



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades



Doutorado

Engenharia Civil e Ambiental

LUCAS SCARPANTI DE JESUS

**PROPOSTA PARA A PRIORIZAÇÃO DA FISCALIZAÇÃO DE
ATIVIDADES INDUSTRIAIS COM POTENCIAL DE POLUIÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.**

Bauru
2021

LUCAS SCARPANTI DE JESUS

**PROPOSTA PARA A PRIORIZAÇÃO DA FISCALIZAÇÃO DE
ATIVIDADES INDUSTRIAIS COM POTENCIAL DE POLUIÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

Bauru
2021



Jesus, Lucas Scarpanti de.

Proposta para priorização da fiscalização de atividades industriais com potencial de poluição das águas subterrâneas / Lucas Scarpanti de Jesus, 2021

179 f.: il.

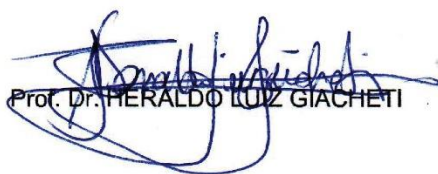
Orientador: Heraldo Luiz Giacheti

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2021

1. Águas Subterrâneas. 2. Potencial Poluidor 3. Vulnerabilidade de Aquíferos. 4. Áreas de proteção de poços. 5. SIG. 6. Densidade de Kernel. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LUCAS SCARPANTI DE JESUS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 dias do mês de agosto do ano de 2021, às 14:00 horas, no(a) Via Sistema de videoconferência e outras ferramentas de comunicação a distância, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LUCAS SCARPANTI DE JESUS, intitulada **PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO E CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DA FISCALIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CAUSADAS POR ATIVIDADES INDUSTRIAIS..** A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profª Drª ANA ELISA SILVA DE ABREU (Participação Virtual) do(a) DGRN / Instituto de Geociências - IG-UNICAMP, Prof. Dr. CRISTIANO KENJI IWAI (Participação Virtual) do(a) Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental / CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Prof. Dr. FABIANO TOMAZINI DA CONCEIÇÃO (Participação Virtual) do(a) Geografia e Planejamento Ambiental / IGCE - UNESP/Rio Claro (SP), Prof. Dr. PAULO CESAR LODI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: **LUCAS SCARPANTI DE JESUS**

DE: "PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO E CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DA FISCALIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CAUSADAS POR ATIVIDADES INDUSTRIAIS".

PARA:

PROPOSTA PARA PRIORIZAÇÃO DA FISCALIZAÇÃO DE
ATIVIDADES INDUSTRIAIS COM POTENCIAL DE POLUIÇÃO
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Bauru, 05 de agosto de 2021.


Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti
Orientador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Dirceu e Elizete, que sempre me apoiaram e me ensinaram a ter perseverança, retidão e resistência na busca de meus objetivos, e a minha esposa Erika que também sempre me apoiou, foi companheira, e me incentivou com todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me colocar em uma família de bem e lutadora, e por me conceder saúde, paz e força para seguir em frente diante das adversidades.

Agradeço a meus pais Dirceu e Elizete por me possibilitar todas as oportunidades, principalmente de estudo, que me permitiram trilhar esse caminho desde minha infância até ao doutoramento.

Agradeço a minha esposa Erika por todos os fins de semana, férias e feriados que nos privamos juntos de viajar ou ter atividades de lazer e bem-estar para eu me concentrar no desenvolvimento dessa pesquisa, sempre me apoiando com muito amor, carinho, amizade e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti que desde o início do mestrado em 2009 sempre me deu todo apoio, auxílio e ensinamentos, sem os quais certamente não teria alcançado todos os méritos acadêmicos que conquistei.

Agradeço ao Eng. Dr. Marcos Tanaka Riyis por todo apoio e todas as dicas e críticas construtivas que me auxiliariam muito em minha pesquisa, pela parceria na elaboração de artigos científicos, e pela amizade de longa data também me auxiliando desde meu mestrado.

Agradeço à UNESP, campus de Sorocaba e de Bauru, todos seus professores e funcionários, responsáveis por praticamente toda minha formação profissional, que me deram a base e a competência para o mercado de trabalho.

Agradeço a todos os amigos de trabalho nas Agências Ambientais da CETESB de Itapetininga e de Sorocaba, em especial ao Geólogo Dirceu Micheli, ao Químico Edegar Hirai, ao Eng. MSc. Ezio Mantegazza e ao Tecnólogo Rafael Dal Medico Neto, por todo apoio e auxílio.

Agradeço à CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo pelo apoio e pelo fornecimento dos dados para a realização da pesquisa.

Resumo

Como existem múltiplas fontes de poluição e dificuldade em estabelecer critérios de priorização de áreas a serem investigadas, é necessário utilizar ferramentas e técnicas que possibilitem orientar e planejar inspeções de campo. Essa tese apresenta uma proposta para priorização na fiscalização de indústrias, fontes potenciais de poluição da água subterrânea, e sua aplicação em três municípios do interior de São Paulo. A proposta elaborada é baseada no potencial poluidor das fontes, na vulnerabilidade dos aquíferos e em áreas de proteção de poços de captação de raio fixo de 500 m. A partir do cruzamento desses três componentes em um Sistema de Informações Geográficas propôs-se o Índice de Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção a Poluição das Águas Subterrâneas, resumindo em inglês índice EIP – *Envinronmental Inspections Prioritization*. O Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo foi utilizado para a elaboração de índice de classificação de potencial poluidor para contaminação em geral e por DNAPLs denominado PPOF – *Pollution Potential by Occurrence Frequency*. O potencial poluidor foi avaliado aplicando-se o método POSH-IG e o Índice PPOF sobre o cadastro de atividades fontes de poluição da CETESB. A vulnerabilidade dos aquíferos foi obtida pelo método GOD utilizando a hidrogeologia regional. Delimitou-se as áreas de proteção para os poços cadastrados no DAEE. Essas foram priorizadas pelas vazões outorgadas propondo-se o índice FQ – Fator de vazão, ou com base nos tempos de trânsito em 500 m propondo-se o índice PTOT – *Prioritization by Time of Travel*. Os índices foram analisados por mapas de densidade de Kernel. Foram priorizadas 114 fontes com foco em DNAPLs e 231 fontes com foco em contaminação em geral como de alta prioridade para inspeção do universo de 2887, reduções de 96% e 91,8%, respectivamente. Os mapas de densidade revelaram um *hot spot* de 1,62 km² e 21 indústrias com foco em contaminação por DNAPLs, e dois *hot spots* somando 2,71 km² e 95 empresas com foco em contaminação em geral, todos de alta prioridade para inspeção. Os critérios propostos foram satisfatórios na priorização de fontes e indicação de áreas de interesse para realização de inspeções ambientais na área de estudo, porém com limitações que os tornam orientadores e não determinantes dessas ações.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas, Potencial Poluidor, Vulnerabilidade de Aquíferos, Áreas de proteção de poços, SIG, Densidade de Kernel.

Abstract

As there are multiple sources of pollution and difficulty in establishing criteria for prioritizing areas to be investigated, it is necessary to use tools and techniques that make it possible to guide and plan field inspections. This thesis presents a proposal for prioritizing inspection of industries, potential sources of groundwater pollution, and its application in three municipalities in the interior of São Paulo. The proposal developed is based on the polluting potential of the sources, the vulnerability of the aquifers and on a fixed radius well-head protection area of 500 m. From the crossing of these three components in a Geographic Information System, the Environmental Inspections Prioritization - EIP Index was proposed, aiming at the Prevention of Groundwater Pollution. The Register of Contaminated and Rehabilitated Sites in the State of São Paulo was used to prepare a classification index of polluting potential for contamination in general and by DNAPLs called PPOF – Pollution Potential by Occurrence Frequency. The pollution potential was evaluated by applying the POSH-IG method and PPOF Index on the registration activities sources of pollution CETESB. Aquifer vulnerability was obtained by the GOD method using regional hydrogeology. The well-head protection areas were delimited for wells registered in the DAEE. These were prioritized by the granted flows, proposing the FQ index - Flow factor, or based on the transit times in 500 m, proposing the PTOT index – Prioritization by Time of Travel. The indices were analyzed by Kernel density maps. 114 sources focused on DNAPLs and 231 sources focused on contamination in general were prioritized as high priority for inspection of the universe of 2887, reductions of 96% and 91.8% respectively. Density maps revealed a 1.62 km² hot spot with 21 industries focusing on DNAPL contamination, and two hot spots totaling 2.71 km² with 95 companies focusing on overall contamination, all of high priority for inspection. The proposed criteria were satisfactory in prioritizing sources and indicating areas of interest for carrying out environmental inspections in the study areas, but with limitations that make them orienting and not determining these actions.

Keywords: Groundwater, Polluting Potential, Aquifer Vulnerability, Well Head Protection Areas, GIS, Kernel Density.

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura dos órgãos ambientais estaduais para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Brasil (modificado de TEIXEIRA et al., 2016).	15
Figura 2 – Número de áreas contaminadas conhecidas no Brasil por estados (MMA, 2020).	16
Figura 3 – O Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo (baseado em CUNHA, 2017).	19
Figura 4 – Exemplo da ficha de cadastro do Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo.	21
Figura 5 – e-Cenários, pontos referentes às indústrias da região abrangida pela Agência Ambiental de Sorocaba. A dispersão de pontos para fora do estado e regiões Sul, Central e Norte do estado de São Paulo demonstram a necessidade de melhoria na validação da localização geográfica.	23
Figura 6 – Regiões Prioritárias para a Identificação de Áreas Contaminadas, conforme a Resolução SMA nº 11 de 08 de fevereiro de 2017.	29
Figura 7 – Distribuição conceitual de um derramamento de LNALP no subsolo e evolução da pluma de fase dissolvida resultante (SUTHERSAN et al., 2017).	31
Figura 8 – Distribuição conceitual de um derramamento de DNALP no subsolo e evolução da pluma de fase dissolvida resultante (SUTHERSAN et al., 2017).	33
Figura 9 – Áreas contaminadas no estado de São Paulo por grupos de contaminantes em dezembro de 2020 (CETESB, 2020).	35
Figura 10 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (FOSTER et al., 2006).	42
Figura 11 - Parâmetros e representação esquemática do método de Wyssling (1997) (IRATANI e EZAKI, 2012).	55
Figura 12 – Representação esquemático do conceito de perigo de contaminação da água subterrânea (FOSTER et al. 2006).	57
Figura 13 - Nível de prioridade das ações de controle da contaminação da água subterrânea, com base na vulnerabilidade do aquífero, nas áreas de proteção das fontes de água subterrânea e na carga contaminante potencial (FOOSTER et al., 2006).	58

Figura 14 – Representação esquemática da integração de três aspectos distintos da tecnologia computacional de SIG (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).	60
Figura 15 - SIG: dados vetoriais e atributos.	62
Figura 16 - Dados Matriciais (<i>raster</i>) e atributos.	62
Figura 17 - SIG: sobreposição de dados sobre ortofotos do Estado de São Paulo da Emplasa (2010).	63
Figura 18 - O princípio da função de Kernel (adaptado de ERDOGAN et al., 2008)	68
Figura 19 – Exemplos de funções de Kernel.	68
Figura 20 – Aplicação da interpolação de Kernel: a) função de Epanechnikov; b) função quártica.	69
Figura 21 – Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo	71
Figura 22 – Mapa das Unidades Litoestratigráficas da Área de Estudo (CPRM, 2006).	73
Figura 23 – Mapa de Águas Subterrâneas da Área de Estudo (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).	77
Figura 24 - Recorte da Região da Área de Estudo do Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (IG/DAEE/CETESB, 1997).	79
Figura 25 - Mapa de Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Poluição de Sorocaba (Recortado de DAEE/LEBAC, 2013).	80
Figura 26 - Estimativa de densidade de Kernel a esquerda e número de pontos numa malha regular de 1x1 km ² a direita para o mesmo conjunto de dados.	88
Figura 27 – Representação esquemática das etapas para definição do Índice EIP e sua representação em mapas Kernel.	92
Figura 28 – Valores dos possíveis resultados do IPC – Índice de Perigo de Contaminação, para os cruzamentos dos índices POSH-IG com GOD e PPOF com GOD.	95
Figura 29 – Valores dos possíveis resultados do EIP – Priorização de Inspeções Ambientais para os cruzamentos dos índices IPC com o PTOT ou FQ.	95
Figura 30 – Mapeamento dos perímetros de proteção com raio de 500 m: a esquerda o <i>raster</i> dos raios com elevação igual as vazões (somando nas interseções de raios); a direita os raios após a classificação pelo tempo de trânsito.	97

Figura 31 – Cone de bombeamento para três poços explorando o mesmo aquífero. Cada poço possui vazões de bombeamento diferente, assim, o nível dinâmico de cada poço considerando o bombeamento individual é diferente (FETTER, 2001).....	98
Figura 32 – Resultados da análise de Pareto para contaminação em geral (na abscissa tem-se os números das divisões do CNAE 2.0).....	101
Figura 33 – Resultados da análise de Pareto para contaminação por DNAPLs (na abscissa tem-se os números das divisões do CNAE 2.0)	101
Figura 34 – Mapas de densidade de indústrias por índice POSH-IG.	107
Figura 35 – Mapas de densidade de indústrias por índice PPOF para contaminação geral.	108
Figura 36 – Mapas de densidade de indústrias por índice PPOF para contaminação por DNAPLs.	109
Figura 37 – Mapas de densidade de indústrias para os índices POSH-IG e PPOF.	110
Figura 38 – Mapa da Vulnerabilidade de Aquíferos na área de estudo pelo método GOD.....	112
Figura 39 – Aquíferos e Camada dos Poços Cadastrados no DAEE (2020).	115
Figura 40 – Tempos de Trânsito Estimados para o Raio de 500m nos aquíferos de interesse na área de estudo.	117
Figura 41 – Classificação PTOT para áreas de proteção com raio de 500 m dos poços de captação que exploram o Aquífero Tubarão.	119
Figura 42 – Classificação PTOT para áreas de proteção com raio de 500 m dos poços de captação que exploram o Aquífero Pré-Cambriano.	120
Figura 43 – Avaliação dos níveis estáticos disponíveis no SIAGAS (CPRM, 2020).	121
Figura 44 – Gráfico <i>box plot</i> das vazões de cada poço adotada para sua respectiva área de proteção com raio de 500 m, com aplicação do somatório em áreas sobrepostas.	122
Figura 45 – Mapa de priorização das áreas de proteção de poços considerando as vazões outorgadas, sem avaliar o tempo de trânsito.....	123
Figura 46 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice POSH-IG.....	125
Figura 47 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice POSH-IG, sem considerar os Depósitos Quaternários.	126

Figura 48 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice PPOF para contaminação geral.....	127
Figura 49 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice PPOF para contaminação por DNAPLs.....	128
Figura 50 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o POSH-IG.....	131
Figura 51 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o PPOF para contaminação geral.	131
Figura 52 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o PPOF para DNAPLs.	132
Figura 53 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices POSH-IG, GOD e PTOT.	134
Figura 54 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-geral, GOD e PTOT.....	135
Figura 55 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas Subterrâneas composto com os índices PPOF- DNAPL, GOD e PTOT.....	136
Figura 56 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices POSH-IG, GOD e FQ.....	137
Figura 57 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-geral, GOD e PTOT.....	138
Figura 58 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-DNAPL, GOD e FQ.	139
Figura 59 – Análise dos <i>hot spots</i> encontrados para os índices EIP=3 em todas as composições realizadas (os números de fontes foram contados do vetor de pontos e áreas indicadas foram medidas).	141

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Quadro resumo elaborado com objetivo de comparar como se dá o enfrentamento ao problema das áreas contaminadas no Brasil e nos EUA.	13
Tabela 2 – Atividades econômicas definidas como potencialmente geradoras de áreas contaminadas, conforme a Resolução SMA 10 de 08 de fevereiro de 2017.....	27
Tabela 3 – Atividades econômicas definidas como potencialmente geradoras de áreas contaminadas, conforme a Resolução SMA 10 de 08 de fevereiro de 2017 (continuação).	28
Tabela 4 – Métodos para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos (FRANCISCO, 2018).	38
Tabela 5 - Fatores que controlam a vulnerabilidade de aquíferos de acordo com Foster et al. (2002).....	41
Tabela 6 – Classificação e mapeamento de fontes de contaminação difusas no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).	44
Tabela 7 – Classificação das fontes de poluição pontuais no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).	44
Tabela 8 – Classificação das fontes de poluição pontuais industriais no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).	46
Tabela 9 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação (IRATANI et al., 2013)	48
Tabela 10 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação (IRATANI et al., 2013), continuação.....	49
Tabela 11 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação (IRATANI et al., 2013), continuação.....	50
Tabela 12 – Métodos para a determinação de perímetros de proteção de poços (IRATANI e EZAKI, 2012).	54
Tabela 13 – Distâncias radiais para o tempo de trânsito de 50 dias aplicando o método de Wyssling (IRATANI e EZAKI, 2012).	56
Tabela 14 - Resumo sobre dados vetoriais e matriciais e suas vantagens e desvantagens, conforme Lisboa Filho e Iochpe (1996).	64

Tabela 15 – Resumo agrupando e classificando as funções de análise espacial em SIG (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).....	65
Tabela 16 – Exemplos de funções de Kernel.....	69
Tabela 17 - Dados de entrada necessários para a aplicação da metodologia proposta.	82
Tabela 18 - Softwares utilizados para o desenvolvimento e aplicação da metodologia proposta.	82
Tabela 19 – Resumo dos valores e classes dos Índices POSH-IG, GOD, PTOT e EIP.	95
Tabela 20 – Critérios de classificação do Índice PTOT.	97
Tabela 21 – Número de ocorrências de áreas contaminadas por tipologia industrial.	100
Tabela 22 – Critérios de Classificação do Índice PPOF.....	102
Tabela 23 – Índice PPOF - Classificação de priorização para fiscalização com base no número de ocorrências de áreas contaminadas cadastradas por tipologia industrial (divisão do CNAE 2.0).	103
Tabela 24 – Número de Indústrias (Seção C do CNAE 2.0) encontradas com boa acurácia no georreferenciamento nos municípios de Sorocaba, Salto de Pirapora e Votorantim.....	104
Tabela 25 – Síntese dos resultados após tratamento e geoespacialização das informações disponíveis do cadastro de atividades licenciadas ou fiscalizadas pela CETESB no município de Sorocaba (CETESB, 2019a).....	105
Tabela 26 – Amostra de controle de qualidade realizada nos dados uniformizados empregando a CNAE 2.0 e classificados conforme o método POSH-IG de forma automática com auxílio de macros no Excel®.....	106
Tabela 27 – Valores de Nível Estático e dos Fatores G, O e D e Índice GOD para os poços avaliados no Aquífero Pré-Cambriano.....	114
Tabela 28 - Parâmetros utilizados nos cálculos dos tempos de trânsito (IRATANI e EZAKI, 2012).	116
Tabela 29 – Classes PTOT definidas para as faixas de vazão que ocorrem na área de estudo com base nos tempos de trânsito para áreas de proteção com Raio de 500 m.	117
Tabela 30 – Fatores de priorização com base nas vazões dos poços da área de estudo	122

Tabela 31 – Resultados em número de indústrias, fontes potenciais de poluição, classificadas pelos Índices POSH-IG, PPOF para contaminação geral e para DNAPLs. 130

Tabela 32 - Resultados em número de indústrias, fontes potenciais de poluição com licenciamento via CETESB, com EIPs calculados com base nos Índices PTOT e FQ. .. 132

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS	VII
SUMÁRIO	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 ÁREAS CONTAMINADAS.....	6
3.2 POLÍTICAS DE ENFRENTAMENTO (BRASIL X EUA)	8
3.3 RESULTADOS E DIFICULDADES	13
3.4 GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS.....	18
3.5 CADASTRO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	20
3.6 SISTEMA DE FONTES DE POLUIÇÃO DA CETESB (SIPOL)	22
3.7 IDENTIFICAÇÃO E PRIORIZAÇÃO NAS AÇÕES DE GAC	24
3.8 CONTAMINANTES	30
3.8.1 LNALPs	31
3.8.2 DNALPs.....	31
3.8.3 Metais.....	35
3.9 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS À CONTAMINAÇÃO.....	36
3.10 MÉTODO GOD.....	40
3.11 MÉTODO POSH	43
3.12 MÉTODO POSH-IG.....	46
3.13 ZONAS DE CAPTURA E ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS	51
3.14 PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	56
3.15 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	58
3.16 GEOCODIFICAÇÃO DE ENDEREÇOS	65
3.17 INTERPOLAÇÃO DE DENSIDADE DE KERNEL	67
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
4.1 ÁREA DE ESTUDO	71

4.2	METODOLOGIA DA PESQUISA	81
4.3	TRATAMENTO DOS DADOS	83
4.4	SISTEMA DE FONTES DE POLUIÇÃO DA CETESB (SIPOL) – 2019.....	83
4.5	APLICAÇÃO DO MÉTODO POSH-IG AOS DADOS DO SIPOL	85
4.6	GEOCODIFICAÇÃO DE ENDEREÇOS (GEORREFENCIAMENTO).....	86
4.7	CADASTRO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS DA CETESB.....	86
4.8	APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD.....	87
4.9	MAPAS DE DENSIDADE DE KERNEL.....	87
4.10	CRITÉRIOS INICIAIS PROPOSTOS.....	88
4.10.1	<i>Índice de Perigo de Contaminação e Índice EIP</i>	<i>93</i>
4.10.2	<i>Índice de Priorização por Tempo de Trânsito da água subterrânea (PTOT)</i>	<i>96</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1	CADASTRO DE ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO	99
5.2	CADASTRO DE FONTES DE POLUIÇÃO DA CETESB	104
5.3	APLICAÇÃO DOS ÍNDICES POSH-IG E PPOF NA ÁREA DE ESTUDO	106
5.4	VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS – ÍNDICE GOD	111
5.5	ÁREA DE PROTEÇÃO DE POÇOS COM RAIO DE 500 M – ÍNDICES PTOT E FQ	115
5.6	ÍNDICES DE PERIGO DE CONTAMINAÇÃO	125
5.7	PRIORIZAÇÃO DE INSPEÇÕES – ÍNDICE EIP	130
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	142
6.1	CONCLUSÕES.....	142
6.2	LIMITAÇÕES	143
6.3	RECOMENDAÇÕES	145
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
8	ANEXOS.....	160

1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e da água subterrânea é uma preocupação real da sociedade nos dias de hoje, tanto no Brasil como em todo o mundo. Esta forma de contaminação pode trazer não só risco à fauna e flora, como também riscos à saúde humana, inclusive inviabilizando o uso e ocupação do solo nos grandes centros urbanos com prejuízos econômicos e socioambientais.

Conforme CETESB (2020), em dezembro de 2019 havia 6285 áreas contaminadas cadastradas no estado de São Paulo, dessas, 652 estão sob investigação, 828 áreas investigadas já possuem risco à saúde humana confirmado, com necessidade da aplicação de medidas de remediação/intervenção, 1429 áreas estão em processo de remediação, 1601 já se encontram em fase de monitoramento das concentrações de poluentes ou em processo de avaliação de mudança de uso do solo, e 1775 foram consideradas reabilitadas para um determinado uso do solo estabelecido (residencial, comercial ou industrial).

