersa. Não se considerou os poços tubulares (menor diâmetro) operados com *airlift* (compressor), muito comuns na cidade. A Figura 3 apresenta a espacialização dos 36 poços tubulares na carta de unidades geotécnicas de Santa Maria de Maciel Filho (1990).

A aplicação do método GOD (Figura 4) se dá a partir dos seguintes fatores: confinamento do aquífero (G = Grau de confinamento); natureza composicional da zona não saturada e/ou seu grau de fraturamento (O = Ocorrência de estratos geológicos); e profundidade do nível de água ou base confinante do aquífero (D = Distância). Este método aplica constantes entre 0 e 1 para cada variável e o produto entre essas variáveis determina o índice de vulnerabilidade ($GOD = G \times O \times D$), sendo que, todos os parâmetros apresentam o mesmo peso. As classes de vulnerabilidade de aquífero variam de insignificante à extrema, conforme apresentado na Tabela 2. Nesta tabela também são

TABELA 2
Definição das classes de vulnerabilidade do aquífero (adaptado de FOSTER *et al.*, 2002)

GOD	Classes de vulnerabilidade	Definição
0,0 - 0,1	Insignificante / desprezível	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea
0,1 - 0,3	Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
0,3 - 0,5	Média / moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
0,5 - 0,7	Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente absorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
0,7 - 1,0	Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação

apresentados os valores e a caracterização das classes de vulnerabilidade.

O grau de confinamento (G) considera os tipos de ocorrência dos aquíferos (surgente, livre, semi-confinado e confinado). Portanto, o modo tipo de aquífero tem uma forte correlação com o seu grau de vulnerabilidade natural. Este parâmetro varia entre zero (surgente) a 1,0 (não confinado). Sendo o valor 1,0 indicativo de maior risco de contaminação. Neste trabalho este parâmetro foi obtido com base na formação geológica onde se localiza cada poço e através da análise do perfil litológico disponível na base de informações dos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas/SIAGAS (2012) do Serviço Geológico do Brasil.

A litologia e o grau de consolidação da zona vadosa ou camadas confinantes (O) tem a ver com o solo e a litologia acima da zona saturada do aquífero. Este parâmetro esta relacionado com o tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de atenuação. O solo corresponde à parte da zona vadosa onde estão localizadas as raízes das plantas, e cada classe de solo tem uma capacidade de atenuação (CUTRIM; CAMPOS, 2010a). Os tipos de solos na área de estudo foram identificados através do mapa de solos de Pedron *et al.* (2006). A litologia situada acima da zona saturada do aquífero contribui com a capacidade de atenuação desse meio. As notas atribuídas a esse parâmetro variam de 0,4 a 1,0; sendo que o valor mínimo representa a situação de menor risco de contaminação e o valor máximo o maior risco.

As informações geológicas de subsuperfície foram obtidas de descrições de perfis geológicos da CPRM (1994) e atualizadas no SIAGAS (2012). Também se considerou as informações do Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria (1:100.000) do ano de 1994 e do Mapa Hidrogeológico do Estado (CPRM, 2005). Para complementar os dados foram utilizados os levantamentos e trabalhos anteriores de Maciel Filho (1990), Silvério da Silva *et al.* (1990), Silvério da Silva (1997), Sartori (2009) e Silvério da Silva *et al.* (2010).

A profundidade da água no aquífero (D) corresponde à profundidade que o contaminante terá que percorrer para alcançar a zona saturada do aquífero. O valor do nível estático (NE) dos aquíferos foi obtido diretamente no cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS (2012), os poços que não apresentaram valores de nível estático foram descartados. Os valores para este parâmetro situam-se entre 0,6 e 1,0;

sendo o valor mínimo característico de menor risco de contaminação (> 50m a distância ao nível de água subterrânea ou ao teto do aquífero) e o valor máximo o maior risco de contaminação (< 5m).

As fontes potenciais de contaminação na área de Santa Maria foram classificadas de acordo com o método POSH de Foster *et al.* (2002 e 2006). O método classifica as fontes em três níveis qualitativos de geração de carga contaminante (reduzida, moderada e elevada). Esta classificação leva em consideração o tipo de atividade, sua capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada. O inventário das atividades potenciais de contaminação mais relevantes para o estudo foi realizado pelo levantamento dos trabalhos realizados anteriormente (ROBAINA *et al.*, 2002; PINHEIRO *et al.*, 2002; OLIVEIRA, 2004; PINTO, 2005; RAUBER, 2008) e pela interpretação de imagens de satélite. Este inventário foi complementado com inspeção no campo de ruas, cemitérios, áreas de disposição de resíduos e outras fontes prováveis de contaminação. Estas fontes são apresentadas no mapa de vulnerabilidade à contaminação

PROCEDIMENTOS CARTOGRÁFICOS

Com o uso do programa *Microsoft Excel* elaborou-se um banco de dados dos poços tubulares, levando-se em consideração somente os poços inseridos na área de abrangência da carta das unidades geotécnicas de Maciel Filho (1990) na escala de 1:25.000, ou seja, dentre a figura formada pelas coordenadas no Sistema de Projeção Universal de Mercator: UTME (221.600 a 234.000) e UTM N (6.706.000 a 6.720.00) aproximadamente. Para obterem-se as coordenadas em Sistema UTM, utilizou-se a carta topográfica Diretoria do Serviço Geográfico SH. 22.V.C.IV/1-SE Santa Maria MI-2965/1-SE, escala 1:25.000.

Uma vez que o SIAGAS adota o Datum Horizontal *South America Datum*/SAD 69 esse Datum foi adotado no presente trabalho, juntamente com o Datum Vertical o Porto de Imbituba/Santa Catarina, o qual foi utilizado para especializar a Superfície Potenciométrica. Essa superfície equipotencial foi obtida pela relação entre a cota altimétrica na *boca* do poço e o nível da água, utilizando-se um Datum de referência (HEATH, 1982) e dados do SIAGAS (2012).

