
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

DANIEL OLIVEIRA DE BRITO

**AVALIAÇÃO DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA POR FONTES PONTUAIS NA MACROZONA
CIDADE RADIOCÊNTRICA DE PORTO ALEGRE, RIO GRANDE
DO SUL**

Porto Alegre

Dezembro 2013

DANIEL OLIVEIRA DE BRITO

**AVALIAÇÃO DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR
FONTES PONTUAIS NA MACROZONA CIDADE RADIOCÊNTRICA DE PORTO
ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato

Porto Alegre

Dezembro 2013

DANIEL OLIVEIRA DE BRITO

AVALIAÇÃO DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR
FONTES PONTUAIS NA MACROZONA CIDADE RADIOCÊNTRICA DE PORTO
ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **12/12/2013** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Antonio Pedro Viero – Departamento de Mineralogia/ Instituto de Geociências/
UFRGS

.....
Prof. Dr. Marcos Imério Leão – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia/ Instituto
de Pesquisas Hidráulicas/ UFRGS

.....
Prof. Dr. Roberto Eduardo Kirchheim – CPRM – Serviço Geológico Nacional/ Gerência
de Recursos Hídricos e Gestão Territorial

Conceito:.....

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Pedro Antonio Roehe Reginato, orientador desse trabalho, pelo constante incentivo, pela paciência e pela prontidão e pertinência das respostas aos meus questionamentos. Sem ele, esse trabalho jamais seria possível.

Agradeço a minha família, pelo incentivo e apoio aos meus estudos, fornecendo-me uma sólida base não apenas educacional, mas também ética.

Agradeço aos professores de excelência da UFRGS que me guiaram ao caminho do conhecimento, conduzindo-me a uma maior compreensão das complexas e diversas interações que ocorrem na área ambiental.

Agradeço a Prof. Dr. Tatiana Silva da Silva, Dr. Thomas M. Berger e Viviane Todeschini pelas pertinentes colocações e pela disponibilidade para conversar a respeito deste trabalho.

Agradeço aos meus chefes, Luciane Fontana Fernandes, Cássio Pinheiro e Mariana Voltolini pela compreensão e tempo cedido para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos, Nicolás, Luan, Gabriel e Vicente por participarem dessa jornada.

Agradeço a Claudia Junqueira Reichert, Renato Biondani Reichert, Raquel Reichert e Bernardo Spindler Guedes, que constituem praticamente minhas segundas famílias.

Agradeço a Camila, João, Pedro e Drusko, colegas com quem me identifiquei desde o início do curso, e hoje são grandes amigos.

Agradeço ao Guilherme Lahm Feron, Alice Palagi e Rodrigo Trindade Schollosser, colegas com os quais tive a oportunidade de estagiar que mostraram ser, além de excelentes profissionais, grandes amigos.

Agradeço aos colegas e amigos que fiz ao longo de toda a Engenharia Ambiental, que tornaram não apenas os momentos dentro de sala de aula mais prazerosos ao demonstrar o verdadeiro valor de coleguismo, mas também compartilhando tantas festas, viagens e momentos memoráveis.

RESUMO

DE BRITO, D. O. AVALIAÇÃO DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA POR FONTES PONTUAIS NA MACROZONA CIDADE RADIOCÊNTRICA DE PORTO ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL. 2013. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Recurso natural que sustenta o desenvolvimento de inúmeros setores, a água subterrânea está sob ameaça crescente devido à poluição oriunda das atividades humanas. Desse modo, a adoção de medidas preventivas para proteção e gestão desses recursos se mostra necessária. O trabalho pretende avaliar o risco de contaminação da água subterrânea na macrozona Cidade Radiocêntrica do Plano Diretor de Desenvolvimento urbano e Ambiental de Porto Alegre através da análise de três camadas de informação: vulnerabilidade dos aquíferos, perímetros de proteção de poços e potenciais fontes de contaminação. A sobreposição desses três *layers* utilizando ferramenta SIG resultou na indicação dos locais da região estudada com maior perigo de contaminação. A vulnerabilidade foi determinada pelo método GOD utilizando dados do SIAGAS. Para os perímetros de proteção, considerou-se a zona operacional do poço e a área de proteção microbiológica para um tempo de 50 dias utilizando a metodologia do Raio Fixo Calculado para poços que extraem água de aquíferos porosos e o raio estipulado pelo Decreto Estadual de São Paulo Nº 32.955/91 para aquíferos fraturados. As fontes potenciais de contaminação foram identificadas através de dados da SMIC e mapeando os cemitérios da região, sendo que, quando possível, algumas das fontes foram agrupadas em regiões denominadas Zonas de Concentração de Atividades Contaminantes – ZCAC. Foi utilizada a metodologia POSH para avaliação do potencial contaminante de cada atividade. Observou-se que a maior parte da ZCAC apresenta um risco elevado de contaminação à água subterrânea, especialmente no bairro Santana. Além disso, encontrou-se 4 zonas de proteção de poços com a presença de atividades potencialmente contaminantes. Esses parâmetros podem ser utilizados como ferramenta de fiscalização das atividades potencialmente poluidoras.

Palavras-chave: água subterrânea, vulnerabilidade, contaminação.

ABSTRACT

DE BRITO, D. O. ASSESSMENT OF GROUNDWATER POLLUTION HAZARD BY POINT SOURCES ON MACROZONE CIDADE RADIOCÊNTRICA OF PORTO ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL. 2013. 82 pages. Environmental Engineering Graduation Work – Hydraulics Research Institute. Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

Natural resource that supports the development of many areas, groundwater is under increasing threat due to pollution from human activities. Thus, the adoption of preventive measures for the protection and management of these resources is required. This paper aims to assess the risk of groundwater contamination in macrozone Cidade Radiocentrica of Porto Alegre's Urban And Environmental Development Master Plan through the analysis of three layers of information: vulnerability of aquifers, wellhead protection zones and potential sources of contamination. The overlap of these three layers using GIS tool resulted in the designation in risk of contamination. The vulnerability was determined by the GOD method using data from SIAGAS. For the wellhead protection zones, were considered the wellhead operation zone and the microbiological protection area for a time of 50 days, using the method of the Calculated Fixed Radius for wells that extract water from porous aquifers, and radius stipulated by São Paulo's State Decree No. 32.955/91 for fractured aquifers. Potential sources of contamination were identified through SMIC data and mapping cemeteries in the region; when possible, some of the sources were grouped into regions called Concentration of Contaminants Activities Zone - CCAZ. POSH methodology was used to evaluate the potential contaminant of each activity. It was observed that most of the CCAZ has a high groundwater pollution hazard, especially in the Santana neighborhood. Furthermore, 4 wellhead protection zones were found in the presence of potentially contaminating activities. These parameters can be used as a monitoring tool of potentially polluting activities.

Keywords: groundwater, vulnerability, contamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes de contaminação de água subterrânea	18
Figura 2 – Índice GOD	24
Figura 3 – Zonas de proteção de poços	26
Figura 4 – Cálculo pelo método de Wyssling	30
Figura 5 – Avaliação do perigo de contaminação	34
Figura 6 – Exemplo de um trecho da Ficha Técnica de Poço fornecida pelo SIAGAS	37
Figura 7 – Fluxograma do mapeamento das fontes potencialmente contaminantes consideradas pontuais	43
Figura 8 – Mapeamento dos cemitérios	43
Figura 9 – Alteração POSH	45
Figura 10 – Distribuição dos poços cadastrados no SIAGAS em Porto Alegre	47
Figura 11 – Poços na macrozona Cidade Radiocêntrica, área de estudo	48
Figura 12 – Distribuição da coleta de água dos poços	50
Figura 13 – Hidrogeologia da Cidade Radiocêntrica	51
Figura 14 – Poços utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade GOD	55
Figura 15 – Vulnerabilidade da Macrozona Cidade Radiocêntrica	60
Figura 16 – Histograma da vulnerabilidade	61
Figura 17 – Vulnerabilidade e poços com elevados índices GOD - <i>stretched</i>	62
Figura 18 – Perímetros de Proteção na Cidade Radiocêntrica	65
Figura 19 – Distribuição das cargas contaminantes	68
Figura 20 – Cargas contaminantes (ZCACs e pontuais) na Cidade Radiocêntrica	70
Figura 21 – Risco de contaminação da água subterrânea da macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre	73
Figura 22 – Histograma do risco de contaminação da ZCAC	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Índices de vulnerabilidade (AVI).....	21
Quadro 2 – Diferentes perímetros de proteção	28
Quadro 3 – Quadro comparativo para delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços.....	29
Quadro 4 – Classificação das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH	33
Quadro 5 – Continuação da classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH.....	33
Quadro 6 – Valores de porosidade	40
Quadro 7 – Determinação dos Perímetros de Proteção	41
Quadro 8 – Cálculo dos Perímetros Imediatos de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta (PA)	64
Quadro 9 – Poços da Cidade Radiocêntrica com maior perigo de contaminação	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre RISCO calculado e o Perigo de contaminação da água subterrânea....	45
Tabela 2 – Poços de captação de água subterrânea instalados na macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre	49
Tabela 3 – Sistema Hidrogeológico de inserção dos poços da Cidade Radiocêntrica de acordo com CPRM (2006)	53
Tabela 4 – Poços localizados na periferia da macrozona Cidade Radiocêntrica	54
Tabela 5 – Cálculo do Índice GOD	56
Tabela 6 – Profundidade de entrada d'água	58
Tabela 7 – Atividades potencialmente contaminantes na macrozona Cidade Radiocêntrica	66
Tabela 8 – Atividades industriais analisadas	67
Tabela 9 – Atividades consideradas pontuais	69
Tabela 10 – Risco de contaminação calculado para fontes pontuais	71

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional das Águas

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

CRH: Conselho de Recursos Hídricos

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgoto

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

DRH: Departamento de Recursos Hídricos

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Luis Roessler

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW: Inverse Distance Weighting

NRC: National Research Council

PA: Perímetro de Alerta

PIPS: Perímetro Imediato de Proteção Sanitária

POSH: Pollutant Origin, Surchage Hydraulically

RFC: Raio Fixo Calculado

SEMA: Secretaria do Meio Ambiente

SIAGAS: Sistema de Informações de Água Subterrânea

SMIC: Secretaria Municipal da Produção, Indústria e Comércio

ZCAC: Zona de Concentração de Atividades Contaminantes

LISTA DE SÍMBOLOS

b = espessura saturada

c = resistência hidráulica (dias)

d = espessura da camada sedimentar (m)

D = distância até o lençol freático ou teto do aquífero

G = grau de confinamento da água subterrânea

i = gradiente hidráulico

k = condutividade hidráulica dessa camada (m/d)

n_e = porosidade efetiva

O = ocorrência de estratos de cobertura

Q = vazão de exploração (m^3/dia)

r = raio do perímetro de proteção (m)

t = tempo de trânsito (dias)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2. JUSTIFICATIVA.....	13
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. Objetivo Geral	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. A ÁGUA SUBTERRÂNEA	15
2.2. CONTAMINAÇÃO	16
2.3. PROTEÇÃO	18
2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE.....	19
2.4.1. Métodos De Avaliação De Perímetros De Proteção	25
2.4.2. Cadastro De Carga Contaminante De Subsolo	32
2.4.3. Avaliação Do Perigo De Contaminação	33
3. METODOLOGIA	36
3.1. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE.....	36
3.1.2. Ocorrência De Estratos De Cobertura	38
3.1.3. Distância Até O Lençol Freático Ou Teto Do Aquífero Confinado	38
3.1.4. Cálculo Do Índice	38
3.2. AVALIAÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO	39
3.3. CADASTRO DAS CARGAS CONTAMINANTES.....	41
3.4. ANÁLISE DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	44
4. RESULTADOS	46
4.1. ÁREA DE ESTUDO	46
4.1.1. Caracterização Hidrogeológica Da Área	50

4.2. VULNERABILIDADE	53
4.3. CÁLCULO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO.....	62
4.4. CARGAS CONTAMINANTES NA ÁREA DE ESTUDO	66
4.5. RISCO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	71
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	77
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1. INTRODUÇÃO

1.1.DESCRICÃO DO PROBLEMA

A água é o elixir da vida, substância fundamental para a existência e um dos direitos fundamentais à vida. Além da importância para o homem, esse recurso também exerce função ecológica.

Da pequena fração de recursos hídricos disponíveis para o consumo humano, mais de 98% é encontrada em aquíferos, formações geológicas as quais permitem o armazenamento d'água (FETTER, 2001). No Brasil, 53% dos municípios tem seu suprimento de água através de recursos subterrâneos (IBGE, 2000).

A importância da água subterrânea se confronta com a sua contaminação promovida pelas mais variadas atividades humanas. A Agência Nacional das Águas (ANA) indicou em 2007 a necessidade da incorporação de estudos de vulnerabilidade e proteção de aquíferos para uma melhor gestão da água subterrânea.

As análises da composição geológica juntamente com informações sobre exploração da água subterrânea e localização de fontes potencialmente contaminantes constituem uma ferramenta para análise do perigo de contaminação da água subterrânea de determinada área.

1.2.JUSTIFICATIVA

O crescente potencial de contaminação das águas subterrâneas demanda a adoção de medidas de proteção desse bem através da avaliação do perigo de contaminação. Para a proteção dos aquíferos é necessário a restrição e controle do uso e das práticas desenvolvidas nos diferentes setores do cenário urbano.

Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, possui em sua área uma grande quantidade de atividades que oferecem risco de contaminação à água subterrânea, o que confere um potencial perigo cuja magnitude varia de acordo com a vulnerabilidade do aquífero sobre o qual está instalado cada estabelecimento.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos em zona de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem de:

- Determinar a vulnerabilidade dos aquíferos em zona de Porto Alegre;
- Determinar os perímetros de proteção dos poços em zona de Porto Alegre;
- Identificar as fontes potenciais de contaminação da água subterrânea no município;
- Avaliar o perigo de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos em zona de Porto Alegre.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.A ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea é um recurso natural que sustenta o desenvolvimento do meio rural, urbano e industrial (LIVINGSTONE et al, 1995). De acordo com Foster e Hirata (1988), os recursos hídricos subterrâneos estão sob crescente ameaça, tendo em vista o desenvolvimento urbano, industrial, agrícola e das empresas de mineração. O fluxo e transporte de contaminantes na água subterrânea é dificilmente observado e medido, tornando a degradação dos aquíferos numa das mais preocupantes questões da gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Para a resolução desse problema, a adoção de medidas preventivas mostra-se a melhor alternativa, visto que a remediação de águas subterrâneas é um processo que enfrenta dificuldades e limitações técnicas, além de ter um custo elevado (CUTRIM e CAMPOS, 2011).

No Brasil esse recurso natural é protegido pela Resolução CONAMA 396/2008, a qual dispõe sobre classificação e diretrizes para enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, como o estabelecimento de diretrizes ambientais para prevenção e controle da poluição desse recurso hídrico. O Artigo 20 da referida resolução estipula a promoção da implementação de Áreas de Proteção de Aquíferos e Perímetros de Proteção de Poços de Abastecimento por parte dos órgãos ambientais em conjunto com os órgãos gestores. Além disso, o Artigo 21 determina:

Os órgãos ambientais, em conjunto com os órgãos gestores dos recursos hídricos e da saúde, deverão promover implementação de Áreas de Restrição e Controle do Uso da Água Subterrânea, em caráter excepcional e temporário, quando, em função da condição da qualidade e quantidade da água subterrânea, houver a necessidade de restringir o uso ou a captação da água para proteção dos aquíferos, da saúde humana e dos ecossistemas. (CONAMA, 2008)

No Rio Grande do Sul, a Lei N° 10.350/94 institui o Conselho de Recursos Hídricos (CRH) como instância deliberativa do Sistema de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul. O CRH tem como competência a aprovação de critérios de outorga de uso da água, a qual será emitida pelo Departamento de Recursos Hídricos (DRH), órgão da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA) o qual realiza a integração do Sistema de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul nos casos em que os recursos hídricos não se enquadrarem no Código de Mineração Decreto-Lei N° 227/67, o qual define os recursos

hídricos de exploração para fins minerais ou termais. Para casos de exploração da água subterrânea enquanto bem mineral, a outorga é de responsabilidade do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM.

O Decreto Estadual N° 42.047/02 regulamenta as disposições da Lei N° 10.350/1994, dispondo sobre a conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul. O decreto determina a dispensa de outorga para as captações insignificantes, com vazão média mensal de até 2m³ por dia ou com a finalidade de uso de caráter individual para a satisfação das necessidades básicas da vida. O mesmo decreto determina que a Secretaria da Saúde deva fiscalizar a qualidade das águas subterrâneas utilizadas para consumo humano, e que a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Luis Roessler – FEPAM – deva normatizar procedimentos de prevenção, controle e fiscalização da qualidade das águas subterrâneas.

O Decreto Estadual N° 23.430/74 determina que, nas zonas abastecidas por rede de água potável, é permitida a instalação de poços somente para suprimentos industriais e uso em agricultura ou floricultura, devendo essas instalações serem fechadas com tampa a no mínimo 0,40m da superfície, além de serem dotadas de bomba.

Em Porto Alegre 99,5% da população possui seu suprimento de água através do abastecimento regular do Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE –, sendo que algumas áreas com problemas de regularização ou áreas de risco têm o abastecimento realizado por caminhão-pipa (DMAE, 2008). Desse modo, a água subterrânea da área de estudo que é regularmente utilizada possui aplicação no setor de floricultura, agricultura e indústria.

No SIAGAS (Sistema de Informações de Água Subterrânea – CPRM), estão cadastrados 143 poços em Porto Alegre. O Setor de Pesquisa da Divisão de Pesquisa do DMAE, em função do Art 2° da Lei Municipal N° 7.560, possui um cadastramento dos poços perfurados no município. Até junho de 1998, havia um total de 244 poços registrados (SCHWARZBACH, 1998).

2.2.CONTAMINAÇÃO

A degradação dos recursos hídricos subterrâneos pode acontecer direta ou indiretamente, tanto por causas naturais como antrópicas (BRASIL, 2007). Em relação à

contaminação provocada pelo homem, sabe-se que o desenvolvimento urbano, agrícola e industrial é responsável pela descarga de resíduos e efluentes de forma pontual e não pontual (LIVINGSTONE et al, 1995).