Segundo Cunha (2017), os números mencionados acima, que constam no cadastro de áreas contaminadas da CETESB, não representam adequadamente a realidade do panorama das áreas contaminadas no Estado de São Paulo. Ainda segundo esse autor, com base nos dados do Banco de Áreas Contaminadas da CETESB de dezembro de 2016, o Estado de São Paulo possuía 1002 áreas contaminadas industriais cadastradas e 4137 áreas contaminadas em postos de combustíveis, num universo de 137612 indústrias e 8750 postos de combustíveis. Assim, 0,73 % das indústrias estariam contaminadas, e 47,28% dos postos estariam contaminados. Uma vez que o grande número de indústrias existentes, com processos bem mais complexos e poluentes que um posto de combustível, há grande probabilidade de haver um número significativo de áreas contaminadas em instalações industriais ainda não descobertas.

Considerando que por força da legislação (Resolução CONAMA 273/2000), desde janeiro de 2001 todos os postos de combustíveis foram obrigados a obter licenciamento junto aos órgãos ambientais, processo em qual também foram

obrigados a investigar seus passivos ambientais, o que não ocorreu da mesma forma para as atividades industriais.

Em relação à proteção das águas subterrâneas, principalmente as utilizadas para abastecimento público, que usualmente são captadas por poços profundos e mais isolados das regiões superficiais dos aquíferos, a fiscalização das atividades industriais possui papel importante, pois são nessas atividades que são manipuladas substâncias mais densas que a água, com potencial para contaminar as porções mais inferiores dos aquíferos.

A forma de investigar, e caso encontrada, remediar ou monitorar a contaminação em uma determinada indústria, de forma individualizada, consiste no processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) que tem como objetivo final a reabilitação da área, de modo que esta não ofereça riscos à saúde e ao meio ambiente e permita seu uso futuro para uma finalidade determinada.

Mas, como determinar quais indústrias, ou áreas industriais, devem ser investigadas? E como adotar critérios de priorização dessas áreas visando a racionalização de recursos? Diante de uma grande probabilidade de haver um número significativo de áreas contaminadas industriais no Estado de São Paulo, quais seriam elegíveis para esforços imediatos e quais poderiam ser investigadas num segundo momento?

As respostas passam por um amplo estudo e discussão e fazem parte do objetivo geral da presente pesquisa, ou seja, a sistematização de uma estratégia de ação anterior ao GAC, uma estratégia de identificação ou fiscalização sistemática de fontes, indústrias, que possuem potencial de poluição das águas subterrâneas e sua priorização para auxílio na tomada de decisão dos órgãos ambientais que tem por competências legais garantir a qualidade do solo e das águas subterrâneas para o uso das gerações atuais e futuras.

Tal estratégia sistematizada teria grande relevância, tanto na racionalização de recursos públicos e privados, como na eficiência dos órgãos ambientais, permitindo que o foco das ações seja sobre as atividades industriais que representam o maior potencial poluidor, portanto, tem a maior probabilidade possuírem áreas contaminadas em suas instalações, pensando não só no Estado de São Paulo, mas também nos demais estados da federação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver critérios de priorização de áreas e empreendimentos industriais com potencial de contaminação das águas subterrâneas para ser empregada como uma ferramenta no planejamento de ações de fiscalização ambiental em um contexto de municípios com áreas urbanas densamente industrializadas, visando a prevenção da poluição, ou ainda, a identificação de áreas contaminadas ainda não conhecidas.

2.2 Objetivos específicos

Pretende-se desenvolver critérios para a classificação de áreas, com visualização em um mapa, e que permita a tomada de decisão racional com critério técnico na priorização da fiscalização ambiental. O foco da fiscalização são as atividades industriais potencialmente poluidoras das águas subterrâneas.

Essa ação se dará em fase anterior ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas, como forma de possível entrada nesse processo.

O desenvolvimento desses critérios passará pela delimitação e classificação das atividades poluidoras capazes de atingir as águas subterrâneas que se pretende proteger, as vulnerabilidades naturais dessas águas e a possibilidade de captação de substâncias contaminantes por poços de abastecimento conhecidos, ou seja, cadastrados no órgão responsável pela outorga de uso.

Pretende-se que esta classificação seja ágil, permitindo àquele que toma a decisão, uma avaliação rápida, sem a necessidade de investir muitos recursos financeiros. Para isso, o uso dos dados já existentes é imperativo, bem como a utilização de softwares livres, ou de baixo custo, para o tratamento e processamento desses dados.

A utilização de um Sistema de Informação Geográfica é condição importante para fazer análises de informações no espaço, permitir a visualização em mapas e possibilitar cruzamento de informações.

Deste modo, tem-se como objetivos específicos os seguintes:

- Foco em identificar áreas com maior quantidade de fontes indústrias com potencial de causar contaminações em área urbana bastante industrializada, onde é necessário adotar alguma forma de priorização nas ações fiscalização ambiental devido ao número elevado de fontes;
- Utilização de dados pré-existent;
- Estabelecimento de um SIG – Sistema de Informações Geográficas com a localização das indústrias, fontes de poluição, associadas às classificações de potencial poluidor, vulnerabilidade do aquífero subjacente e proximidade à poços cadastrados;
- Desenvolver critérios de priorização para fiscalização das indústrias, fontes de poluição, considerando seu potencial poluidor, e sua relação espacial aos aquíferos e poços de captação cadastrados;
- Testar as propostas de priorização e de mapeamento e avaliar os resultados numa determinada área de estudo;
- Avaliar os limites dos critérios de priorização recomendados.

Não foram objeto do estudo os postos de combustíveis, que possuem contaminantes associados (Benzeno, Etil-Benzeno, Tolueno, Xilenos e Estirenos – BTEXEs) bem conhecidos, e desde 2001 já vem sendo foco de medidas de Gerenciamento de Áreas Contaminadas em função da Resolução CONAMA 273/2000 que obriga a apresentação do estudo passivo ambiental no âmbito do licenciamento ambiental.

Não foram objeto do estudo as Indústrias Extrativas, seção B do CNAE 2.0 (IBGE, 2007), que englobam as atividades de mineração e exploração de óleo e gás, usualmente restritas as regiões de ocorrência do bem mineral, e que causam grande impactos ao meio ambiente. Assim, usualmente as atividades minerárias ocorrem em menor número e são bastante conhecidas e monitoradas pelos órgãos de controle ambiental.

Também não faz parte do escopo desse estudo áreas de disposição/recuperação de resíduos, geralmente menos numerosas e que por seu grande potencial de gerar impactos ambientais usualmente também são bastante conhecidas e monitoradas pelos órgãos de controle ambiental.

Dentro dos pontos de exclusão desse estudo também se encontram as captações clandestinas de águas subterrâneas, ou seja, desconhecidas do poder público e em desacordo com as regulamentações legais, pois no Brasil toda captação de água subterrânea precisa de outorga (autorização) ou cadastro no órgão de controle estadual de uso das águas.

Essas captações podem oferecer risco de contaminação de seu usuário, entretanto na escala municipal proposta é inexecutável de forma rápida e sem a ocupação de recursos importantes, principalmente de recursos humanos, o levantamento in loco de todos os poços clandestinos existentes.

Esse levantamento também depende de cooperação da população, principalmente em fiscalizações de atividades fora do escopo do licenciamento ambiental, pois somente é permitida a ação do agente de fiscalização ambiental no âmbito restrito de suas atribuições, ficando limitada sua ação em atividades não declaradas pela legislação como fontes de poluição sem ordem judicial, fato já conhecido ou denúncia que a justifique.

A realização desse tipo de levantamento é plausível quando já foi confirmada a contaminação de uma área, assim, há fato que sustenta a verificação do entorno dessa área em busca de poços de captação não declarados, procedimento cabível na realização da investigação detalhada. No estado de São Paulo a Decisão de Diretoria da CETESB DD 038/2017/C exige esse levantamento de poços do entorno na fase de investigação detalhada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Áreas contaminadas

Com o avanço da industrialização, o meio ambiente passou a ser o receptor de todos os resíduos e substâncias químicas advindos desse processo. Os métodos de produção artesanais passaram a ser conduzidos por máquinas gerando aumento do consumo de recursos naturais e a fabricação de novos produtos e insumos com potencial poluidor desconhecido à época. Com isso, surgiram as áreas contaminadas e impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente (MORAES et al., 2013, *in* RIYIS, 2017).

Há diversas definições para o termo áreas contaminadas, sempre relacionando o efeito da contaminação ambiental às restrições ao uso atual e futuro da área, bem como aos riscos de exposição para a saúde humana e para o ecossistema.

Na Resolução CONAMA nº 420/2009 (BRASIL), contaminação é definida como: “presença de substância(s) química(s) no ar, água ou solo, decorrentes de atividades antrópicas, em concentrações tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para os usos atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico”.

Conforme a Lei Estadual 13.577/2009 do Estado de São Paulo, Área Contaminada é definida como: “área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger”.

O Ministério do Meio Ambiente (2017) define área contaminada como sendo área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger, que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural.

Nos EUA, a USEPA define *brownfield* como sendo bens imóveis, cuja expansão, remodelação, ou reutilização pode ser prejudicada pela presença ou potencial presença de uma substância perigosa, poluente ou contaminante (USEPA, 2017). Literalmente seria “campo marrom”, porém se refere às áreas que necessitam de revitalização, as quais quase sempre são áreas contaminadas nos EUA, mas também podem ser áreas degradadas.

A percepção do problema teve início na década de 70, tendo como um dos primeiros casos, e mais emblemático que chamou atenção, a contaminação encontrada na área do Love Canal, estado de New York, nos EUA.

Em 1978 foi declarado estado de emergência no Love Canal depois de um aumento surpreendente de doenças na população como erupções cutâneas, abortos e *defeitos* congênitos em bebês. Este caso aumentou a conscientização pública sobre os iminentes perigos graves causados pelo despejo inadequado de resíduos perigosos nas comunidades (adaptado de USEPA, 2018).

No Brasil, as primeiras áreas contaminadas foram reconhecidas em meados da década de 1980. Um dos casos de maior repercussão foi o que envolveu a empresa Rhodia, na região da Baixada Santista, litoral do Estado de São Paulo (SÁNCHEZ, 2004).

Segundo Sánchez (2004), em 1976, a Rhodia adquiriu a empresa Clorogil, fabricante de solventes organoclorados, mas pouco tempo depois fechou a fábrica localizada em Cubatão, pois a Clorogil lançava seus resíduos em cavas de mineração, provocando a dispersão de resíduos contendo organoclorados em uma vasta área da Baixada Santista.

Dentre outros casos pode-se destacar a região da Cidade dos Meninos em Duque de Caxias – RJ, com contaminação por BHC causada pelo próprio governo federal desde de 1946, denunciada na mídia escrita pela primeira vez em 1988 (segundo Oliveira, 2008), que, apesar das medidas já adotadas, ainda continua contaminada com a população afetada, sendo realizada uma reunião em 20/04/2018 com representantes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), Ministérios do Meio Ambiente e da Saúde, onde foram apresentadas as iniciativas de monitoramento e remediação na região, com expectativa de cooperação na perspectiva da descontaminação da região. (FIOCRUZ, 2018);

E a partir de 2001 diversos casos ocorridos em São Paulo tiveram enorme repercussão na imprensa, como (i) Barão de Mauá, um condomínio de edifícios residenciais construídos sobre uma antiga área de disposição de areias de fundição no município de Mauá; (ii) Recanto dos Pássaros, uma área de chácaras e sítios de lazer vizinha a uma indústria química desativada pertencente à Shell, no município de Paulínia; (iii) Vila Carioca, onde um condomínio de apartamentos localizado em terreno vizinho a uma base de armazenamento de combustíveis, também de propriedade da Shell, utilizava água subterrânea contaminada; (iv) a indústria de baterias automotivas Ajax, no município de Bauru, situada próxima a um bairro residencial (SÁNCHEZ, 2004).

3.2 Políticas de Enfrentamento (Brasil x EUA)

A repercussão do Love Canal e de outros casos teve grande impacto nos EUA, com reposta governamental vindo logo em seguida com a aprovação em 1980 da CERCLA – *Comprehensive Environmental Reponse, Compesantion, and Liability Act*, ou Lei Abrangente de Resposta, Compensação e Responsabilidade Ambiental. Essa foi uma lei federal que desenvolveu um programa nacional para reposta às emergências, coleta e análise de informações, responsabilização das partes e revitalização de áreas contaminadas. Ela também criou um fundo de segurança, denominado como *Superfund*, para financiar repostas emergenciais e limpeza de áreas (adaptado de USEPA, 2018).

Da década de 1980 até os dias de hoje, diversas outras legislações e programas de financiamento público foram aprovados a fim de apurar as responsabilidades, financiar e incentivar a limpeza e revitalização de áreas contaminadas nos Estados Unidos, dentre essas podem ser destacadas: a SARA – *Superfund Amendments and Reauthorization Act*, ou Lei de Emendas e Reautorizações do *Superfund*, de 1986; a Iniciativa *Brownfields* lançada em 1993; e a *Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act*, ou Lei de Revitalização de *Brownfields* e de Alívio de Responsabilidade para Pequenos Negócios, sancionada em 2002.

A SARA reforçou as disposições de cumprimento da CERCLA; encorajou acordos voluntários ao invés de litígios; salientou a importância de soluções permanentes e de tecnologias de tratamento inovadoras; buscou aumento do envolvimento do estado em todas as fases do programa *Superfund*; aumentou o foco nos problemas de saúde humana provocados pelos locais de resíduos perigosos; e incentivou uma maior participação dos cidadãos, na forma como as áreas contaminadas são limpas (USEPA, 2018). A SARA também imputou às agências federais americanas o mesmo dever de cumprimento da CERCLA na mesma maneira e na mesma medida que as entidades não governamentais (adaptado de USEPA, 2018).

A iniciativa *Brownfields* da USEPA foi um programa de incentivos que visou desenvolver novamente locais industriais e comerciais abandonados, ociosos ou subutilizados, que possuíam restrições ao uso devido a contaminação ambiental real ou percebida (percebida pela comunidade) (adaptado de USEPA, 2018).

A *Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act* expandiu o Programa *Brownfields*, impulsionou o financiamento para avaliação e limpeza de *brownfields*, reforçou os papéis dos programas de resposta estaduais e tribais e esclareceu a responsabilidade da *Superfund*. Historicamente, sob o *Superfund*, o proprietário ou operador de uma propriedade contaminada pode ser responsabilizado pela limpeza da propriedade, com base exclusivamente em sua propriedade atual da área. A Lei *Brownfields* mudou o cenário do passivo, fornecendo proteções importantes da responsabilidade do *Superfund* para os proprietários de terras que preenchem certos critérios estatutários. As proteções de responsabilidade são para os proprietários de terra que se qualificam como potenciais compradores de boa-fé, proprietários de propriedades contíguas ou proprietários inocentes (adaptado de USEPA, 2018).

Ao contrário do ocorrido nos EUA, a resposta do Estado Brasileiro ao problema foi de modo geral negligente. Em sua maior parte, as regulamentações foram adotadas no âmbito técnico dentro de normativas dos órgãos ambientais estaduais.

O Estado de São Paulo foi o pioneiro no enfrentamento da questão, segundo SÁNCHEZ (2004), os primeiros passos foram dados em 1993, para enquadrar de modo sistemático e organizado os problemas representados pelas áreas

contaminadas, quando teve início um programa de cooperação técnica entre a CETESB e a GTZ – *Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*, entidade do governo alemão voltada para a cooperação técnica para o desenvolvimento. Este programa teve diversos frutos, dentre os quais o principal talvez tenha sido a capacitação técnica da equipe da CETESB, que hoje já dispõe de pessoal com conhecimento e experiência em gestão de áreas contaminadas, vários deles com formação em nível de pós-graduação, realizados em universidades públicas do Brasil.

Outros resultados dessa cooperação técnica foram as publicações geradas, com destaque para o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 1999), e o cadastro de áreas contaminadas, implementado segundo metodologia descrita nesse Manual (SÁNCHEZ, 2004).

As legislações brasileiras (municipais, estaduais ou federais) de 1976 à 1998, são de caráter generalista, ou seja, tratam a poluição ambiental como um todo, abrangendo também a questão da poluição do solo e águas subterrâneas.

Somente em 1998, com a Lei nº 9999/98 do Município de São Paulo houve no país uma primeira normativa, ainda pouco específica, mas que passou a exigir a análise de passivo ambiental para áreas onde se pretendia mudar o uso do solo de industrial para outros usos, como residencial ou comercial.

Posteriormente, em janeiro de 2001, foi publicada a Resolução CONAMA 273/2000 que estabeleceu o licenciamento ambiental de postos de combustíveis atrelado à investigação de passivos ambientais.

No Estado de São Paulo, a primeira normativa específica para o gerenciamento de áreas contaminadas surgiu com a publicação da Decisão de Diretoria DD CETESB nº 023/2000/C/E, que definiu os procedimentos uniformizados de gerenciamento de áreas contaminadas.

Foi publicada em 2001 a Lista CETESB que é um conjunto de valores orientadores para os parâmetros de qualidade para solo e água subterrânea. Tais valores de concentração, incluindo metais, organoclorados, compostos orgânicos voláteis (COVs), hidrocarbonetos poliaromáticos (PAHs), contempla 37 substâncias (CETESB, 2021).

Em 2009, foi publicada a Resolução CONAMA 420/2009 que estabeleceu o procedimento de gerenciamento de áreas contaminadas, bem como valores

orientadores de qualidade do solo e água subterrânea no âmbito federal. Também em 2009, no Estado de São Paulo foi publicada a Lei Estadual nº 13577/09, primeira lei específica para o gerenciamento de áreas contaminadas, a qual foi regulamentada em 2013, com o Decreto nº 59236/13.

Ao longo do tempo houve várias alterações nas regulamentações definidas pela CETESB no Estado de São Paulo, estando vigentes atualmente a Decisão de Diretoria DD CETESB nº 256/2016/E, que estabelece os valores orientadores de qualidade do solo e água subterrânea atuais e a Decisão de Diretoria DD CETESB nº 038/2017/C, que estabelece o Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas, criando também um Procedimento de Proteção e Qualidade dos Solos e Águas Subterrâneas.

Quando se compara a resposta governamental americana ao problema com o que ocorre no Brasil, fica evidente a falta de participação de entidades do governo como o congresso nacional ou o governo federal, bem como da maior parte dos estados brasileiros, em ações eficientes sobre essa questão.

A maior parte da regulamentação foi desenvolvida pelos estados, em especial no Estado de São Paulo, o único da Federação que possui Lei Estadual 13577/2009 específica para o assunto.

A mesma lei criou o FEPRAC – Fundo Estadual para Prevenção e Remediação de Áreas Contaminadas para, de modo parecido ao *Superfund*, financiar a investigação, remediação e revitalização de áreas contaminadas, porém voltadas para aquelas consideradas órfãs. Em busca às páginas disponíveis na internet da CETESB (2020a), consta notícia de 25/08/2020 que o conselho do fundo se reuniu aprovando o aporte de 600 mil reais para ações de investigação e remediação de uma área contaminada por chumbo no município de Caçapava-SP, também informando o aporte de 8,2 milhões ao fundo, com obrigatoriedade de aplicação de 91% no litoral norte de SP, fornecidos em função de ações do Ministério Público.

No âmbito federal, o Brasil praticamente não evoluiu. Existem apenas duas regulamentações federais para a questão, a Resolução CONAMA 237/2000 e a Resolução CONAMA 420/2009. São deliberações de apoio do Conselho Nacional do Meio Ambiente, mais relacionadas à procedimentos técnicos, ou seja, desde os primeiros episódios críticos de contaminação do solo e águas subterrâneas com

riscos confirmados para a população, não houve ações do legislativo e executivo federal em relação às áreas contaminadas. Até o momento grandes áreas contaminadas federais, ou que foram de responsabilidade federal, ainda se encontram contaminadas, oferecendo riscos à saúde da população.

Como exemplo, tem-se a já citada cidade dos meninos, em Duque de Caxias, no Rio de Janeiro. Essa área vem sendo ocupada pela população, que não possui a percepção adequada dos riscos à saúde devido a contaminação da área, sem nenhuma ação de contingência por parte do Estado. OLIVEIRA (2008) apresenta um histórico da área e dos estudos realizados, com confirmação da contaminação da população local por BHC.

Outro diferencial do enfrentamento ao problema entre Brasil e EUA está relacionado ao incentivo ao desenvolvimento de tecnologia e divulgação científica. Nos EUA, com programas de financiamento e ações proativas dos órgãos governamentais, bem como com uma legislação que definiu formas de proteção para aqueles proprietários que tiveram interesse na revitalização de suas áreas contaminadas, o meio técnico e científico pôde prosperar com a formação de diversos órgãos governamentais de desenvolvimento e divulgação científica, participação das universidades e empresas da área, e com publicações dos próprios órgãos ambientais em especial a USEPA (2021) e o ITRC (2021), e também de órgãos não governamentais como a API (2021). A inclusão dos entes federais nas obrigações de limpeza e revitalização de áreas contaminadas também teve contribuição para os avanços com muitas pesquisas e divulgações científicas sendo realizadas pelas forças armadas, departamento de energia e outros do governo americano disponibilizadas em USEPA (2021a).

No Brasil, o ônus da recuperação e revitalização recai totalmente sobre o poluidor ou proprietário, sem medidas de incentivo ou financiamento à revitalização e recuperação de áreas além das sanções legais a serem aplicadas (advertências, multas, ações penais e ações civis públicas). Neste sentido, as empresas que descobrem uma área contaminada em sua propriedade buscam sigilo, o que também beneficia as consultorias ambientais do ramo que acabam criando uma reserva de mercado pela detenção exclusiva do *know-how* sobre o assunto. Assim, poucas são as publicações científicas nacionais relatando estudos de casos, e em

aplicações diretas de tecnologias de investigação e remediação de áreas contaminadas.

O quadro a seguir apresenta um resumo com a finalidade de comparar as diferenças entre o Brasil e os EUA quanto ao enfrentamento às áreas contaminadas.

Tabela 1 – Quadro resumo elaborado com objetivo de comparar como se dá o enfrentamento ao problema das áreas contaminadas no Brasil e nos EUA.

Brasil	EUA
• Enfrentamento do problema liderado pelo Estado de São Paulo, CETESB. • Ausência de preocupação do poder público federal. • Ausência de medidas de financiamento das ações de limpeza e revitalização de áreas. • Pouca acessibilidade de informação, estudos classificados como sigilosos.	• Fomentado pelo ativismo ambiental – Ações assumidas pelo Congresso, Presidência e EPA (poder público federal). • <i>Superfund, Brownfields</i>, e outros programas de financiamento. • Grande preocupação em avanços tecnológicos e disseminação de conhecimento.

3.3 Resultados e Dificuldades

Apesar de vários casos críticos de áreas contaminadas de repercussão nacional, que já vem sendo apresentados pela mídia desde a década de 1970, apenas os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, possuem órgãos ambientais melhor estruturados para tratar o tema.

Segundo Teixeira et al. (2016), a maior parte do país ainda não possui um setor responsável pelas áreas contaminadas nos órgãos ambientais estaduais (Figura 1 – c). Os estados de RS, SC, PR, ES, PI, PE e RN possuem funcionários vinculados à outras áreas, que realizam concomitantemente algumas funções ligadas a áreas contaminadas, sendo estes também os estados que dizem ter

ações iniciadas para construção de um banco de dados para o gerenciamento de áreas contaminadas (Figura 1 – b).