Especializou-se em cartograma no Programa *Surfer 8* a superfície potenciométrica (Tabela 3) utilizando-se o Interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IQD). De acordo com Landim *et al.*

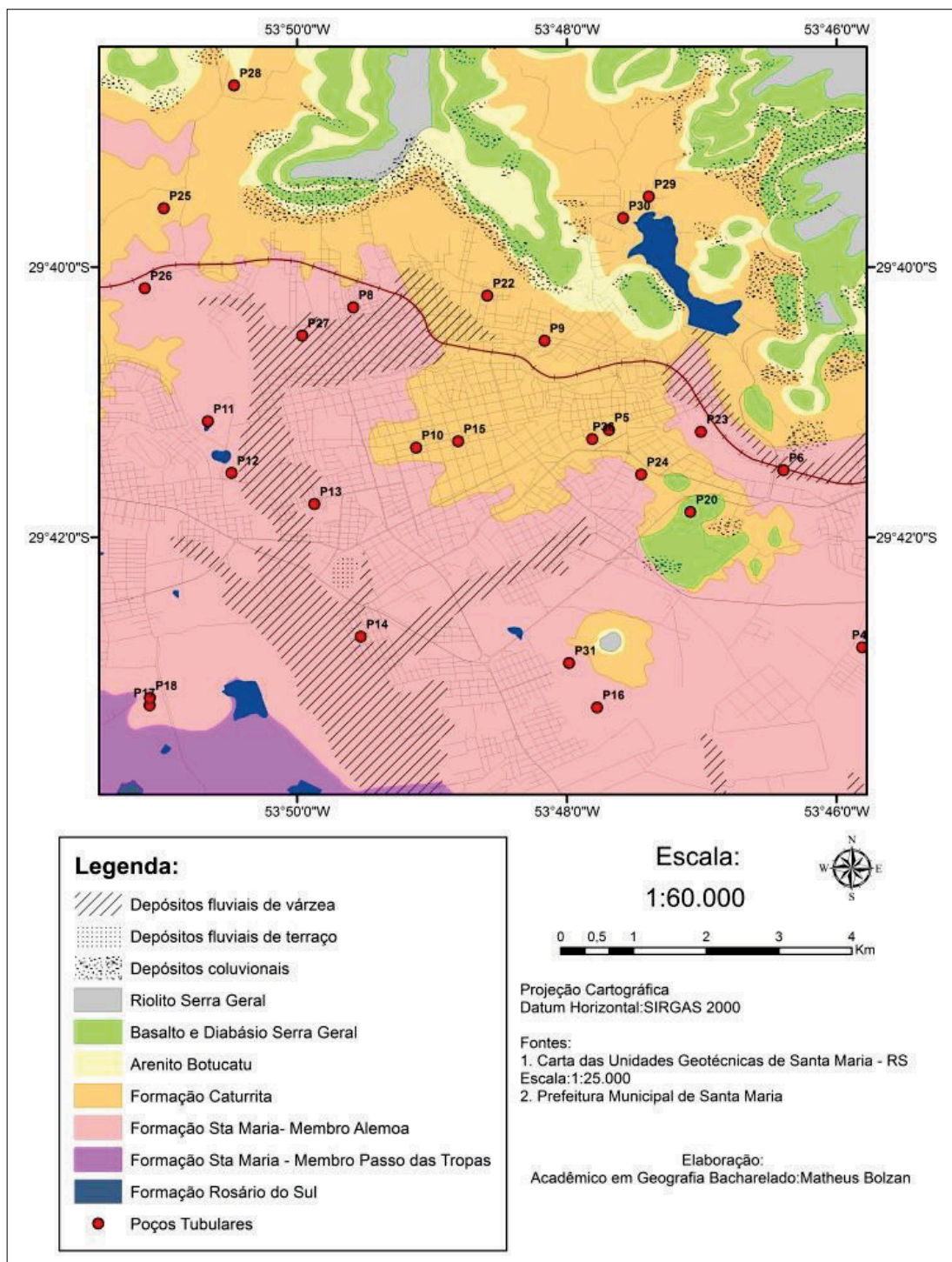


FIGURA 3 – Mapa de espacialização dos 36 poços tubulares e as formações geológicas.

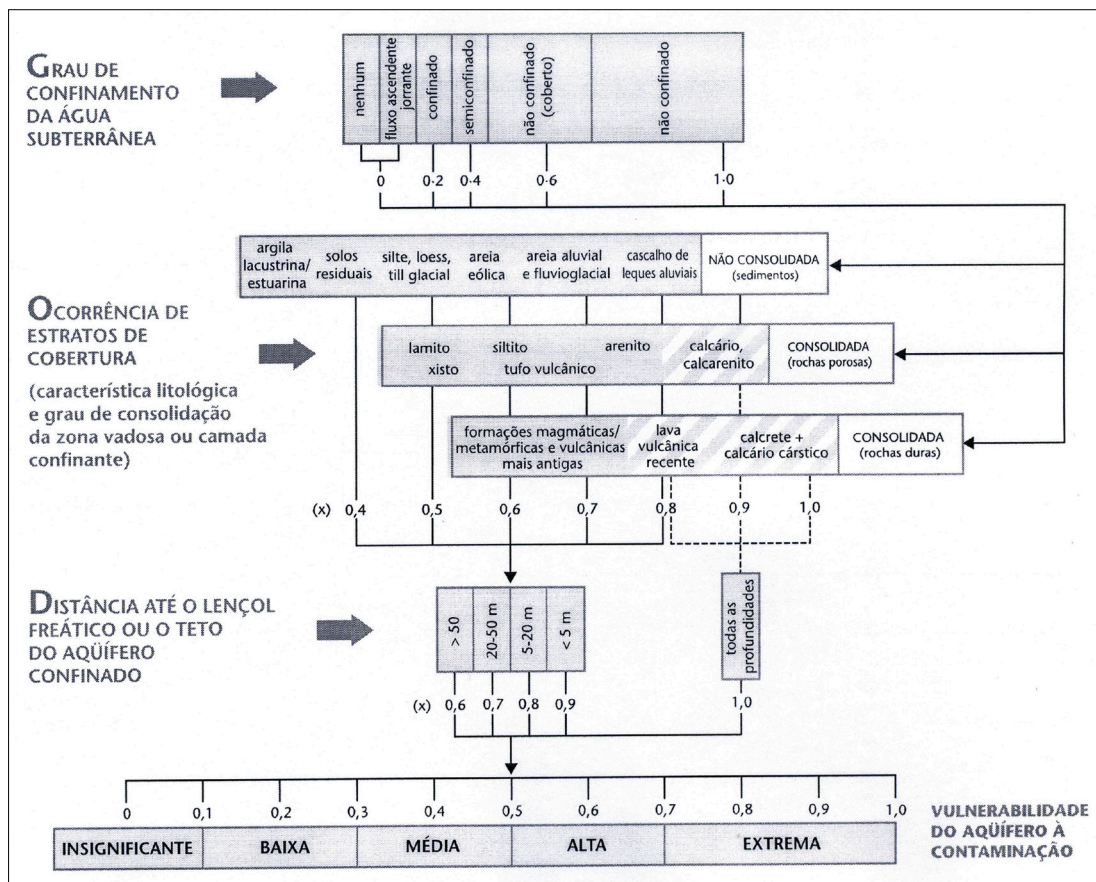


FIGURA 4. Avaliação da vulnerabilidade pela metodologia GOD (FOSTER et al., 2002; 2006).