Uma grande variedade de contaminantes é encontrada na água subterrânea, como químicos orgânicos sintéticos, hidrocarbonetos, íons inorgânicos, patógenos e radionuclídeos. As fontes responsáveis pela liberação desses contaminantes podem ser incluídas em seis categorias, conforme exibido na Figura 1 (FETTER, 1999):

- I. Liberadas no local (fossas sépticas e poços de injeção);
- II. Armazenamento, tratamento e disposição (aterros sanitários, lixões, locais de disposição de resíduos, sistemas de tratamento de efluentes, resíduos da mineração, áreas de armazenamento de materiais, cemitérios, tanques de armazenamento superficiais e subterrâneos, containers, locais de incineração de resíduos, áreas de disposição de resíduos radioativos);
- III. Retidas no transporte (canalizações – esgoto, gás natural, petróleo, entre outros -, transporte de material em rodovias e ferrovias);
- IV. Conseqüentes de atividades planejadas (irrigação, aplicação de pesticidas e fertilizantes, criadouro de animais, escoamento superficial urbano, drenagem de minas);
- V. Fontes que conduzem os contaminantes aos aquíferos (poços e escavações);
- VI. Ocorrências naturais intensificadas pelo homem (interação entre água superficial e subterrânea, lixiviação e intrusão salina);

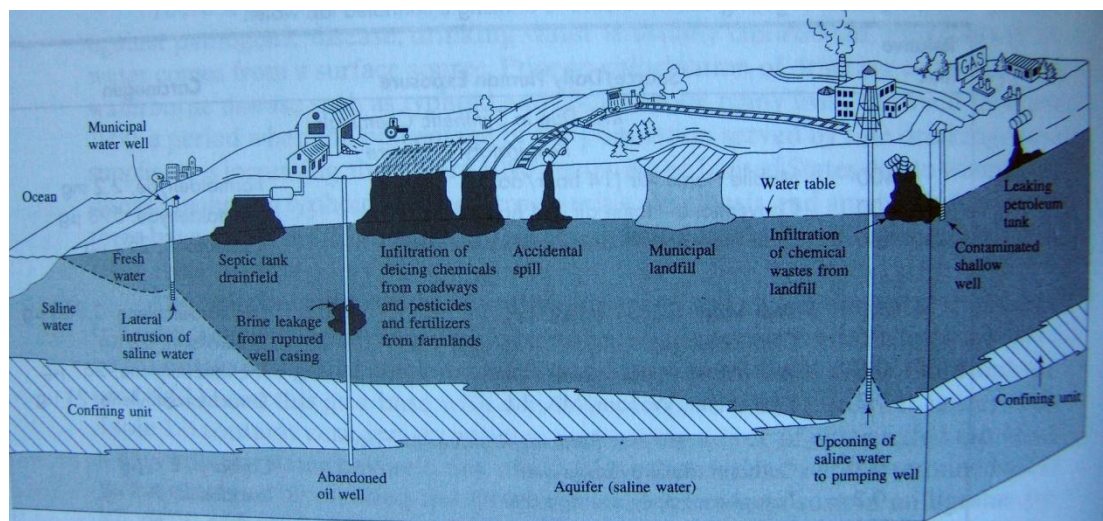


Figura 1 – Fontes de contaminação de água subterrânea

Fonte: FETTER (1999, p. 20)

Os contaminantes ao percolarem na zona não saturada podem ser atenuados através de processos de sorção na superfície dos minerais ou carbono orgânico presentes, precipitação, biodegradação e reações de oxi-redução. A sorção pode retardar os contaminantes, enquanto que os processos de biodegradação e precipitação irão diminuir suas concentrações (FETTER, 1999). A ocorrência desses mecanismos na zona vadosa do solo se revela de maior importância, sendo que essa atenuação e retardamento dependem das características hidrogeoquímicas do ambiente e das características do poluente (GOGU et al, 1998).

2.3. PROTEÇÃO

Para proteção dos aquíferos, é necessário que haja o manejo do uso do solo restringindo sua ocupação, emissão de efluentes e práticas de despejos de resíduos. Para um controle mais ponderado do uso do solo, deve-se utilizar a capacidade de atenuação natural como parâmetro de decisão. Para avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea, deve-se analisar a interação entre a vulnerabilidade do aquífero e a carga de contaminante, sobrepondo essas informações à zona de captura. Essa sobreposição de dados pode revelar que uma determinada área possui alta vulnerabilidade, mas nenhum perigo de poluição por causa da ausência de carga contaminante significativa, e vice-versa (FOSTER et al, 2006).

2.4.MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE

O conceito de vulnerabilidade em hidrogeologia começou a ser usado na década de 1970, sendo utilizado de maneira mais ampla na década de 1980 (FOSTER et al, 2006). De acordo com Aller et al (1987), muitas metodologias de avaliação do potencial de contaminação da água subterrânea surgiram em função da seleção de áreas para disposição de resíduos.

A um contaminante arbitrário introduzido sobre alguma superfície, o que tem como procedência as fontes citadas no item 2.2 e na Figura 1, é associada uma tendência de que essa substância venha atingir a água subterrânea. Essa propensão de alcance é definida como a vulnerabilidade desse recurso hídrico subterrâneo (NRC, 1993). Os diferentes métodos de avaliação da vulnerabilidade podem ser agrupados em diferentes classes (NRC, 1993):

- I. Modelos de transporte: modelagem da distribuição do contaminante no espaço e tempo, requerendo soluções numéricas.
- II. Métodos estatísticos: avalia a probabilidade de contaminação utilizando dados de distribuição de áreas já contaminadas, gerando a caracterização de potencial de contaminação. Não é estabelecida relação causal, apenas estatística.
- III. Sobreposição de índices combinando diferentes atributos físicos (geologia, tipo de solos, profundidade da água subterrânea, entre outros): muito utilizado por vários governos e órgãos de proteção ambiental. Deve-se analisar cuidadosamente a importância dos índices utilizados, a variação natural desses atributos e a resolução espacial dos dados. Valores de atributos como profundidade da água variam anualmente. Esse tipo de metodologia se caracteriza pela simplicidade e pela necessidade de poucos dados. Nessa classe se encontram os métodos GOD (FOSTER e HIRATA, 1988), AVI (STEMPVOORT et al, 1993), DRASTIC (ALLER et al, 1987), entre outros.

Nessa última classe (sobreposição de índices combinando diferentes atributos físicos), a vulnerabilidade pode ser descrita como a combinação entre dois fatores (FOSTER et al, 2006):

- Facilidade de acesso de penetração dos contaminantes à zona saturada do aquífero;
- Capacidade dos contaminantes serem atenuados pelos estratos da zona vadosa.

O transporte de contaminantes envolve uma complexa interação de uma série de fatores, incluindo as condições hidrogeológicas, as quais são demasiadamente variáveis para o mapeamento da vulnerabilidade, e a diferente dispersão de cada contaminante. Tendo em vista isso, um mapeamento da vulnerabilidade para cada grupo de contaminante ou atividades potencialmente contaminantes forneceria dados mais consistentes. Entretanto, tal avaliação demandaria um maior detalhamento de informações técnicas sobre a região analisada, além de gerar uma infinidade de produtos cartográficos para cada região, dificultando uma análise integrada, a gestão e elaboração de diretrizes de uso do solo e o controle de emissões de efluentes para a área estudada com base na vulnerabilidade (FOSTER et al, 2006). Geralmente o produto cartográfico gerado na análise de vulnerabilidade possui escalas que variam de 1:12.000 a 1:250.000 (NRC, 1993).

A National Research Council (NRC) estabeleceu em 1993 três leis da vulnerabilidade da água subterrânea, sendo elas:

- I. Toda a água subterrânea é vulnerável: vulnerabilidade é um indicador relativo e amorfo (já que indica uma tendência à contaminação) ao qual todo o recurso hídrico subterrâneo está submetido;
- II. A incerteza é inerente à avaliação da vulnerabilidade: isso se deve às limitações no conhecimento sobre o comportamento do contaminante e das informações espaciais disponíveis; desse modo, a vulnerabilidade deve ser expressa em termos probabilísticos;
- III. O óbvio corre o risco de ser obscurecido e o sutil de ser indistinguível.

A complexidade de um método é diretamente proporcional à quantidade de parâmetros requeridos por ele, desse modo, a disponibilidade de dados deve ser considerada no momento da sua seleção (TAVARES, 2009).

De acordo com Gogu et al (2000), os principais métodos de análise de vulnerabilidade com sobreposição de índices (classe III) são: GOD (FOSTER e HIRATA, 1988), DRASTIC (ALLER et al., 1987), SEEPAGE (NAVULUR e ENGEL, 1997), AVI (VAN STEMPVOORT et al, 1993), SINTACS (CIVITA, 1994), ISIS (CIVITA e DE REGIBUS, 1995) e EPIK (DOERFLIGER e ZWAHLEN, 1997).

O método AVI (STEMPVOORT et al, 1993) é baseado na espessura da unidade sedimentar acima da parte superior do aquífero e da condutividade hidráulica estimada

de cada uma dessas camadas, gerando a resistência hidráulica (c), fornecida pela Equação 1:

$$c = \sum_{i=1}^n d_i/k_i \quad (1)$$

Onde:

c = resistência hidráulica (dias)

d = espessura da camada sedimentar (m)

k = condutividade hidráulica dessa camada (m/d)

n = número de camadas

Desse modo são geradas regiões de isovulnerabilidade determinadas pelo resultado do logaritmo da resistência hidráulica ($\log(c)$), conforme exibido no quadro abaixo.

Quadro 1 – Índices de vulnerabilidade (AVI)

log (c)	Vulnerabilidade (AVI)
<1	extremamente alta
1 a 2	alta
2 a 3	moderada
3 a 4	baixa
>4	extremamente baixa

Fonte: Stempvoort et al (1993, p. 31)

Como limitações do método AVI, deve-se citar (STEMPVOORT et al, 1993):

- A não inclusão de parâmetros como o clima, gradiente hidráulico, porosidade e quantidade de água no solo, propriedade de sorção e reação das camadas;
- A base de dados é oriunda principalmente de dados de perfuração de poços;
- O método considera apenas aquíferos superficiais, além de não considerar a qualidade desses;
- Os valores de condutividade hidráulica são aproximações;
- A continuidade ou descontinuidade lateral do aquífero não é considerada;
- Os valores qualitativos obtidos por $\log(c)$ (**Quadro 1**) são arbitrários.

O método SEEPAGE (NAVULUR e ENGEL, 1997) foi desenvolvido para avaliação do potencial de contaminação na água subterrânea em áreas de agricultura, considerando características hidrogeológicas e propriedades do solo. O método EPIK (DOERFLIGER e ZWAHLEN, 1997) foi criado especificamente para a avaliação da vulnerabilidade em aquíferos cársticos (GOGU et al, 2000).

O método DRASTIC (ALLER et al., 1987) para determinar a vulnerabilidade do aquífero considera os seguintes fatores: profundidade da água, recarga, litologia, tipo de solo, topografia, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero. Cada um desses parâmetros possui um peso W que varia de 1 (fator menos significativo) a 5 (fator mais significativo), além de possuir um valor R que varia de 1 a 10, o qual é atribuído de acordo com faixas de valores característicos de cada parâmetro.

Quanto maior é o valor calculado pelo método, mais vulnerável é a área analisada. A Equação 2 determina o índice DRASTIC.

$$DRDW + RRRW + ARAW + SRSW + TRTW + IRIW + CRCW = \text{Vulnerabilidade} \quad (2)$$

Onde:

D = profundidade da água do Aquífero

R = recarga do aquífero

A = litologia do aquífero

S = tipo de Solo

T = topografia local (inclinação em %)

I = impacto da zona vadosa

C = condutividade hidráulica do aquífero

índice W = peso

índice R = atribuição de cada parâmetro

Um segundo fator foi criado para a avaliação de zonas agrícolas com uso de pesticida, resultando em um segundo sistema, o *Pesticide DRASTIC*, o qual difere nos valores dos pesos W do método original.

Ambos os métodos assumem que o contaminante é introduzido no solo a partir da superfície, que ele atinge a água subterrânea através da precipitação e que possui a mesma mobilidade da água. Além disso, a área avaliada deve ter no mínimo 0,41km² (ALLER et al, 1987).

O método DRASTIC possui parâmetros que estão correlacionados e sobrepostos (por exemplo, o tipo de solo e o impacto da zona vadosa), alguns de difícil determinação (recarga do aquífero), alguns de efeitos discutíveis (uma topografia suave pode influenciar positivamente – diminui o escoamento superficial – e negativamente – aumenta a recarga em depressões –), além de possuir um arbitrário esquema de pesos (o mesmo peso é dado à profundidade da zona não saturada para um aquífero superficial como para um aquífero confinado) tornando a aplicação do método discutível (STEMPVOORT et al, 1993).

O método GOD (FOSTER e HIRATA, 1988), distinto por sua simplicidade conceitual e prática, avalia a vulnerabilidade analisando o confinamento hidráulico da água subterrânea, os estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante, os quais determinam através das características hidrogeológicas e grau de consolidação a capacidade de atenuação do contaminante) e a profundidade até o lençol freático ou aquífero confinado. A vulnerabilidade analisada pelo método GOD é um valor que varia de 0 a 1 (correspondendo, respectivamente, a uma vulnerabilidade insignificante a extrema) calculado pelo produto desses três parâmetros, cujos valores são atribuídos de acordo com os índices estabelecidos na Figura 2.

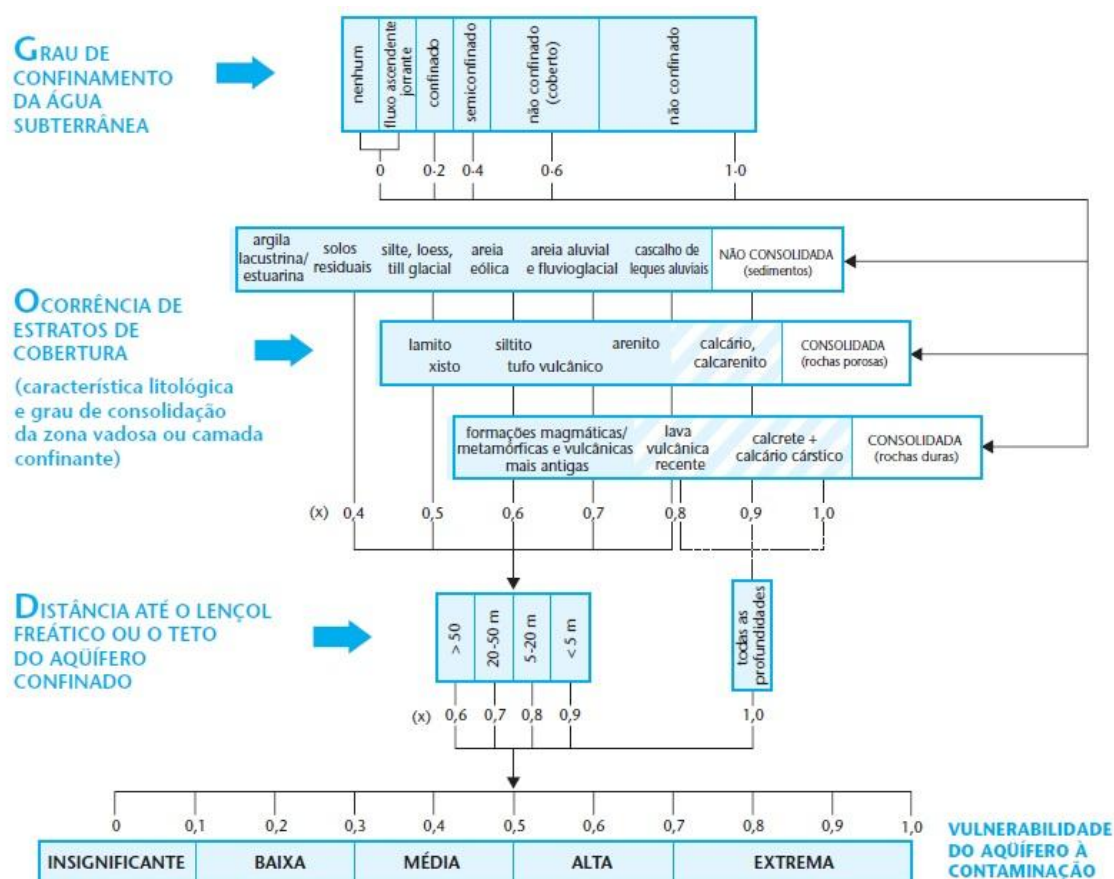


Figura 2 – Índice GOD

Fonte: FOSTER et al (2006, p. 23)

Observa-se que ao potencial de existência de fraturas bem desenvolvidas é atribuído um índice mais elevado (mesmo em rochas porosas), sendo esse considerado o fator mais determinante no aumento da vulnerabilidade e na diminuição da atenuação dos contaminantes quando comparado à porosidade efetiva e condutividade hidráulica (FOSTER et al, 2006).

Em ambientes rurais há uma alteração da metodologia, sendo acrescentado a ela o parâmetro cobertura do solo, o qual influencia na atenuação/eliminação dos contaminantes. Essa modificação do método (variação denominada GODS) não é aplicável em zonas urbanas, já que são áreas em que a cobertura do solo é majoritariamente alterada (FOSTER et al, 2006).

O mapeamento da vulnerabilidade possui uma série de limitações associadas à presença de corpos hídricos superficiais, já que esses podem alterar as condições hidrogeológicas da região, podem constituir uma fonte de contaminação quando

deteriorados, além da capacidade de atenuação do sedimento de fundo. Desse modo, é necessário indicar os corpos d'água potencialmente influentes que atravessam aquíferos não confinados. Constituem outras limitações a exploração excessiva do aquífero, que pode variar a profundidade do lençol freático, e argilas excessivamente consolidadas, que podem estar fraturadas, o que representaria uma imprecisão na atribuição do seu índice (FOSTER et al, 2006).

Devido a sua simplicidade, o método GOD é extensamente utilizado no Brasil. Podem-se citar trabalhos desenvolvidos nos municípios de Santa Maria/RS (PINHEIRO et al, 2013) e Cacequi/RS (MARTELLI, 2011), além de trabalhos voltados ao mapeamento da vulnerabilidade para determinados aquíferos, como o do Aquífero Guarani em São Paulo (ALBUQUERQUE FILHO et al, 2010) e da Bacia Sedimentar do Araripe/CE (TAVARES et al, 2009).

2.4.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO

Perímetros de proteção constituem áreas ao redor de um poço nas quais possíveis contaminantes podem migrar e atingir a água captada (BRADBURY, 1991). Com o objetivo de eliminar o risco de contaminação de mananciais de água potável, as fontes potencialmente contaminantes devem ter suas instalações impedidas dentro da área de captação de recarga de modo a constituir perímetros de proteção que, em função de pressões socioeconômicas, possuem subdivisões com diferentes restrições de uso do solo (WAHNFRIED e HIRATA, 2005).

A adoção de perímetros de proteção de captação de abastecimento urbano em países como Alemanha, França, Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos e Austrália indica a eficiência da coexistência da adequada proteção dos recursos hídricos subterrâneos e da atividade socioeconômica da região (NAVARRETE, 2003).