Teixeira et al. (2016) buscou identificar os órgãos ambientais que possuem um sistema de licenciamento ambiental sistematizado e eficiente, considerando o tipo de atividade potencialmente poluidora, segundo a Resolução Conama nº 237/97. Tais resultados estão sistematizados no mapa da Figura 1 – a.

A maioria dos estados brasileiros já possui esse sistema, no entanto, não fornecem informações sistematizadas. Nesse caso, foram classificados “atende parcialmente”. Os Estados que não atendem esse requisito são: MT, AL e RR, que contam apenas com um sistema interno ainda precário. Nenhum contato foi conseguido com os órgãos do AC, AP e RO para buscar essa informação (TEIXEIRA et al., 2016).

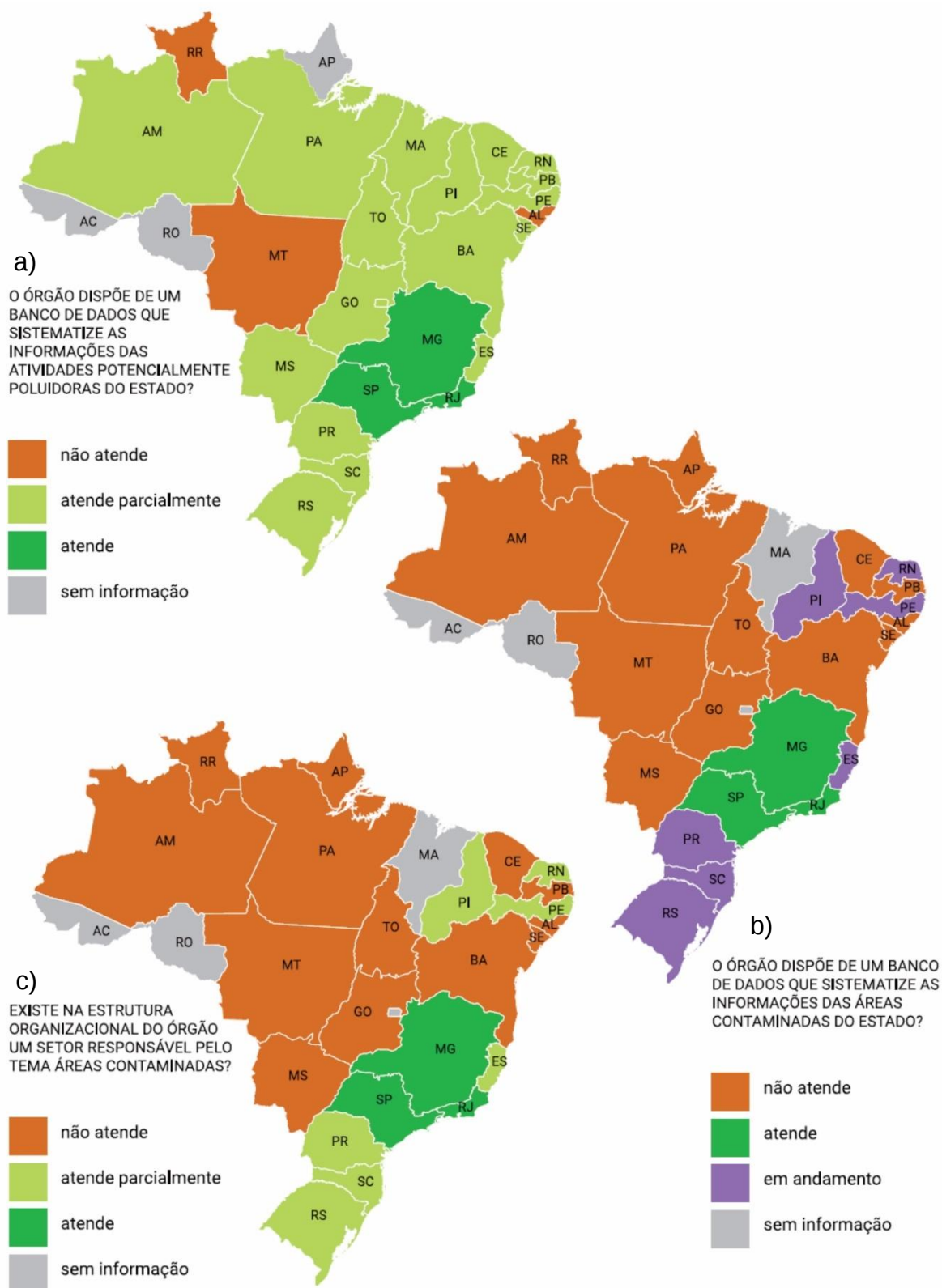


Figura 1 - Estrutura dos órgãos ambientais estaduais para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Brasil (modificado de TEIXEIRA et al., 2016).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2021) cita a elaboração de um Programa Nacional do Gerenciamento de Áreas Contaminadas em 2020 (MMA, 2020) que contém um panorama das áreas contaminadas no Brasil elaborado principalmente por meio de levantamento junto aos órgãos ambientais estaduais.

MMA (2020) levantou que no Brasil há 117 áreas contaminadas por poluentes orgânicos persistentes (POPs) conforme dados de 2015. Para áreas contaminadas por Mercúrio, o MMA (2020) aponta com mais recente o levantamento nacional da CEAP-FSP (2019, apud MMA, 2020) no qual foram consultados os Órgãos Estaduais de Meio Ambiente sendo possível obter dados somente dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Bahia, com 363, 5 e 2 áreas contaminadas respectivamente, concluindo que as informações coletadas não são suficientes para compor um panorama totalmente representativo em relação a contaminação de mercúrio no Brasil, já que a maioria dos estados não possuem banco de dados de áreas contaminadas.

Para outras substâncias químicas MMA (2020) conseguiu dados somente dos Estados de Pernambuco, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro.

A Figura 2 apresenta os totais de áreas contaminadas por estados que foram reportados ao MMA para a elaboração do panorama.

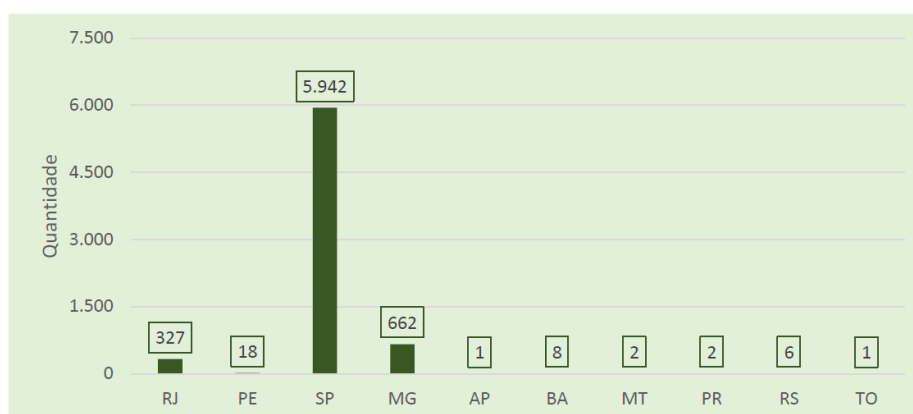


Figura 2 – Número de áreas contaminadas conhecidas no Brasil por estados (MMA, 2020).

MMA (2020) também cita as situações atual e desejada para o país.

Situação Atual:

- Disposições da Resolução CONAMA nº 420/2009 não estão sendo cumpridas: estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQs); disponibilização das áreas contaminadas existentes.
- Informações oficiais sobre a quantidade de áreas contaminadas são limitadas.
- Informações limitadas acerca das estruturas e procedimentos conduzidos por estados e municípios para promover a prevenção, identificação e gestão de áreas contaminadas.
- Ausência de plataforma para integração das informações disponibilizadas sobre áreas contaminadas existentes.

Situação Desejada:

- Estados e Municípios adotam medidas para prevenir a contaminação de áreas.
- Estados e Municípios definem seus VRQs e consolidam as informações sobre as áreas contaminadas existentes.
- Existência de plataforma digital, para apresentação padronizada e compartilhamento de informações, para aprimorar o cadastro das áreas contaminadas existentes no país.
- Procedimentos, medidas e modelos considerados referência são divulgados.
- Recursos humanos com conhecimento adequado sobre gestão de áreas contaminadas nas esferas federal, estadual e municipal.
- Melhoria da gestão de áreas contaminadas no país.

Nesse sentido o MMA (2020) elaborou um plano de ação visando melhorar as condições do GAC no Brasil, e o MMA (2021) informa que estão sendo aplicados cursos on-line de capacitação para os Órgãos Estaduais de Meio Ambiente em parceria com associações da sociedade civil.

3.4 Gerenciamento de áreas contaminadas

O Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) visa reduzir para níveis aceitáveis, os riscos a que estão sujeitos a população e o meio ambiente em decorrência de exposição às substâncias provenientes de áreas contaminadas, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos riscos e danos decorrentes da contaminação, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas (CETESB, 2017).

Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a Metodologia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas baseia-se em uma estratégia constituída por etapas sequenciais, onde a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da posterior (CETESB, 2017).

A metodologia de avaliação de risco em áreas contaminadas industriais desativadas para embasamento de tomada de decisão quanto a necessidade de remediação foi apresentada por Cunha (1997).

O método de gerenciamento de áreas contaminadas desenvolvido no Estado de São Paulo foi proposto no meio acadêmico por Gloeden (1999), tendo sido um grande avanço na área. Pesquisas posteriores preocuparam-se em: Estabelecer os procedimentos para definir o responsável legal pela investigação e pela remediação (TIRLONE, 2004); avaliar e definir fatores de exposição adequados à realidade paulista, dentro do processo de análise de risco à saúde humana (COUTO, 2006); e apresentar a metodologia para a determinação de áreas de restrição de uso de água subterrânea devido à contaminação (APICCIRELA, 2009).

Alberto (2010) procurou avaliar a heterogeneidade no Modelo Conceitual da Área para sua remediação e utiliza a simulação estocástica de diversos cenários para um mesmo conjunto de dados, obtendo zonas de captura distintas para a simulação de um poço de bombeamento. Conforme esse autor, os efeitos da heterogeneidade mostram que, para projeção de sistema de remediação, devem ser considerados diversos arranjos litológicos pois, a consideração de modelos simplistas levará a uma remediação ineficiente, aumentando os custos para novas investigações e ações de remediação adicionais.

Moraes et al. (2013) conclui que o GAC deve conter duas fases de entendimento do problema. A primeira é a da identificação ou diagnóstico da contaminação, composta da avaliação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e avaliação de risco. A segunda é a reabilitação da área que é composta pelo plano de intervenção (elaboração, implantação e operação) e pelo monitoramento. O processo de GAC deve ser finalizado com a reabilitação da área para o uso pretendido pelo Responsável Legal (RIYIS, 2017).

A Lei Estadual nº 13577/09, e seu Decreto regulamentador nº 59236/13, a atualização dos procedimentos estabelecidos pela DD CETESB nº 038/2017/C, e as Resoluções SMA nº 10 de 2017 e nº 11 de 2017, atualizaram o arcabouço legal e normativo para a aplicação dos aspectos de fiscalização e gerenciamento de áreas contaminadas no Estado de São Paulo.

A Figura 3 apresenta um resumo do procedimento atual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo, com base na DD 38/2017/C.

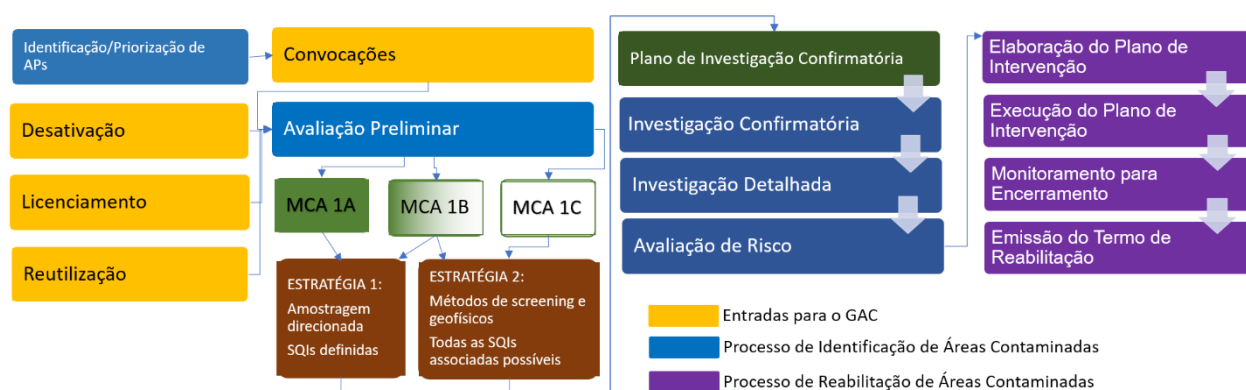


Figura 3 – O Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo (baseado em CUNHA, 2017).

A principal alteração no processo de gerenciamento no que trata da investigação das áreas está no estabelecimento de diferentes estratégias de investigação, a partir da análise preliminar da área.

Historicamente, as análises preliminares resultavam em poucas informações, e limitavam-se, muitas vezes, a visitas aos locais que eram feitas sem a procura de dados históricos sobre o processo industrial da área, sobre a localização das fontes, dos produtos manipulados, e dos dados pré-existent da

geologia local. Essa abordagem traz muitas incertezas na elaboração do modelo conceitual da área.

A DD 38/2017/C (CETESB, 2017) prevê a identificação das incertezas na avaliação preliminar e a adoção de métodos de varredura (*screening*) e avaliação de todas as Substâncias Químicas de Interesse (SQIs) possíveis, com base na tipologia do uso e ocupação da área, em locais onde o modelo conceitual da área inicial não apresentou com clareza a localização temporal e espacial das fontes e os produtos manipulados.

Também nas investigações confirmatória e detalhada, a DD 38/2017/C (CETESB, 2017) apresenta o conceito de identificação de todas as unidades hidroestratigráficas ao longo do perfil, ou seja, a definição das zonas de fluxo e de armazenamento que irão determinar as condições de fluxo por difusão/advecção dos contaminantes.

3.5 Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo

O cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas mantido pela CETESB (CETESB, 2020) no Estado de São Paulo, mantém uma base de dados das empresas que possuem contaminação do solo e água subterrânea com informações sobre os tipos de contaminantes, os meios afetados (águas superficiais, subterrâneas e solo), a extensão da contaminação (dentro ou fora da propriedade), as medidas de remediação e outras. A Figura 4 apresenta um exemplo de ficha do cadastro de áreas contaminadas do Estado de São Paulo.

O banco de dados foi elaborado em sistema Microsoft Access, sendo os relatórios gerados (fichas cadastrais) publicados em PDF no site da CETESB. O banco de dados possui também informações não públicas como a descrição da atividade das empresas cadastradas em diversos padrões de informação: descrição arbitrária, com base no CNAE 1.0 ou conforme o CNAE 2.0 do IBGE (2007).

Em dezembro de 2020, o estado de São Paulo possuía 6434 áreas contaminadas cadastradas.

Áreas Cadastradas no Estado de São Paulo

NOME DA EMPRESA _____
ENDEREÇO DA EMPRESA _____

Atividade ☒ indústria ☐ comércio ☐ posto de combustível ☐ resíduo ☐ acidentes ☐ agricultura ☐ desconhecida

Coordenadas (m): fuso 23 DATUM SAD69 UTM_E 252 37,00 UTM_N 7.40 18,00

Classificação reabilitada para o uso declarado (AR) ☐ reutilização

Etapas do gerenciamento

☐ avaliação da ocorrência ☐ medidas para eliminação de vazamento ☐ investigação confirmatória ☐ investigação detalhada e plano de intervenção ☐ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia ☐ monitoramento para encerramento	☒ avaliação preliminar ☒ investigação confirmatória ☒ investigação detalhada ☒ avaliação de risco ☒ plano de intervenção ☒ projeto de remediação ☒ remediação com monitoramento da eficiência e eficácia ☒ monitoramento para encerramento
--	---

Fonte de contaminação

☒ armazenagem ☐ produção ☐ manutenção ☐ emissões atmosféricas ☐ tratamento de efluentes
☐ descarte disposição ☐ infiltração ☒ acidentes ☐ desconhecida

Meios impactados

Meio impactado	Propriedade	
	Dentro	Fora
solo superficial	☒	☐
subsolo	☒	☐
águas superficiais	☐	☐
águas subterrâneas	☒	☐
sedimentos	☐	☐
ar	☐	☐
biota	☐	☐

☐ existência de fase livre
☐ existência de POPs

Contaminantes

☒ metais ☐ fenóis
☒ outros inorgânicos ☐ biocidas
☐ solventes halogenados ☐ ftalatos
☐ solventes aromáticos ☐ dioxinas e furanos
☐ solventes aromáticos halogenados ☐ anilinas
☐ PAHs ☐ radionuclídeos
☐ PCBs ☐ microbiológicos
☐ metano ☐ TPH
☐ combustíveis automotivos ☒ outros
☐ outros vapores/gases

Medidas emergenciais

☐ isolamento da área (proibição de acesso à área)
☐ ventilação/exaustão de espaços confinados
☐ monitoramento do índice de explosividade
☒ monitoramento ambiental
☒ remoção de materiais (produtos, resíduos, etc.)
☐ fechamento/interdição de poços de abastecimento
☐ interdição edificações
☐ proibição de escavações
☐ proibição de consumo de alimentos

Medidas de controle institucional

restrição	proposta na avaliação de risco ou no plano de intervenção	comunicada ao órgão responsável	implantada
uso de solo	☐	☐	☐
uso água subterrânea	☐	☐	☐
uso água superficial	☐	☐	☐
consumo alimentos	☐	☐	☐
uso de edificações	☐	☐	☐
trabalhadores de obras	☐	☐	☐

Medidas de remediação

☐ bombeamento e tratamento ☐ oxidação química ☐ barreira física
☐ extração de vapores do solo (SVE) ☐ redução química ☐ barreira hidráulica
☐ air sparging ☐ barreiras reativas ☐ biorremediação
☐ biosparging ☐ lavagem de solo ☐ fitorremediação
☐ bioventing ☒ remoção de solo/resíduo ☐ biopilha
☐ extração multifásica ☐ recuperação fase livre ☐ atenuação natural monitorada
☐ descolorinação redutiva ☐ encapsulamento geotécnico ☒ outras
☐ tratamento térmico in situ ☐ cobertura de resíduo/solo contaminado ☐ sem medida de remediação

Medidas de controle de engenharia

☐ adequação de projeto ☐ impermeabilização ☐ pavimentação ☐ outras

Figura 4 – Exemplo da ficha de cadastro do Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo.

Uma deficiência desse banco de dados é a falta do cadastramento do histórico das atividades desenvolvidas no local. Em geral quando uma área contaminada é comprada por empresa que desenvolve outra atividade, o cadastro é atualizado com a nova atividade perdendo-se a informação da atividade anterior.

Isso ocorre quase sempre em casos de empreendimentos imobiliários que compram a área visando prover sua remediação/recuperação e alteração do uso industrial para residencial.

3.6 Sistema de Fontes de Poluição da CETESB (SIPOL)

O SIPOL – Sistema de Fontes de Poluição da CETESB, contém o cadastro de todas as atividades/empresas já licenciadas e/ou fiscalizadas pela CETESB, pelo menos desde 1997, quando esse sistema foi criado. Assim, além de dados de empresas, cujas atividades possuem potencial poluidor, também há cadastros de área rurais relacionadas às questões florestais, loteamentos, empreendimentos comerciais, e outros.

No SIPOL são cadastrados memoriais de caracterização das empresas, as inspeções realizadas, e são emitidas as licenças ambientais, autuações, e outros documentos da Companhia. Esse sistema foi desenvolvido em Visual Basic 6.0 e SQL 8.0, com posteriores atualizações em SQL 2012 para integração com o Portal de Licenciamento Ambiental (PLA), site da CETESB onde o usuário pode solicitar o licenciamento ambiental junto a CETESB.

As formas de classificação das atividades desde 1997 foram mudando ao longo do tempo. Inicialmente elas eram cadastradas conforme o código do IBGE utilizado no sensu, posteriormente migrou para o CNAE 1.0 e recentemente está sendo utilizada a classificação atual do CNAE 2.0.

Uma deficiência do sistema é a perda do histórico das atividades desenvolvidas no cadastro da empresa quando ocorre a alteração da atividade, ou seja, uma empresa é comprada por outra que, ou a própria, solicita o licenciamento da alteração da atividade no mesmo endereço, com o deferimento do licenciamento o cadastro é alterado sendo perdida a informação anterior. Essa informação fica contida nas constatações de inspeções anteriores e licenças já emitidas, sendo

necessária uma verificação individual de cada empresa para o resgate da informação.

Esse sistema possibilita a análise e manutenção do histórico das atividades fontes de poluição de modo individual, sem ferramenta que permita a avaliação espacial das atividades cadastradas.

Nesse sentido a CETESB vem desenvolvendo outro sistema denominado e-Cenários, no qual estão sendo inseridos os dados do cadastro de fontes de poluição da CETESB em um sistema espacial na forma de um vetor de pontos, entretanto, esse sistema não possui comunicação direta com o SIPOL, e os dados referentes às coordenadas geográficas são derivados de informações prestadas pelos usuários na ficha de requerimento de licenças do PLA sem validação contendo muitos erros (Figura 5).

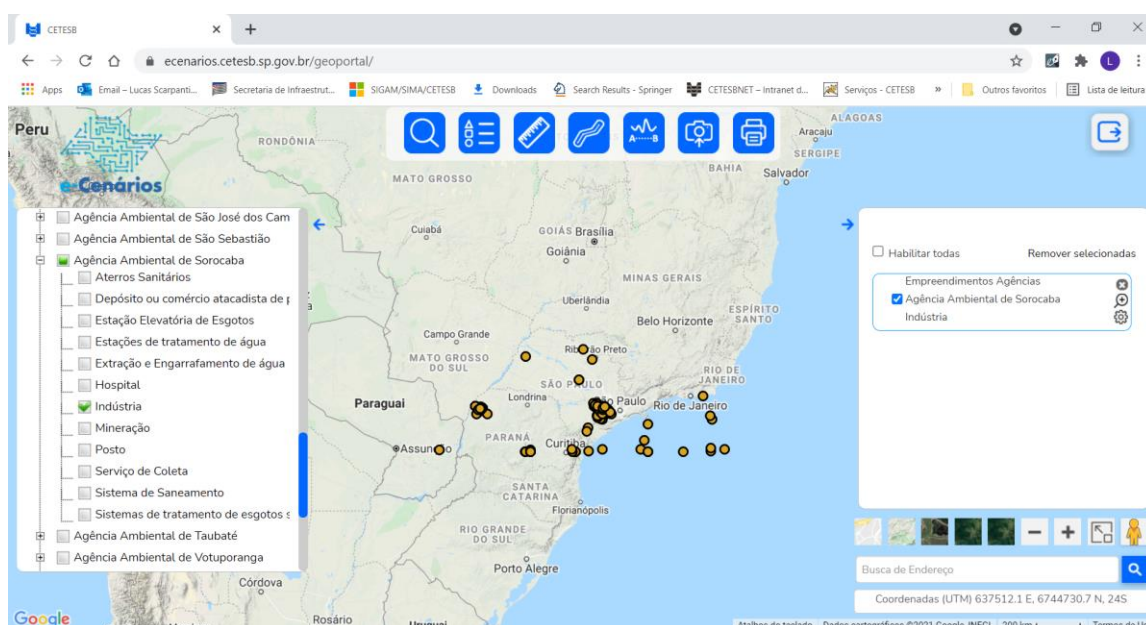


Figura 5 – e-Cenários, pontos referentes às indústrias da região abrangida pela Agência Ambiental de Sorocaba. A dispersão de pontos para fora do estado e regiões Sul, Central e Norte do estado de São Paulo demonstram a necessidade de melhoria na validação da localização geográfica.