(2002) esse é um dos interpoladores mais utilizados o qual fornece um resultado razoável para uma rápida avaliação do comportamento espacial da variável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do total de poços cadastrados na área de estudo 18 estão penetrantes na Formação Santa Maria (Aquicludo Alemoa), 11 no Aquífero Caturrita, 3 na Formação Santa Maria (Aquífero Passo das Tropas), 2 no Aquífero Sanga do Cabral (Rosário do Sul) e 2 em Basaltos e Diabásios que formam o Sistema Aquífero Serra Geral. A Unidade Hidroestratigráfica Santa Maria é que abrange a maior superfície exposta dentro da área de estudo, portanto, comporta o maior número de poços perfurados.

Com relação ao índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, após classificar os poços de acordo os procedimentos descritos na metodologia, obteve-se o produto dos 3 parâmetros avaliados (Grau de confinamento, Ocorrência do substrato geológico e Distância ao nível de água subterrânea) apresentados na tabela 3. Para o parâmetro grau de confinamento (G), foram encontrados três tipos de aquíferos (confinados, semi-confinados e livres). Para aquíferos semi-confinados foi atribuído um valor de $G = 0,4$; para aquíferos confinados este valor foi $G = 0,2$ e o valor $G = 1$ para aquíferos não confinados ou livres. Estes valores foram atribuídos com base na formação geológica penetrada por cada poço, e também com base em alguns perfis de poços disponíveis no SIAGAS (2012). A Figura 5 ilustra o perfil de um

TABELA 3
Índice de Vulnerabilidade natural do aquífero

Cód.	Latitude	Longitude	Localização	Sup. Potenc. (m)	G	O	D	Ind. Vuln	Classe
P1	53°45'16''	29°41'25''	Camobi	50,0	0,20	0,65	0,60	0,07	I
P2	53°45'43''	29°41'56''	Vila Farroupilha	73,4	0,20	0,65	0,60	0,07	I
P3	53°45'07''	29°42'30''	Camobi	82,2	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P4	53°45'48''	29°42'48''	São José	74,8	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P5	53°47'41''	29°41'12''	E.Form.Sargentos	128,0	1,00	0,70	0,80	0,56	A
P6	53°46'23''	29°41'30''	Vila Bilibiu	49,6	0,20	0,56	0,60	0,06	I
P7	53°45'35''	29°41'37''	Cohab Santa Maria	66,6	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P8	53°49'35''	29°40'17''	Vila Kennedy	84,4	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P9	53°48'09''	29°40'32''	Bairro Itararé	107,1	1,00	0,70	0,80	0,56	A
P10	53°49'07''	29°41'20''	Bombeiros	77,4	0,40	0,56	0,70	0,15	B
P11	53°50'29''	29°41'08''	PQ. Man. Exército	84,8	0,20	0,65	0,80	0,10	I
P12	53°50'19''	29°41'31''	Vila Rigão	74,7	0,20	0,65	0,90	0,11	B
P13	53°49'52''	29°41'45''	Est. Trat. Esgoto	75,9	0,20	0,65	0,80	0,10	I
P14	53°49'31''	29°42'44''	Vila Urlândia	55,0	0,20	0,65	0,80	0,10	I
P15	53°48'48''	29°41'17''	Praça Satur. Brito	111,3	1,00	0,70	0,70	0,49	M
P16	53°47'46''	29°43'15''	Vila Tomazzetti	68,0	0,20	0,65	0,60	0,07	I
P17	53°51'05''	29°43'14''	Campo Instrução	41,0	0,20	0,65	0,60	0,07	I
P18	53°51'05''	29°43'11''	Campo Instrução	51,0	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P19	53°52'11''	29°40'14''	Faz. Santa Marta	78,0	1,00	0,80	0,70	0,56	A
P20	53°47'05''	29°41'48''	Sem.Vicente Palloti	148,0	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P21	53°41'00''	29°41'59''	Colégio Marista	85,0	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P22	53°48'35''	29°40'12''	Perpétuo.Socorro	124,3	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P23	53°47'00''	29°41'13''	Pátio da RFFSA	86,0	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P24	53°47'26''	29°41'32''	Casa Retiro Sant.	126,0	1,00	0,70	0,80	0,56	A
P25	53°50'59''	29°29'33''	Caturrita	118,0	1,00	0,70	0,80	0,56	A
P26	53°51'07''	29°40'09''	Caturrita	100,0	0,20	0,65	0,80	0,14	B
P27	53°49'57''	29°40'30''	Santa Maria	87,0	0,20	0,65	0,80	0,10	I
P28	53°50'28''	29°38'39''	Caturrita	176,0	1,00	0,70	0,90	0,63	A
P29	53°47'23''	29°39'28''	Campestre M. Deus	134,5	1,00	0,70	0,90	0,63	A
P30	53°47'34''	29°39'38''	CEEE	107,0	1,00	0,70	0,70	0,49	M
P31	53°47'59''	29°42'55''	Seminário São José	78,3	0,20	0,65	0,70	0,09	I
P32	53°48'32''	29°44'58''	Estância Minuano	60,0	1,00	0,80	0,70	0,56	A
P33	53°52'03''	29°41'22''	CVI Ltda	48,9	0,40	0,63	0,70	0,17	B
P34	53°52'14''	29°41'25''	CVI Ltda	55,3	0,40	0,63	0,70	0,17	B
P35	53°52'12''	29°41'21''	CVI Ltda	63,3	0,40	0,63	0,70	0,17	B
P36	53°47'48''	29°41'16''	Dores, Centro	49,2	0,40	0,70	0,60	0,16	B

Obs.: I = insignificante; B = Baixa; M = Média; A = Alta.

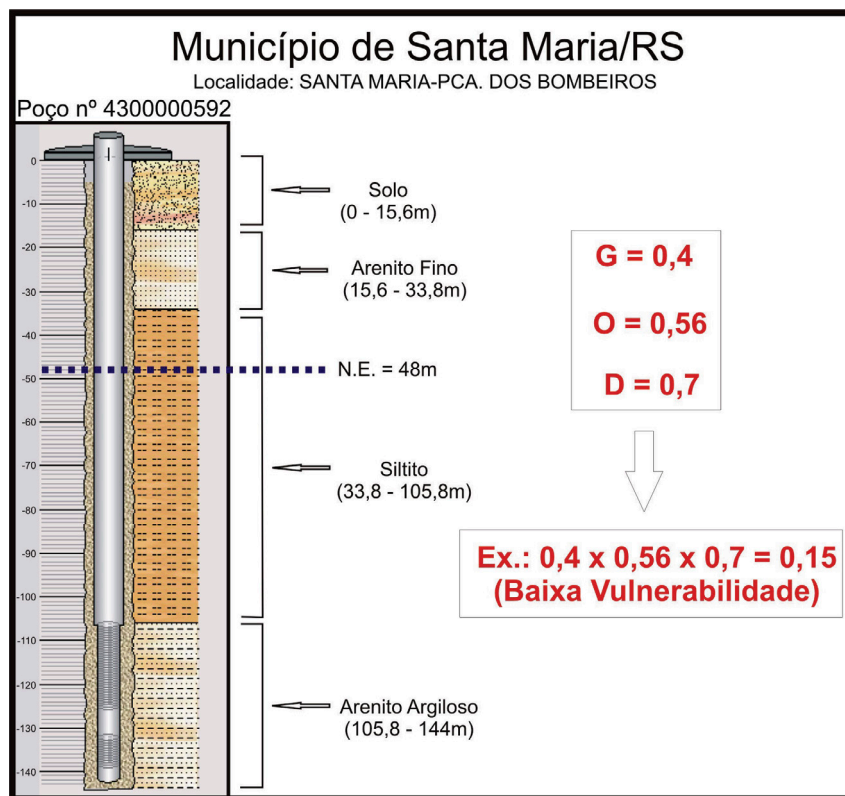


FIGURA 5. Perfil geológico do poço tubular (Poço 10) SIAGAS 4300000592 - Aquífero Caturrita.