Os métodos de estimação de perímetros de proteção são diversos e, normalmente, a subdivisão é baseada em critérios de distância ou tempo de fluxo até o manancial, porcentagem de área de recarga, capacidade de diluição ou atenuação da zona saturada. De acordo com Wahnfried e Hirata (2005), geralmente é utilizado uma combinação do tempo de fluxo horizontal e distância à fonte. As três zonas mais importantes a serem definidas, representadas na Figura 3, são (WAHNFRIED e HIRATA 2005 apud ADAMS e FOSTER 1992 e FOSTER e SKINER 1995):

- Área de captura total: zona mais externa definida pela contribuição da área de recarga.
- Área de proteção microbiológica: proteção de potenciais fontes de parasitas, bactérias e vírus patógenos, a área é determinada através de um tempo (valor adotado que varia de 10 a 100 dias, dependendo da legislação) de trânsito horizontal da água na zona saturada do aquífero.
- Zona operacional do poço: área ao redor da captação com presença de cerca. A literatura recomenda um raio de no mínimo 20m, e a inspeção detalhada das condições sanitárias em um raio de 200m. A área mais próxima deve ser coberta por laje de cimento.

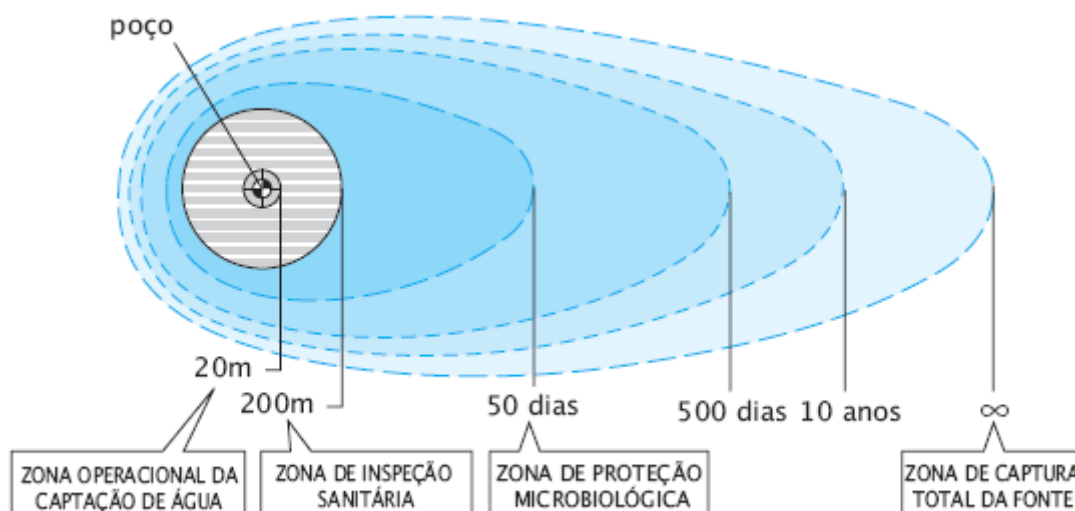


Figura 3 – Zonas de proteção de poços

Fonte: FOSTER et al (2006, p.35)

Existem outras subdivisões, como a isócrina de 500 dias de tempo de fluxo. O emprego dessa subdivisão visa evitar contaminantes mais persistentes.

Devem-se levar em conta algumas das limitações indicadas pela literatura sobre o perímetro de proteção, como:

- A presença de fraturas em aquíferos, que torna na prática o retardo dos contaminantes na zona não-saturada menor do que o considerado pelo método;

- A intensa e intermitente exploração, que leva à interferência de áreas de poços de bombeamento resultando em complexas zonas de proteção;
- A presença de aquíferos com múltiplas camadas, onde pode haver a drenagem vertical d'água entre unidades do aquífero;
- A sobrevivência de alguns patógenos por mais do que 50 dias na superfície.

Aquíferos cársticos, devido aos padrões de fluxo irregulares oriundos dos canais preferenciais originados da dissolução, necessitam de uma abordagem diferenciada, necessitando uma delimitação de áreas de proteção a partir de um estudo mais detalhado sobre a área.

Em áreas urbanas, nas quais provavelmente as áreas de proteção já estarão ocupadas, essas zonas se tornam uma importante ferramenta para maior controle de qualidade d'água e inspeção de instalações industriais.

No Estado de São Paulo, o Decreto Estadual N° 32.955 de 07/02/1991 estabelece área de Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (com raio de 10 metros a partir do ponto de captação, devendo ser cercado e protegido com telas e interior resguardado da entrada ou penetração de poluentes) e o Perímetro de Alerta (área de proteção com tempo de transição de 50 dias destinada a controle máximo das fontes poluidoras; para poços localizados na unidade hidrogeológica Sistema Aquífero Cristalino, a distância radial proposta é de 30m para vazões até 15m³/h e 50m para vazões superiores).

No Estado do Rio Grande do Sul, o Decreto Estadual N° 42.047 de 26/12/2002 determina um Perímetro Imediato de Proteção Sanitária de 10m a partir do ponto de captação, o qual deverá ser protegido e cercado.

O Quadro 2 exhibe diferentes perímetros de proteção adotados por alguns países.

Quadro 2 – Diferentes perímetros de proteção

País	Perímetros de Proteção			
Alemanha	Zona I Raio de 20 m	Zona II Tempo de trânsito de 50 dias	Zona III A Distância de 2 km	Zona III B Zona de Captura
França	Perímetro Imediato 10 a 20 m	Perímetro Próximo 1 a 10 hectares ou 50 dias de tempo de trânsito	Perímetro Afastado 0,2 a 15 km ou critério técnico	
Reino Unido	Zona I – Proteção interior 50 m ou 50 dias de tempo de trânsito	Zona II – Proteção exterior 25% da ZC ou 400 dias de tempo de trânsito	Zona III – Captação Total Zona de Captura	Zona Z de Proteção Especial Área fora da ZC, mas que pode transmitir contaminação ao poço
Holanda	Área de Captação 50 ou 60 dias de tempo de trânsito	Área de Proteção I 10 anos de tempo de trânsito	Área de Proteção II 25 anos de tempo de trânsito	Área de Recarga 50 a 100 anos de tempo de trânsito
Itália	Zona de Proteção Absoluta Mínimo de 10 m	Zona de Respeito Mínimo de 200 metros	Zona de Proteção Zona de Captura e da Bacia	
Estado de São Paulo – Decreto nº 32.955/91	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) Raio de 10 m	Perímetro de Alerta (PA) 50 dias de tempo de trânsito		

Fonte: IRITANI & EZAKI (2010, p. 6)

Iritani e Ezaki (2010) baseados em Navarrete e García (2003) apresentam os principais métodos de delimitação de perímetros de proteção apresentados no Quadro 3. Pode-se perceber que a maior parte dos métodos existentes é indicada para a determinação do perímetro de proteção em aquíferos porosos. Para aquíferos cársticos e fissurais, existe o método do Mapa Hidrogeológico, o qual necessita de dados sobre a direção do fluxo d'água subterrânea, dados geológicos e estruturais (IRITANI & EZAKI, 2010).

Quadro 3 – Quadro comparativo para delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços

Método	Tipo de Aquífero	Limitações	Dados Necessários								Outros dados			
			Q	i	K	b	n_e	S	N	T		V_e		
Raio Fixo Calculado. Equação Volumétrica	P	Fluxo bidimensional. Fluxo ambiental desprezível. Poço com alta capacidade de bombeamento	X			X	X							
Método de Wyssling	P	Aquífero homogêneo nas proximidades da captação. Gradiente regional uniforme	X	X	X	X	X					X	Direção de fluxo e linhas potenciométricas	
Solução Analítica Simples	P	Aquífero homogêneo nas proximidades da captação	X	X	X	X	X						Direção de fluxo e linhas potenciométricas	
Mapa Hidrogeológico	P, C, F	Proporciona área única para o perímetro de proteção. Esta não depende do tempo de trânsito											Limites do aquífero captado. Cartografia hidrogeológica. Direção de fluxo e linhas potenciométricas. Relação Rio-Aquífero	
Modelo Matemático, ex: Visual MODFLOW Visual MODPATH	P	Considera a componente de advecção de transporte de solutos, mas não considera a difusão e dispersão	Limites hidrogeológicos da área a modelar. Condições de contorno (recarga, características dos rios e drenagens). Geometria e tipo de aquífero. Potenciometria. Valores dos parâmetros hidráulicos em cada célula (K_x , K_y , K_z , S, n_e), Q e regime de bombeamento em cada captação											
LEGENDA:		Dados Necessários:												
Tipo de aquífero: P: Porosidade intergranular ou similar C: Cárstico F: Fissural		Q: Vazão bombeada N: Recarga b: Espessura saturada			S: Coeficiente de Armazenamento K: Condutividade hidráulica V_e: Velocidade efetiva			i: Gradiente hidráulico T: Transmissividade n_e: Porosidade efetiva						

Fonte: NAVARRETE & GARCÍA (2003) apud IRITANI & EZAKI (2010, p. 14)

Dentre os métodos apresentados, o RFC e o Método de Wyssling serão abordados com maior detalhe, conforme será visto a seguir.

O método de raio fixo calculado (RFC) é aplicado utilizando a Equação 3.

$$r = \sqrt{\frac{Qt}{n_e b \pi}} \quad (3)$$

Onde:

r = raio do perímetro de proteção

Q = vazão de exploração (m³/dia)

t = tempo de trânsito (dias)

n_e = porosidade efetiva

b = espessura saturada

O método de Wyssling é mostrado na Figura 4 e calculado pelas equações de 4 a 10 apresentadas abaixo.

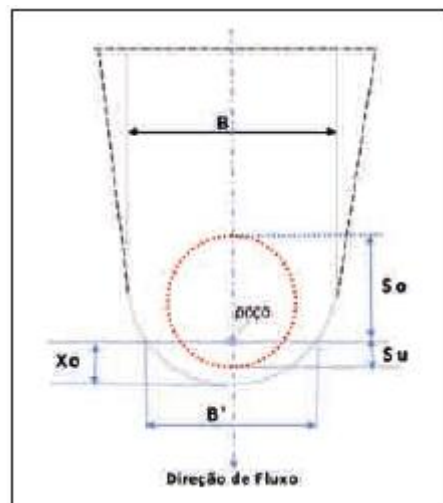


Figura 4 – Cálculo pelo método de Wyssling
Fonte: IRITANI & EZAKI (2010, p. 46)

$$B = \frac{Q}{Kbi} \quad (4)$$

$$X_o = \frac{Q}{2\pi kbi} \quad (5)$$

Onde:

B = largura da zona de captura

Q = vazão de exploração

K = condutividade hidráulica

b = espessura saturada

i = gradiente hidráulico

X_o = raio de chamada (distância da captação ao ponto neutro a justante)

$$B' = B/2 \quad (6)$$

$$V_e = \frac{K \cdot i}{n_e} \quad (7)$$

$$l = V_e \cdot t \quad (8)$$

Onde:

B' = largura da zona de captura na altura do poço

V_e = velocidade real

l = distância linear

$$S_o = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2} \quad (9)$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8X_o)}}{2} \quad (10)$$

Onde:

S_o = distância correspondente ao tempo (t) no sentido do fluxo (a montante da captação)

S_u = distância correspondente ao tempo (t) no sentido do fluxo (a jusante da captação)

2.4.2. CADASTRO DE CARGA CONTAMINANTE DE SUBSOLO

Deve-se considerar que os recursos hídricos subterrâneos são contaminados tanto pelas empresas de grande como pelas de pequeno porte, sendo que essas, devido às instabilidades econômicas, comumente têm suas atividades encerradas em um curto período de tempo, fato que dificulta o cadastro das cargas poluidoras (FOSTER et al, 2006).

A contaminação da água subterrânea está ligada principalmente à mobilidade e persistência do contaminante no subsolo, sendo que as atividades associadas a tipos específicos de contaminantes representam maior ameaça aos aquíferos (FOSTER et al, 2006).

O cadastro pode variar desde uma avaliação analítica de fontes secundárias de dados, até um reconhecimento de campo envolvendo múltiplas equipes. Para uma avaliação mais simplificada, é possível classificar as fontes potenciais de carga contaminante de subsolo com base na probabilidade da presença do contaminante e na existência de uma carga hidráulica que gera o transporte advectivo dos contaminantes. Como essas informações não estão sempre à disposição, é frequente estabelecer as simplificadoras suposições de que a probabilidade da presença de poluente está associada com a atividade, assim como a provável sobrecarga (FOSTER et al, 2006).

Para isso, utiliza-se o sistema *POSH* (acrônimo em inglês de *pollutant origin, surcharge hydraulically*), o qual se baseia na origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica, gerando três níveis qualitativos de potencial contaminante: reduzido, moderado e elevado, conforme exibido no Quadro 4 e no Quadro 5.

Quadro 4 – Classificação das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH

Tabela 3.3 Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH		
POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE DE SUBSOLO	FONTE DE CONTAMINAÇÃO	
	saneamento <i>In situ</i>	práticas agrícolas
Elevado	cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha	culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados
Moderado	intermediário entre elevado e reduzido	
Reduzido	cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha	rotação das culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semi-áridas

Fonte: FOSTER et al (2006, p. 63)

Quadro 5 – Continuação da classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH

Table 3.4 Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH					
POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	deposição de resíduos sólidos	áreas Industriais*	lagoas de águas residuais	outras (urbanas)	mineração e exploração de petróleo
Elevado	resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos	todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial) se a área >5 ha		operações em campos de petróleo, mineração de metais
Moderado	chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	indústria tipo 2	esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo	postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1	indústria tipo 1	águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	cemitérios	
<p>* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria</p> <p>Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos</p> <p>Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão</p> <p>Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal</p>					

Fonte: FOSTER et al (2006, p. 69)

2.4.3. AVALIAÇÃO DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO

Define-se perigo de contaminação como a probabilidade de um aquífero ser contaminado em função de alguma atividade antrópica (FOSTER et al, 2006). Com os

três layers de informações adquiridas (vulnerabilidade, perímetro de proteção e cargas contaminantes), sobrepõem-se os dados de vulnerabilidade e carga contaminante, assim como mostrado na Figura 5 e Figura 6. A sobreposição pode resultar em cinco índices de perigo (ou risco) de contaminação: muito baixo, baixo, moderado, alto e extremo. Feito isso, sobrepõem-se a esse mapa com índices as informações de zonas de proteção; se, por exemplo, uma zona de captura estiver em uma área de alto risco de contaminação, haverá um elevado perigo de contaminar aquela fonte (FOSTER et al, 2006).

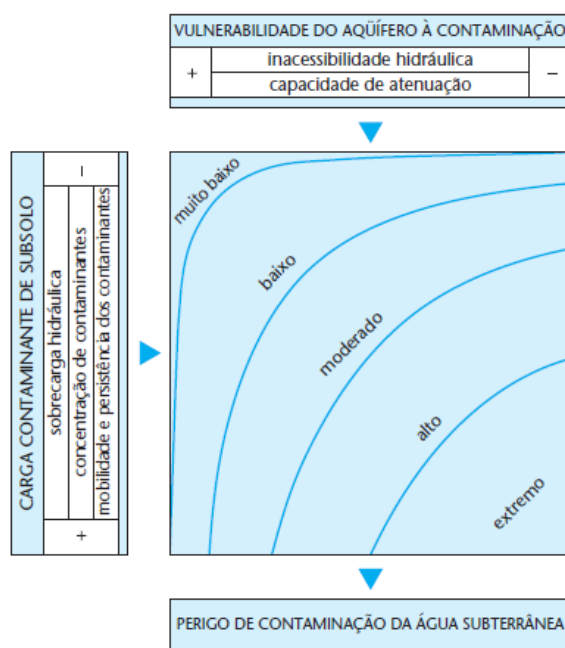


Figura 5 – Avaliação do perigo de contaminação

Fonte: FOSTER et al (2006, p. 80)

Os mapas gerados podem ser utilizados para a prevenção da contaminação futura, constituindo uma ferramenta de planejamento do uso e ocupação do solo, de modo a estipular quais atividades são possíveis de serem instaladas em quais regiões (FOSTER et al, 2006).

Indústrias do tipo 2 e 3, por exemplo, (ver Quadro 5) são consideradas como não aceitáveis de serem instaladas em áreas de alta vulnerabilidade, exceto em alguns casos sujeitos a investigação detalhada e projeto específico. Zonas de proteção de poços também constituem limitantes no uso e ocupação do solo; postos de gasolina não são permitidos de serem instalados em zonas de proteção microbiológica (FOSTER et al, 2006).

Para os locais onde já há a ocupação do solo, a avaliação de perigo de contaminação do aquífero constitui uma ferramenta que estabelece prioridades para medidas de controle da contaminação da água subterrânea, de forma a definir dentre as atividades já estabelecidas qual representa maior perigo. Para locais vulneráveis onde já está instalada uma atividade potencialmente contaminante, recomenda-se a melhora nas instalações e uma maior frequência no monitoramento da água subterrânea. Em cemitérios, por exemplo, recomenda-se a impermeabilização do fundo (FOSTER et al, 2006).

Desse modo, a avaliação do perigo de contaminação do aquífero constitui um importante instrumento de determinação de medidas prioritárias para controle da contaminação das águas subterrâneas.

3. METODOLOGIA

Tendo em vista os métodos citados, o presente trabalho objetiva a seleção do mais apropriado dentre eles, tendo como critério a disponibilidade de dados para o desenvolvimento.

O levantamento de dados com consequente escolha de metodologia, assim como no item anterior, será dividido em quatro tópicos:

- Avaliação da Vulnerabilidade
- Avaliação dos Perímetros de Proteção
- Cadastro das Cargas Contaminantes
- Avaliação do Perigo de Contaminação

3.1. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Para avaliação da vulnerabilidade, será utilizado o método GOD (FOSTER e HIRATA, 1988), já que, quando comparado aos outros métodos em relação à quantidade de parâmetros utilizados, ele se mostra mais simples e pragmático. Um menor número de parâmetros não implica em uma informação menos válida; conforme já dito anteriormente, métodos que utilizam muitos parâmetros, como o DRASTIC (ALLER et al, 1987), podem acabar utilizando dados correlacionados e sobrepostos, o que gera índices vagos (FOSTER et al, 2006; STEMPVOORT et al, 1993).

O método GOD avalia a vulnerabilidade multiplicando índices relacionados ao confinamento hidráulico da água subterrânea, os estratos de cobertura e a profundidade até o lençol freático ou aquífero confinado, conforme apresentado anteriormente na Figura 2. Serão utilizados os índices atualizados por Foster et al (2006), os quais diferem em alguns aspectos dos descritos por Foster e Hirata (1988) (redução nos índices de distância até a água subterrânea, simplificação na caracterização geológica dos estratos de cobertura e elucidação no grau de confinamento em relação aos semi-confinados).

Para determinação dos parâmetros, foram analisados os perfis construtivos dos poços de captação de água subterrânea de Porto Alegre cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) desenvolvido pela CPRM. Os perfis contêm dados sobre a construção, localização, formação geológica, hidrogeológica,

nível estático (dado disponível no teste de bombeamento), além de informações gerais, como nome do poço, proprietário e uso da água, conforme apresentado na Figura 6.