Conforme Carra (2020), há a previsão da inserção de medidas de validação automática no PLA para a melhoria da qualidade dos dados de coordenadas geográficas dos empreendimentos até 2025.

3.7 Identificação e priorização nas ações de GAC

Um método utilizado para a priorização de inspeções em atividades industriais pela USEPA é o RSEI – *Risk-Screening Environmental Indicators* (USEPA, 2018a), o qual avalia um cenário de risco para contaminação do ar e das águas superficiais, porém não avalia o potencial de contaminação das águas subterrâneas. Esse método é baseado nas quantidades de substâncias químicas perigosas declaradas à USEPA no TRI – *Toxic Release Inventory Program*.

O TRI rastreia o gerenciamento de certos produtos químicos tóxicos que podem representar uma ameaça à saúde humana e ao meio ambiente. As instalações dos EUA em diferentes setores da indústria devem relatar anualmente quanto de cada produto químico é liberado para o meio ambiente e/ou gerenciado por meio de reciclagem, recuperação de energia e tratamento. A "liberação" de um produto químico significa que ele é emitido para o ar ou água, ou colocado em algum tipo de disposição terrestre (USEPA, 2021b).

Um procedimento de seleção de áreas aplicado pela USEPA consiste do Pre-CERCLA guia de triagem (USEPA, 2016), ou PCS – Pre-CERCLA Screening, define os procedimentos de inscrição de uma área possivelmente contaminada no *Superfund*, ou se essa deve ser encaminhada a outros programas de recuperação estaduais ou tribais. Esses procedimentos visam auxiliar os assessores da área na determinação se:

- Ocorreu ou há potencial de ter ocorrido o vazamento de substâncias perigosas na área;
- O local é elegível para uma avaliação de remediação adicional sob a autoridade CERCLA;
- O site precisa de mais atenção no *Superfund* ou outro programa de remediação; e
- O site garante as condições regulamentares para entrada no inventário de sites ativos do programa federal *Superfund* para avaliação ou resposta adicionais.

O PCS pode ser conduzido por várias razões, incluindo, mas não limitado a:

- Via notificação de uma área potencial através de ligação ou denúncia, ou recebendo referência de uma agência estadual, federal ou tribal;
- Em resposta a petição cidadã (prevista na CERCLA) para a condução de uma avaliação preliminar (lembrando que no âmbito da CERCLA a avaliação preliminar inclui a investigação confirmatória);
- Pela condução de um esforço, geográfico, setorial ou de base ampla, realizado pela EPA para a identificação de fontes de contaminação conhecidas; ou
- Quando um estado ou tribo tenha identificado um site ou um conjunto de sites garantindo a realização do PCS que será executado em acordo de cooperação com a EPA.

A aplicação do PCS, passa pela reunião de várias informações disponíveis do site, bem como por vistorias nos locais, para a resposta de várias questões elencadas em um check-list, dentre elas se há evidência real ou potencial de vazamento, se há receptores que podem ter sido impactados, se há documentação indicando que houve exposição de receptores a substâncias perigosas liberadas do site, dentre outras. Em comparação seria próximo do que é realizado numa avaliação preliminar preconizada pela DD 038/2017.

Neste sentido, pode-se dizer existem como formas de entrada na GAC nos EUA a verificação de denúncias, em resposta a petições dos cidadãos, ações de buscas setoriais/geográficas por parte da USEPA ou de ações conduzidas nos órgãos estaduais ou tribais, sem ser limitado a somente essas formas.

Em pesquisa a base SCOPUS (2021), foram buscadas as palavras chaves: *“inspection prioritization”*; *“search”* e *“contaminated areas”*; *“environmental inspection”*; *“environmental oversight”*; *“contaminated groundwater”* e *“prioritization”*; sendo encontrados respectivamente 13, 39, 0, 0 e 6 artigos, porém nenhum relacionado à identificação ou priorização de áreas contaminadas.

No Estado de São Paulo, na Figura 3 é possível observar como se dão as entradas para o GAC, ou seja, quando uma determinada indústria necessita realizar uma investigação preliminar e assim por diante. Assim, há quatro momentos nos quais a empresa pode ser instada a iniciar o processo de GAC:

- Quando convocada pela CETESB a realizar o GAC;

- Durante o licenciamento ambiental, quando constatada alguma área suspeita de contaminação, ela poderá ser notificada a iniciar o processo de GAC;
- Quando pretender desativar suas atividades. Nesse caso, as atividades listadas na Resolução SMA 10/2017 e no Anexo 4 da Informação Técnica nº 39 de 2019 da CETESB (2019) são obrigadas a obter um Parecer Técnico de Desativação aprovando as medidas ambientais necessárias, dentre elas a realização do processo de GAC. As atividades listadas somente na Resolução SMA 10/2017 são obrigadas à adoção de medidas de remoção e destinação final de resíduos/efluentes e a realização do processo de GAC com posterior encaminhamento de relatório das ações executadas para a CETESB; ou
- Quando o proprietário do terreno solicitar o licenciamento no local para outros usos que não industrial, também deverá ser realizado o processo de GAC.

Exceto para as notificações realizadas pela CETESB, quando das inspeções realizadas no âmbito do licenciamento ambiental, as demais entradas estão sujeitas à uma estratégia de priorização, ou seja, a seleção de áreas com potencial poluidor que seriam convocadas pela CETESB a iniciar o processo de GAC ou que deveriam realizar o processo GAC quando sua desativação ou mudança de uso da área.

A primeira forma de seleção foi determinada pela Resolução SMA nº 10 de 2017 a qual define a lista de atividades potencialmente geradoras de áreas contaminadas (Tabela 2 e Tabela 3), de acordo com o código da Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE estabelecido no Brasil pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Assim, são obrigadas a iniciar o processo de GAC no âmbito das entradas: convocação, desativação e mudança de uso; as empresas que realizam as atividades listadas na Resolução SMA nº 10/2017.

Tabela 2 – Atividades econômicas definidas como potencialmente geradoras de áreas contaminadas, conforme a Resolução SMA 10 de 08 de fevereiro de 2017.

Código CNAE	Descrição	Abrangência
Divisão 05	EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL	Todas as atividades*
Divisão 06	EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL	Todas as atividades*
Divisão 07	EXTRAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS	Todas as atividades*
Grupo 09.1	ATIVIDADES DE APOIO À EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL	Todas as atividades*
Grupo 10.7	FABRICAÇÃO E REFINO DE AÇÚCAR	Todas as atividades*
Grupos 13.1	PREPARAÇÃO E FIAÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS	Todas as atividades*
Grupos 13.2	TECELAGEM, EXCETO MALHA	Todas as atividades*
Subclasse 1340-5/01	ESTAMPARIA E TEXTURIZAÇÃO EM FIOS, TECIDOS, ARTEFATOS TÊXTEIS E PEÇAS DO VESTUÁRIO	Todas as atividades*
Subclasse 1340-5/02	ALVEJAMENTO, TINGIMENTO E TORÇÃO EM FIOS, TECIDOS, ARTEFATOS TÊXTEIS E PEÇAS DO VESTUÁRIO	Todas as atividades*
Grupo 15.1	CURTIMENTO E OUTRAS PREPARAÇÕES DE COURO	Todas as atividades*
Grupo 16.1	DESDOBRAMENTO DE MADEIRA	Todas as atividades*
Grupo 17.1	FABRICAÇÃO DE CELULOSE E OUTRAS PASTAS PARA A FABRICAÇÃO DE PAPEL	Todas as atividades*
Grupo 18.1	ATIVIDADE DE IMPRESSÃO	Todas as atividades*
Divisão 19	FABRICAÇÃO DE COQUE, DE PRODUTOS DERIVADOS DO PETRÓLEO E DE BIOCOMBUSTÍVEIS	Todas as atividades*
Divisão 20	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS	Todas as atividades*
Divisão 21	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS FARMOQUÍMICOS E FARMACÊUTICOS	Todas as atividades*
Classe 22.11-1	FABRICAÇÃO DE PNEUMÁTICOS E DE CÂMARAS DE AR	Todas as atividades*
Grupo 23.1	FABRICAÇÃO DE VIDRO E DE PRODUTOS DO VIDRO	Todas as atividades*
Grupo 23.2	FABRICAÇÃO DE CIMENTO	Todas as atividades*
Grupo 23.3	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS	Todas as atividades*
Divisão 24	METALURGIA	Todas as atividades*
Divisão 25	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE METAL, EXCETO MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	Todas as atividades*
Divisão 26	FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE INFORMÁTICA, PRODUTOS ELETRÔNICOS E ÓPTICOS	Todas as atividades*
Divisão 27	FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS, APARELHOS E MATERIAIS ELÉTRICOS	Todas as atividades*
Divisão 28	FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	Todas as atividades*
Divisão 29	FABRICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, REBOQUES E CARROCERIAS	Todas as atividades*
Divisão 30	FABRICAÇÃO DE OUTROS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE, EXCETO VEÍCULOS AUTOMOTORES	Todas as atividades*
classe 31.02-1	FABRICAÇÃO DE MÓVEIS COM PREDOMINÂNCIA DE METAL	Todas as atividades*
classe 32.12-4	FABRICAÇÃO DE BIJUTERIAS E ARTEFATOS SEMELHANTES	Todas as atividades*
grupo 33.1	MANUTENÇÃO E REPARAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	Todas as atividades*
divisão 35	ELETRICIDADE, GÁS E OUTRAS UTILIDADES	Todas as atividades*
Atividade 36.00-6/01	TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA FINS DE ABASTECIMENTO (DESINFECÇÃO, COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO, DECANTAÇÃO, FILTRAÇÃO, CORREÇÃO DO PH E FLUORETAÇÃO)	Atividades específicas
Divisão 37	ESGOTO E ATIVIDADES RELACIONADAS	Todas as atividades*
Divisão 38	COLETA, TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS; RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS	Todas as atividades*

* Todas as atividades pertencentes à divisão ou grupo ou subclasse

** Exceto os grupos 46.86-9 - COMÉRCIO ATACADISTA DE PAPEL E PAPELÃO EM BRUTO E DE EMBALAGENS e 46.89-3 - COMÉRCIO ATACADISTA ESPECIALIZADO

Tabela 3 – Atividades econômicas definidas como potencialmente geradoras de áreas contaminadas, conforme a Resolução SMA 10 de 08 de fevereiro de 2017 (continuação).

Código CNAE	Descrição	Abrangência
Divisão 39	DESCONTAMINAÇÃO E OUTROS SERVIÇOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS	Todas as atividades*
Atividade 45.20-0/01	MANUTENÇÃO MECÂNICA E ELÉTRICA DE CAMINHÕES, ÔNIBUS E VEÍCULOS PESADOS	Atividades específicas
Atividade 45.20-0/01	OFICINA MECÂNICA DE VEÍCULO AUTOMOTOR	Atividades específicas
Grupo 46.8	COMÉRCIO ATACADISTA ESPECIALIZADO EM OUTROS PRODUTOS	Todas as atividades com exceção **
Grupo 47.3	COMÉRCIO VAREJISTA DE COMBUSTÍVEIS PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES	Todas as atividades*
Grupos 49.1	TRANSPORTE FERROVIÁRIO E METROFERROVIÁRIO,	Todas as atividades*
Grupos 49.2	TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PASSAGEIROS	Todas as atividades*
Grupos 49.3	TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA	Todas as atividades*
Grupos 49.4	TRANSPORTE DUTOVIÁRIO	Todas as atividades*
Atividade 52.11-7/99	ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS PERIGOSOS POR CONTA DE TERCEIROS	Atividades específicas
Atividade 52.32-0/00	SERVIÇO DE BASTECIMENTO DE NAVIOS	Atividades específicas
Atividade 96.01-7/01	SERVIÇOS DE LAVAGEM A SECO e SERVIÇO DE LAVANDERIA	Atividades específicas
Subclasse 96.03-3/03	SERVIÇOS DE SEPULTAMENTO	Todas as atividades*

* Todas as atividades pertencentes à divisão ou grupo ou subclasse

** Exceto os grupos 46.86-9 - COMÉRCIO ATACADISTA DE PAPEL E PAPELÃO EM BRUTO E DE EMBALAGENS e 46.89-3 - COMÉRCIO ATACADISTA ESPECIALIZADO

Para as convocações, em conjunto com a Resolução SMA 10/2017, a Resolução SMA nº 11 de 08 de fevereiro de 2017 definiu quatro regiões prioritárias para a identificação de áreas contaminadas. Assim, a CETESB passaria a convocar as empresas com atividades econômicas listadas na Resolução SMA 10 de 2017, situadas nestas quatro regiões prioritárias, as quais teriam 180 dias para realizar uma Avaliação Preliminar e uma Investigação Confirmatória e apresentá-la para a CETESB.

Conforme a legislação, ficou como competência da CETESB estabelecer, por Decisão de Diretoria, anualmente a relação das empresas que devem adotar tais ações, ou seja, a lista com a convocação das empresas que serão obrigadas a realizar a investigação geoambiental de contaminação do solo e água subterrânea.

A Figura 6 apresenta as quatro regiões prioritárias definidas no Município de São Paulo: Região 1 – Barra Funda; Região 2 – Mooca; Região 3 – Chácara Sto. Antônio; e Região 4 – Jurubatuba.

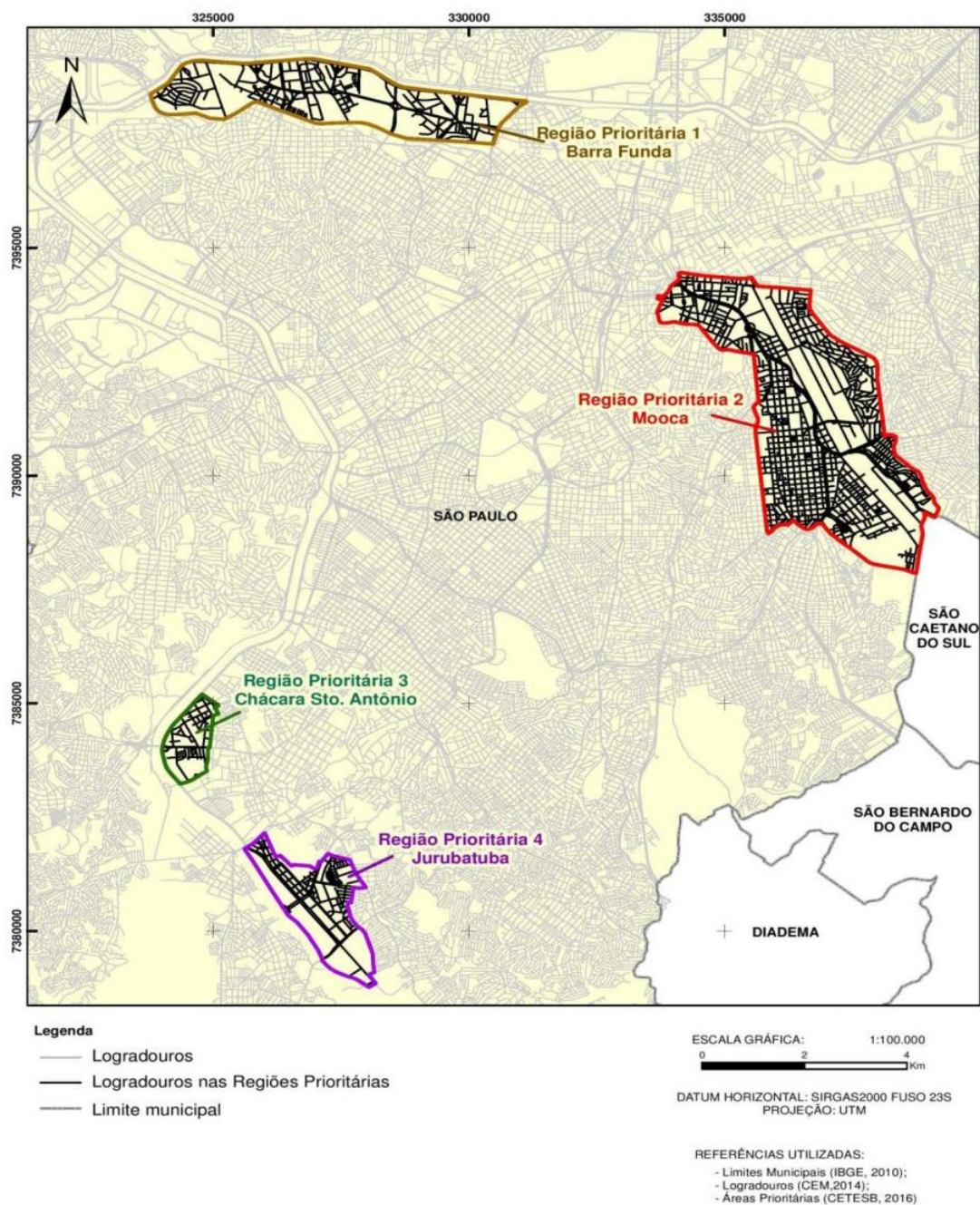


Figura 6 – Regiões Prioritárias para a Identificação de Áreas Contaminadas, conforme a Resolução SMA nº 11 de 08 de fevereiro de 2017.

Segundo Cunha (2017), as regiões prioritárias definidas na Resolução SMA nº 11 de 2017 foram escolhidas com base nos seguintes critérios:

- Região onde ocorreu ou está ocorrendo mudança de uso do solo, especialmente para o uso residencial ou comercial;
- Região com evidências de contaminação regional de solo e de água subterrânea;

- Região com restrições legais ambientais;
- Região com utilização de recursos hídricos para abastecimento;
- Áreas com Potencial de Contaminação (AP), onde ocorre ou ocorreu o uso de solventes halogenados;
- Áreas com Potencial de Contaminação (AP) ativas.

Assim, no Estado de São Paulo, com a publicação das Resoluções SMA 10 e 11 de 2017, as atividades industriais com potencial para geração de áreas contaminadas passaram a ser convocadas para a investigação geoambiental de seus eventuais passivos, o que antes só ocorria com os postos de combustíveis, que já estão obrigados a realizar investigação de eventuais passivos, desde 2001, de acordo com a Resolução CONAMA 237/2000.

Até então as atividades industriais eram instadas para realizarem os estudos de passivos ambientais no Estado de São Paulo, a partir da fiscalização do órgão ambiental, onde eram encontradas áreas suspeitas de contaminação.

3.8 Contaminantes

As classes mais comuns de contaminantes orgânicos das águas subterrâneas incluem hidrocarbonetos aromáticos (e hidrocarbonetos do petróleo), solventes clorados e pesticidas. Contaminantes inorgânicos comuns incluem nitrato (NO_3^-), Arsênio (As), Selenium (Se), e metais pesados tóxicos como chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cromo hexavalente (Cr^{6+}) (adaptado de ALVAREZ e ILLMAN, 2006).

Uma grande variedade de materiais tem sido identificada como contaminantes encontrados nas águas subterrâneas. Desses incluem-se químicos orgânicos sintéticos, hidrocarbonetos, ânions e cátions inorgânicos, patógenos e radionuclídeos. A maioria desses materiais se dissolvem na água em variados graus. Alguns compostos orgânicos somente são levemente solúveis em água e irão existir no aquífero em duas fases: uma dissolvida e outra fase insolúvel não aquosa, ou, do inglês, NAPL – *Nonaqueous Phase Liquid* (adaptado de FETTER, 2008).

Compostos NAPLs com densidade maior que a água (por exemplo, solventes clorados) quando liberados no aquífero irão existir como DNAPLs - *Dense*

Nonaqueous Phase Liquids, e tem a tendência de afundar dentro da zona saturada. Compostos com densidade menor que a água (por exemplo, petróleo) irão formar um NAPL leve denominada de LNAPL – *Light Nonaqueous Phase Liquids* e, dependendo do volume, irão se espalhar lateralmente ou rebaixar a superfície freática (adaptado de SUTHERSAN et al., 2017).

3.8.1 LNAPLs

Os contaminantes imiscíveis, ou pouco miscíveis, em água e menos densos que água são conhecidos pela sigla em inglês LNAPL – *Light Nonaqueous Phase Liquids*.

Os hidrocarbonetos do petróleo são, em maioria, menos densos do que a água e irão existir como LNAPLs que flutuam no topo do nível freático ou estar presente no solo e na porção superior da zona saturada (Figura 7) (adaptado de SUTHERSAN et al., 2017).

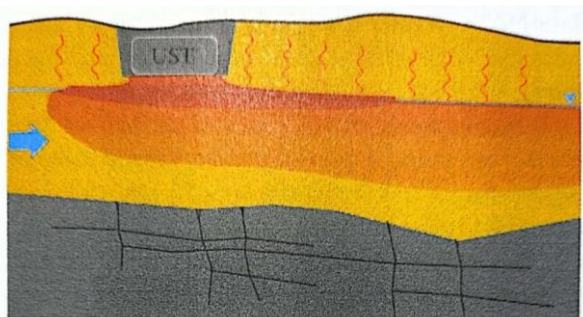


Figura 7 – Distribuição conceitual de um derramamento de LNAPL no subsolo e evolução da pluma de fase dissolvida resultante (SUTHERSAN et al., 2017).

3.8.2 DNAPLs

Os contaminantes imiscíveis, ou pouco miscíveis, em água e mais densos que água são conhecidos pela sigla em inglês DNAPL – *Dense Nonaqueous Phase Liquids*.

Áreas contaminadas com DNAPLs e suas misturas apresentam os maiores desafios. Apesar das décadas gastas em tentativas de caracterizar e remediar

áreas contaminadas com DNAPL, o risco substancial ainda permanece (ITRC, 2015).

DNAPLs são mais densos que a água e têm solubilidades limitadas e variadas na água; assim, eles tendem a ocorrer em uma fase não aquosa separada no subsolo. Em contraste, álcoois (por exemplo, o etanol) são totalmente solúveis em água e não formam líquidos separados em fase não aquosa (NAPLs). Quando os DNAPLs são liberados para a subsuperfície, a fase DNAPL permanece separada das outras fases principais do fluído, ar e água, e sua migração e comportamento físico na subsuperfície são regidos pela física do fluxo multifásico em meios porosos ou fraturados (ITRC, 2015).

O comportamento dos DNAPLs em subsuperfície é categorizado por sua tendência a afundar por gravidade para profundidades bem abaixo do nível d'água (adaptado de SUTHERSAN et al., 2017).