poço tubular (poço P-10), apresentando as litologias penetradas no Aquífero Caturrita e os parâmetros resultantes da aplicação da metodologia GOD.

Nota-se com os dados apresentados na Tabela 3 que a maioria dos poços estudados encontra-se penetrando aquíferos semi-confinados. Estes aquíferos apresentam camadas interdigitadas com composição argilo-siltosa de baixa permeabilidade e espessuras variáveis em função dos paleoambientes deposicionais. Outro fator a ser considerado é sua fração argila composta por argilominerais do tipo 2:1, da família das esmectitas expansivas e de interessestratificados illita-smectita (SILVÉRIO DA SILVA, 1997 e SILVÉRIO DA SILVA *et al.*, 1990). Esses argilominerais de acordo com Drever (1997) apresentam altos valores de capacidade de troca catiônica (CTC), portanto pode adsorver parte do conteúdo de contaminantes inorgânicos.

Os valores atribuídos para o parâmetro estrato da cobertura (O), em mais de 50%, foi de 0,65. Este parâmetro classifica cada poço estudado em função do seu substrato suprajacente (ocorrência litológicas e

grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes) com base na formação a qual estão inseridos, e também em perfis de poços disponíveis no SIAGAS (2012). Este valor indica a predominância das frações silte e areia.

A determinação do parâmetro de distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea (D) baseou-se na informação da altura do nível estático (NE) dos poços cadastrados no SIAGAS (2012). A tabela 3 apresenta os valores atribuídos para cada altura de nível estático dos poços estudados. Observou-se uma variação significativa da altura do nível estático dos poços (inferiores a 5m e superiores a 50m), que ocasionou valores deste parâmetro variando entre D = 0,6 e D = 0,9. Salienta-se que quanto mais raso for o nível da água maior é o risco de contaminação a partir de uma carga imposta na superfície do terreno, portanto parâmetro adotado mais elevado.

Os valores do índice de vulnerabilidade situaram-se entre 0,07 e 0,63 (classe de vulnerabilidade insignificante a alta). Na área de estudo das 5 classes possíveis quanto ao grau de vulnerabilidade natural

dos aquíferos apresentou 4 (insignificante, baixa, média e alta). Não apresentando nenhum poço com vulnerabilidade extrema.

A Figura 6 apresenta a espacialização das classes de vulnerabilidade utilizando o programa SURFER 8.0 (2004). Analisando-se esta figura, nota-se que 19

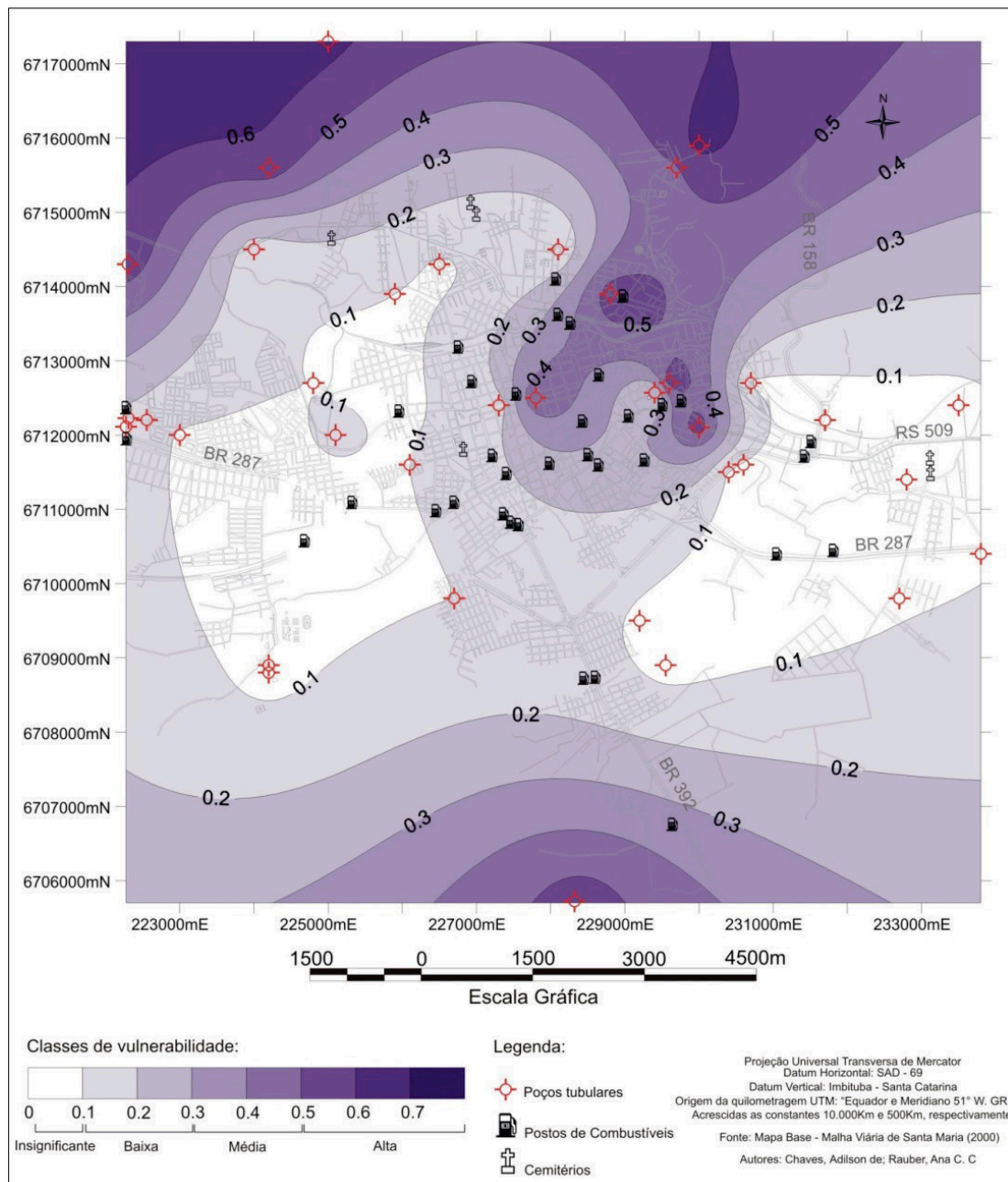


FIGURA 6. Cartograma do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, malha urbana e principais fontes potenciais de contaminação.

poços estão inseridos na classe de vulnerabilidade insignificante, 8 poços na classe alta e 7 poços na classe de vulnerabilidade baixa. Ao comparar as classes de vulnerabilidade natural dos aquíferos com a localização dos poços na carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990), confirmam-se as descrições geológicas e hidrogeológicas da área de estudo.