CPRM
Serviço Geológico do Brasil

Ficha Técnica Completa de Poço



Poço: 4300018116	UF: RS	Município: Porto alegre	Localidade: SERRARIA
------------------	--------	-------------------------	----------------------

Perfil Construtivo



Gerais	
Dados Gerais:	
Nome :	11/85
Data da Instalação :	
Proprietário :	TERCEIRO BATALHAO DE COMUNICACAO DO EXERCITO
Natureza do Ponto :	Poço tubular
Uso da água :	
Cota do Terreno :	
Localização:	
Localidade :	SERRARIA
UTM (Norte/Sul) :	6664039
UTM (Leste/Oeste) :	479242
Latitude (GGMMSS) :	300917
Longitude (GGMMSS) :	511256
Bacia Hidrográfica:	
Subbacia Hidrográfica:	
Situação:	
Data :	
Situação :	

Figura 6 – Exemplo de um trecho da Ficha Técnica de Poço fornecida pelo SIAGAS

Fonte: SIAGAS

Foram obtidas informações sobre 143 poços cadastrados em Porto Alegre; entretanto, 30 deles não possuem dados suficientes para elaboração de um índice de vulnerabilidade, e um deles – o poço 4300018104 – não se encontra dentro dos limites da cidade. Desse modo, 112 poços possuíam dados suficientes para serem utilizados na avaliação da vulnerabilidade.

A seguir, serão descritas a determinação de cada um dos três parâmetros que compõem o índice de vulnerabilidade GOD para cada poço, juntamente com suas incertezas. Conforme dito anteriormente, a incerteza é inerente ao processo de mapeamento da vulnerabilidade (NRC, 1993).

3.1.1. GRAU DE CONFINAMENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Uma camada confinante é aquela unidade geológica que possui uma reduzida ou nula permeabilidade. Frequentemente camadas confinantes são subdivididas em aquifugos (unidade impermeável que não transmite água), aquitardos (camada de baixa permeabilidade que pode armazenar e transmitir água) e aquicludes (armazena água, mas não transmite) (FETTER, 1993).

O método GOD atribui valores que variam de 0 (para aquíferos confinados) até 1 (não confinados) para o parâmetro de confinamento da água subterrânea.

3.1.2. OCORRÊNCIA DE ESTRATOS DE COBERTURA

Os estratos de cobertura são onde ocorre a atenuação do contaminante. O método GOD atribui ao potencial de existência de fraturas bem desenvolvidas uma maior vulnerabilidade (FOSTER et al, 2006). Nesse trabalho, nos poços onde havia a ocorrência de mais de um estrato de cobertura, estabeleceu-se um índice composto, correlacionando a espessura de cada camada com o respectivo índice atribuído.

3.1.3. DISTÂNCIA ATÉ O LENÇOL FREÁTICO OU TETO DO AQUÍFERO CONFINADO

Quanto maior a profundidade d'água, menor será a propensão de um contaminante arbitrário atingir esse recurso. Assim, às maiores profundidades são atribuídos menores índices. Deve-se considerar que a profundidade da água subterrânea varia e que os dados utilizados correspondem a apenas uma medição, o que pode ocasionar alguma imprecisão nos resultados.

3.1.4. CÁLCULO DO ÍNDICE

Para o cálculo do índice, multiplicou-se os três parâmetros apresentados anteriormente, resultando em um valor que pode variar entre 0 e 1, conforme apresentando na Figura 2. Feito isso, os poços foram inseridos no software ArcGIS 10.0 e gerou-se uma superfície para índice GOD calculado interpolando os dados dos

diferentes poços. Comparando diferentes métodos de interpolação, o IDW (*Inverse Distance Weighting*) mostrou os melhores resultados.

3.2.AVALIAÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO

Nos moldes do Decreto Estadual Nº 32.955/91 de São Paulo, estabeleceram-se duas zonas de proteção para os poços de Porto Alegre cadastrados no SIAGAS: Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta (PA) de 50 dias de tempo de transito.

Para o PIPS, adotou-se o valor de 10m estabelecido pelo Decreto Estadual Nº 42.027/02 do Rio Grande do Sul, mesmo valor determinado pelo Decreto Estadual Nº 32.955/91 de São Paulo.

Para a determinação do PA, dividiram-se os poços entre aqueles que extraem água de aquíferos porosos e fraturados a partir das informações do SIAGAS. Quando não constavam informações sobre entrada d'água, inferiu-se que a extração ocorria na camada revestida por filtro. Na ocorrência de mais de uma entrada d'água, adotou-se aquela mais superficial.

O Perímetro de Alerta de aquíferos porosos foi determinado pelo método do Raio Fixo Calculado (RFC) – Equação 3, reapresentada logo abaixo – para um tempo de trânsito de 50 dias. A seguir é apresentada a determinação dos parâmetros utilizados.

$$r = \sqrt{\frac{Qt}{n_e b \pi}}$$

- Q = vazão de exploração (m³/dia): valor após estabilização que consta nos Testes de Bombeamento disponíveis nas Fichas Técnicas Completas de Poços do SIAGAS;
- t = tempo de trânsito (dias): 50 dias (valor usual na determinação de Áreas de proteção microbiológica - proteção de potenciais fontes de parasitas, vírus patógenos e bactérias -);
- b = espessura saturada: Estimou-se a espessura da camada saturada a partir do perfil dos poços selecionados;

- n_e = porosidade efetiva: A porosidade foi estimada a partir dos valores indicados por Freeze e Cherry (1979), exibidos no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores de porosidade

	n(%)
Não consolidados	
Cascalho	25-40
Areia	25-50
Silte	35-50
Argila	40-70
Consolidados	
Basalto fraturado	5-50
Calcário cárstico	5-50
Arenito	5-30
Calcário, dolomito	0-20
Xisto	0-10
Rocha cristalina fraturada	0-10
Rocha cristalina densa	0-5

Fonte: adaptado de Freeze e Cherry (1979).

Para os aquíferos fraturados, optou-se pela metodologia do Raio Fixo Arbitrário (RFA) para a determinação do Perímetro de Alerta. Adotou-se o valor estabelecido pelo Decreto Estadual N° 32.955/91 de São Paulo para poços localizados na unidade hidrogeológica Sistema Aquífero Cristalino (distância radial de 30m para vazões até 15m³/h e de 50m para vazões superiores).

O Quadro 7 apresenta de maneira resumida os diferentes métodos utilizados para determinação dos perímetros de proteção descritos nesse item.

Quadro 7 – Determinação dos Perímetros de Proteção

Aquífero	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS)	Perímetro de Alerta (PA)	
Poroso	10 m	Raio Fixo Calculado (RFC) t=50 dias	
Fraturado		Vazão $\leq 15\text{m}^3/\text{h}$	30m
		Vazão $> 15\text{m}^3/\text{h}$	50m

Os poços de Porto Alegre cadastrados no SIAGAS foram inseridos no software ArcGIS 10.0. Os perímetros de proteção para cada poço foram calculados no software Microsoft Office Excel 2007 e foram utilizados como parâmetro para *buffer* no ArcGIS 10.0 (ferramenta que cria polígonos a partir de uma distância definida de cada ponto).

3.3.CADASTRO DAS CARGAS CONTAMINANTES

Para o cadastro das cargas contaminantes foi utilizada o método POSH (mostrado no Quadro 5) para atribuição de índices de risco de contaminação. Considerou-se apenas a contaminação provocada por fontes pontuais. Para obtenção desses dados, utilizaram-se os empreendimentos cadastrados na Secretaria Municipal de Produção, Indústria e Comércio (SMIC). Separou-se dentre os empreendimentos cadastrados aqueles que são citados pelo Quadro 5, ou seja:

- Áreas industriais - índice POSH: varia de acordo com a atividade industrial
- Oficinas - índice POSH: 3 (elevado);
- Postos de gasolina - índice POSH: 2 (moderado);
- Cemitérios - índice POSH: 1 (reduzido);

A SMIC disponibiliza em seu site os Alvarás Cadastrados com as seguintes informações: razão social, endereço, CEP, bairro e atividade.

Depósitos de resíduos sólidos e lagoas de águas residuais foram desconsiderados na análise, por não constarem nos cadastros da SMIC.

Deve-se considerar que algumas atividades potencialmente poluidoras ocorrem irregularmente e, assim, não constarão no cadastro. Além disso, há aquelas estabelecimentos nos quais ocorriam atividades que representavam um maior potencial

de contaminação ambiental no passado, mas atualmente estão desativadas, não havendo registro do histórico do empreendimento.

Em função do nível de detalhamento desse trabalho, não é possível saber a quantidade de produtos químicos perigosos utilizados diariamente por cada atividade. Desse modo, não se pode determinar o real perigo de algumas indústrias. Por exemplo, um determinado estabelecimento industrial que está classificado como madeireira nos registros da SMIC pode possuir na cadeia de produção uma grande quantidade de produtos químicos que representam um risco de contaminação à água subterrânea (uma grande quantidade de vernizes, seladores e tintas), assim como pode apenas realizar atividades de alteração física do produto, como realização de cortes e montagens. Esses empreendimentos que apresentavam essa imprecisão não foram considerados nas análises.

A metodologia POSH não fornece uma distinção dentro de cada classe de carga contaminante. Por exemplo, essa metodologia considera no mesmo índice uma oficina mecânica e uma grande indústria metalúrgica. E dentro de uma mesma classe de atividade, não são consideradas a qualidade das instalações e a adoção de medidas que evitem a contaminação da água subterrânea. Por exemplo, postos de gasolinas com tanques de diferentes idades são considerados na mesma classe. Essa falta de distinção constitui outra limitação da análise.

A partir do endereço e CEP, utilizando o site BatchGeo criou-se um arquivo .kml com os empreendimentos selecionados do cadastro da SMIC. Esse arquivo foi importado para o software ArcGIS 10.0 (ver Figura 7). Todos os estabelecimentos, com exceção dos cemitérios, foram considerados pontuais. Os cemitérios foram desenhados a partir de imagens de satélite do Google Earth, conforme apresentado na Figura 8.

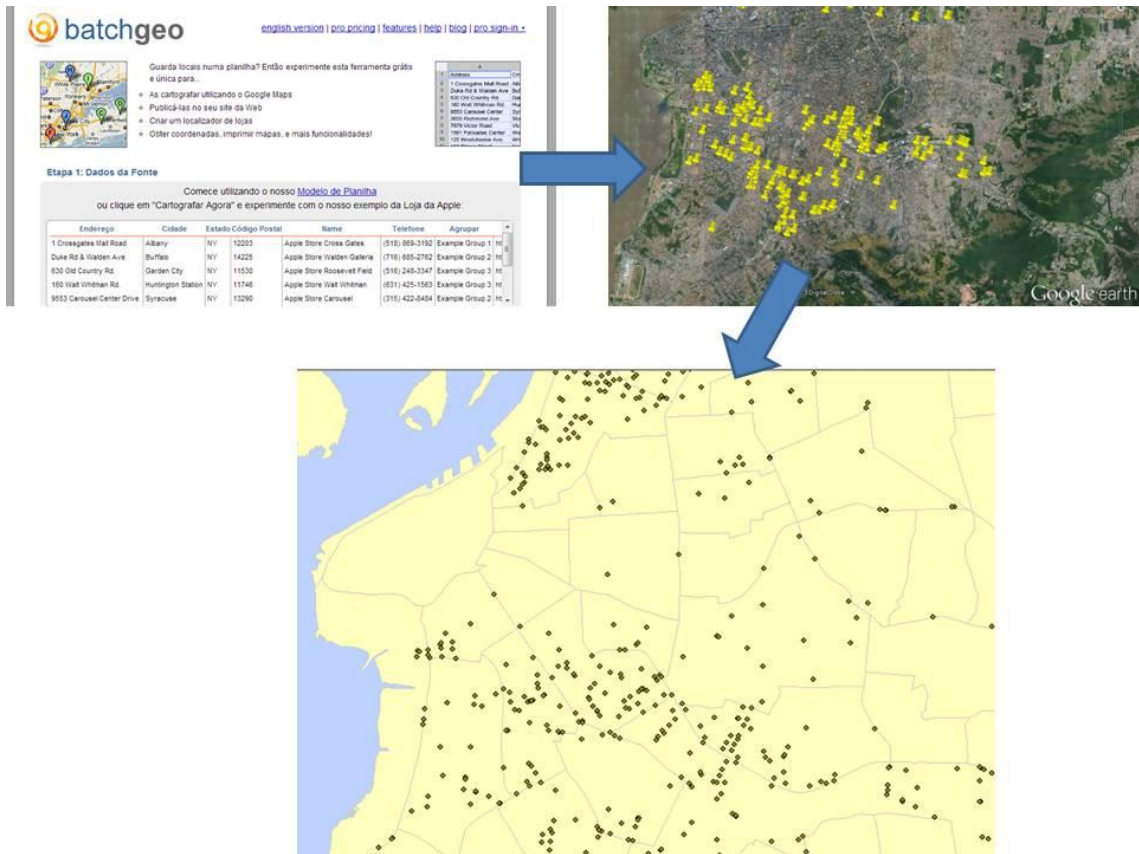


Figura 7 – Fluxograma do mapeamento das fontes potencialmente contaminantes consideradas pontuais



Figura 8 – Mapeamento dos cemitérios

Em um ambiente urbano, a ocupação do solo se dá de maneira descontínua. Desse modo, a distribuição das cargas contaminantes terá essa característica de descontinuidade. Para a definição de áreas de maior risco de contaminação, é de interesse transformar essa informação incontinua em contínua. Para isso, a partir dos pontos importados, utilizou-se a ferramenta *buffer* do software ArcGIS 10.0 para um valor de 100m. As áreas geradas foram interligadas quando possível, criando uma Zona de Concentração de Atividades Contaminantes (ZCAC), gerando um dado contínuo.

Dentro das zonas criadas, interpolou-se o índice atribuído segundo o método POSH a partir de cada ponto presente nela pelo método IDW, gerando uma superfície limitada por essa zona de concentração.

As atividades que não se inseriram na ZCAC, foram analisadas de maneira pontual. Os cemitérios, por se tratarem de polígonos também foram analisados separadamente.

3.4. ANÁLISE DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Para análise do risco de contaminação da água subterrânea, primeiramente foram sobrepostos os dados de vulnerabilidade com os de cargas contaminantes. Essa sobreposição se deu multiplicando os dois índices a partir de uma equação que traduzisse matematicamente a relação estabelecida pela Figura 5. A relação matemática é apresentada na Equação 11.

$$RISCO = GOD * 0,3333POSH \quad (11)$$

Onde:

RISCO = risco (ou perigo) de contaminação da água subterrânea calculado [0 – 1];

GOD = índice de vulnerabilidade da água subterrânea pelo método GOD [0 – 1];

POSH = índice da carga contaminante pelo método POSH [0 – 3];

O índice POSH é multiplicado por 0,3333 para que ele também variasse entre 0 e 1. Essa relação é apresentada na Figura 9.

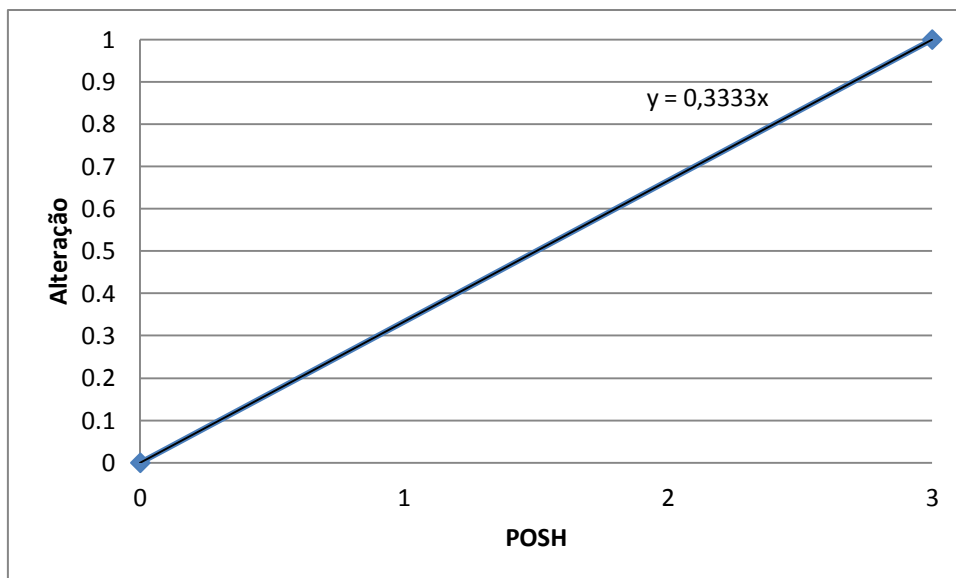


Figura 9 – Alteração POSH

Os diferentes intervalos de risco calculado representam os perigos de contaminação da água subterrânea apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre RISCO calculado e o Perigo de contaminação da água subterrânea

RISCO calculado	Perigo de contaminação da água subterrânea
0 - 0,0125	Muito baixo
0,0125 - 0,1	Baixo
0,1 - 0,25	Moderado
0,25 - 0,48	Alto
0,48 - 1	Extremo

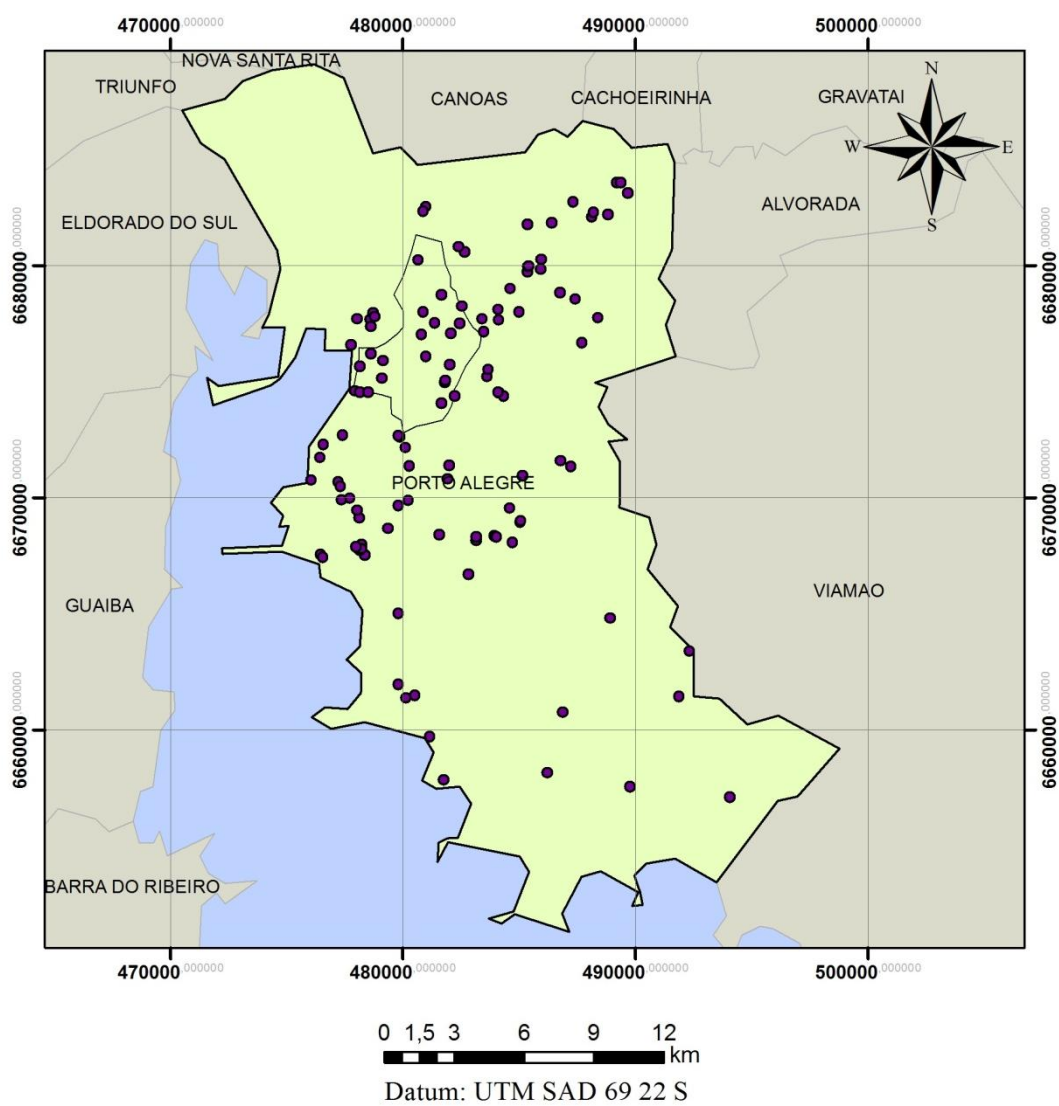
Essa relação matemática foi aplicada para a Zona de Concentração de Atividades Contaminantes, para os empreendimentos considerados como pontos, e para os cemitérios.