Com a gravidade sendo o principal direcionador para a migração de um DNAPL, esse migra para baixo através do caminho de menor resistência até encontrar estratos confinantes ou impermeáveis que impedem ou limitam o transporte. Semelhante ao transporte de contaminantes em fase aquosa, a migração DNAPL é controlada por diferenças de condutividade hidráulica e mudanças relativas na permeabilidade do solo. Além disso, a migração DNAPL também é controlada pelas suas propriedades físicas específicas e por seu volume, pois a pressão para baixo aplicada por um corpo DNAPL deve ser suficiente para permitir que ele seja comprimido para dentro e através dos poros do solo. Como resultado, as diferenças na permeabilidade entre os estratos do solo e a presença ou ausência de camadas confinantes afetam fortemente a distribuição vertical e horizontal de DNAPLs no subsolo (adaptado de SUTHERSAN et al., 2017).

Neste sentido, enquanto os LNAPLs impactam as porções superficiais de um aquífero, os DNAPLs tendem a impactar os aquíferos também em maiores profundidades. A Figura 8 apresenta o modelo conceitual de uma contaminação em subsolo causada por uma substância DNAPL.

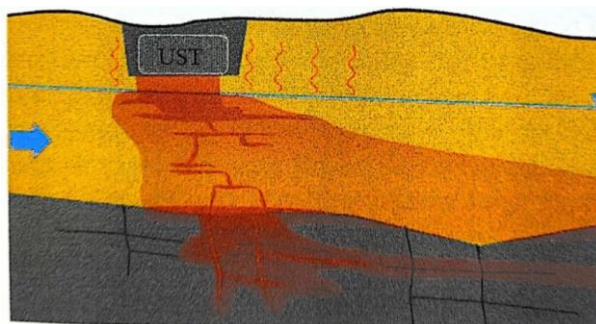


Figura 8 – Distribuição conceitual de um derramamento de DNALP no subsolo e evolução da pluma de fase dissolvida resultante (SUTHERSAN et al., 2017).

Os compostos DNAPL comuns incluem materiais que foram, ou ainda são, amplamente empregados em processos industriais e comerciais, como os seguintes (ITRC, 2015):

- solventes clorados
- alcatrão de carvão
- creosoto
- petróleo pesado - por exemplo, produtos petrolíferos No. 6 (óleo BPF)
- bifenilas policloradas (PCBs)
- pesticidas

Possivelmente, os DNAPLs mais comuns são os solventes clorados, como o tricloroetileno (TCE), tetracloroetileno (PCE), conhecido comercialmente como percloroetileno, e tetracloreto de carbono (CCl_4). O PCE e o TCE têm sido usados como desengraxantes, fluidos de limpeza a seco e solventes, em muitos processos industriais e comerciais e frequentemente foram liberados para o subsolo. Esses solventes também são comumente usados em produtos domésticos, como removedores de manchas, limpador de freios, óleos penetrantes, fluido de correção de máquinas de escrever e acabamentos (ITRC, 2015).

Segundo Jaffé et al. (2008), os solventes clorados são usados em muitas empresas para as mais diversas finalidades e processos produtivos, especialmente como produtos de limpeza e solventes. Seguem os principais consumidores em potencial de solventes clorados (considerando as áreas de aplicação dos principais solventes clorados):

- Tratamento de superfícies, metal

- Indústria metalúrgica, mecânica
- Retificadoras, tornearias metálicas
- Fundições
- Indústrias químicas
- Laboratórios farmacêuticos
- Lavagem a seco
- Indústria têxtil
- Indústria de plásticos
- Indústria de papel e celulose
- Indústrias de processamento de carcaças, fabricantes de ração

E em menor escala, em:

- Montadoras e oficinas de automóveis
- Fabricantes de esmaltes e tintas
- Oficinas tipográficas
- Fabricantes de refrigerantes
- Empresas de reciclagem
- Refinarias
- Fabricantes de aromatizantes, extratos e café descafeinado

No Estado de São Paulo, das 1911 áreas contaminadas cadastradas pela CETESB (2020), sem levar em conta os postos de combustíveis (4523), 596 (31,2%) possuem contaminação por solventes halogenados (clorados), 113 (5,9%) por PCBs, 45 (2,4%) por biocidas (pesticidas), e 108 (5,7%) por solventes aromáticos halogenados, conforme se observa na Figura 9. Porém, como nesse cadastro pode haver uma área com a presença de mais de um contaminante, esses dados não podem ser somados para se ter uma estimativa de quantas são as áreas contaminadas por DNAPLs cadastradas.

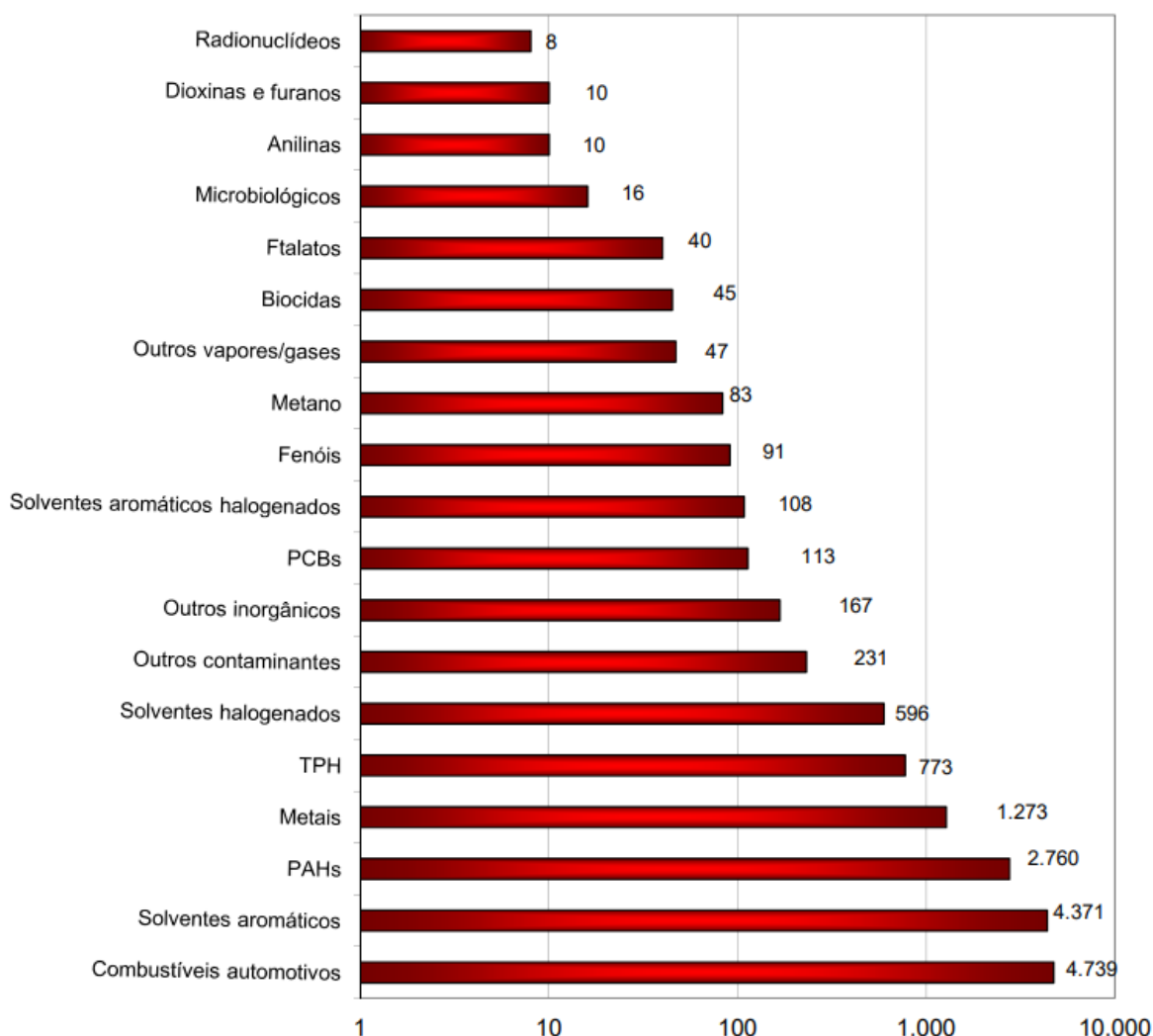


Figura 9 – Áreas contaminadas no estado de São Paulo por grupos de contaminantes em dezembro de 2020 (CETESB, 2020).

3.8.3 Metais

Contaminantes metálicos originam-se de liberações diretas antropogênicas (por exemplo, cromo, cobre, zinco e chumbo), ou via mobilização ou dissolução indireta do solo da subsuperfície como um resultado de mudanças na geoquímica (por exemplo, ferro, manganês e arsênio) (SUTHERSAN et al., 2017).

As reatividades, carga iônica e solubilidade dos metais na água variam amplamente. O destino e o transporte de contaminantes de metal no subsolo estão, portanto, diretamente ligados ao comportamento de um metal individual com base na geoquímica do subsolo. O nível de acidez, estado de oxidação do metal, sua especiação e tendência para formar complexos afetam o comportamento dos

metais, seu transporte com o fluxo advectivo da água subterrânea, ou seu sequestro na matriz do solo (adaptado de SUTHERSAN et al., 2017).

3.9 Vulnerabilidade de Aquíferos à Contaminação

A principal motivação para avaliação do grau de vulnerabilidade de diversas formações aquíferas decorre, fundamentalmente, da necessidade de fornecer às autoridades competentes um instrumento com utilidade prática para as tomadas de decisão, direcionadas ao planejamento e ordenamento do território, dando subsídios para a proteção dos aquíferos ainda preservados ou passíveis de uso, além de evitar ações futuras de remediação (PARALTA; FRANCÉS; RIBEIRO, 2005, apud FRANCISO, 2018).

Segundo Francisco (2018), o conceito de vulnerabilidade foi proposto por Le Grand (1964, apud Francisco, 2018), nos EUA, e um pouco mais adiante, por Albinet e Margat (1970, apud Francisco, 2018), na França. Durante as décadas de 80 e 90, este conceito foi mais amplamente difundido com a publicação de outros trabalhos de extrema relevância, tais como: *DRASTIC* (ALLER et al., 1987); *GOD* (FOSTER, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988); *AVI* (VAN STEMPTVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992); *SINTACS* (CIVITA; DE MAIO, 1997) e *EPIK* (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997).

Francisco (2018) avalia que, em linhas gerais, a maioria destas interpretações converge para a definição proposta por Foster (1987): a vulnerabilidade natural é a sensibilidade do aquífero de ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta.

Conforme Foster e Hirata (1988), a vulnerabilidade natural representa características intrínsecas dos estratos acima da zona saturada, que determinam a suscetibilidade de um aquífero ser afetado por uma carga contaminante aplicada na superfície do terreno.

Os métodos de avaliação de vulnerabilidade natural utilizados consideram um poluente genérico disposto na superfície do solo, independente da natureza da fonte, com mobilidade na água, o qual é transportado verticalmente a partir da superfície em direção ao aquífero. Assim, as estimativas são de caráter geral e,

portanto, nem sempre conseguem retratar com fidelidade todos os contextos hidrogeológicos e geológicos (FRANCISCO, 2018).

Dentre as diversas linhas de abordagem para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos, os principais são os métodos paramétricos ou paramétricos-indexadores, segundo Francisco (2018):

- Métodos Paramétricos: baseiam-se na suposição de que são poucos os principais fatores decisivos para a vulnerabilidade de uma área, cujas condicionantes são conhecidas e podem ser ponderadas. Podem oferecer resultados mais robustos aplicados às áreas extensas, visto que as informações básicas se originam de dados secundários, como mapas topográficos, climatológicos e hidrogeológicos.
- Paramétricos-indexadores: utilizam parâmetros indicativos da vulnerabilidade natural, atribuindo-lhes pesos numéricos e integrando-os para gerar o índice de vulnerabilidade. Nestes métodos, cada parâmetro apresenta um intervalo relativo à sua propriedade, subdivididos em intervalos hierarquizados com valores específicos, que refletem o seu nível de suscetibilidade à contaminação.

A Tabela 4 resume as informações e indica os diversos métodos de avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos, relacionando os parâmetros utilizados por cada método e seus autores.

Tabela 4 – Métodos para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos (FRANCISCO, 2018).

Método	Parâmetro	Fonte
DRASTIC	Profundidade do nível de água, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987)
SINTACS	Iguais aos utilizados no DRASTIC, modificando apenas os pesos atribuídos aos parâmetros.	Civita e De Maio (1997)
GALDIT	Ocorrência do aquífero, condutividade hidráulica, nível piezométrico, distância à linha da costa, impacto do estado atual da intrusão salina na região e espessura do aquífero.	Lobo Ferreira e Chachadi (2001)
GOD	Grau de confinamento das águas subterrâneas, litologia/grau de consolidação da zona insaturada e profundidade do nível d'água	Foster e Hirata (1988)
AVi	Espessura de cada camada sedimentar acima do nível d'água e a condutividade hidráulica de cada uma destas camadas.	Van Stempvoort, Ewert e Wassenaar (1992)
EPIK	Intensidade de carstificação próxima à superfície, espessura da cobertura protetora, condições da infiltração (pontual ou difusa) e desenvolvimento da rede cárstica.	Doerfliger e Zwahlen (1997)
COP	Capacidade de proteção da zona não saturada, concentração de fluxo em superfície e precipitação.	Vías et al. (2006)
DRASTIC-Fm	Iguais aos utilizados no DRASTIC, inserindo apenas a componente estrutural (meio fraturado).	Denny et al. (2007)
DRARCH	Profundidade do nível da água subterrânea, razão entre a espessura acumulada de camadas argilosas e a espessura total da zona não saturada, recarga líquida, espessura do aquífero, condutividade hidráulica e coeficiente de adsorção de contaminantes pela zona não saturada.	Guo et al. (2007)
Ekv	Profundidade do nível da água subterrânea e permeabilidade vertical da zona não saturada.	Auge (2004)
Si	Condutância Longitudinal Unitária.	Braga e Francisco (2014)
GPI	Espessura e condutividade elétrica da zona não saturada.	Casas et al. (2008)
SAI	Profundidade do nível d'água, espessura da zona não saturada, conteúdo de carbono e de argila no solo, capacidade de troca catiônica e pH.	Heredia e Cirelli (2007)

Francisco (2018) identifica as limitações gerais dos métodos de avaliação da vulnerabilidade natural indicadas por diversos autores, resumidas a seguir:

- Poluente genérico: o principal pressuposto dos métodos de vulnerabilidade trata-se da consideração de um poluente genérico, que se move de forma semelhante à água e migra verticalmente quando depositado no topo do terreno. Entretanto, existem diversos contaminantes com características físico-químicas distintas da água, com comportamento hidrogeológicos e geoquímicos distintos, que podem interferir em sua movimentação no solo;
- Homogeneidade dos solos/aquíferos: a maioria das abordagens para a avaliação da vulnerabilidade assumem que os depósitos superficiais estão inalterados, com percolação espacialmente uniforme, no momento da atribuição de pesos aos atributos das variáveis. Caminhos preferenciais de fluxo subterrâneo, bem como a heterogeneidade e complexidade hidrogeologia, são ignorados;
- Quantidade e tipos de parâmetros de entrada: há métodos que necessitam de sete parâmetros como o DRASTIC, e outros que utilizam apenas dois como o AVi e o Si. Grande parte das informações são limitadas e modelos mais simples, voltados à locais com pouca disponibilidade de dados, gerando usos indiscriminados dada a aparente facilidade de aplicação;
- Redundâncias e sinergia: a utilização de parâmetros inter-relacionados como, por exemplo, a condutividade hidráulica e a granulometria, podem superestimar os índices de vulnerabilidade. Também é possível que duas variáveis determinadas individualmente não traduzam o efeito de ambas sobre a atenuação de poluentes, devido aos efeitos sinéticos.

De modo geral, deve-se ter cautela na análise e interpretação de mapas de vulnerabilidade natural, pois estes tratam de uma estimativa com muitas simplificações geológicas e hidrogeológicas, além de serem gerados com os dados disponíveis no momento, podendo haver tanto falta de informações mais detalhadas como a variação temporal e espacial das informações, sendo necessário uma atualização periódica dos produtos para cumprirem suas finalidades (modificado de FRANCISO, 2018).

3.10 Método GOD

Segundo Foster et al. (2006), o método GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, são considerados dois fatores básicos:

- o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero
- a capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero.

Esses fatores, no entanto, não podem ser diretamente determinados e dependem, por sua vez, da combinação de outros parâmetros (Tabela 5). Uma vez que geralmente não se dispõe de muitos desses parâmetros, a simplificação da lista é uma medida inevitável, se o objetivo é desenvolver um esquema de mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Com base nessas considerações, o índice de vulnerabilidade GOD (Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988) caracteriza a vulnerabilidade do aquífero à contaminação tendo em conta os seguintes parâmetros, que geralmente estão disponíveis ou são facilmente determinados (FOSTER et al., 2006):

- o confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero em questão;
- os estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante;
- a profundidade do lençol freático ou até o teto do aquífero confinado.

Tabela 5 - Fatores que controlam a vulnerabilidade de aquíferos de acordo com Foster et al. (2002)

Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação		
COMPONENTE DE VULNERABILIDADE	DADOS HIDROGEOLÓGICOS	
	idealmente necessários	normalmente disponíveis
Inacessibilidade Hidráulica	grau de confinamento do aquífero	tipo de confinamento da água subterrânea
	profundidade até o lençol freático ou a posição da água subterrânea	profundidade até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado
	condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante	
Capacidade de Atenuação	distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante	grau de consolidação/fissuração desses estratos
	mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante	característica litológica desses estratos

Esses parâmetros abrangem, ainda que apenas no sentido qualitativo, a maioria dos que constam na Tabela 5 (FOSTER et al., 2006).

De acordo com Foster et al. (2006), a metodologia empírica proposta para estimar-se a vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster e Hirata, 1988) envolve alguns estágios distintos:

- primeiro, identificação do tipo de confinamento de água subterrânea, com a posterior indexação desse parâmetro, na escala de 0,0–1,0;
- segundo, especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de (a) grau de consolidação (e, portanto, provável presença ou ausência de permeabilidade por fissuras) e (b) tipo de litologia (e, portanto, porosidade indiretamente dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica); isto leva a uma segunda pontuação, numa escala de 0,4–1,0;
- terceiro, estimativa da profundidade do lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6–1,0.

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices (Figura 10) (FOSTER et al., 2006).

Foster et al. (2006), também informa que o esquema representado na Figura 10 tem algumas modificações em relação à versão original (Foster e Hirata, 1988), como reflexo dos resultados obtidos com as experiências de aplicação desse método durante a década de 1990. Segundo o autor as modificações incluem:

- uma pequena redução nos índices do parâmetro “distância até a água subterrânea”
- uma simplificação na caracterização geológica da “ocorrência de estratos de cobertura” para “rochas potencialmente fraturadas de vulnerabilidade intrínseca intermediária”;
- elucidação do fator “grau de confinamento da água subterrânea”, com respeito aos aquíferos semiconfinados.

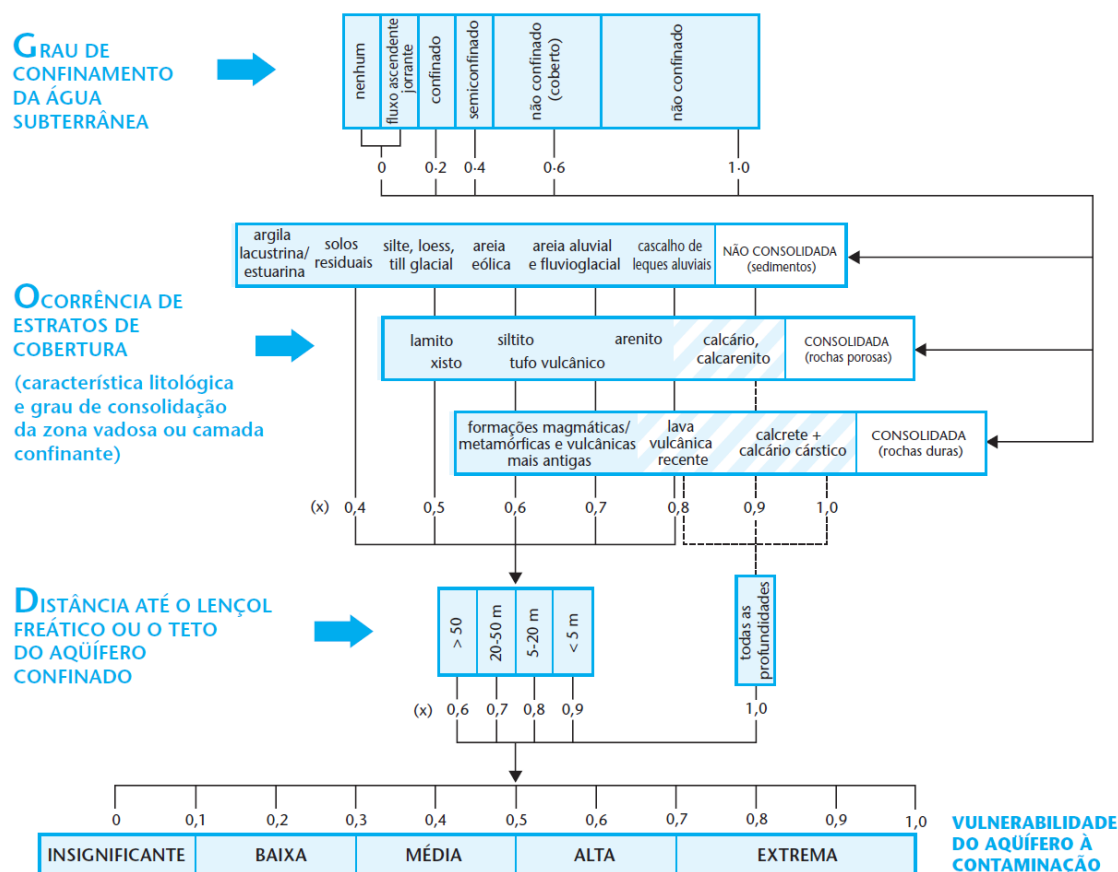


Figura 10 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (FOSTER et al., 2006).

3.11 Método POSH

Segundo Foster et al. (2006), é necessário considerar as várias formas de classificação durante o levantamento das fontes potenciais de carga contaminante de subsolo, no entanto, para um tipo de cadastro simplificado, é conveniente classificar as fontes potenciais de carga contaminante de subsolo com base em duas características:

- a probabilidade da presença de contaminantes que, segundo se sabe ou se espera, são persistentes e móveis no subsolo,
- a existência de uma carga hidráulica associada (sobrecarga) capaz de gerar o transporte advectivo dos contaminantes para os sistemas aquíferos.

Essas informações nem sempre estão prontamente à disposição, e com frequência é necessário trabalhar com suposições simplificadoras, como:

- associar a probabilidade da presença de substância poluente com o tipo de atividade humana;
- estimar a provável sobrecarga hidráulica com base no uso da água pela atividade em questão.

Portanto, Foster et al. (2006) apresenta o método de avaliação das atividades potencialmente contaminante chamado sistema POSH (acrônimo em inglês de *pollutant origin, surcharge hydraulically*) que se baseia em duas características fáceis de estimar: a origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica. O método POSH produz três níveis qualitativos de “potencial para gerar uma carga contaminante no subsolo”: reduzido, moderado e elevado (Tabela 6 e Tabela 7) (FOSTER et al., 2006).