Os poços localizados na classe de vulnerabilidade insignificante (52% do total de poços avaliados) apresentam características conforme descritas na Formação Santa Maria – Aquicludo Alemoa (SMA), sendo a mesma descrita como uma camada impermeável na parte superior, composta por siltitos argilosos maciços e arenitos argilosos. Devido aos arenitos argilosos a unidade também é classificada como semipermeável em sua parte inferior. Segundo Pinheiro *et al.* (2015) os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica nesta unidade geotécnica também confirmam as características de material praticamente impermeável. Porém deve-se acrescentar que pode haver a formação de fluxo ascendente formando brotações de água na superfície do terreno. Uma vez que essa unidade não é aquífera não forma um lençol freático (MACIEL FILHO, 1990). Essas brotações de água subterrânea

são bastante comuns na cidade de Santa Maria, ocupando diferentes posições altimétricas.

A Figura 7 apresenta a espacialização da superfície potenciométrica indicando a direção do fluxo subterrâneo, traçada pelos vetores, perpendicularmente as linhas equipotenciais. Notar a existência de altos potenciométricos a Norte do cartograma no poço 28. Outros altos potenciométricos ocorrem nos poços 5, 22, 24 e 29 penetrando os arenitos fluviais do Aquífero Caturrita. Observou-se que estão predominantemente associados a índices de vulnerabilidade altos. Por outro lado, os baixos potenciométricos estão associados aos poços 1, 6 e 17, penetrando o Membro Alemoa (Aquicludo) da Formação Santa Maria, com índices de vulnerabilidade insignificante. Também ocorrem baixos potenciométricos nos poços 33 e 36 associados ao Aquífero Passo das Tropas e Aquífero Caturrita, arenitos de paleoambiente fluvial os quais estão associados a índices de vulnerabilidade na classe baixa. As direções regionais de fluxos indicadas são de Norte para Sudeste e Noroeste para sudoeste.

Ao confrontar a classe de vulnerabilidade alta demonstrada na Figura 6, com a carta das unidades geotécnicas (Figura 3), percebe-se que os poços in-

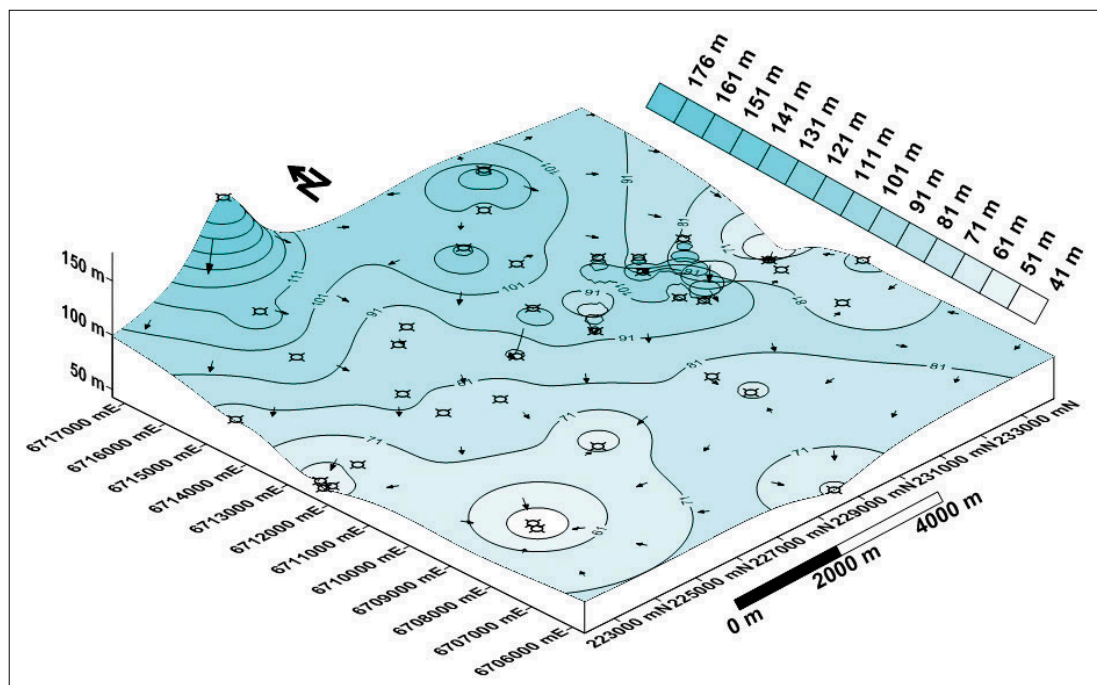


FIGURA 7. Cartograma da superfície potenciométrica em poços da cidade de Santa Maria.

seridos apresentaram alta vulnerabilidade estão em maior concentração na Formação Caturrita (CAT), e em menor proporção na Formação Santa Maria - Passo das Tropas (SMP). A Formação Caturrita apresenta-se como um aquífero com camadas semi-permeáveis e impermeáveis, e na Formação Santa Maria – Aquífero Passo das Tropas esse pode ser de condição livre e permeável, variando de acordo com o material encontrado no depósito sedimentar. Os poços localizados diretamente sobre a unidade Passo das Tropas apresentam lençol livre, e com uma ocorrência litológica que não protegem o aquífero, tendo uma vulnerabilidade elevada (poços 19 e 32).

Os poços enquadrados na classe de vulnerabilidade baixa foram encontrados em várias unidades hidroestratigráficas, dentre elas: Aquífero Caturrita, Santa Maria (Aquicludo Alemoa e Aquífero Passo das Tropas) e Aquitardo Sanga do Cabral. Esta classe de vulnerabilidade não apresenta muito risco por ser de baixa vulnerabilidade, mas deve ser monitorada.

Na área foram identificadas seis fontes potenciais pontuais de contaminação, classificadas em quatro categorias: fontes pontuais urbanas, áreas de disposição de resíduos, lagoas de tratamento de esgoto industrial e fontes lineares.