Feito isso, as zonas de proteção de poços (Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta (PA)) foram sobrepostas a esse mapa que possui os índices de perigo de contaminação da água subterrânea, revelando aqueles poços com maior risco de contaminação.

4. RESULTADOS

4.1.ÁREA DE ESTUDO

Dos 112 poços de Porto Alegre registrados no SIAGAS com dados suficientes para a avaliação, apenas 14 deles estão situados na metade sul do município, conforme apresentado na Figura 10. Desse modo, a determinação de um índice de vulnerabilidade, uma das principais informações desse trabalho, na metade sul de Porto Alegre resultaria em valores pouco representativos.



Legenda

- Porto Alegre
- Cidade Radiocêntrica
- Poços SIAGAS

Figura 10 – Distribuição dos poços cadastrados no SIAGAS em Porto Alegre

Observa-se uma maior densidade de poços na região central da cidade, correspondendo a macrozona Cidade Radiocêntrica do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre (PMPA, 2012), que constitui a área mais estruturada do Município. Essa área possui 16 poços distribuídos nos seus 23,78 km², o que resulta em um raio de influência médio de 2,75km para cada poço.

Assim, o presente trabalho irá elaborar um índice de perigo de contaminação para a macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre, zona com maior densidade de dados no município, conforme apresentado na Figura 11.

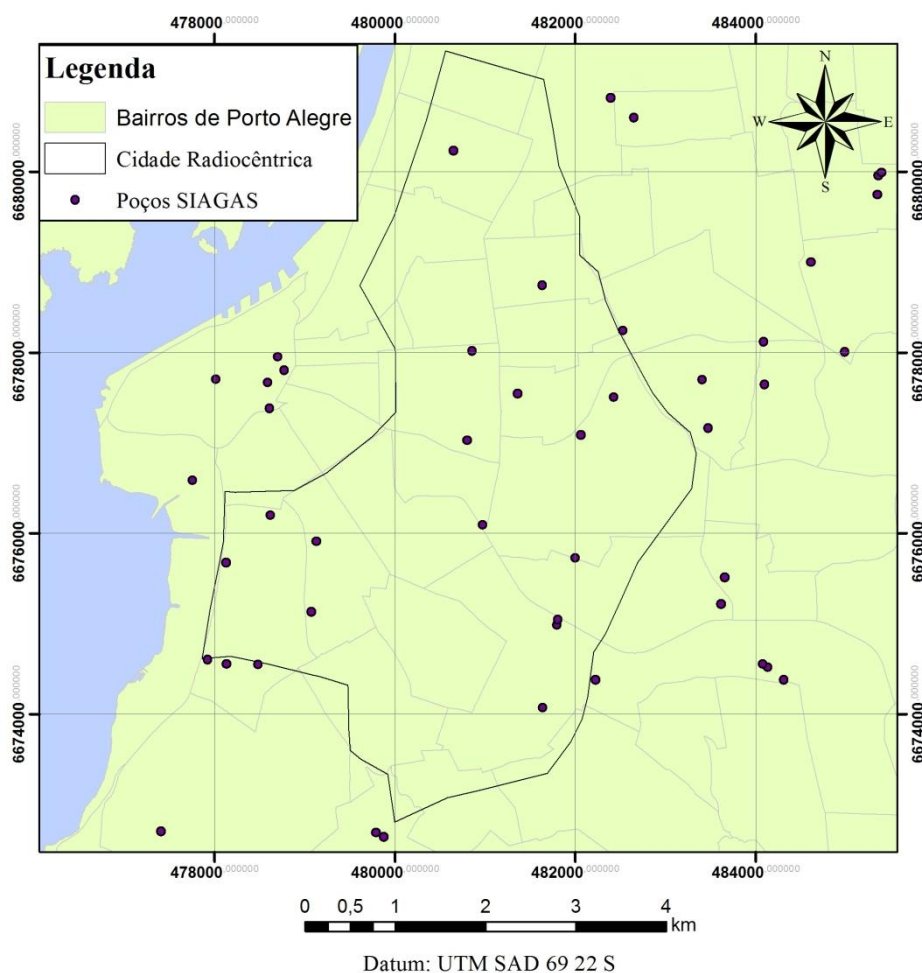


Figura 11 – Poços na macrozona Cidade Radiocêntrica, área de estudo

A Tabela 2 apresenta os poços instalados na Cidade Radiocêntrica. Os itens não preenchidos não são informados na Ficha Técnica. As informações sobre entrada d'água retratam aquela mais superficial no caso de ocorrência de múltiplas entradas.

Tabela 2 – Poços de captação de água subterrânea instalados na macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre

Poço	Proprietário	Data da instalação	Aquífero Explotado	Entrada d'água (m)	NE (m)	Uso d'água
4300000124	Refrigerantes Sul Riograndense	08/10/1965	Areia	33	1	Abastecimento industrial
4300001449	Zottis Mobycenter	18/11/1993	Areia	22	2.31	Abastecimento múltiplo
4300018057	BCC - Com. De Comb. Ltda	-	Gnaisse	19	6	-
4300018067	Paroquia N. Sra. Auxiliadora	-	Gnaisse	19	22	-
4300018101	Mucles Huwwari	-	Gnaisse	39	85.16	-
4300018107	Motel a Dois Ltda	-	Gnaisse	31	0.5	-
4300018108	Motel a Dois Ltda	-	Gnaisse	55	1	-
4300018034	Empresa Gasometro Transportes	-	Granito	73	9	-
4300018072	Nacional	-	Granito	37	31	-
4300018079	Creche Santa Rita de Luca	-	Granito	155	11	-
4300018085	Motel Botafogo	-	Granito	70	5	-
4300018096	ZH Edit. Jornalístico	-	Granito	31	4	-
4300018097	Supermercado Febernati	-	Granito	187	0.82	-
4300001444	Gremio Nautico União	29/07/1992	Granito alterado	160	0.23	Abastecimento múltiplo
4300001446	Posto de Combust. Pernambuco	-	Granito alterado	63	3.27	Abastecimento múltiplo
4300018110	Condomínio Castelo De Heidelberg	-	Granito alterado	12	5.2	-

Fonte: SIAGAS, 2013

Pelo proprietário pode-se inferir o possível uso d'água quando essa informação não é fornecida pela Ficha Cadastral. Constata-se que grande parte dos poços cadastrados na Cidade Radiocêntrica possivelmente não possui o uso permitido pelo Decreto Estadual N° 23.430/74 (aquele que determina que, nas zonas abastecidas por rede de água potável, permite-se apenas para suprimentos industriais e uso em agricultura ou floricultura).

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA

De acordo com o mapa de Sistemas Aquíferos do Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre (CPRM, 2006), a macrozona Cidade Radiocêntrica contempla as unidades hidrogeológicas Pinheiro Machado (g3) e Dom Feliciano (g2), as planícies fluviolacustres atuais e subatuais (b2), além dos depósitos de encosta encobrendo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense (j2), conforme apresentado na Figura 13

Analisando-se os perfis geológicos dos poços instalados na macrozona Cidade Radiocêntrica, constata-se que 2 (dois) poços retiram a água de uma camada de areia, 5 (cinco) de fraturas do gnaiss, 6 (seis) de fraturas do granito e 3 (três) de uma camada alterada do granito, conforme apresentado na Figura 12. Desse modo, a maior parte dos poços extrai água de aquíferos fraturados, enquanto que menor parte retira de aquíferos porosos (areia e alteração do granito).

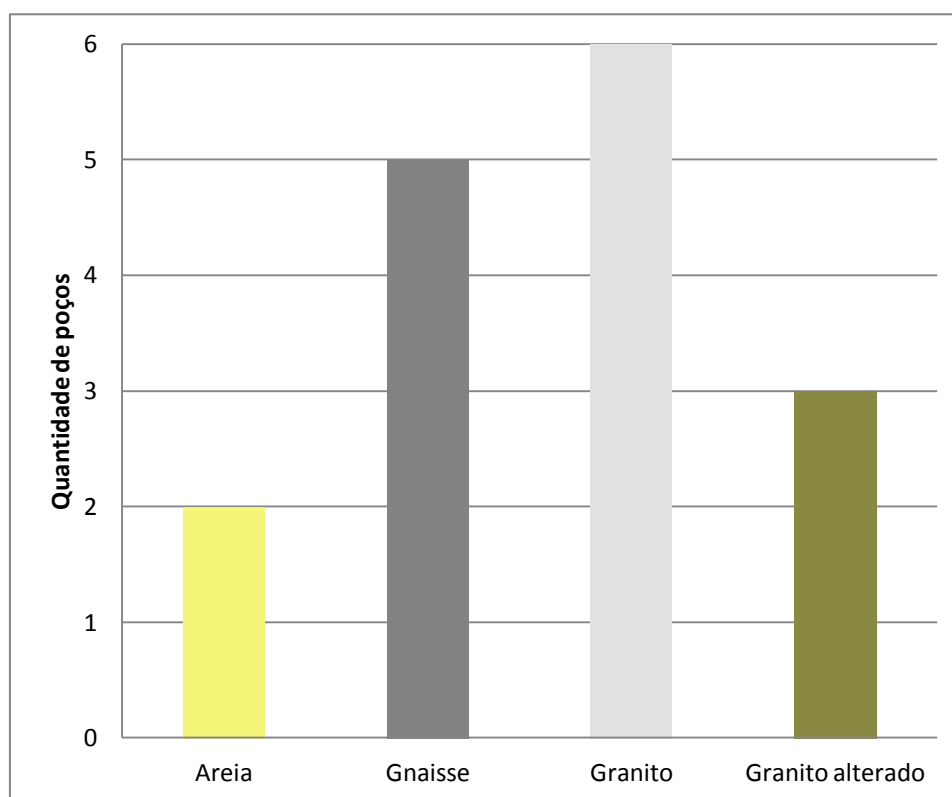


Figura 12 – Distribuição da coleta de água dos poços

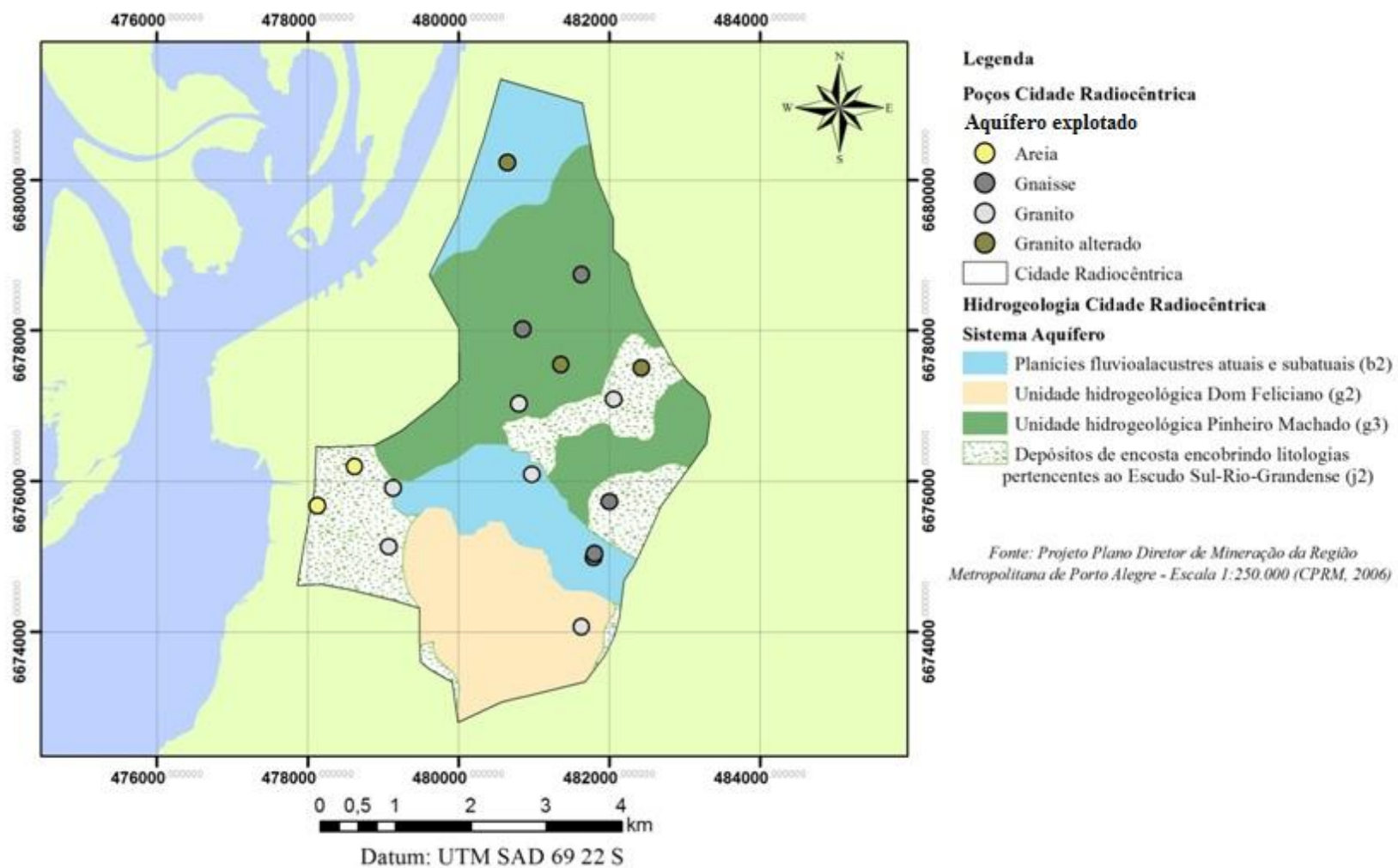


Figura 13 – Hidrogeologia da Cidade Radiocêntrica

A unidade hidrogeológica Pinheiro Machado (g3) é constituída por aquíferos descontínuos restritos a zonas fraturadas, desenvolvidos sobre granodioritos, migmatitos e gnaisses, com coberturas eluviais espessas (CPRM, 2006). Nessa unidade estão localizados os poços: 4300018101, 4300018067, 4300018072 e 4300018110; esse último capta água da parte mais superficial e intemperizada do aquífero.

A unidade hidrogeológica Dom Feliciano (g2), na qual está localizado o poço 4300018079, é caracterizada por aquíferos descontínuos restritos a zonas fraturadas desenvolvidas sobre corpos granitoides (CPRM, 2006).

As planícies fluviolacustres atuais e subatuais (b2) é constituída por aquíferos intergranulares inseridos nos depósitos fluviais, deltaicos e lacustres, compostos por sequencia areno-silto-argilosa, com gradação granulométrica descendente base para o topo (CPRM, 2006). Nesse sistema estão localizados os poços 4300001446, 4300000124, 4300018107, 4300018108 e 4300018304. Entretanto, a análise dos perfis construtivos que constam nas Fichas Técnicas dos poços 4300018107 e 4300018108 – que captam água de gnaiss a uma grande profundidade –, e do poço 4300018034 – que, apesar de possuir uma cobertura característica desse sistema, capta água de granito a uma profundidade de aproximadamente 40m –, entram em dissidência com o que é descrito pela CPRM. Conforme já informado anteriormente, o presente trabalho considerará os dados que constam nas Fichas Cadastrais para elaboração dos índices propostos.

Os depósitos de encosta encobrendo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense (j2) é caracterizado pelos depósitos eluviais, coluviais, gravitacionais de encosta e porções de leques aluviais não individualizáveis, além de elúvios e colúvios recentes (CPRM, 2006). Nesse sistema estão localizados os poços 4300001449, 4300018057, 4300018085, 4300018096, 4300018097 e 4300001444, os quais captam água de formações sedimentares (areia) e consolidadas (granito e gnaiss).

A Tabela 3 indica o sistema hidrogeológico de acordo com CPRM (2006) no qual está inserido cada poço localizado na macrozona Cidade Radiocêntrica.

Tabela 3 – Sistema Hidrogeológico de inserção dos poços da Cidade Radiocêntrica de acordo com CPRM (2006)

Poço	Sistema Hidrogeológico
430000124	b2 Planícies Fluvioalacustres Atuais e Subatuais
4300001446	b2 Planícies Fluvioalacustres Atuais e Subatuais
4300018034	b2 Planícies Fluvioalacustres Atuais e Subatuais
4300018107	b2 Planícies Fluvioalacustres Atuais e Subatuais
4300018108	b2 Planícies Fluvioalacustres Atuais e Subatuais
4300018079	g2 Unidade Hidrogeológica Dom Feliciano
4300018067	g3 Unidade Hidrogeológica Pinheiro Machado
4300018072	g3 Unidade Hidrogeológica Pinheiro Machado
4300018101	g3 Unidade Hidrogeológica Pinheiro Machado
4300018110	g3 Unidade Hidrogeológica Pinheiro Machado
4300001449	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense
4300018057	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense
4300018085	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense
4300018096	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense
4300018097	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense
4300001444	j2 Depósitos de encosta encobrindo litologias pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense

4.2.VULNERABILIDADE

Através das informações do arcabouço geológico gerado pelos perfis litológicos dos poços foi possível estimar índices de vulnerabilidade através do método GOD. Além dos poços inseridos na Cidade Radiocêntrica - citados pela Tabela 2 -, foram considerados 28 poços localizados na sua periferia, a fim de se obter um índice mais significativo. A Tabela 4 e a Figura 14 apresentam os poços localizados fora da área de estudo considerados na avaliação da vulnerabilidade.