Tabela 6 – Classificação e mapeamento de fontes de contaminação difusas no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).

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

Tabela 7 – Classificação das fontes de poluição pontuais no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).

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, agro-industriais e de mineração de não metálicos	cemitérios	
* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal					

A Tabela 8 apresenta a classificação no sistema POSH de atividades industriais quanto ao seu potencial de gerar carga contaminante no subsolo. Conforme Foster et al. (2006), esta classificação baseia-se:

- No tipo de indústria em questão, pois isso controla a probabilidade de serem utilizados certos contaminantes na água subterrânea;

- Na provável sobrecarga hidráulica associada com a atividade industrial, calculada pelo volume de água utilizado.

Foster et al. (2006), também recomenda a necessidade de se considerar como elevado o potencial de contaminação de indústrias que manuseiem produtos químicos nocivos, como hidrocarbonetos, solventes orgânicos sintéticos (organoclorados), metais pesados etc., em quantidades apreciáveis (acima de 100 kg/dia, por exemplo), frente a dificuldade de se obter dados confiáveis sobre manuseio de produtos químicos e tratamento de efluentes.

Tabela 8 – Classificação das fontes de poluição pontuais industriais no sistema POSH (FOSTER et al., 2006).

Resumo das características químicas e dos índices de risco para atividades industriais comuns										
TIPO INDUSTRIAL	Índice de Risco Mazurek (1-9)	uso relativo da água	carga de salinidade	carga de nutrientes	carga orgânica	hidrocarbonetos	patógenos fecais	metais pesados	orgânico sintético	Índice de Poluição Potencial da Água Subterrânea (1-3)
Ferro e Aço	6	**	•	•	••	••	•	••	••	2
Processamento de Metal	8	*	•	•	•	•	•	•••	•••	3
Engenharia Mecânica	5-8	*	•	•	•	•••	•	•••	••	3
Metais Não-Ferrosos	7	*	•	•	•	•	•	•••	•	2
Minerais Não-Metálicos	3-4	**	•••	•	•	•	•	•	•	1
Refinarias de Gás e Petróleo	7-8	*	•	••	•••	•••	•	•	••	3
Produtos Plásticos	6-8	**	•••	•	••	••	•	•	•••	3
Artefatos de Borracha	4-6	*	••	•	••	•	•	•	••	2
Produtos Químicos Orgânicos	3-9	**	••	•	••	•••	••	••	•••	3
Produtos Químicos Inorgânicos	6-9	**	••	•	•	•	•	•••	•	3
Farmacêuticos	6-9	***	•••	••	•••	•	••	•	•••	3
Madeira	2-4	*	••	•	••	•	•	•	••	1
Papel e Celulose	6	***	•	••	••	•	•	•	••	2
Sabão e Detergentes	4-6	**	••	•	••	••	••	•	•	2
Têxteis	6	***	••	••	•••	•	•	•	••	2
Curtume	3-8	**	•••	••	••	•	•	••	•••	3
Alimentos e Bebidas	2-4	**	••	•••	•••	•	•••	•	•	1
Pesticidas	5-9	**	••	•	•	•	•	•	•••	3
Fertilizantes	7-8	*	•••	•••	•	••	•	•	••	2
Açúcar e Alcool	2-4	**	•••	•••	•••	••	•	•	•	2
Usina Termoeletrica	–	***	•	•	•	•••	•	•••	••	2
Elétricos e Eletrônicos	5-8	*	•	•	•	•••	•	••	•••	3

• reduzida
 •• moderada
 ••• elevada

} probabilidade de concentrações problemáticas de efluentes e/ou líquidos de processos

Fonte: Extraído de BNA, 1975; DMAE, 1981; Hackman, 1978; Luin & Starkenburg, 1978; Nemerow, 1963 e 1971; Mazurek, 1979; USEPA, 1977 e 1980; OMS, 1982; e outros relatórios menores não publicados.

3.12 Método POSH-IG

O método POSH-IG (IRATANI et al., 2013) foi adaptado do método POSH, sendo efetuadas adequações como a inserção de parâmetros disponíveis no Sistema Paulista de Licenciamento Ambiental (CETESB, 2019a) para fontes pontuais e a integração de informações obtidas pelo mapeamento do uso e cobertura da terra, da tipologia e do padrão de ocupação para as fontes difusas,

associadas aos sistemas de saneamento na área urbana e às atividades agropastoris na área rural (adaptado de IRATANI et al., 2013).

O método POSH-IG foi desenvolvido considerando as tipologias de empreendimentos, conforme a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0) elaborada pelo IBGE (2007) e para as fontes pontuais (indústrias) tem como base o método POSH, o Fator de Complexidade (W) e os critérios estabelecidos no SILIS – Sistema de Licenciamento Simplificado.

O Fator de Complexidade (W) de cada tipo de atividade é aplicado pela CETESB no licenciamento dos empreendimentos com potencial de poluição do meio ambiente e está estabelecido no Regulamento da Lei Estadual 997/76, aprovado pelo Decreto Estadual nº 8468/76 e suas alterações.

Quando da elaboração do método POSH-IG o fator W estava estabelecido pelo Decreto Estadual nº 47.397/02, alteração vigente do regulamento supracitado. Esse fator varia de 1 a 5, menor complexidade a maior complexidade, e pode ser considerada como um índice de potencial poluidor de modo geral.

O SILIS consistia à época (2013) de uma forma de licenciamento simplificada para atividades do CNAE 2.0 consideradas como de baixo potencial poluidor, onde as Licenças Prévia, de Instalação e de Operação eram emitidas concomitantemente em até 15 dias, com inspeções prévias realizadas por amostragem. As atividades incluídas no SILIS eram aquelas passíveis de licenciamento ambiental municipalizado, bem como não continham operações de tratamento de superfície (térmico ou químico), fundições de metais, ou não possuísssem armazenamento de GLP – Gás Liquefeito de Petróleo com capacidade acima de 4000 Kg. Também havia linhas de corte por valor máximo de área construída para cada tipo de atividade.

A Tabela 9, a Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam a classificação POSH-IG do potencial poluidor para as atividades, fontes pontuais de contaminação.

**Tabela 9 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação
(IRATANI et al., 2013)**

Grupo de atividade	Tipo de atividade	Classe da carga potencial contaminante			
		Elevada	Moderada	Reduzida	Muito reduzida
Mineração de extração	Minerais Metálicos	Extração e beneficiamento de minerais metálicos			
	Minerais Não Metálicos		Extração e beneficiamento de minerais não metálicos associados à fabricação de fertilizantes, produtos químicos e outros produtos não especificados	Extração e beneficiamento de minerais não metálicos associados à construção civil	
	Petróleo, Gás Natural, Carvão Mineral	Extração e beneficiamento de petróleo, gás natural, xisto, carvão mineral, areias betuminosas, linhito, turfa, antracito, hulha			
Indústria da transformação	Refino de Petróleo e Gás	Fabricação de coque e produtos derivados do petróleo			
	Álcool e açúcar			Produção de álcool e açúcar	
	Processamento de Materiais Não Metálicos			Fabricação de vidro e cimento com $W \geq 3$; produtos cerâmicos refratários ou esmaltados; produtos minerais não metálicos não especificados com $W \geq 2,5$	Fabricação de artefatos de cimento e barro cozido; Marmorarias e Britamento; Outros com $W \leq 2,0$
	Metalurgia e Produtos de Metal	Metalurgia; Fabricação de produtos de metal com $W \geq 3,0$ ou qualquer atividade que manipule resíduos, efluentes ou produtos perigosos acima de 100 kg/dia ou 100 l/dia	Fabricação de produtos de metal com $W \leq 2,5$		

Tabela 10 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação (IRATANI et al., 2013), continuação.

Grupo de atividade	Tipo de atividade	Classe da carga potencial contaminante			
		Elevada	Moderada	Reduzida	Muito reduzida
Indústria da transformação	Engenharia Mecânica	Fabricação de máquinas, equipamentos e acessórios em geral; Fabricação e montagem de veículos; Construção e reparação de embarcações e aeronaves, incluindo peças e acessórios			Marcenaria e Fabricação de peças e artefatos de madeira com área $\leq 250 \text{ m}^2$
	Produtos Elétricos e Eletrônicos	Fabricação de materiais, equipamentos e acessórios elétricos e eletrônicos			Fabricação de artefatos de papel ($W \leq 2$)
	Produtos de Madeira		Produção de madeira reconstituída ou tratada com agentes de conservação e imunização	Madeira e fabricação de artefatos de madeira	
	Celulose e Papel		Fabricação de celulose e papel ($W \geq 4$)	Fabricação de embalagens de papel e papelão	
	Borracha		Beneficiamento de borracha natural e Fabricação de artefatos de borracha ($W \leq 3,0$)		
	Couro	Curtimento e outras preparações de couro ($W = 5$)	Fabricação de artefatos de couro ($W \leq 3,5$)		
	Química	Fabricação de produtos químicos, petroquímicos, agroquímicos e desinfetantes domissanitários. Recuperação de solventes e óleos	Produção de fertilizantes		
	Farmacêutica	Fabricação de medicamentos farmacêuticos e veterinários			Fabricação de artefatos têxteis com $W \leq 2$ e Confeção de artigos de vestuário
	Sabões e Detergentes		Fabricação de sabões, detergentes e produtos de perfumaria e cosmética		Manufatura de alimentos e bebidas ($W \leq 3,0$)
	Têxtil		Fabricação e acabamento de fios e tecidos, com $W > 2,0$		
	Alimentos e Bebidas			Abate de animais e Manufatura de alimentos e bebidas com $W \geq 3,5$	
	Plástico	Fabricação de plásticos (monômeros, polímeros e resinas) ($W = 5$)		Fabricação de artefatos plásticos ($W \leq 2,5$)	

Tabela 11 – Sistema de Classificação POSH-IG para fontes pontuais de contaminação (IRATANI et al., 2013), continuação.

Grupo de atividade	Tipo de atividade	Classe da carga potencial contaminante			
		Elevada	Moderada	Reduzida	Muito reduzida
Resíduo e Efluente	Destino final	Aterro industrial; disposição inadequada ou com resíduos de origem desconhecida (inclui lixão, bota-fora, queima ao ar livre, aterro controlado)	Aterro sanitário com resíduo urbano, inerte ou agroindustrial		
	Reciclagem e recuperação	Reciclagem e/ou recuperação de óleos, solventes ou resíduos contendo produto químico ou perigoso (W =5)	Reciclagem e/ou recuperação de sucata metálica e não metálica com W ≤ 3	Compostagem	
	Tratamento		Lagoa de tratamento de efluentes com área > 5 ha	Lagoa de tratamento de efluentes com área ≤ 5 ha e estação de tratamento de água	
Comércio e Serviço	Cemitério			Cemitério horizontal	Cemitério vertical
	Energia e gás		Produção e distribuição de energia elétrica e distribuição de gás		
	Comércio e armazenamento de combustíveis, produtos químicos ou perigosos	Depósito e comércio atacadista de combustíveis, produtos químicos, petroquímicos e farmacêuticos com W ≥ 2,5	Depósito e comércio atacadista ou varejista de combustíveis, produtos químicos, petroquímicos e farmacêuticos com W ≤ 2		
	Garagens e oficinas de manutenção		Garagens de veículos de transporte; oficinas de mecânica e funilarias		
	Lavanderia		Lavanderia		
	Gráfica			Serviços de impressão em geral, excetuando serviços de computação gráfica	
Atividade agrosilvo-pastoril	Criação confinada de animais		Criação comercial confinada com lagoas de efluentes ou área de confinamento > 1 ha	Criação comercial confinada com lagoas de efluentes ou área de confinamento ≤ 1 ha	

Na atualidade o SILIS foi substituído pelo VRA – Via Rápida Ambiental, dentro do Portal de Licenciamento Ambiental da CETESB, com emissão automatizada das Licenças Prévia, de Instalação e de Operação para as atividades passíveis de municipalização do Licenciamento Ambiental definidas na Deliberação Normativa CONSEMA nº1/2019 com área construída de até 2500 m² para os municípios que não possuem licenciamento municipal. As inspeções dessas

atividades continuam sendo realizadas por amostragem em momento posterior a emissão das licenças ambientais.

3.13 Zonas de captura e áreas de proteção de poços

O gerenciamento sem cuidado de fontes de contaminação das águas subterrâneas pode causar a degradação dessas águas. Uma solução é definir áreas de proteção no entorno de poços (e nascentes) suscetíveis à contaminação e limitar ou controlar o uso do solo nessas áreas (STROBL e ROBILLARD, 2005). Esta concepção surgiu com programas governamentais da Europa e Estados Unidos, na década de 1980, com a finalidade de proteger as captações de água subterrânea (poços) destinadas ao abastecimento público da ameaça de contaminação (IRATANI e EZAKI, 2012).

Essa área é denominada Área de Proteção de Poços, ou em inglês *Well-Head Protection Area*, definida pelo perímetro do entorno da captação que delimita a Zona de Contribuição do poço, isto é, a área onde toda água de recarga que infiltra no aquífero será capturada pelo bombeamento do poço, também denominada de Zona de Captura (adaptado de IRATANI e EZAKI, 2012).

No Estado de São Paulo, o Decreto Estadual nº 32955/91, alterado pelo Decreto 63261/2018, estabelece a Área de Proteção de Poços e Outras Captações definindo dois Perímetros de proteção: o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária e o Perímetro de Alerta contra poluição.

Conforme o Art. 24 do Decreto Estadual nº 32955/91 o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária será instituído Perímetro Imediato de Proteção Sanitária a partir do ponto de captação, dotado de laje de proteção, devendo o seu interior ficar resguardado da entrada ou penetração de poluentes. Segundo o Parágrafo único do Art. 24, as lajes de proteção, de concreto armado, deverão ser fundidas no local, envolver o tubo de revestimento, ter declividade do centro para as bordas, espessura mínima de dez centímetros e área não inferior a três metros quadrados. Antes da alteração dada pelo Decreto 63261/2018, era previsto o raio de 10 m no entorno do poço para o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária

O Perímetro de Alerta contra poluição é definido no Art. 25 do Decreto Estadual nº 32955/91 tomando-se por base uma distância coaxial ao sentido do fluxo, a partir do ponto de captação, equivalente ao tempo de trânsito de cinquenta dias de águas no aquífero, no caso de poluentes não conservativos.

A Resolução Conjunta SMA / SERHS / SES -3, de 21/06/2006, estabeleceu que o requerimento de outorga de captação para água subterrânea junto ao DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, órgão regulador dos usos da água subterrânea no estado, depende da apresentação de mapeamento das fontes potenciais de poluição num raio de 500 m, e em caso da ocorrência de áreas declaradas contaminadas nesse raio de 500 m deve ser apresentado Parecer Técnico da CETESB referente a qualidade ambiental.

Assim, quando há ocorrência de contaminação das águas subterrâneas dentro desse raio fixo arbitrário de proteção de poços de 500 m, para a obtenção da outorga, direito de uso, do poço junto ao DAEE, o requerente necessita solicitar um Parecer Técnico à CETESB, nesse parecer a CETESB avalia as condições de fluxo e potencial de migração da contaminação em relação ao poço.

Conforme a DD 38/2017 (CETESB, 2017) e IT 39 (CETESB, 2019), normas regulamentadoras da CETESB, em atendimento a Resolução Conjunta SMA / SERHS / SES -3, de 21/06/2006 o interessado solicitará o Parecer Técnico de Outorga à CETESB apresentado relatório da situação ambiental das áreas contaminadas localizadas em um raio de 500 metros do ponto de perfuração do poço de abastecimento de água a ser outorgado. Nesse parecer a CETESB avalia as condições de fluxo e potencial de migração da contaminação em relação ao poço, exarando o Parecer Técnico que pode ser:

- Desfavorável à solicitação de outorga, caso as informações apresentadas sejam insuficientes, exigindo do Responsável Legal as adequações necessárias e a reapresentação das informações;
- Emitido, informando sobre a situação das áreas contaminadas vizinhas, apontando as contaminações capazes de influenciar a captura do poço a ser outorgado e indicando as recomendações a serem seguidas, caso a outorga seja concedida;
- Emitido, informando sobre a inexistência de restrições à solicitação de outorga no âmbito de áreas contaminadas.

Em casos específicos de contaminação, o parecer pode até mesmo ser desfavorável à utilização do poço recomendando o indeferimento da outorga e tamponamento do poço se existente.

Neste sentido, há no Estado de São Paulo três raios de proteção de poços definidos, um raio de proteção sanitária, um perímetro de alerta na isócrona de 50 dias de trânsito da água subterrânea dentro da Zona de Captura do poço, e o raio arbitrário de 500 m, onde caso haja área contaminada declarada, o responsável pela captação necessita de análise de deferimento do órgão ambiental (CETESB) para poder solicitar a outorga de uso junto ao órgão de gerenciamento de recursos hídricos (DAEE).

Além de determinações normativas, USEPA (1994) e Strobl e Robillard (2005) apresentam métodos de delimitação de áreas de proteção de poços aplicados nos EUA e na Alemanha. Iratani e Ezaki (2012) indica como mais utilizados os métodos: Raio Fixo Arbitrário (RFA); Raio Fixo Calculado (RFC) – Equação Volumétrica; Método de Wyssling; Mapeamento Hidrogeológico; Modelo Analítico; e Modelos Numéricos – modelos matemáticos de simulação de Fluxo; e apresenta uma comparação desses métodos (Tabela 11).

Para o Estado de São Paulo, Iratani e Ezaki (2012) propõe a definição dos perímetros de alerta a partir do método de Wyssling (1979 apud IRATANI e EZAKI, 2012). Este método permite calcular a Zona de Contribuição e Zonas de Transporte considerando o conceito de fluxo natural uniforme do aquífero e de fluxo radial causado pelo bombeamento de um poço. Considera aquíferos homogêneos, confinados e poço com vazão de bombeamento inferior à taxa de descarga do aquífero, e por ser de fácil aplicação. É um método aplicado na Alemanha para a delimitação da zona de transporte de 50 dias (STROBL e ROBILLARD, 2005). Merino e Navarrete (1991) e Navarrete e Garcia (2003) também descrevem o método de Wyssling como de fácil aplicação, em especial para pequenos tempos de trânsito e mencionam a aplicação deste método em alguns aquíferos na Espanha (IRATANI e EZAKI, 2012).

Tabela 12 – Métodos para a determinação de perímetros de proteção de poços (IRATANI e EZAKI, 2012).

Método	Tipo de Aquífero	Limitações	Dados Necessários									
			Q	i	K	b	n _e	S	N	V _e	Outros dados	
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
Mapeamento 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 (Kx, Ky, Kz, S, ne), Q e regime de bombeamento em cada captação.									
Legenda:												
Tipos de Aquíferos:			Dados Necessários:									
P - Porosidade intergranular ou similar			Q: Vazão bombeada					S: Coeficiente de Armazenamento				
C - Cárstico			i: Gradiente Hidráulico					N: Recarga				
F - Fissural			K: Condutividade Hidráulica					n _e : Porosidade efetiva				
			b: Espessura Saturada					V _e : Velocidade Efetiva				

USEPA (2008) utiliza formulações semelhantes ao método de Wyssling (1979) para a estimativa de zonas de captura em poços de extração para projetos de remediação por bombeamento e tratamento (*pump and treat*).

Iratani e Ezaki (2012), assume para o aquífero cristalino que esse se comporta com homogêneo dentro do raio proteção de 50 dias, visando permitir a aplicação do método de Wyssling (1979).

Risser e Barton (1995), descrevem que a aplicação de métodos simplificados para aquíferos fraturados e heterogêneos podem ser não aplicáveis e apresentam uma estratégia de delimitação de áreas de proteção em aquíferos fraturados partindo de um modelo conceitual inicial e refinar o modelo coletando informações geológicas de uma ou mais de seis categorias: mapeamento hidrogeológico, medidas do nível d'água e fluxo, geoquímica, geofísica e medição de fluxo em furos de sondagem, teste permeabilidade e fluxo no aquífero, e testes com traçadores.

A Figura 11 apresenta o diagrama esquemático e parâmetros do método de Wyssling (1979). O cálculo do limite da Zona de Contribuição por esse método considera que a direção do fluxo natural da água subterrânea coincide com o eixo X.

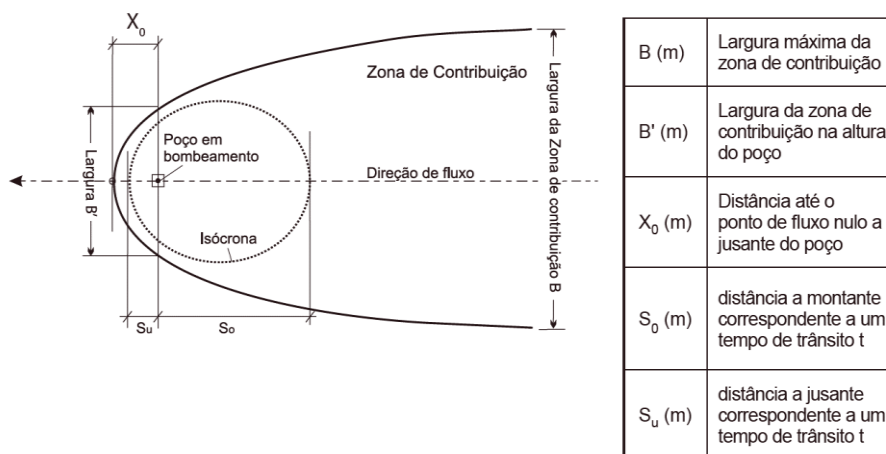


Figura 11 - Parâmetros e representação esquemática do método de Wyssling (1997) (IRATANI e EZAKI, 2012).

Onde:

$$B = \frac{Q}{Kbi} ; B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2Kbi} \quad (1)$$

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (2)$$

$$V_e = \frac{K \cdot i}{n_e} ; l = V_e \cdot t \quad (3)$$

$$S_0 = \frac{l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} ; S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} \quad (4)$$

Sendo: Q – Vazão do poço; b – Espessura saturada do aquífero; K – Condutividade Hidráulica; i – Gradiente hidráulico do aquífero sem a influência do poço; n_e – porosidade específica; V_e – Velocidade real; l – Distância linear correspondente ao tempo t ; t – Tempo de trânsito da água correspondente a isócrona.

A Tabela 13 apresenta parâmetros hidrogeológicos médios regionais e os cálculos realizados pelo método de Wyssling por Iratani e Ezaki (2012) para o tempo de trânsito da água subterrânea de 50 dias, visando o estabelecimento de perímetros de alerta para o Estado de São Paulo considerando o valor de S_0 na proposição do raio de um perímetro de alerta circular.

Tabela 13 – Distâncias radiais para o tempo de trânsito de 50 dias aplicando o método de Wyssling (IRATANI e EZAKI, 2012).