Na classe de fontes pontuais urbanas estão os postos de distribuição de combustíveis com moderado potencial de geração de carga contaminante e cemitérios com reduzido potencial de geração de carga contaminante. A maioria dos postos de combustíveis estão localizados na área urbanizada, e analisando o cartograma do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos (Figura 6), nota-se que 7 postos de combustíveis situam-se na classe de vulnerabilidade insignificante, 19 postos na classe de vulnerabilidade baixa, 8 postos na classe de vulnerabilidade média, e 1 na classe de vulnerabilidade alta, próximo do poço 9 (Tabela 3). Este poço apresentou-se associado a um aquífero livre, portanto recebendo nota máxima no parâmetro G, logo com um risco muito maior de contaminação. Esta fonte é considerada de moderada geração de contaminantes, portanto, ela oferece perigo à contaminação do aquífero, o qual é maior nos locais de vulnerabilidade média a alta e menor em vulnerabilidade baixa e insignificante. Todos os cemitérios estão situados em áreas de vulnerabilidade insignificante e baixa, e apesar desta fonte apresentar uma reduzida capacidade de geração de carga contaminante, deve-se ter cuidado principalmente devido as cargas patogênicas (vírus e bactérias) associadas a esta fonte de contaminação no Aquicludo Alemoa

que pode formar fluxos ascendentes e brotações de água.

Os aterros de resíduos (sólidos domiciliares, industriais e agro-industrial) são considerados fontes com moderado potencial de geração de carga contaminante. O antigo lixão da Caturrita e o atual aterro sanitário do Município de Santa Maria situam-se em uma área classificada como de média a alta vulnerabilidade situada no limite oeste da carta (acima do poço 19). O perigo à contaminação é elevado e a área é identificada como uma região de recarga dos aquíferos da região (Aquífero Passo das Tropas). Neste local o aquífero já se encontra contaminado, bem como em toda área urbana da cidade que se situa sobre o Aquífero Caturrita. Os aterros de resíduos industriais e agro-industrial (frigorífico) situam-se no limite sul da carta de unidades geotécnicas, com substrato arenito Passo das Tropas o qual é considerado o melhor aquífero da região (CPRM, 1994). O Aquífero Passo das Tropas apresenta um fluxo para o norte, em direção à área urbana, onde deixa de ser livre e apresenta-se em condição semi-confinado. Na área urbana este aquífero é isolado do Aquífero Caturrita pelas camadas de baixa permeabilidade do Aquicludo Alemoa. Na área do poço 32 (ao sul da carta de unidades geotécnicas) apresenta-se como aquífero livre e aflorante, portanto apresentando uma vulnerabilidade elevada e um alto risco à contaminação.

As atividades industriais desenvolvidas no município estão relacionadas à produção de bebidas, alimentos, móveis, metal-mecânica e fabricação e reciclagem de baterias na área do distrito industrial da cidade. As lagoas de tratamento de esgoto industrial situadas neste local (no limite leste da carta geotécnica – poços 33, 34 e 35) onde se notou na Figura 7, a existência de um baixo potenciométrico, apresentam pequena capacidade de geração de contaminante (área <1ha). Elas estão situadas em área de insignificante à baixa vulnerabilidade à contaminação do aquífero, porém existe alteração da qualidade das águas superficiais, que uma vez contaminadas podem afetar os aquíferos, tanto em uma escala local, quanto regional.

Robaina *et al.* (2002) salientam que principal fonte linear de contaminação é o Arroio Cadena (direção aproximada N-S) e Vacacaí-Mirim (direção aproximada E-W), com elevado nível de contaminação por esgoto doméstico, portanto classificada como elevada capacidade de geração de contaminantes, principalmente, quando atravessa grandes áreas sem saneamento básico (Depósitos fluviais de várzea indicados na Figura 3). Porém seu substrato

rochoso é composto pelas camadas silto-argilas vermelhas do Aquicludo Alemoa conferindo um menor risco de contaminação fecal. Os arroios Arenal e Passo Ferreira apresentam uma marcada atividade de mineração que envolve a extração de areias e argilas destinadas à construção civil. A principal fonte dispersa de poluição na área urbana refere-se ao saneamento básico sem rede coletora de esgoto, principalmente nos bairros e vilas que situam na periferia da cidade. No município em torno de 48% dos esgotos estão ligados à rede coletora e são tratados, tendo o restante um destino incerto, normalmente através de fossas sépticas. Para se definir o perigo que esta fonte de contaminação representa ao aquífero é necessário um estudo sobre em que períodos do ano ele se comporta como uma drenagem efluente ou influente. O clima da região, de acordo com a CPRM (1994), é do tipo Cfa pela classificação de Köppen, que se caracteriza por ser subtropical úmido, com chuvas durante todos os meses. Sendo sua precipitação pluviométrica anual de 1.769 mm, com maior pluviosidade nos meses de maio, junho, e setembro. Enquanto que nos meses de novembro e dezembro é onde ocorre o período de maior seca. A alimentação dos aquíferos ocorre no período de abril a setembro, e a depleção ocorre de outubro a março, por um longo período, portanto, é aí que os aquíferos abastecem os rios.

CONCLUSÕES

O conhecimento das características geotécnicas e hidrogeológicas de uma determinada região são de fundamental importância para a execução de diagnósticos do meio físico, principalmente em áreas urbanas, onde se situam as principais fontes potenciais de poluição degradadoras dos recursos naturais, devido a diversidade de atividades antrópicas implantadas.

Através do uso de mapas temáticos, de ferramentas de geoprocessamento, em SIGs tornaram-se uma ferramenta básica de planejamento, facilitando a análise espacial de dados e auxiliando na tomada de decisões.

No diagnóstico urbano ambiental do município de Santa Maria os SIGs apresentaram-se como subsídios para a espacialização dos temas estudados e das fontes de poluição urbana, podendo ser utilizados em pesquisas futuras na região.

O método GOD aplicado na avaliação do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos foi bastante eficiente, possibilitando a verificação da vulnera-

bilidade em toda a área da Folha de Santa Maria variando na faixa de insignificante a alta. Observou-se que vulnerabilidade média a alta compreende a área da Formação Santa Maria ao sul (Aquífero Passo das Tropas), o qual é caracterizado como poroso e permeável e não confinado; e Formação Caturrita ao norte em região de recarga. Estas áreas compreendem aproximadamente 28% da área avaliada.

Grande parte da área de estudo apresentou classe de vulnerabilidade baixa a insignificante (72%). O conhecimento da vulnerabilidade é importante para indicar os locais mais adequados para instalação de futuros empreendimentos, potencialmente poluidores do meio ambiente. É uma ferramenta que deve ser utilizada no desenvolvimento de projetos e políticas urbanas para o uso e ocupação do solo e proteção dos recursos naturais, e consequentemente manter a qualidade de vida nos centros urbanos.