Tabela 4 – Poços localizados na periferia da macrozona Cidade Radiocêntrica

Ponto	Aquífero explotado	Sistema Aquífero
4300001440	Granito alterado	g2
4300018070	Granito	g2
4300018078	Granito	g2
4300018039	Areia	g2
4300018059	Gnaisse	j2
4300001445	Granito	j2
4300001432	Granito alterado	j2
4300018073	Granito	j2
4300018036	Areia	j2
4300018051	Gnaisse	j2
4300001052	Areia	b2
4300001049	Areia	g3
4300018092	Granito	g3
4300018122	Granito	b2
4300001439	Granito	g3
4300018066	Areia	g3
4300018098	Gnaisse alterado	g3
4300017328	Granito	g3
4300001447	Granito alterado	g3
4300018074	Granito	g3
4300017331	Granito	g3
4300017157	Granito	g3
4300016929	Granito	j2
4300018095	Riolito	g3
4300000117	Areia	j2
4300001438	Granito	b2
4300018120	Granito	b1
4300000118	Areia	b1

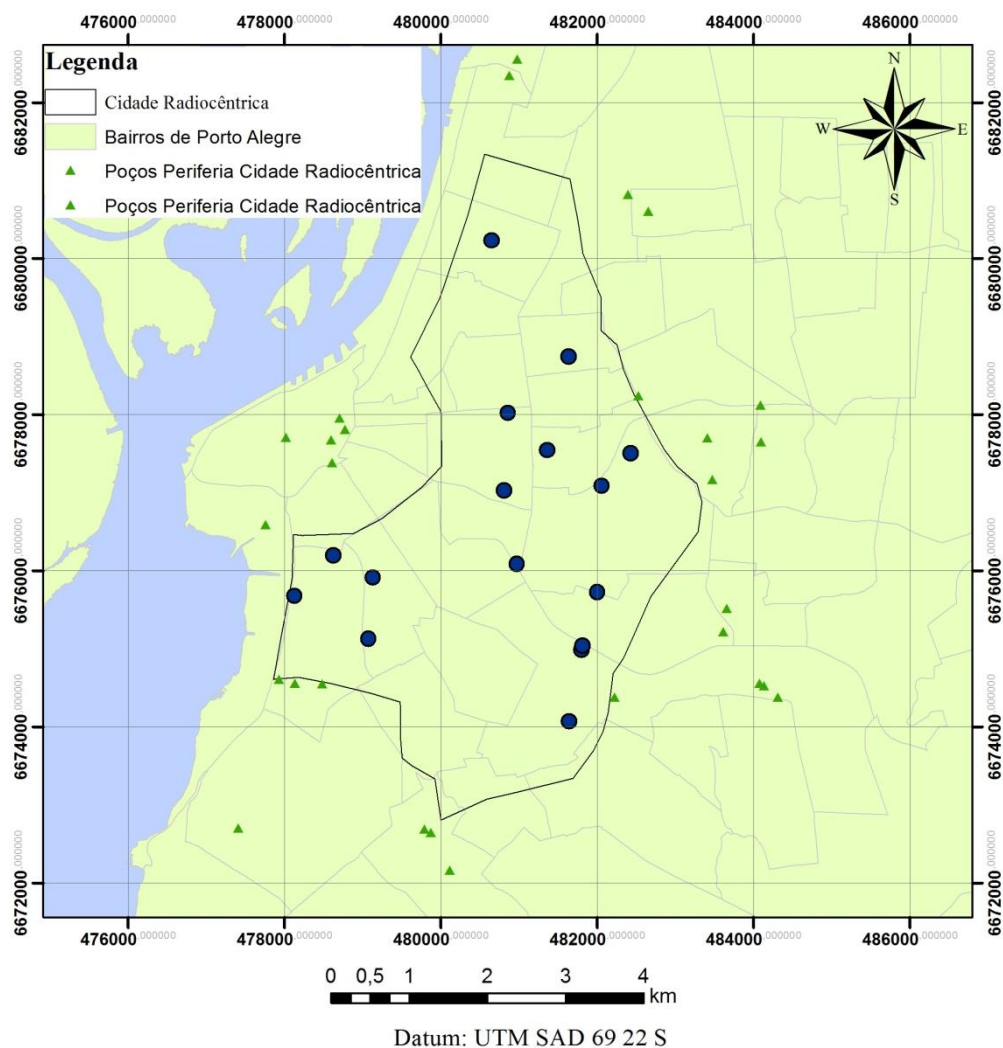


Figura 14 – Poços utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade GOD

Todos os poços localizados na periferia da Cidade Radiocêntrica que foram considerados estão localizados nos mesmos Sistemas Aquíferos encontrados na Cidade Radiocêntrica, com exceção dos poços 4300000118 e o 4300000120 (ao norte da macrozona), os quais se encontram na unidade hidrogeológica Aquífero Salinizados (b1). Assim, assume-se a semelhança nas características desses poços para elaboração de um índice de vulnerabilidade. A Tabela 5 apresenta os parâmetros dos diferentes poços considerados para o cálculo do índice de vulnerabilidade GOD.

Tabela 5 – Cálculo do Índice GOD

Ponto	Inserção na Cidade Radiocêntrica	G	O	D	GOD
4300000117	NÃO	0,2	0,6	0,8	0,10
4300000118	NÃO	0,3	0,7	0,8	0,17
4300000124	SIM	0,8	0,7	0,7	0,39
4300001049	NÃO	0,4	0,7	0,8	0,21
4300001052	NÃO	1,0	0,6	0,8	0,44
4300001432	NÃO	1,0	0,7	0,8	0,56
4300001438	NÃO	0,8	0,6	0,7	0,35
4300001439	NÃO	1,0	0,8	0,7	0,53
4300001440	NÃO	1,0	0,7	0,8	0,56
4300001444	SIM	0,7	0,6	0,7	0,29
4300001445	NÃO	0,6	0,5	0,8	0,26
4300001446	SIM	0,6	0,5	0,8	0,26
4300001447	NÃO	0,8	0,6	0,8	0,40
4300001449	SIM	0,9	0,7	0,8	0,47
4300016929	NÃO	0,6	0,6	0,6	0,21
4300017157	NÃO	0,8	0,6	0,6	0,30
4300017328	NÃO	1,0	0,7	0,6	0,42
4300017331	NÃO	1,0	0,7	0,6	0,42
4300018034	SIM	0,7	0,7	0,7	0,34
4300018036	NÃO	0,4	0,7	0,7	0,18
4300018039	NÃO	1,0	0,5	0,7	0,35
4300018051	NÃO	0,6	0,6	0,6	0,21
4300018057	SIM	1,0	0,7	0,7	0,49
4300018059	NÃO	0,9	0,7	0,7	0,40
4300018066	NÃO	0,4	0,6	0,7	0,16
4300018067	SIM	0,8	0,7	0,6	0,34
4300018070	NÃO	0,9	0,7	0,6	0,37
4300018072	SIM	1,0	0,7	0,6	0,42
4300018073	NÃO	0,7	0,7	0,6	0,27
4300018074	NÃO	0,9	0,7	0,7	0,40
4300018078	NÃO	0,8	0,6	0,6	0,28
4300018079	SIM	0,7	0,7	0,7	0,33
4300018085	SIM	1,0	0,7	0,6	0,42
4300018092	NÃO	0,9	0,7	0,6	0,36
4300018095	NÃO	1,0	0,7	0,6	0,42
4300018096	SIM	0,9	0,7	0,6	0,38

4300018097	SIM	0,9	0,7	0,7	0,40
4300018098	NÃO	0,8	0,6	0,7	0,33
4300018101	SIM	0,9	0,7	0,6	0,38
4300018107	SIM	0,9	0,7	0,6	0,38
4300018108	SIM	0,8	0,6	0,6	0,30
4300018110	SIM	0,6	0,6	0,8	0,29
4300018120	NÃO	0,8	0,5	0,6	0,22
4300018122	NÃO	0,9	0,6	0,7	0,37

Em relação ao confinamento (parâmetro G), percebe-se que a maior parte dos poços é caracterizada por um não confinamento. Os valores variam de 0,2 (para o poço 4300000117 confinado por camada argilosa) até 1,0 (para, por exemplo, o poço 4300018039).

Quanto à ocorrência de estratos de cobertura (parâmetro O), os poços apresentam valores que variam de 0,486 (para o poço 4300018120, o qual possui uma camada de areia argilosa, seguida por areia média, argila siltosa e tendo em sua base uma camada granítica) a 0,75 (para o poço 4300001439, o qual possui uma camada de rochas intemperizadas em sua zona vadosa). A maior parte dos valores se encontra no intervalo entre 0,662 e 0,706.

No parâmetro D, analisou-se a distância até a camada aquífera do poço. No método GOD o parâmetro D corresponde à profundidade da água subterrânea ou a profundidade do teto da camada confinante. Entretanto, como se está trabalhando com aquíferos porosos e fraturados que, na sua maior parte, não possuem confinamento, a profundidade da entrada da água mostra-se de maior importância na determinação de valores. O índice mais frequente é o de 0,6, aquela que representa os poços que captam água de aquíferos que estão a mais de 50 metros de profundidade. Entretanto, a soma entre os poços com índice 0,7 e 0,8 é superior ao índice anteriormente citado, a grande variação da profundidade desses valores. A Tabela 6 apresenta a profundidade da entrada d'água para os diferentes poços analisados.

Tabela 6 – Profundidade de entrada d'água

Poço	Entrada d'água (m)
4300001432	8,5
4300001049	11
4300018110	12
4300000117	13
4300001445	15
4300001447	15
4300001440	17
4300000118	18
4300001052	18
4300001446	19
4300001449	19
4300001439	21,4
4300001444	22
4300018039	24
4300001438	26
4300018074	28
4300018098	29
4300018057	31
4300018097	31
4300000124	33
4300018122	33
4300018059	36
4300018066	37
4300018079	37
4300018034	39
4300018036	44,6
4300016929	51
4300017157	52
4300018067	55
4300018120	55
4300018073	58
4300018108	63
4300017331	67
4300018096	70
4300018072	73
4300018051	88

4300017328	108
4300018078	138
4300018095	139
4300018085	155
4300018107	160
4300018092	185
4300018101	187
4300018070	249

Analisando os dados da Tabela 6, percebe-se que a entrada d'água varia de 8,5m (poço 4300001432) a 249m (poço 4300018070). A média de entrada d'água é de 58,88m, com um desvio padrão de 56,56m, o que reflete a grande variação desse parâmetro. A princípio pode-se considerar não válida a comparação da vulnerabilidade de poços em situações hidrogeológicas tão distintas; entretanto, a proposta do cálculo de tal índice é gerar um parâmetro unificado que demonstre a probabilidade de um determinado contaminante atingir a água subterrânea.

Os parâmetros definidos foram multiplicados gerando o índice GOD exibido na última coluna da Tabela 5. Depois de calculados, esses índices foram interpolados utilizando o interpolador IDW; o modelo gerado foi recortado utilizando-se a ferramenta *Extract by Mask* do software ArcGIS 10.0, gerando a Figura 15.

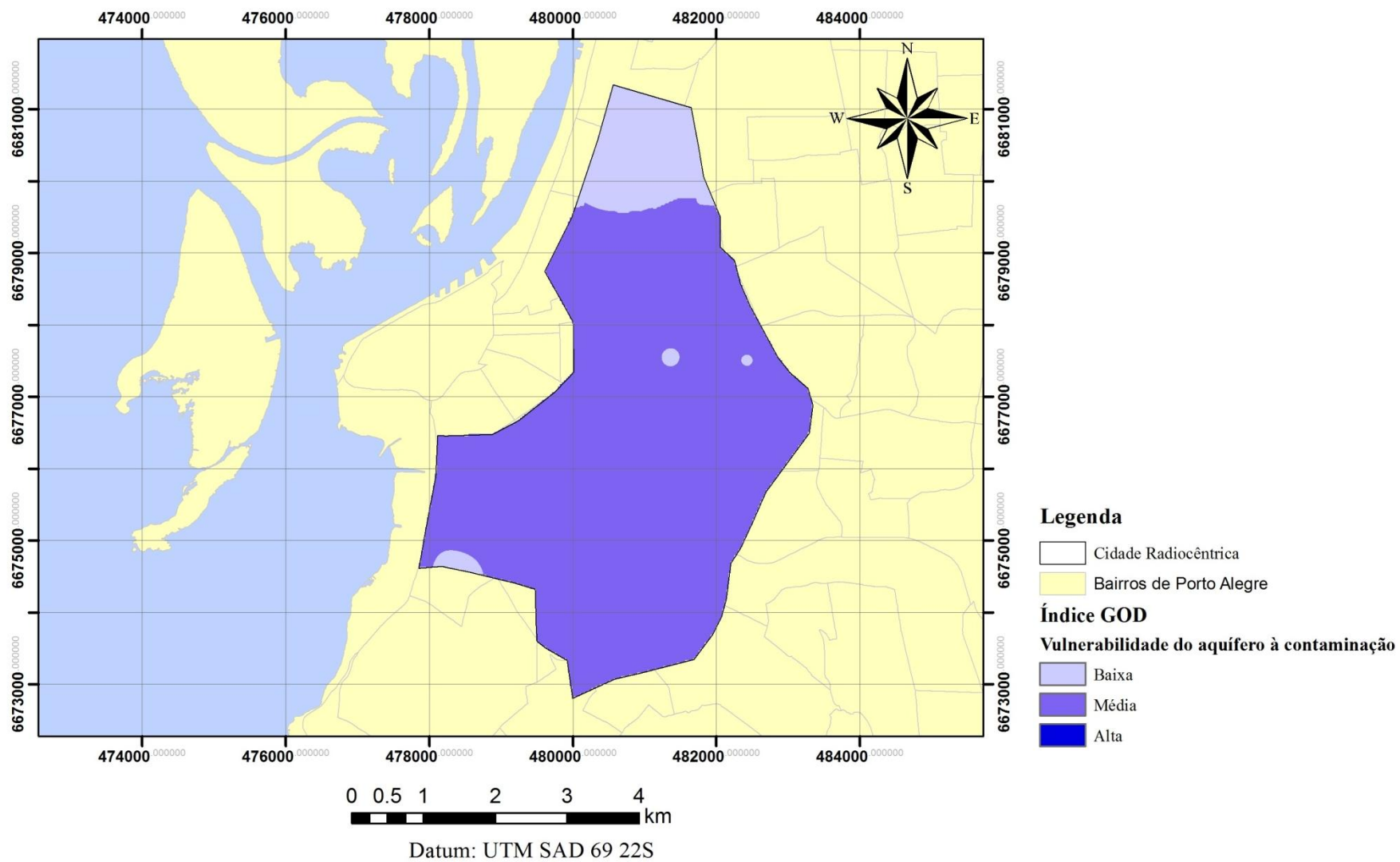


Figura 15 – Vulnerabilidade da Macrozona Cidade Radiocêntrica

Analisando o modelo gerado, a Cidade Radiocêntrica possui uma vulnerabilidade majoritariamente média, com alguns locais (extremo norte da macrozona, pontos centrais e pequena área ao sul) com vulnerabilidade baixa. Os índices apresentados na Figura 15 seguem a classificação descrita na anteriormente exibida Figura 2, ou seja, a vulnerabilidade baixa varia de 0,1 a 0,3, enquanto que a média varia de 0,3 a 0,5. A Figura 16 apresenta o histograma dos índices de vulnerabilidade da área.

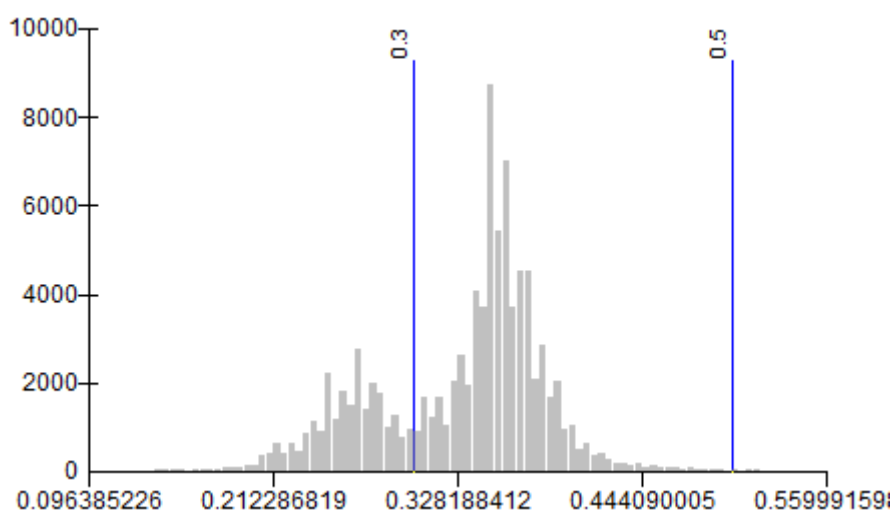


Figura 16 – Histograma da vulnerabilidade

Os pontos centrais com vulnerabilidade baixa registrados na região mais central da área ocorrem devido aos poços 4300001444 (índice GOD 0,294) e 4300018110 (índice GOD 0,288). Dos poços considerados apresentados na Tabela 5, apenas três (os poços 4300001432, 4300001440 e 4300001439) apresentam índices considerados altos, ou seja, entre 0,5 e 0,7. Os índices são de 0,56, 0,56 e 0,53, respectivamente. Esses poços estão localizados fora da área de estudo, mas influenciaram na interpolação do modelo, conforme apresentado na superfície com exibição *stretched* na Figura 17.