Unidade Hidrogeológica	Q (m³/h)	I	K (m/d)	b (m)	ne	B (m)	B' (m)	Xo (m)	Ve (m/d)	I (m)	So (m)	Su (m)
Sistema Aquífero Cristalino	15	0,04	0,3	200	0,05	150	75	23,9	0,24	12	30,7	18,7
	50	0,04	0,3	200	0,05	500	250	79,6	0,24	12	50,1	38,1
Aquífero Furnas	30	0,02	1,5	100	0,12	240	120	38,2	0,25	12,5	37,8	25,3
Sistema Aquífero Tubarão	40	0,04	0,3	350	0,1	228,6	114,3	36,4	0,12	6	24,1	18,1
Sistema Aquífero Guarani (porção livre, aflorante e porção confinada com até 50 metros de espessura de basalto)	40	0,01	2,5	150	0,15	256	128	40,7	0,17	8,3	30,6	22,2
	120	0,01	2,5	150	0,15	768	384	122,2	0,17	8,3	49,5	41,2
Aquífero Serra Geral	30	0,03	1	150	0,08	160	80	25,5	0,38	18,8	41,7	22,9
	120	0,03	1	150	0,08	640	320	101,9	0,38	18,8	71,9	53,1
Sistema Aquífero Bauru	20	0,02	1,5	120	0,12	133,3	66,7	21,2	0,25	12,5	30,1	17,6
	100	0,02	1,5	120	0,12	666,7	333,3	106,1	0,25	12,5	58,1	45,6
Aquífero Taubaté	40	0,02	1,5	200	0,13	160	80	25,5	0,23	11,5	30,7	19,1
	120	0,02	1,5	200	0,13	480	240	76,4	0,23	11,5	48,2	36,6
Aquífero São Paulo	20	0,03	1	100	0,1	160	80	25,5	0,3	15	36,1	21,1
	50	0,03	1	100	0,1	400	200	63,7	0,3	15	51,8	36,8
Aquífero Litorâneo	15	0,01	0,5	75	0,08	1920	960	305,6	0,03	1,6	31,7	30,1
Coberturas Cenozóicas	20	0,03	1	30	0,1	533,3	266,7	84,9	0,3	15	58,5	43,5

3.14 Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas

Conforme Foster e Hirata (1988), a abordagem mais lógica para a definição da poluição da água subterrânea é compreendê-la como a interação entre:

- A carga de contaminante que é, será ou poderá ser aplicada no ambiente de subsuperfície como resultado da atividade humana;
- A vulnerabilidade à poluição do aquífero, consequência das características naturais dos estratos que a separam da superfície terrestre (vulnerabilidade natural do aquífero).

A Figura 12 apresenta uma representação esquemática desse conceito.

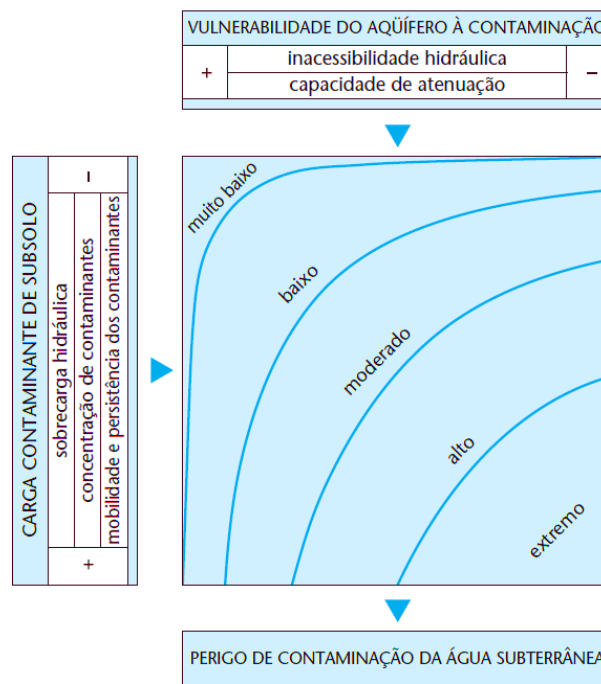


Figura 12 – Representação esquemático do conceito de perigo de contaminação da água subterrânea (FOSTER et al. 2006).

Foster et al. (2006) modificou o termo em inglês “*risk*” utilizado em Foster e Hirata (1988) para perigo, definindo o perigo de contaminação da água subterrânea como a probabilidade de um aquífero sofrer impactos negativos decorrentes de determinada atividade humana, a tal nível que sua água subterrânea se torne imprópria para consumo, segundo os valores-guias estabelecidos pela OMS para a qualidade da água potável.

Foster et al. (2006) justifica que o termo “perigo de contaminação da água subterrânea” empregado por estes autores tem exatamente o mesmo sentido que “risco de contaminação da água subterrânea” empregado por Foster e Hirata (1988). A mudança de terminologia é necessária para adequar-se àquela utilizada por outras áreas de avaliação de riscos a ecossistemas e à saúde humana e animal, onde risco é agora definido como o produto de “perigo vezes escala do impacto”.

Em áreas onde já existem várias atividades potencialmente poluentes, a principal necessidade será estabelecer prioridades para as medidas de controle da contaminação da água subterrânea. Tanto nas zonas rurais como urbanas, será necessário primeiro definir qual, dentre essas atividades, representa mais perigo para a qualidade da água. Os mesmos três componentes (mapeamento da

vulnerabilidade do aquífero, delimitação das áreas de proteção das fontes de abastecimento e cadastro da carga contaminante de subsolo) constituem a base fundamental para essa avaliação (FOOSTER et al., 2002).

Na Figura 13 é possível observar a priorização para ações de controle de fontes potenciais de poluição para as três componentes citadas.

		ZONAS DE VULNERABILIDADE DO AQUIFERO À CONTAMINAÇÃO*			ÁREAS DE PROTEÇÃO DA FONTE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	
		baixa	média	alta	500 dias	50 dias
CARGA CONTAMINANTE POTENCIAL	reduzida	3	3	2	2	1
	moderada	2	2	1	1	1
	elevada	2	1	1	1	1
NÍVEL DE PRIORIDADE 1 = alto 2 = médio 3 = baixo						

Figura 13 - Nível de prioridade das ações de controle da contaminação da água subterrânea, com base na vulnerabilidade do aquífero, nas áreas de proteção das fontes de água subterrânea e na carga contaminante potencial (FOOSTER et al., 2006).

3.15 Sistemas de Informação Geográfica

Segundo Sutton et al. (2009) um Sistema de Informação Geográfica (SIG), possibilita lidar com dados geográficos num computador, da mesma forma que um processador de texto possibilita escrever documentos e lidar com palavras nesse mesmo computador.

Um SIG consiste em (SUTTON et al., 2009):

- Dados Digitais - a informação geográfica que visualiza e analisa usando o *software* e *hardware* de um computador.
- *Hardware* – computadores destinados a armazenar dados, apresentar gráficos e processar informação.
- *Software* – programas computacionais que correm sobre o *hardware* do computador e permitem trabalhar com dados em formato digital. Os programas que fazem parte dos SIG são chamados de aplicações SIG.

Conforme Sutton et al. (2009), com uma aplicação SIG pode-se abrir mapas digitais no computador, gerar nova informação espacial para adicionar ao mapa, imprimir mapas personalizados e fazer análise espacial.

Um SIG é constituído por um conjunto de ferramentas especializadas em adquirir, armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais. Esses dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posição, com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos não aparentes (como a cor, pH, custo, incidência de pragas etc.) e das relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos do meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real (CÂMARA e ORTIZ, 2018). Um SIG pode, ainda, ser definido como um sistema provido de quatro grupos de aptidões para manusear dados georreferenciados: entrada, gerenciamento, manipulação e análise, e saída. Os dados são georreferenciados quando estes possuem basicamente duas características: dimensão física e localização espacial (CÂMARA e ORTIZ, 2018). Em resumo, as principais características de um SIG são:

- Integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno.
- Combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados.
- Consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.

Os dados tratados em um SIG incluem: imagens de satélite, modelos numéricos de terreno, mapa temáticos, redes e dados tabulares (CÂMARA e ORTIZ, 2018). Uma característica básica e geral em um SIG é sua capacidade de tratar as relações espaciais entre os objetos geográficos. Denota-se por topologia a estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que podem se estabelecer entre objetos geográficos. Armazenar a topologia de um mapa é uma das características básicas que fazem um SIG se distinguir de um sistema CAD. A outra diferença fundamental é a capacidade de tratar as diversas projeções cartográficas. Para aplicações em análise geográfica e redes, o armazenamento da topologia permite o desenvolvimento de consultas a um banco de dados espacial, que não seriam possíveis de outra maneira (CÂMARA e ORTIZ, 2018).

Os SIG constituem-se na integração de três aspectos distintos da tecnologia computacional (Figura 14): Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados (dados gráficos e não gráficos); Procedimentos para obtenção, manipulação, exibição e impressão de dados com representação gráfica; e Algoritmos e técnicas para análise de dados espaciais (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).

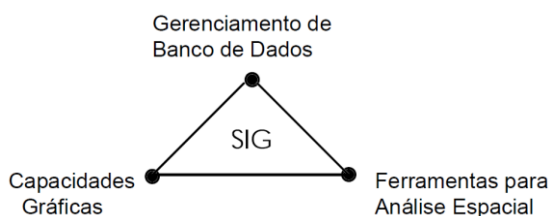


Figura 14 – Representação esquemática da integração de três aspectos distintos da tecnologia computacional de SIG (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).

Conforme Lisboa Filho e Iochpe (1996), existem duas abordagens principais de representação dos componentes espaciais associados às informações geográficas: o modelo matricial (ou *raster*) e o modelo vetorial.

No modelo vetorial, as entidades do mundo real são representadas como pontos, linhas e polígonos. A posição de cada objeto é definida por sua localização no espaço, de acordo com algum sistema de coordenadas (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).

Na Figura 15 tem-se um exemplo de dados vetoriais e seus atributos associados e na Figura 16 tem-se os mesmos dados junto a um dado matricial (*raster*).

No modelo matricial, a área em questão é dividida em uma grade regular de células, normalmente quadradas ou retangulares. A posição da célula é definida de acordo com a linha e a coluna onde está localizada. Cada célula contém um valor que corresponde ao tipo de entidade que é encontrada naquela posição. Normalmente, uma área é representada através de diferentes camadas (mapas temáticos), onde as células de uma camada armazenam os valores associados a uma única variável ou tema (ex.: tipo de solo, hidrologia, relevo, etc.). O espaço é todo coberto, uma vez que cada localização na área de estudo corresponde a uma célula na imagem matricial (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).

O dado matricial apresentado na Figura 16, representa um modelo numérico do terreno obtido através das cotas dos pontos de sondagem e poços de monitoramento apresentados na Figura 15, sendo as linhas em ambas as figuras, curvas de nível retiradas desse modelo matricial do terreno.

A Figura 17 demonstra a capacidade de sobreposição dos modelos em SIG, neste caso, apresentando os dados da Figura 15 e da Figura 16 sobre a imagem aérea do local de onde os dados foram amostrados, o que pode ser realizada de uma maneira bastante simples, tanto utilizando uma imagem já georreferenciada, como a utilizada, como também georreferenciando uma imagem com base em pontos de referência de coordenadas conhecidas ou medidas em campo.

Na Figura 15 e a na Figura 16 tem-se também a tabela de atributos associada as feições representadas. Através desta tabela é possível criar um banco de dados sobre diversas características associadas à uma feição com representação no espaço com coordenadas planas ou geodésicas e cota.

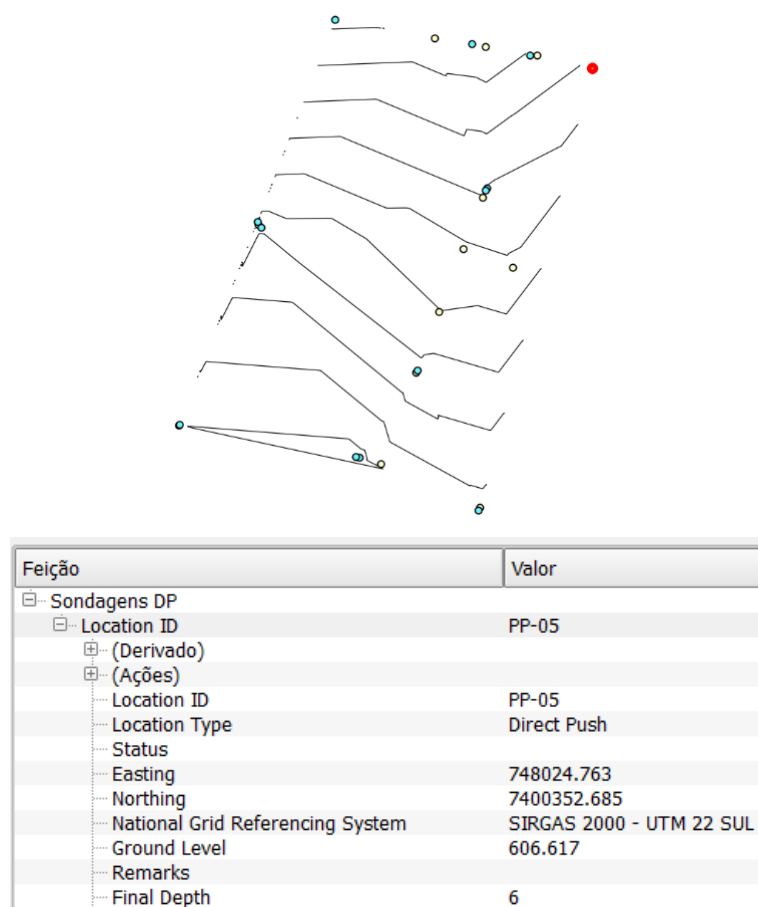


Figura 15 - SIG: dados vetoriais e atributos.

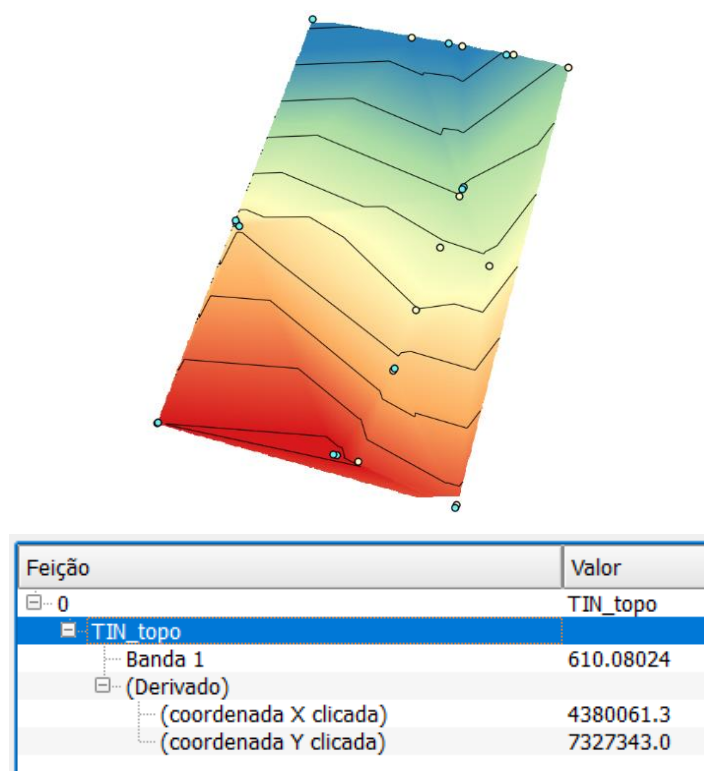


Figura 16 - Dados Matriciais (raster) e atributos.

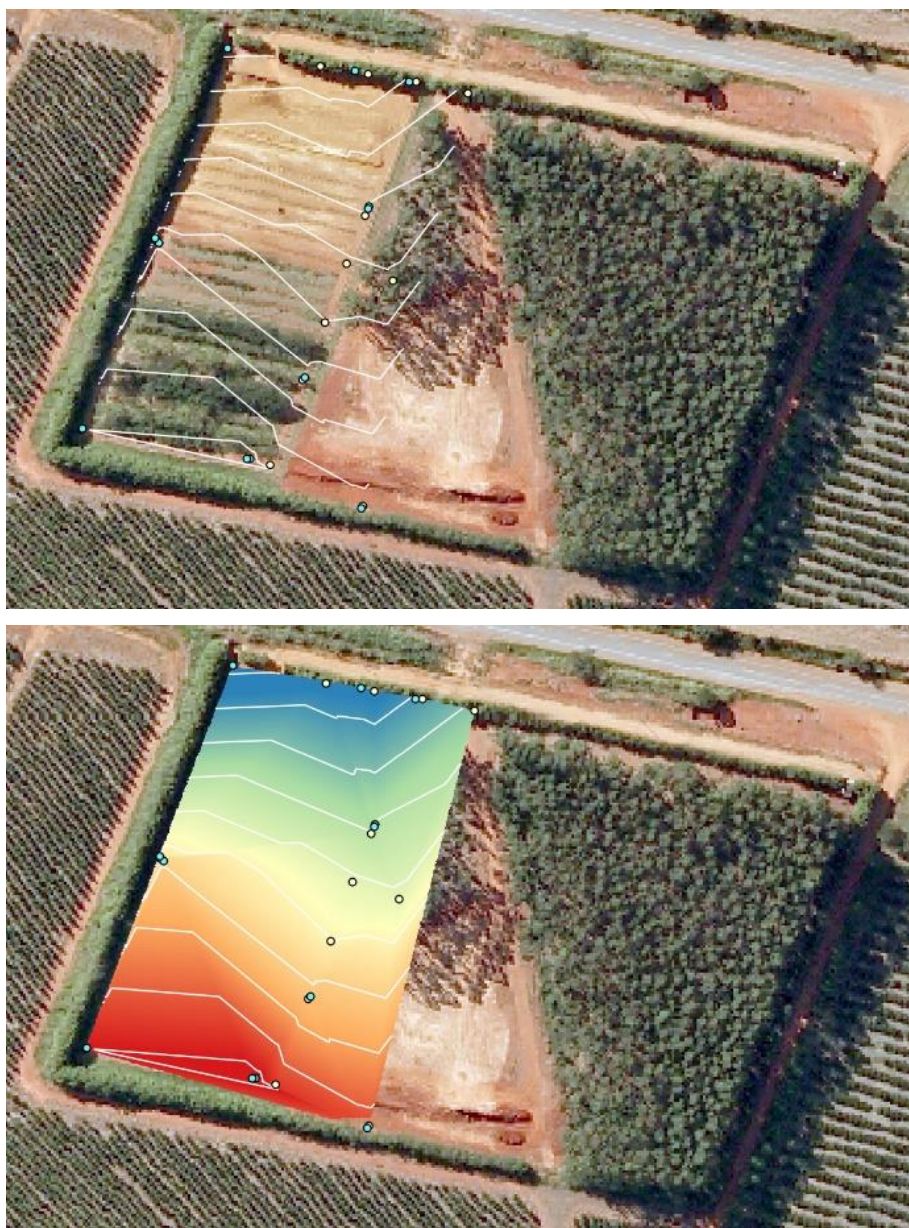


Figura 17 - SIG: sobreposição de dados sobre ortofotos do Estado de São Paulo da Emplasa (2010).

Lisboa Filho e Iochpe (1996), apresentam um quadro resumo (Tabela 14) destacando os dados vetoriais e matriciais e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 14 - Resumo sobre dados vetoriais e matriciais e suas vantagens e desvantagens, conforme Lisboa Filho e Iochpe (1996).

FORMATO MATRICIAL	
Vantagens:	• Utiliza estrutura mais simples. • Operações de <i>overlay</i> são implementadas mais eficientemente. • Representação eficiente de áreas com alta variação espacial. • Tratamento adequado de imagens produzidas por satélites.
Desvantagens:	• Estruturas de dados são menos compactas. Armazenam uma maior quantidade de dados, independente da utilização de métodos de compactação. • Relacionamentos topológicos são mais difíceis de serem representados. • Saída gráfica com menor resolução.
FORMATO VETORIAL	
Vantagens:	• Utiliza uma estrutura de dados mais compacta do que o formato matricial. • Suporta o armazenamento de topologia. • Permite a realização de cálculos de medidas espaciais mais precisos. • Suporte adequado para operações que requerem informações topológicas. • Gera saídas gráficas de melhor qualidade.
Desvantagens:	• As estruturas de dados são mais complexas que no formato matricial. • Operações de <i>overlay</i> são mais difíceis de serem implementadas. • A representação de áreas com alta variação espacial é ineficiente. • É inadequado para manipulação de imagens geradas por satélites.

Segundo Lisboa Filho e Iochpe (1996), um SIG deve fornecer operações para a recuperação de informações segundo critérios de natureza espacial e não-espacial. Ele deve ser capaz de manipular dados espaciais e recuperar informações com base em conceitos como proximidade, pertinência, adjacência, interseção etc. Atualmente existe uma enorme variedade de funções de manipulação e análise de dados disponíveis nos sistemas.

Assim, Lisboa Filho e Iochpe (1996) apresentam um quadro resumo agrupando e classificando as funções de análise espacial mais frequentemente encontradas na maioria dos sistemas SIG.

Tabela 15 – Resumo agrupando e classificando as funções de análise espacial em SIG (LISBOA FILHO e IOCHPE, 1996).

1. Manutenção e Análise de Dados Espaciais	-Transformações de Formato -Transformações Geométricas -Transformações entre Projeções -Casamento de Bordas -Edição de Elementos Gráficos -Redução de Coordenadas	
2. Manutenção e Análise de Atributos Descritivos	-Edição de Atributos Descritivos -Consulta a Atributos Descritivos	
3. Análise Integrada de Atributos Espaciais e Descritivos	-Recuperação, Classificação e Medidas -Sobreposição (overlay) -Vizinhança -Conectividade	-Recuperação -Classificação e Generalização -Medidas -Busca -Linha-em-Polígono e Ponto-em-Polígono -Funções Topográficas -Funções de Interpolação -Geração de Contornos -Medidas de Contiguidade -Proximidade -Rede -Intervisibilidade
4. Formatação de Saída	-Anotações em Mapa -Posicionamento de Rótulos -Padrões de Texto e Estilos de Linhas -Símbolos Gráficos	

3.16 Geocodificação de endereços

A determinação de uma posição geográfica a partir de um endereço descritivo é chamada de geocodificação. Essas ferramentas geralmente compreendem duas partes interdependentes: um conjunto de métodos de geocodificação e o banco de dados de endereçamento, às vezes chamado de banco de dados de referência (DAVES Jr. e FONSECA, 2007).

Nos primeiros SIG, o uso da geocodificação era limitado a grupos de profissionais que tinham uma boa compreensão dos processos subjacentes e das

incertezas associadas. No entanto, com a Internet e o avanço nas tecnologias de serviços da Web, a complexidade da geocodificação ficou mais transparente para os usuários finais. Hoje em dia, converter um endereço em um conjunto de coordenadas em tempo real pode ser feito enviando uma solicitação a um serviço de geocodificação online com pouco conhecimento, pouco esforço e pouco ou nenhum custo (ROONGPIBOONSOPIT e KARIMI, 2010).

Cinco serviços Web de geocodificação, Geocoder.us, Google, MapPoint, Map Quest, foram testados e avaliados por Roongpiboonsopit e Karimi (2010) para 552 endereços nos EUA, distribuídos entre zonas urbanas e rurais, classificando o nível de combinação entre o endereço e a coordenada como bom, ambíguo ou não encontrado. Dentre esses, o Google apresentou a maior taxa de combinações de nível bom, 88,04%, com 8,52% de combinações ambíguas e 3,44 % de endereços não encontrados. Na análise de acurácia, para as combinações de nível bom foi encontrado um erro médio de 163 m.