A superfície o potenciométrica indicou a existência de vários altos e baixos potenciométricos, sendo que os fluxos subterrâneos tem direção preferencial de norte para sul, noroeste para sudoeste. Os altos potenciométricos associaram-se ao Aquífero Caturrita, poroso intergranular.

As fontes potenciais de contaminação urbanas foram: 35 postos de combustíveis, 6 cemitérios, 3 áreas de disposição de resíduos e distrito industrial observando-se que: 25% postos de combustíveis inserem-se na classe de vulnerabilidade média a alta. A maioria dos postos de combustíveis localizam-se no Aquicludo Alemoa e Aquífero Caturrita, as quais apresentam camadas semipermeáveis e impermeáveis.

Com relação aos cemitérios, 4 estão no Aquicludo Alemoa, portanto, quase impermeável, porém pode haver fluxo ascendente. Inserem-se nas classes de vulnerabilidade insignificante e baixa, mas em função da carga contaminante imposta, podem representar risco de degradação do meio ambiente. A grande fonte de contaminação difusa são os cursos de água que recebem uma grande carga orgânica pelo despejo de esgoto e lixo.

A pesquisa traz dados técnicos executados com rigor metodológico e método científico, disponibilizando informações as quais servirão de subsídios aos órgãos gestores ambientais, comitê de bacias hidrográficas e sociedade civil. Utilizaram-se diferentes ferramentas de avaliação de campo, no laboratório as geotecnologias, integrando homem e seu meio físico.

Referências

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETRY, R.J.; HACKET, G. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater using hydrological settings. US EP, Report 600/2-85/018, USA, 1987. Disponível em: <<http://info.ngwa.org/gwol/pdf/860138698.PDF>>. Acesso 12 dezembro 2014.
- BORTOLUZZI, C. A. Contribuição à geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974, 100 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Águas Subterrâneas, um recurso a ser conhecido e protegido. Brasília, 2007, 38 p. Disp. em: <<http://www.agrolink.com.br/downloads/%C3%81GUAS%20SUBTERR%20NEAS.pdf>>. Acesso em 10 de dezembro 2014.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=431690>>. Acesso em 17 de novembro de 2015.
- CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria. Escala 1:100.000, 1994. Impresso.
- CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. Convênio SOPS-SEMA-DRH/RS-CPRM. Machado, J.L.F. e Freitas, M.A. Mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000, Dezembro 2005. Relatório Final, p.65p. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em 10 de dezembro 2014.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH Nº 15, de 11 de janeiro de 2001. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 Jan. 2001. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br>>. Acesso em 10 de agosto de 2015.
- CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E.G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Geociências*, UNESP, São Paulo. v.39, p. 401-411, 2010a.
- CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E.G. Aplicação dos métodos Drastic e Posch para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n.2, p. 127-142, abr./jun.2010b.
- DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A. Solos do município de Santa Maria. *Ciência & Ambiente*, Universidade Federal de Santa Maria. UFSM, n. 38, p. 59-77, jan./jun. 2009.
- DREVER, J.I. *The geochemistry of Natural Waters: surface and groundwater environments*. Prentice Hall: Upper Saddle River, 1997. 436p.
- SEMA - ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, Secretaria de Meio Ambiente/SEMA. Disponível em: <<http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/Site/Document.aspx?inpKey=106552&inpCodDispositivo=&inpDsKeywords=10350>>. Visitada em 03/11/2015.
- FERON, G.L.; REGINATO, P.A.R. Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos localizados na região central de Canoas – RS. Águas Subterrâneas, v. 28, n.1, p. 1-13, 2014.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. *Contaminación de las aguas subterráneas*. Organización Mundial de La Salud. Organización Panamericana de La Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente. Lima, Peru, 1987.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1988.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. *A determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo: Instituto Geológico, 1993, 92 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Ground water quality protections: a guide for Waters service companies, municipal authorities and environment agencies. Word Bank, GWMAE. Washington, 2002, 101p. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/.../250710PU>>. Visitado em 10 dezembro 2014.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea. Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Servmar& Engenharia. Versão em Português, 2006. P. 106. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/336486-1175813625542/GroundwaterQualityProtectionGuide_Portuguese.pdf>. Visitado em 05 de março de 2014.
- FRANTZ, L.C.; CRUZ, J.C. O processo de outorga de direito de uso de recursos hídricos superficiais no Rio Grande do Sul: contribuições para o aprimoramento. *Revista de Gestão de Água da América Latina - REGA*, v.7, n.1, p. 5-16, 2010. Disp. em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/be503c282aeca8a9842562cb8b67331e_593bbe6976b25b17c3004212f49f0197.pdf>. Visitado em 10 de dezembro 2014.
- ENVIRONMENT AGENCY. *Policy and practice for the protection of groundwater*. London: The Stationary Office, ISBN 011.310.145-7. 1998.
- GOMES, S.A.; SABADIA, J.A.B.; DUARTE, C.R. Análise da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do complexo portuário e industrial do Mucuripe, Fortaleza - CE. *Geociências*, São Paulo, UNESP, v.28, n.3, p. 369-374, 2010.
- HEATH, R.C. *Basic Ground-water Hydrology*. United States Geological Survey, Water Supply Paper 2220, 1982, p.81.
- LANDIM, P.M.B.; MONTEIRO, R.C.; CORSI, A.C. Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER. UNESP/Campus de Rio Claro, Departamento de Geologia Aplicada – IGCE. Laboratório de Geomatemática – Texto didático 09, 2002. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/Surfer.pdf>>. Visitado em 10/11/2015.
- LÖBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; MARTELLI, G. V.; ERTLE, T. Pontos Potenciais de Contaminação e Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas do Município de Restinga Seca - RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.6, p.500-509, 2013.