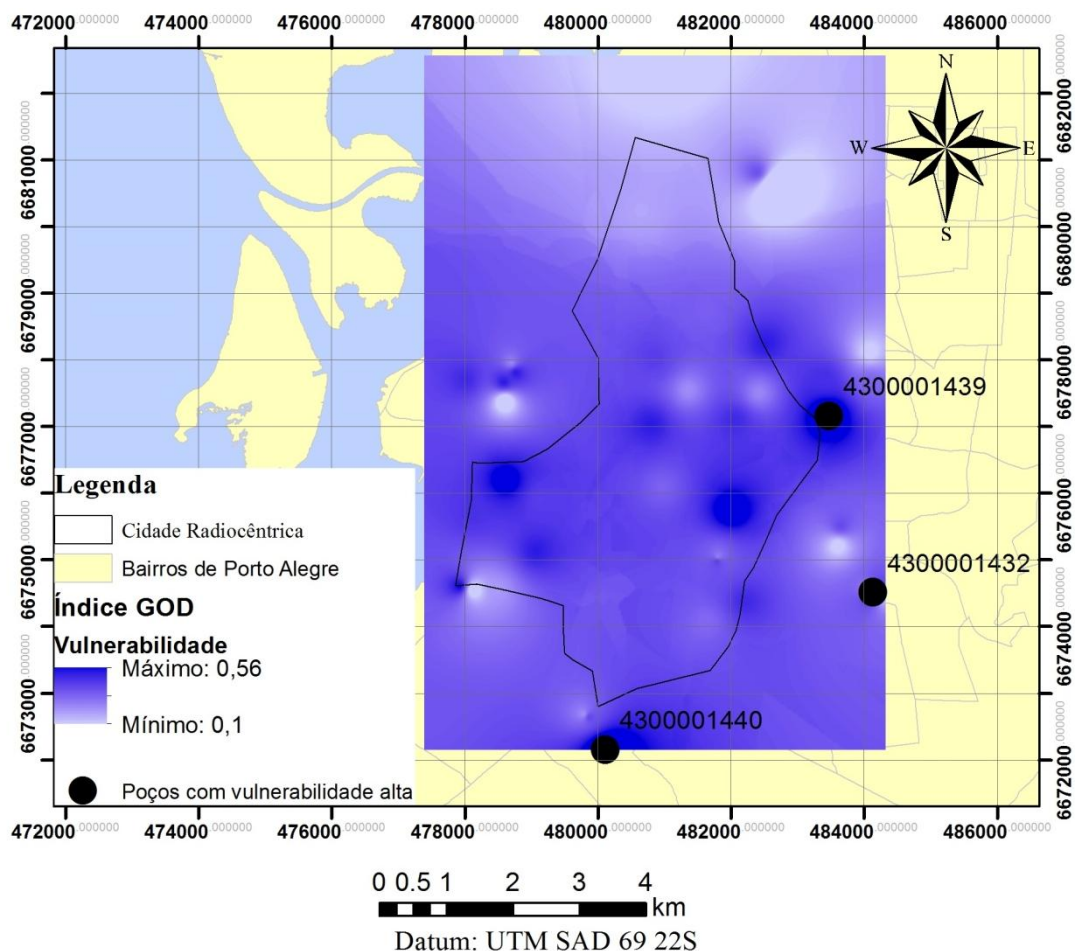


Figura 17 – Vulnerabilidade e poços com elevados índices GOD - stretched

4.3.CÁLCULO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO

Foram calculados os perímetros de proteção para os poços localizados na macrozona Cidade Radiocêntrica de acordo com o aquífero mais superficial da qual o poço extrai água, seguindo a metodologia apresentada anteriormente no Quadro 7.

Calcularam-se duas zonas de proteção para os poços da Cidade Radiocêntrica: Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) – com a adoção do valor de 10m estabelecido pelo Decreto Estadual N° 42.027/02 do Rio Grande do Sul – e Perímetro de Alerta (PA) de 50 dias de tempo de transito – utilizando Raio Fixo Calculado (RFC) para meios porosos, e os valores do Decreto Estadual N° 32.955/91 de São Paulo para meios fraturados.

Conforme apresentado na Figura 12, a maior parte dos poços da área de estudo capta água de aquíferos fraturados, enquanto que 02 (dois) poços captam água de

sedimentos arenosos e 03 (três) de alterações do granito, as quais, por se tratarem de camadas de sedimentos gerados da alteração das rochas, serão analisadas como meios porosos no cálculo dos perímetros de proteção.

O Quadro 8 apresenta os parâmetros para os cálculos dos perímetros de proteção de cada poço, a camada de coleta d'água, a metodologia utilizada e os resultados.

A Figura 18 apresenta os PIPs e os PAs da área de estudo.

Quadro 8 – Cálculo dos Perímetros Imediatos de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta (PA)

Poço	Coleta d'água	Q Vazão (m³/dia)	b Espessura da camada saturada (m)	n _e Porosidade (FREEZE e CHERRY, 1979)	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS)		Perímetro de Alerta (PA)	
					Método	Raio (m)	Método	Raio (m)
4300000124	Areia	48	5	0,375	Decreto Estadual Nº 42.027/02 do Rio Grande do Sul	10	Raio Fixo Calculado (t=50dias)	20,19
4300001444	Granito alterado	117,6	2	0,325		10		53,66
4300001446	Granito alterado	63,36	3	0,325		10		32,16
4300018110	Granito alterado	24,72	3	0,325		10		$r = \sqrt{\frac{Qt}{n_e b \pi}}$ 20,09
4300001449	Areia	152,88	13	0,375		10		22,34
4300018034	Granito	228	-	-		10	Decreto Estadual Nº 32.955/91 de São Paulo Vazão ≤ 15m³/h: R= 30m Vazão > 15m³/h: R= 50m	50
4300018057	Gnaisse	4,08	-	-		10		30
4300018067	Gnaisse	172,8	-	-		10		50
4300018072	Granito	14,4	-	-		10		30
4300018079	Granito	8,4	-	-		10		30
4300018085	Granito	240	-	-		10		50
4300018096	Granito	84	-	-		10		50
4300018097	Granito	600,24	-	-		10		50
4300018101	Gnaisse	288	-	-		10		50
4300018107	Gnaisse	132,72	-	-		10		50
4300018108	Gnaisse	42,24	-	-		10	50	

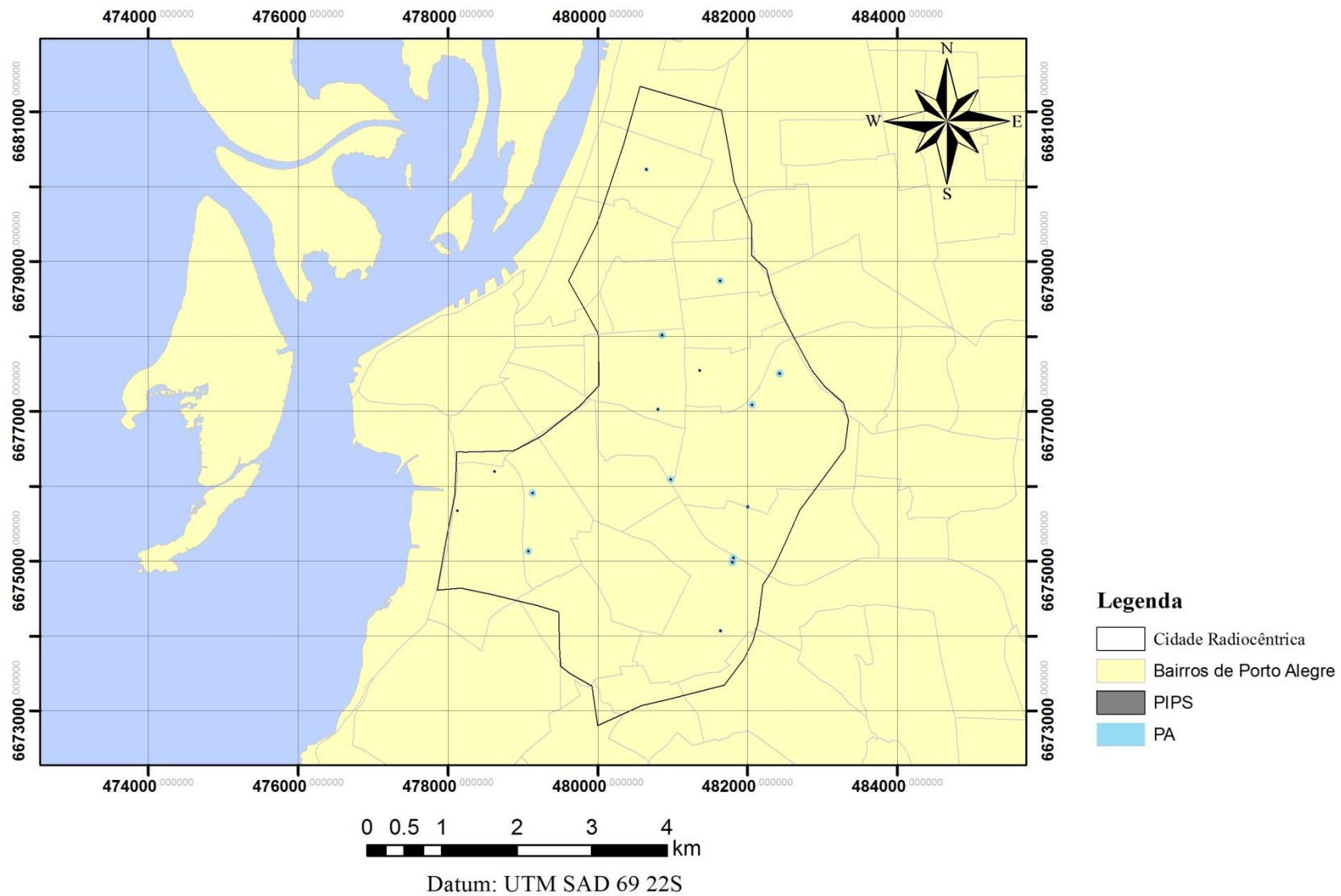


Figura 18 – Perímetros de Proteção na Cidade Radiocêntrica

Os Perímetros Imediatos de Proteção Sanitária são de difícil visualização devido à sua pequena extensão de apenas 10m. Pode-se perceber a semelhança dos resultados entre os Perímetros de Alerta calculados pela metodologia do Raio Fixo Calculado e pelos valores adotados baseados no Decreto supracitado. Os raios encontrados pelo RFC variam entre 20,09 e 53,66m.

4.4.CARGAS CONTAMINANTES NA ÁREA DE ESTUDO

Nos Alvarás Cadastrados disponibilizados pela SMIC em seu site, foram encontradas 661 atividades potencialmente contaminantes nos bairros que constituem a Cidade Radiocêntrica, dentre indústrias, oficinas mecânicas, postos de gasolina e cemitérios. Dentre esses empreendimentos, nem todos estão inseridos na área de estudo, pois há muitos bairros que não são completamente englobados pela macrozona avaliada.

As atividades localizadas dentro da Cidade Radiocêntrica e em suas proximidades foram consideradas, sendo as restantes descartadas, resultando em um total de 548 fontes potencialmente contaminantes. As atividades consideradas foram classificadas de acordo com o método POSH (Quadro 5), conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Atividades potencialmente contaminantes na macrozona Cidade Radiocêntrica

Atividade	Quantidade	Índice POSH
Oficinas mecânicas	394	3
Postos de gasolina	131	2
Indústrias	19	Varia com a atividade
Cemitérios	4	1

A maior parte das indústrias consideradas está localizada no norte da área de estudo, nos bairros Floresta e São Geraldo. Conforme indicado pela Tabela 7, as indústrias possuem um índice POSH que variam de acordo com o tipo. A Tabela 8 apresenta os diferentes tipos de indústrias que foram listados dentre os empreendimentos considerados – de acordo com o que é definido pela SMIC – e os respectivos índices POSH.

Tabela 8 – Atividades industriais analisadas

Atividade*	Quantidade	Índice POSH
Fabricação de elementos e produtos químicos	2	3
Fabricação de estruturas metálicas	1	3
Fabricação de outros artefatos de metal	4	3
Fabricação de produto farmacêutico e veterinário	8	3
Fabricação de produtos farmacêuticos e hospitalares	1	3
Fabricação de sabões, detergentes e glicerina	3	2

* de acordo com o que é definido pela SMIC

Os cemitérios estão concentrados mais ao sul da Cidade Radiocêntrica, próximos à Avenida Oscar Pereira. Os postos de gasolina e as oficinas mecânicas se encontram espalhados pela área de estudo. Ressalta-se a pequena quantidade de fontes potencialmente contaminantes localizados na parte mais central da macrozona, especialmente nos bairros Moinhos de Vento, Rio Branco e Bela Vista.

Um *buffer* de 100m foi dado em cada atividade considerada pontual (conforme informado no item 3.3), os cemitérios foram considerados polígonos, e as áreas geradas foram interligadas quando possível, gerando as Zonas de Concentração de Atividades Contaminantes (ZCAC).

A Figura 19 apresenta as atividades consideradas (indústrias, postos de gasolina e oficinas mecânicas), distribuídas e classificadas de acordo com seu índice POSH, além da ZCAC supracitada.

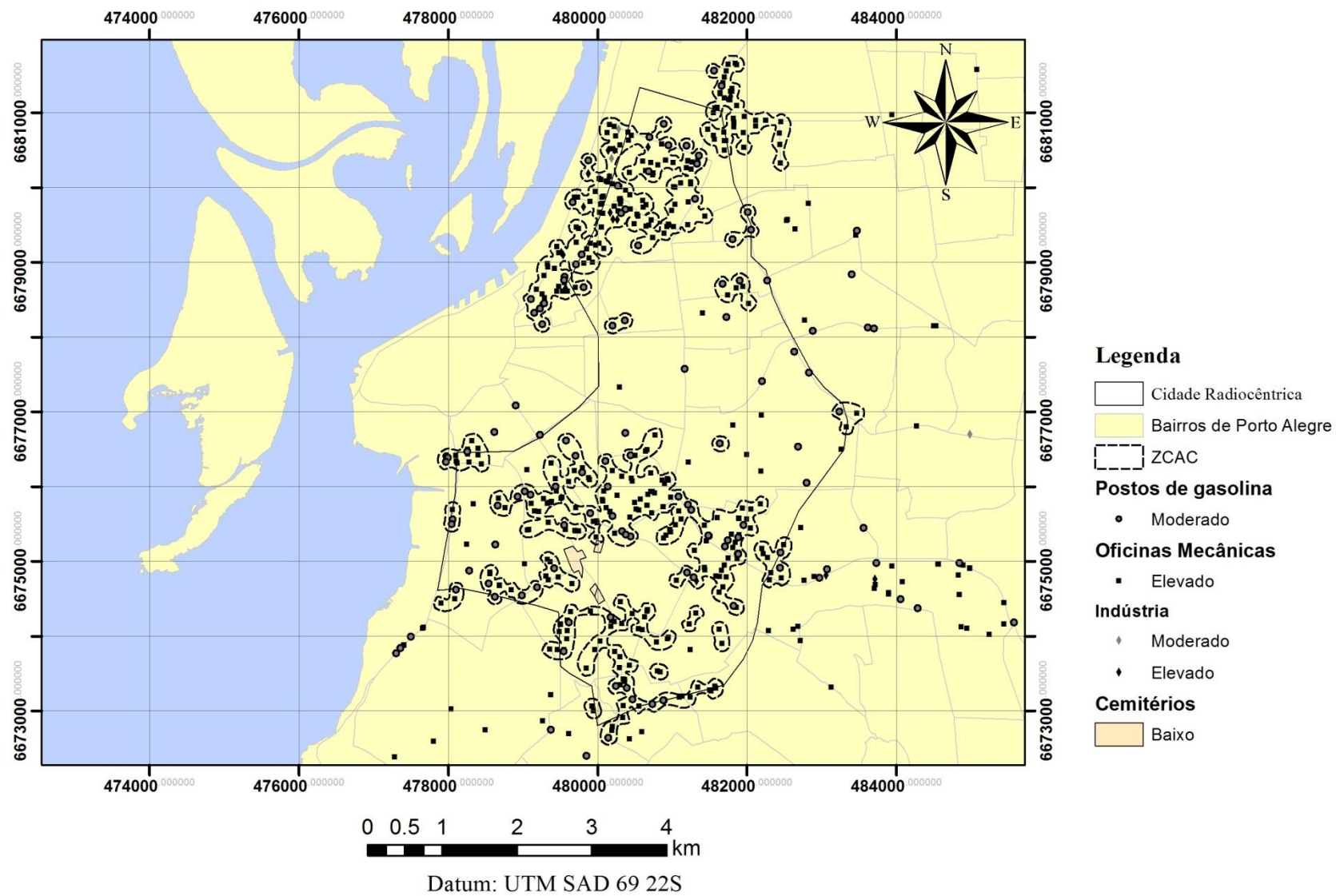


Figura 19 – Distribuição das cargas contaminantes

Os empreendimentos não enquadrados dentro da Zona de Concentração de Atividades Potencialmente Contaminantes foram considerados pontuais. Eles estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Atividades consideradas pontuais

Atividade	Quantidade	Índice POSH
Posto de abastecimento	15	2
Oficina mecânica	11	3

As atividades localizadas dentro da ZCAC tiveram seus índices POSH interpolados pelo método IDW. O modelo gerado, juntamente com as atividades pontuais e os cemitérios, todos com a classificação POSH, estão apresentados na Figura 20.

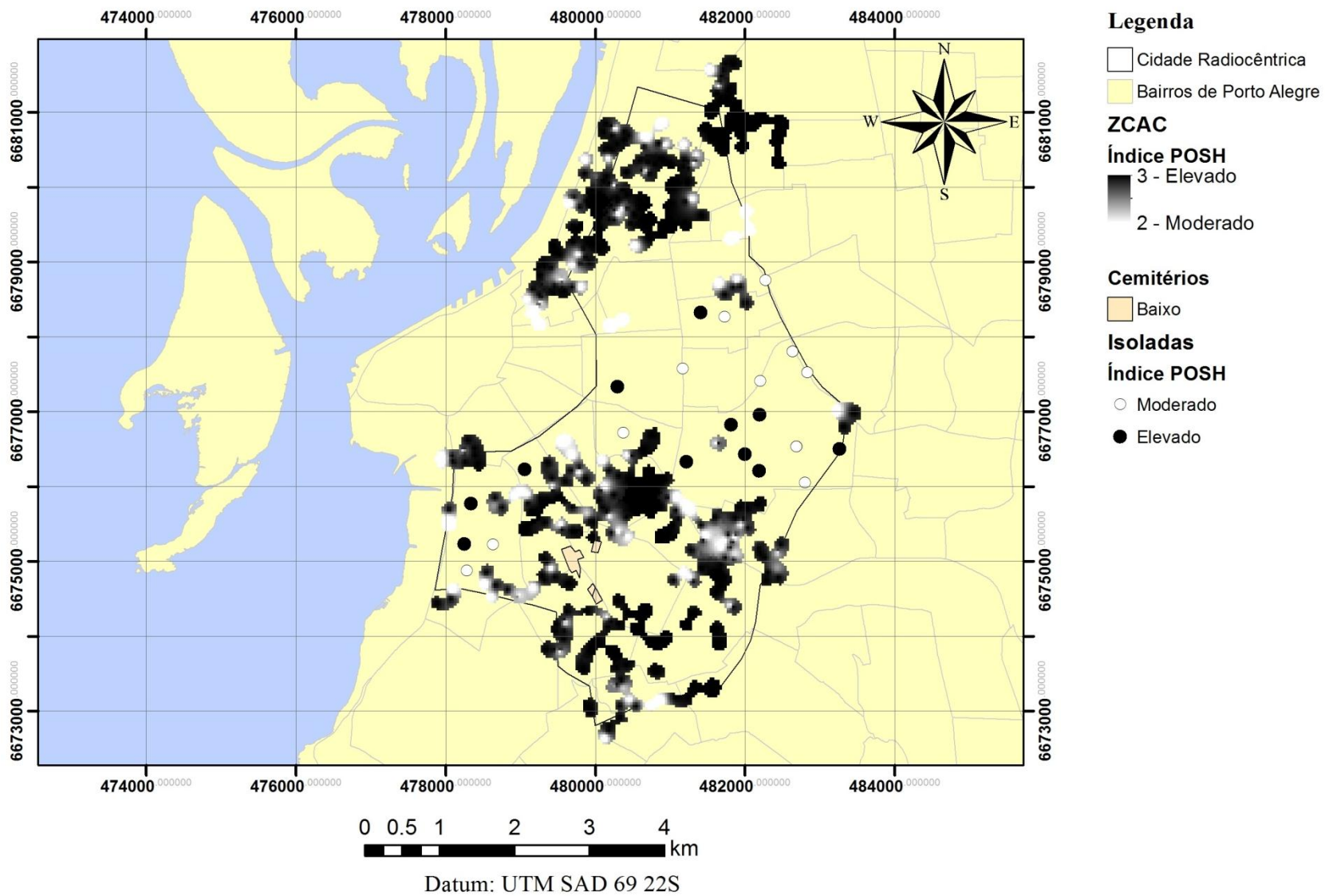


Figura 20 – Cargas contaminantes (ZCACs e pontuais) na Cidade Radiocêntrica

4.5.RISCO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O *layer* de vulnerabilidade (apresentado na Figura 15) foi multiplicado pelo *layer* de Zona de Concentração de Atividades Contaminantes (apresentado na Figura 20) pela Equação 11 apresentada anteriormente no item 3.4. Os resultados foram classificados dentre os limites estabelecidos pela Tabela 1. As fontes de contaminação pontuais – localizadas fora da ZCAC, apresentadas na Tabela 9 – tiveram também seu risco calculado conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Risco de contaminação calculado para fontes pontuais

Atividade	GOD	Risco	Classe de contaminação
Posto de abastecimento	0,36	0,24	Moderado
Posto de abastecimento	0,32	0,21	Moderado
Posto de abastecimento	0,37	0,25	Moderado
Posto de abastecimento	0,30	0,20	Moderado
Posto de abastecimento	0,30	0,20	Moderado
Posto de abastecimento	0,39	0,26	Elevado
Posto de abastecimento	0,39	0,26	Elevado
Posto de abastecimento	0,36	0,24	Moderado
Posto de abastecimento	0,36	0,24	Moderado
Posto de abastecimento	0,36	0,24	Moderado
Posto de abastecimento	0,36	0,24	Moderado
Posto de abastecimento	0,34	0,23	Moderado
Posto de abastecimento	0,39	0,26	Elevado
Posto de abastecimento	0,38	0,25	Elevado
Posto de abastecimento	0,39	0,26	Elevado
Oficina de reparação e manutenção de veículos	0,40	0,40	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,39	0,39	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,36	0,36	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,35	0,35	Elevado
Oficina de reparação e manutenção de veículos	0,41	0,41	Elevado
Oficina de retificação de motores	0,39	0,39	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,39	0,39	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,36	0,36	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,40	0,40	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,39	0,39	Elevado
Oficina mecânica para automóveis	0,37	0,37	Elevado

Analisando a tabela acima, constata-se que a maior parte das fontes de contaminação pontuais (16 dentre as 26) representa um perigo de contaminação elevado à água subterrânea.

O risco de contaminação da água subterrânea da macrozona Cidade Radiocêntrica, tanto para fontes pontuais como para as localizadas na ZCAC, está apresentado na Figura 21.

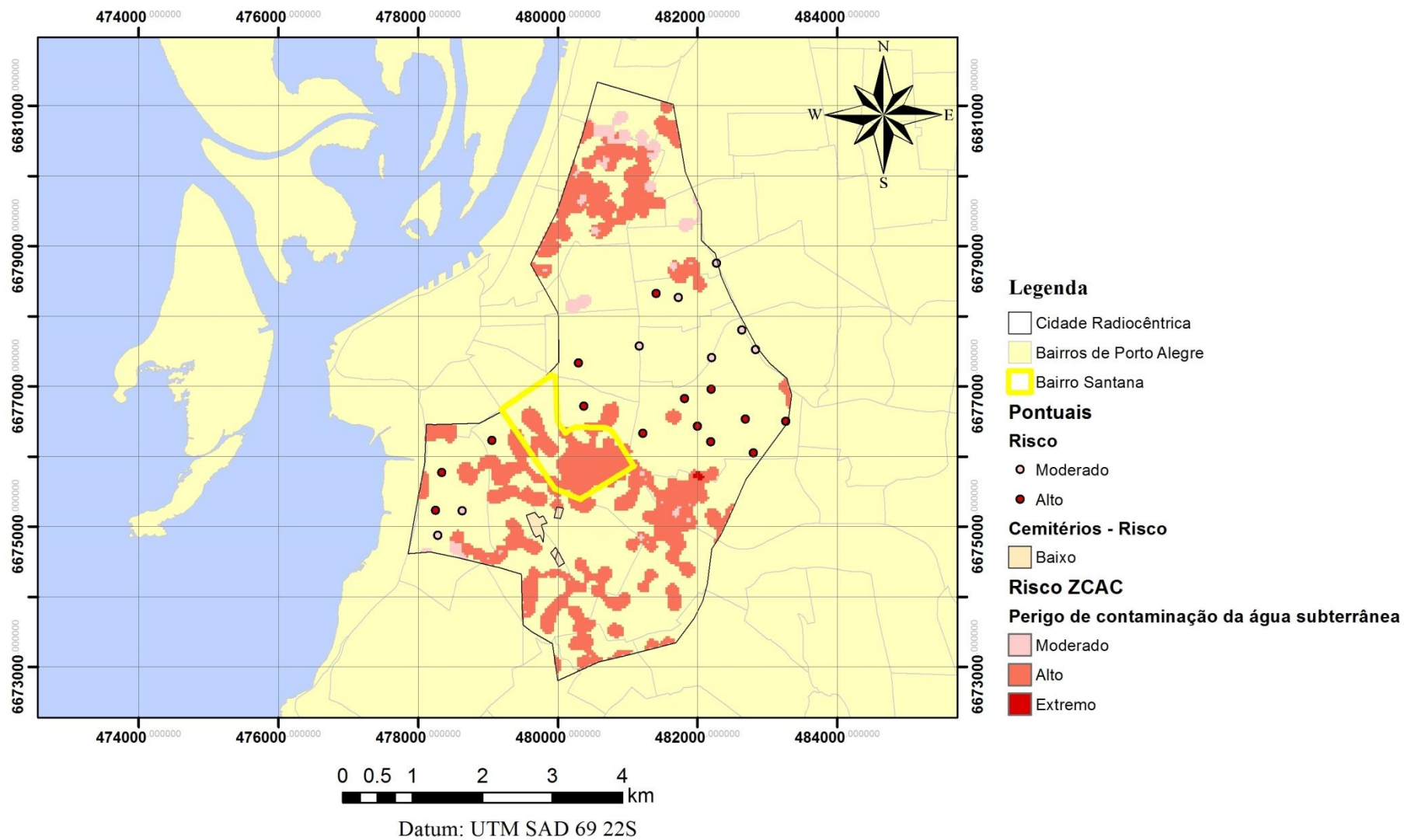


Figura 21 – Risco de contaminação da água subterrânea da macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre

A Figura 22 apresenta o histograma do risco de contaminação da Zona de Concentração de Atividades Contaminantes. É possível notar que o risco varia entre elevado e moderado, ficando na maior parte das ZCAC's em elevado. Há pequenos focos de risco extremo.

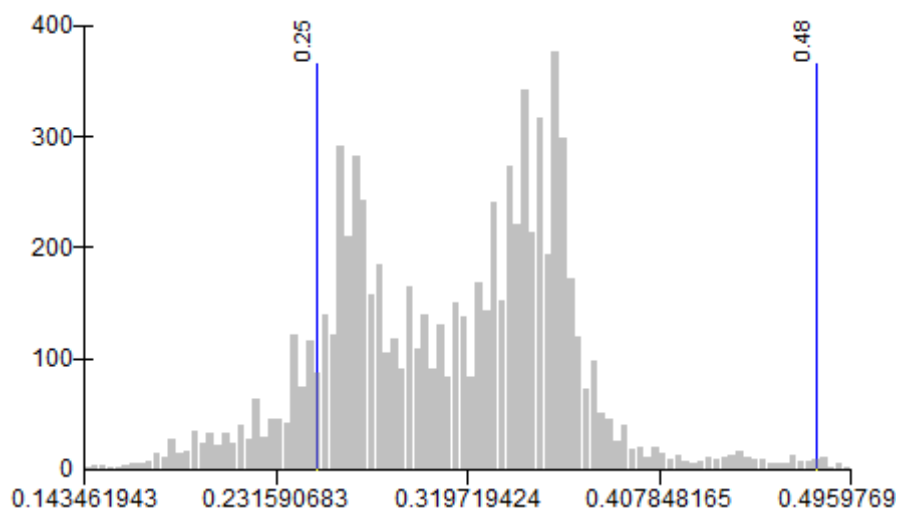


Figura 22 – Histograma do risco de contaminação da ZCAC

Percebe-se que, entre os bairros localizados na macrozona Cidade Radiocêntrica, o Santana é aquele que apresenta maior risco de contaminação. Em oposição, a região mais central da Cidade Radiocêntrica, em especial nos bairros Moinhos de Vento, Rio Branco e Bela Vista, apresentam um menor perigo de contaminação da água subterrânea em função do pequeno número de atividades potencialmente contaminantes nessa localidade.

Quando sobrepostos as zonas de proteção – Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e Perímetro de Alerta (PA) apresentados na Figura 3 aos dados de perigo de contaminação da água subterrânea apresentados na Figura 21, tem-se os poços de água subterrâneas com maior perigo de contaminação. Dos 16 poços localizados na Cidade Radiocêntrica, 3 deles possuem atividades contaminantes dentro do Perímetro de Alerta e 1 possui dentro do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, conforme apresentado abaixo no Quadro 9.

Quadro 9 – Poços da Cidade Radiocêntrica com maior perigo de contaminação

Poço	Proprietário	Risco		Atividade Potencialmente Contaminante			
		Calculado	Perigo	Dentro de PIPS		Dentro de PA	
4300001446	Posto de Combust. Pernambuco	0,26	Elevado	Atividade	Oficina mecânica	-	
				Índice POSH	3		
4300018034	Empresa Gasômetro Transportes	0,33	Elevado	-		Atividade	Oficina mecânica
						Índice POSH	3
						Atividade	Oficina mecânica
						Índice POSH	3
4300018079	Creche Santa Rita de Luca	0,33	Elevado	-		Atividade	Oficina mecânica
						Índice POSH	3
4300018096	ZH Edit. Jornalístico	0,26	Elevado	-		Atividade	Posto de abastecimento
						Índice POSH	2

Pode-se perceber que os 4 poços apresentados pela Tabela 10 correm um alto risco de contaminação. Destaca-se que o poço 4300018034 (utilizado pela Empresa Gasômetro Transportes) possui duas atividades contaminantes localizadas dentro do Perímetro de Alerta.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Seguindo a concepção de prevenção da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, o presente trabalho buscou o estabelecimento de um índice para elencar locais prioritários para a execução de medidas preventivas da degradação da qualidade dos aquíferos de Porto Alegre, utilizando informações de vulnerabilidade, zonas de proteção e fontes potenciais de contaminação, resultando em uma avaliação de risco da contaminação da água subterrânea.

Em função da disponibilidade de dados, foi analisada a macrozona Cidade Radiocêntrica do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre.

A região possui uma vulnerabilidade média na sua maior parte, contendo algumas áreas com valores classificados como baixos.

Os raios dos Perímetros Imediatos de Proteção Sanitária (PIPS) adotados foram de 10m, enquanto que os raios dos Perímetros de Alerta (PA) calculados pelo método Raio Fixo Calculado (RFC) variaram entre 20,09 e 53,66m, e os adotados com base no Decreto Estadual Nº 32.955/91 de São Paulo possuem valor de 30 ou 50m.

Em relação às fontes potenciais de contaminação, observam-se na região, de acordo com os dados da SMIC, 548 fontes potenciais de contaminação compostas por postos de gasolina, oficinas mecânicas, indústrias e cemitérios. Algumas dessas fontes foram agrupadas em regiões denominadas Zonas de Concentração de Atividades Contaminantes (ZCAC), sendo as restantes avaliadas pontualmente.

O risco foi classificado como variando entre moderado e elevado, tanto na ZCAC como nas atividades pontuais.

A sobreposição dos perímetros de proteção permitiu a identificação de 4 zonas de proteção de poços com a presença de atividades contaminantes, as quais, de acordo com a metodologia utilizada, forneciam um risco elevado de contaminação à água subterrânea.

Deve-se destacar a limitação da qualidade da descrição dos perfis dos poços que constam no SIAGAS, além da baixa densidade de poços cadastrados em algumas regiões do município. Um maior número de poços, assim como uma maior precisão descritiva, poderiam fornecer resultados mais precisos para Porto Alegre.

Observou-se que o levantamento das fontes contaminantes constitui uma das informações fundamentais do trabalho, já que, era possível a indexação de um risco apenas nos regiões onde foi detectada a ocorrência dessas atividades. Enquanto uma limitação na descrição do perfil do poço resultaria em um índice de vulnerabilidade não tão preciso, o não cadastramento de fontes contaminantes teria como resultado uma área considerada sem risco.

Ainda assim, o levantamento de 548 fontes potencialmente contaminantes, especialmente aquelas que se encontram na ZCAC, apresentam a dispersão dessa categoria de empreendimentos pela região avaliada. Sendo assim, o índice de risco elaborado pode servir como guia para priorização de atividades de prevenção da contaminação da água subterrânea da macrozona Cidade Radiocêntrica do município de Porto Alegre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz et al. **Plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**: proposta preliminar, Águas Subterrâneas, 2010.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.; HACKETT, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. USEPA, EPA/600/2-87/035, EUA, 1987.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). 2007. **Panorama do enquadramento dos corpos d'água/panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Disponível em: < <http://pnqa.ana.gov.br/>>. Acesso em: 21 nov. 2013.

BatchGeo LLC. **BatchGeo database**. Disponível em: <http://www.batchgeo.com>.

BRADBU, K. R. et al. **Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks**. Wisconsin Geological and Natural History Survey, Madison, WI (United States), 1991.

BRASIL. Decreto-Lei nº 227/67, de 28 de fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940.

CONAMA. Resolução 396 de 03/04/2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. 11 p.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; **Projeto Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre - PDM** (Mapa Geológico Integrado - escala 1:250.000). Porto Alegre, 2006.

CUTRIM, A.; CAMPOS, J. **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. V39, p. 401-411.

DE ALMEIDA JÚNIOR, Francisco Jocélio Bezerra et al. **Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe**, Estado do Ceará, Brasil. Rem: Revista Escola de Minas, v. 62, n. 2, p. 227-236, 2009.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DE PORTO ALEGRE. DMAE. **Plano diretor de água (2008-2009)**. Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmae/>>. Acesso em: 28 jul. 2013.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2000. Disponível em: <www.ibge.com.br/>. Acesso em: 21 nov. 2013.

FETTER, Charles Willard. **Applied hydrogeology**. 4ª edição. USA: Prentice hall, 2001.

FETTER, Charles Willard. **Contaminant hydrogeology**. 2ª edição. USA: Prentice hall, 1999.

FOSTER, S. e HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available**. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1998. 78p.

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, Washington, D.C. 2006.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New York: Prentice Hall, Inc. 1979, 604p.

GOGU, R.; DASSARGUES, A. **Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods**. Environmental geology, v. 39, n. 6, p. 549-559, 2000.

IRITANI, M & EZAKI, S. **Roteiro Orientativo para Delimitação de Área de Proteção de Poço**. Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. 48p.

LIVINGSTONE, S., FRANZ, T., GUIGUER, N.. **Managing Ground-water Resources Using Wellhead Protection Programs**. Geoscience Canada, North America, 22, sep. 1995. Disponível em: <<http://journals.hil.unb.ca/index.php/GC/article/view/3879/4393>>. Acesso em: 27 Jul. 2013.

MARTELLI, G. V.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; DA SILVA, J. L. S. **Determinação de Áreas de Risco Potencial de Contaminação das Águas Subterrâneas na Área Urbana de Cacequi/RS – Brasil**. XIV World Water Congress, Porto de Galinhas, 2011.

NAVARRETE, C.; GARCÍA, A. **Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano**. Metodología y aplicación al territorio. Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS. IGME. Madrid, 2003. ISBN: 84-7840-496-1

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1993.

PINHEIRO, R. J. B.; RAUBER, A. C. C.; DA SILVA, J. L. S. **Suscetibilidade à Contaminação dos Aquíferos no Município de Santa Maria – RS**. VII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. Santa Maria, 2013.

PORTO ALEGRE. Lei Nº 7.560, de 22 de dezembro de 1994. Cria o Cadastro Municipal de Poços Tubulares Profundos.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Decreto N° 23.430, de 24 de outubro de 1974, Aprova Regulamento que dispõe sobre a promoção, proteção e recuperação da Saúde Pública.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Lei n° 10.350, de 30 de dezembro de 1994, Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Decreto Estadual n° 42.047, de 26 de dezembro de 2002. Regulamenta disposições da Lei N° 10.350, de 30 de dezembro de 1994, com alterações, relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul.

SCHWARZBACH, M.; MORANDI, I. **Avaliação Da Variabilidade Temporal Das Características Físicoquímicas Das Águas Subterrâneas Dos Poços Tubulares Profundos Do Município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.** Águas Subterrâneas, Porto Alegre, 2000.

SÃO PAULO. Decreto Estadual N° 32.955, de 07 de fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei N° 6.134, de 2 de junho de 1988. São Paulo, 1991.

STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping.** Canadian Water Resources Journal, v. 18, n. 1, p. 25-37, 1993.

TAVARES, Paulo Roberto Lacerda et al. **Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil.** Rem: Rev, Esc. Minas, Ouro Preto. v. 62, n. 2, June 2009.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. **Perímetros de proteção de poços: uma importante ferramenta para a sustentabilidade de mananciais públicos.** Água Subterrâneas, 2005.