- LOBLER, SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do Município de Nova Palma, RS, BR. *Revista Ambiente & Água*. v.10, p.141-152, 2014.
- MACIEL FILHO, C. L. *Carta de unidades geotécnicas de Santa Maria – RS*. Escala 1:25.000. Imprensa Universitária, FINEP/UFSM, Santa Maria: 1990. Relatório impresso, p.21 + mapas.
- MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. *Introdução à Geologia de Engenharia*. Editora UFSM. 5ª Ed. Revista e Ampliada. P.453.
- MEIRA, J.C.R.; CAMPOS, A.B.; PEREIRA, L.C. Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do aquífero Guarani. *Águas Subterrâneas*, v. 28,n.1, p. 31-46, 2014.
- MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Folha de Santa Maria. SH.22-V-C-IV/1-SE, MI-2965/1-SE. Escala 1:25.000, Diretoria do Serviço Geográfico – DSG, 1980.
- NASCIMENTO, M.D.; SOUZA, B.S.P. Fragilidade ambiental e expansão urbana da região administrativa nordeste da sede do município de Santa Maria, RS. *Ciência e Natura*, UFSM, Santa Maria, v. 32, n.2, p.163-181, 2010.
- NOBRE, R.C.M.; NOBRE, M.M.M; ROTUNNO FILHO, O.C.; MANSUR, W.J. Mapeamento do índice de perigo ao consumo de águas subterrâneas vulneráveis à contaminação. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n.2, p. 101-111, abr./jun 2008.
- OEА - Organização dos Estados Americanos; GEF - Global Environment Facility. PEA – Programa Estratégico de Ação. 2009. Projeto de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Programa Estratégico de Ação – PEA. [S.l.], 102 p.
- OLIVEIRA, E. L. A. Áreas de risco geomorfológico na bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS: Zoneamento e Hierarquização. 2004. 141f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C.; POELKING, E.L.; MIGUEL, P. Utilização do sistema de avaliação do potencial de uso urbano das terras no diagnóstico ambiental do município de Santa Maria - RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.2, p. 468-477, mar./abr. 2006.
- PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C. *Solos do perímetro urbano de Santa Maria: características, classificação e potencial de uso*. Santa Maria: Orium. 143p, 2008.
- PEREIRA, JUNIOR, L.C.; SOARES, H.L.T.; CASTRO, S.S. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Bauru no município de Rio Verde – GO. *Água Subterrânea*. v.29, n.2, p. 129-145, 2015
- PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D.; TAVARES, I. S.; RACHELLI, R. T.; LUZ, E. L. A importância da geologia nos problemas geotécnicos na região de Santa Maria. *In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 10, 2002, Ouro Preto, MG. *Anais...* São Paulo: ABGE, 2002. CD-ROM.
- PINHEIRO, R.J.B.; RAUBER, A.C.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L. Suscetibilidade à contaminação dos Aquíferos no Município de Santa Maria-RS. *In: GEORS- VII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul*. Santa Maria, 09 e 10 de maio de 2013. *Anais...* Santa Maria. Disponível em: <w3.ufsm.br/ppgec/Anais%208-216.pdf>. p.208-216.
- PINHEIRO, R.J.B.; NUMMER, A.V.; RAUBER, A.C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológica-geotécnicas de Santa Maria-RS. 2015 (inédito).
- PINHEIRO, R.J.B.; NUMMER, A.V.; RAUBER, A.C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Vulnerabilidade de Aquíferos Caturrita e Passo das Tropas no Município de Santa Maria-RS. *In: XVI Congresso de Mecânica de Solos e Engenharia Geológica- COBRAMSEG 2012*, 15-18 Outubro, Porto de Galinhas, PE. *Anais.....COBRAMSEG: Porto de Galinhas*, 2012.CD- ROM.
- PINTO, J. S. *Estudo da Condutividade Hidráulica de Solos para a Disposição de Resíduos Sólidos na Região de Santa Maria*. 2005. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA MARIA – RS. PMSM. Plano Municipal Ambiental.2002.
- RAUBER, A.C.C. *Diagnóstico ambiental urbano do meio físico de Santa Maria – RS*. 2008. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas* (2013) 27(2):32-46. Disponível em <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27060/17710>>. Visitado em 03/novembro de 2015.
- RIBEIRO, D.M.; ROCHA, W.F.; GARCIA, A.J. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da subbacia do rio siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011. Disponível em <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/19366>>. Visitado em 13/novembro de 2015.
- RIBEIRO, L. F. T. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos – formulações e aplicações. Actas do 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, ed. CDROM, APRH, Évora, Portugal. 2005, p.14.
- RIFFEL, E. S.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos no Município de Santa Rosa, RS. *Revista do Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo*. v.22, p.3 - 28, 2011.
- ROBAINA, L. E. S.; OLIVEIRA, E. L. A.; PIRES, C. A. F. Estudo para instalação de aterro sanitário no município de Santa Maria – RS. *In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 10º CGBE, Ouro Preto, MG. *Anais.....ABGE: São Paulo*, 2002.CD- ROM.
- SARTORI, P.L.P. Geologia e geomorfologia de Santa Maria. *Ciência & Ambiente*, Universidade Federal de Santa Maria. UFSM, n. 38, p. 19-42,jan./jun. 2009.

SIAGAS. Sistema de Informação de Águas Subterrâneas. Companhia de Pesquisas de Recursos Naturais/CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://www.siaogas.cprm.gov.br>>. Acesso em 10 outubro de 2012 e, em 03 novembro 2015.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; MENEGOTTO, E.; MEDEIROS, E. R. Avaliação preliminar dos argilominerais das Folhas de Santa Maria e Camobi, Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência e Natura*, v.12, p.127-132, 1990.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; *Estudo dos Processos de Silicificação e Calcificação em Rochas Sedimentares Mesozóicas do Estado do Rio Grande do Sul*. Curso de Pós-Graduação UFRGS, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 1997, 154f.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V. Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria-RS. *Revista Águas Subterrâneas*. v.24, p.1 - 17, 2010.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; PEDRON, F. A.; WERLANG, M. K.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; CABRAL, D. Características morfológicas do Membro Alemoa, Formação Santa Maria, Rio Grande do Sul. In: VIII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, 2010, Santa Maria. v.1. p.1-6..

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; LORENSI, R. P.; CRUZ, J. C.; ELTZ, F. L. Vulnerabilidade do Aquífero Serra Geral à Contaminação no Município de Erechim - Rio Grande do Sul - BRASIL. *Ciência e Natura*. v.35, p.10-23, 2013.

SURFER 8. *Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers*. User's Guide. Golden Software Inc. 2004. Version 8. Colorado - U.S.A. 640p. Licenciado para a UFSM.

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Hidrografia de Santa Maria. *Ciência & Ambiente*, Universidade Federal de Santa Maria. UFSM, n. 38, p. 79-92, jan./jun. 2009.

USEPA. State source water assessment and protection programs: final guidance. Office of Water 4606, Report EPA 816-R-97-009, August, 1997. Disp. em: <<http://water.epa.gov/infrastructure/drinkingwater/sourcewater/protection/upload/swpguidance.pdf>>. Acesso em 10 de dezembro 2014.

VILLAR, P. C. A gestão internacional dos recursos hídricos subterrâneos transfronteiriços e o Aquífero Guarani. *Revista de Gestão de Água da América Latina - REGA*, v.4, n.1, p. 63-74. 2007. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=2&ID=69&SUMARIO=845>>. Acesso em 10 de dezembro de 2014.

Rinaldo J. B. Pinheiro Centro de Tecnologia / Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: rinaldo@ufsm.br.

Ana Carla Carvalho Rauber Centro de Tecnologia / Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: acrauber@yahoo.com.br.

Andréa Valli Nummer Centro de Ciências Naturais e Exatas / Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: a.nummer@gmail.com.

José Luis Silvério da Silva Centro de Tecnologia / Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: silverioufsm@gmail.com.