Roongpiboonsopit e Karimi (2010a), avaliaram a acurácia da geocodificação denominada “*rooftop*”, que indica a coordenada geográfica do topo do prédio cujo endereço foi procurado, a que indica um ponto na rua, e a híbrida que utiliza as duas formas de localização. O serviço Web do Google é do tipo híbrido, e num conjunto de 5000 pontos avaliados no Condado de Allgheny, Pennsylvania, EUA, obteve 93,64% de combinações boas, com erro mediano de 10,9 m e erro referente ao percentil de 95% de 48,5 m, em 3112 pontos avaliados.

O Google (2018) estabelece um limite diário gratuito para a geocodificação de endereços, sendo de 2500 registros por dia, com 50 registros buscados por segundo.

O *Geocoding API* do Google (GOOGLE, 2020), retorna em uma de suas variáveis o nível de acurácia da coordenada encontrada, com os seguintes níveis:

- “ROOFTOP” - indica que o resultado é um código geográfico preciso para o qual se tem informações de localização precisas até a precisão do endereço.
- “RANGE_INTERPOLATED” - indica que o resultado é uma aproximação (geralmente em uma estrada) interpolada entre dois pontos precisos (como cruzamentos). Os resultados interpolados

geralmente são obtidos quando os códigos geográficos do telhado não estão disponíveis para um endereço de rua.

- “GEOMETRIC_CENTER” - indica que o resultado é o centro geométrico de um vetor, como uma polilinha (por exemplo, uma rua) ou polígono (região).
- “APPROXIMATE” - indica que o resultado é aproximado.

Para as atividades industriais, que em sua maioria ocorrem em zonas urbanizadas com endereços bem definidos, a geocodificação de endereços realizada apresenta bons resultados. Resultados com pouca acurácia geralmente ocorrem apenas para os endereços rurais, que possuem muitas vezes denominações sem padrão, somente os nomes dos bairros, ou da fazenda, ou ainda várias denominações diferentes para a mesma via. Também não é possível a geocodificação de endereços como Rua 1, via projetada ou Rua projetada, por exemplo.

3.17 Interpolação de densidade de Kernel

A interpolação de densidade de Kernel cria um arquivo *raster* de densidade (mapa de calor) a partir de um vetor de pontos utilizando uma estimativa de densidade de Kernel (QGIS PROJECT, 2021).

O estimador de densidade de Kernel desenha uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de busca, e então é aplicada uma função matemática saindo de 1, na posição do ponto, até 0, na fronteira da vizinhança. O valor para cada pixel é a soma dos valores Kernel sobrepostos de forma bruta ou dividida pela área de cada raio de pesquisa (adaptado de OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2017).

Segundo Oliveira e Oliveira (2017), a interpolação de densidade de Kernel gera um arquivo matricial (*raster*) como resultado da soma do empilhamento de n outros *rasters* circulares de raio h para cada ponto do dado de entrada, segundo a equação (5) a seguir:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \quad (5)$$

na qual K = função de Kernel; h = raio de busca; x = posição do centro de cada célula do *raster* de saída; X_i = posição do ponto i proveniente do centroide de cada polígono; e n = número total de pontos.

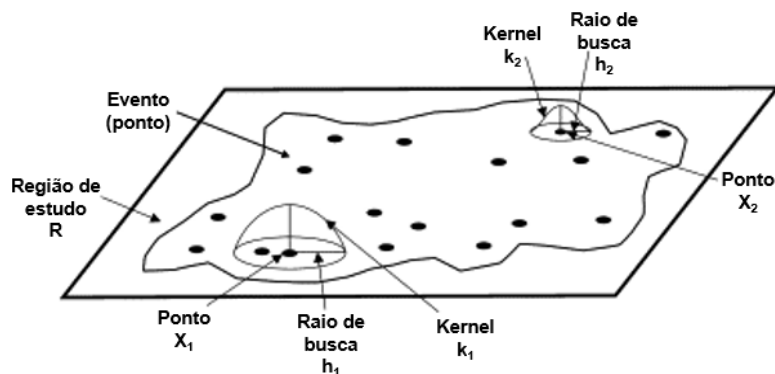


Figura 18 - O princípio da função de Kernel (adaptado de ERDOGAN et al., 2008)

Epanechnikov (1967, apud ZUCCHINI, 2003), Quártica (*Quartic* ou *Biweight*), Triangular, Gaussiana e Uniforme (retangular) são exemplos de funções de Kernel (ZUCCHINI, 2003), e a representação gráfica dessas funções encontra-se na Figura 19 e suas equações na Tabela 16.

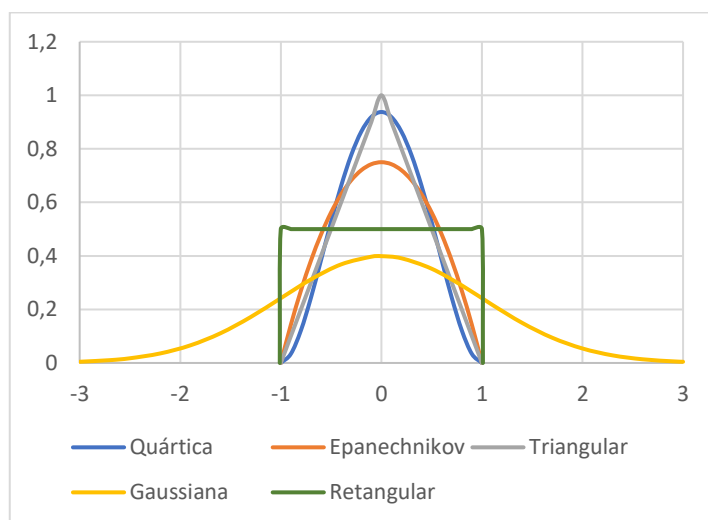


Figura 19 – Exemplos de funções de Kernel.

Tabela 16 – Exemplos de funções de Kernel.

Função de Kernel	Equação
Epanechnikov (1967)	$K(u) = \begin{cases} \frac{3}{4}(1 - u^2) & \text{se } u \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$
Quártica (<i>Quartic</i> ou <i>Biweight</i>)	$K(u) = \begin{cases} \frac{15}{16}(1 - u^2)^2 & \text{se } u \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$
Triangular	$K(u) = \begin{cases} 1 - u & \text{se } u \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$
Gaussiana	$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}$
Uniforme (retangular)	$K(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{se } u \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$

A Figura 20 apresenta em corte a aplicação da interpolação de Kernel em um pequeno conjunto de pontos para duas funções de Kernel (Epanechnikov e Quártica), onde podem ser observados os Kernels aplicados em cada ponto e a somatória dos valores dos Kernels (linha vermelha pontilhada), resultado da interpolação.

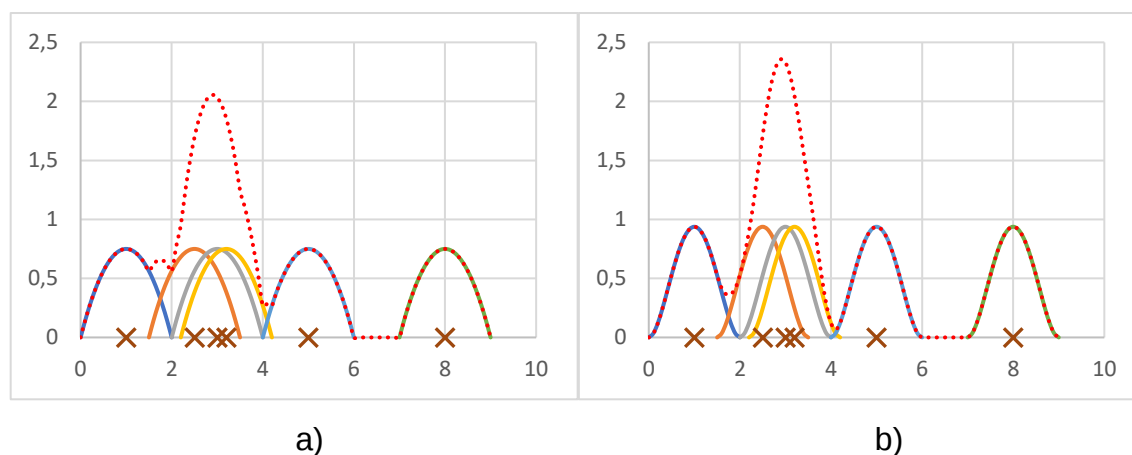


Figura 20 – Aplicação da interpolação de Kernel: a) função de Epanechnikov; b) função quártica.

O mapa dos valores de densidade de Kernel permite avaliar a distribuição espacial da localização de áreas com maior densidade (agrupamento) de pontos (*hot spots*) (QGIS PROJECT, 2021).

Vale destacar que essa interpolação não tem por objetivo estimar valor de uma variável em um ponto no espaço a partir de pontos próximos com valores

conhecidos, ou seja, não consiste de método geoestatístico. Sua função é simplesmente indicar áreas com maiores concentrações de pontos, podendo se adotar uma escala numérica, ou qualitativa.

O estimador de kernel também pode ser visto como um histograma espacial suavizado, representando uma frequência de ocorrência de pontos numa região.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

Para validação da proposta a área de estudo selecionada encontra-se nos municípios de Sorocaba, Votorantim e Salto de Pirapora. Tal delimitação foi feita de modo a abranger uma região que possui três tipos de aquíferos: granular, fraturado e cárstico, em áreas com grande densidade de atividades industriais.

A localização dessa área no Estado de São Paulo é apresentada na Figura 21, e está inserida no quadrante definida pelas coordenadas: 23°45'22,82"W 47°42'23,41"; S, 23°21'02,88"W 47°17'46,58"S.

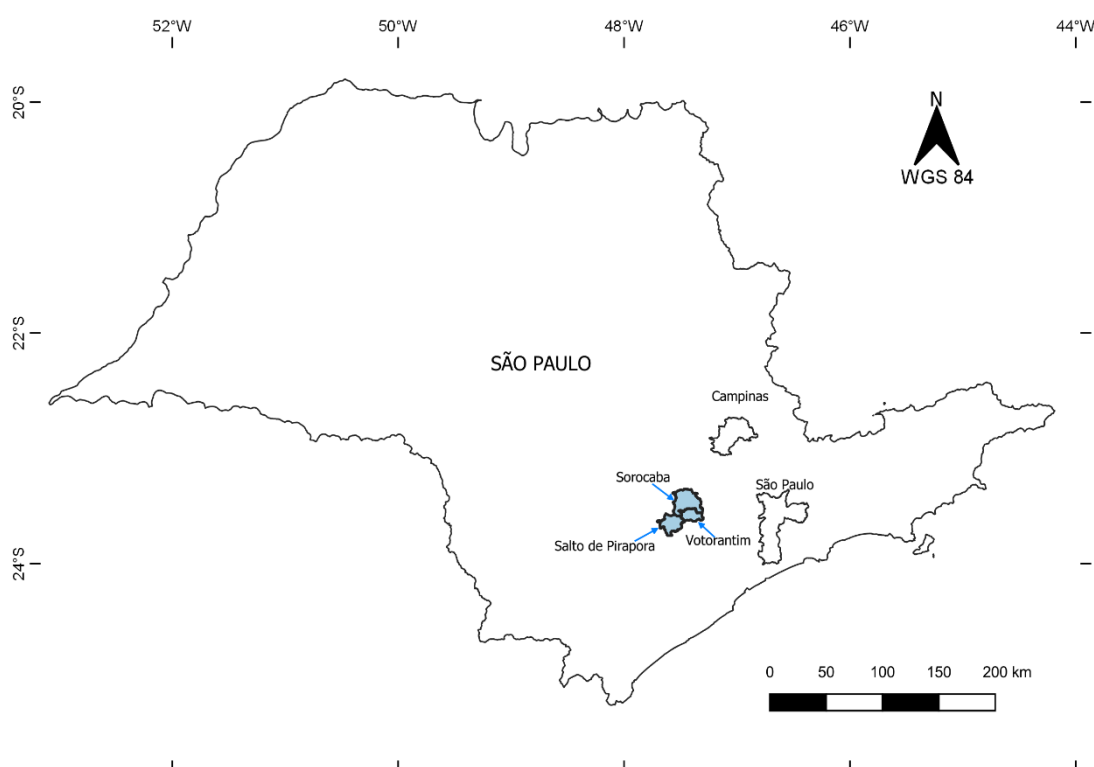


Figura 21 – Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo

Conforme o IBGE (2020), o município de Sorocaba possuía uma população estimada de 687.357 habitantes, com área total de 450,382 km², densidade demográfica de 1304,18 hab./km², e PIB per capita de 48.271,34 reais.

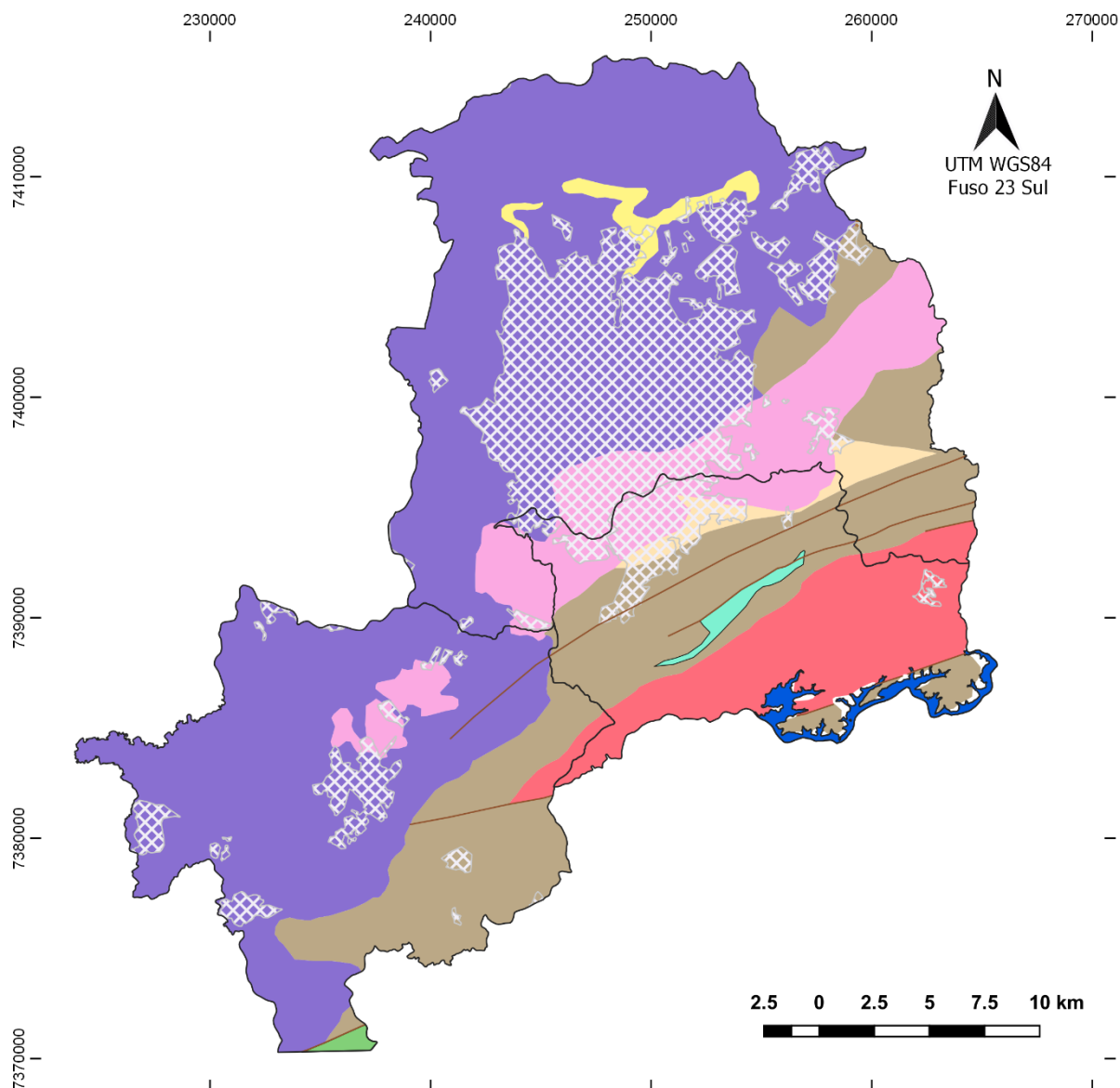
O município de Votorantim possui em 2020 uma população estimada de 123.599 habitantes, com área total de 183,517 Km², densidade demográfica de 591,04 hab./km², e PIB per capita de 25.036,13 reais (IBGE, 2020).

Já, Salto de Pirapora possui população estimada de 45.860 habitantes, área total de 280,509 km², densidade demográfica de 143,02 hab./km² e PIB per capita de 36.783,17 reais (IBGE, 2020).

O Mapa geológico regional da área de estudo (CPRM, 2006) é apresentado na Figura 22. A geologia dessa área consiste basicamente em três regiões distintas, os escudos cristalinos compostos por rochas ígneas e metamórficas (MP2si, NP3sγ2Iso, NP3sγ2Isl, NP3sγ3Asf, NP3srer, NP3srpi) e rochas carbonáticas metamórficas (NP3Srpc). A região Noroeste é composta por rochas sedimentares do Grupo Itararé (C2P1i), e ao longo de várzeas da Bacia do Rio Sorocaba ocorrem Depósitos Aluvionares (Q2a) de sedimentos inconsolidados.

Um resumo da descrição de cada unidade litoestatigráfica indicada na Figura 22, conforme a CPRM (2006a), é apresentada a seguir:

- C2p1i – Grupo Itararé Indiviso: em conjunto com a *Formação Aquidauana (C2P1a)*, representa a porção basal transgressiva da Supersequência Gondwana I, de idade carbonífera-eotriássica, com sedimentação glácio-marinha. França e Potter (1988 apud CPRM, 2006a) subdividiram o Grupo Itararé nas formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba, que corresponderiam, cada uma, a fases de sedimentação cíclicas dentro de um regime glacial, relacionadas a subidas relativas do nível do mar. A Formação Taciba engloba grande parte das rochas aflorantes no Grupo Itararé, sendo composta por lamitos com seixos, arenitos, folhelhos e siltitos. França e Potter (1988 apud CPRM, 2006a) atribuem a estes sedimentos origem relacionada a ambientes marinhos profundos e deltaicos. Estão também representados depósitos marinhos com influência de geleiras, depósitos gerados por processos de lavagem subaquosa, depósitos de fluxos de detritos, turbiditos e, provavelmente, *eskers*. O conteúdo fóssilífero engloba esporos de flora continental (*Vitatina* e *Limitisporites*) e esporos marinhos (*Tasmanites sp.*).



Legenda

Litologia

- C2P1i - Grupo Itararé - Arenito, Folhelho, Diamictito, Ritmito
- MP2si - Grupo Serra do Itaberaba - Xisto, Rocha metapelítica
- NP3s_gamma_2Iso - Corpo Granito Sorocaba - Monzogranito, Sienogranito, Granodiorito, Granito
- NP3s_gamma_3Asf - Corpo Granito São Francisco - Monzogranito, Granito, Sienogranito
- NP3srer - Grupo São Roque, Formação Estrada dos Romeiros - Metarenito, Metarritmito, Rocha metapelítica
- NP3srpi - Grupo São Roque, Formação Piragibu - Filito, Metaconglomerado, Metabasito, Metabrecha
- Q2a - Depósitos aluvionares - Depósitos de areia, Depósitos de cascalho, Depósitos de silte, Depósitos de argila
- NP3p_gamma_2Ssl - Corpo Granito Serra dos Lopes - Biotita monzogranito, Granito
- NP3srpc - Grupo São Roque, Formação Pirapora do Bom Jesus, unidade carbonática - Calcifilito, Metacalcário dolomito
- Estruturas Geológicas
- Limites Municipais
- Área Urbana
- Rios, represas e lagoas

Fontes: Mapa de Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006). Área Urbana; Rios, Represas e Lagos - Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado (ROSSI, 2017).

Figura 22 – Mapa das Unidades Litoestratigráficas da Área de Estudo (CPRM, 2006).

- MP2si – Grupo Serra do Itaberaba (1395 Ma): é uma sequência metavulcanossedimentar de idade mesoproterozóica, composta pelas formações Morro da Pedra Preta (Basal), Nhanguçu (sobrepota à basal) e Pirucaia (sobrepota à basal). As rochas do Grupo Serra do Itaberaba foram deformadas complexamente, podendo ser reconhecidos padrões de dobramentos superpostos produzidos por processos regionais, com deformações posteriores associadas às zonas de cisalhamento de Jundiuvira e do Rio Jaguari e suas sucessivas reativações;
- NP3sγ2Iso – Granito Sorocaba (606 Ma): Pertence a unidade Granitóides tipo I, sin a tardiorogênicos, do Orógeno Socorro-Guaxupé. É intrusivo em rochas das formações *Estrada dos Romeiros* (NP3srer) e *Piragibu* (NP3srpi), Grupo São Roque, da Província Mantiqueira. O Maciço Sorocaba é composto por monzogranitos leucocráticos e melanogranitóides cinzas e róseos, sienogranitos e quartzo-monzogranitos inequigranulares porfiróides e granodioritos equigranulares a porfiríticos. A composição é calcialcalina de médio a alto potássio;
- NP3sγ3Asf – Granito São Francisco (615 Ma): Pertence à unidade dos granitóides tipo A, pós-orogênicos, do Orógeno Socorro-Guaxupé, intrusivo em rochas do Complexo Varginha – Guaxupé, na Formação Piragibu (NP3srpi). Nesta unidade predominam rochas alcalinas de alto potássio, ocorrendo alguns termos com tendência subalcalina ou peralcalina. Ocorre uma ampla variedade de rochas, abrangendo dioritos, quartzo-dioritos, monzodioritos, quartzo-monzodioritos, monzonitos, quartzo-monzonitos e monzogranitos ao lado de álcali sienitos, quartzo-álcali sienitos e álcali granitos. No Granito São Francisco foram descritas texturas rapaviki;
- NP3srer - *Formação Estrada dos Romeiros* (NP3srer): definida por Bergmann (1988 apud CPRM, 2006a), ocorre, na região de Pirapora do Bom Jesus, em contato transicional com a unidade carbonática da Formação Pirapora do Bom Jesus. Comporta na base um membro

arenoso (que pode ser correlato da Formação Piragibu), com metarenitos, ritmitos gradados micro-conglomeráticos e intercalações subordinadas de metapelitos. O membro pelítico superior é constituído por metarritmitos siltico-argilosos com níveis de metarenitos quartzosos.

- NP3srpc – Formação Pirapora do Bom Jesus – unidade carbonática - Grupo São Roque: A Formação Pirapora do Bom Jesus, inicialmente proposta como Formação Pirapora por Bergmann (1988 apud CPRM, 2006a), foi individualizada em uma unidade metavulcânica (NP3srpv) na base e uma unidade carbonática (NP3srpc), no topo. Segundo Bergmann (1988 apud CPRM, 2006a) constituem a unidade carbonática, calcifilitos e mármore dolomíticos com estromatólitos. Os calcifilitos são constituídos de carbonato, quartzo, actinolita e opacos e encaixam lentes decimétricas a métricas de metadolomito e esparsamente quartzito laminado. Os metadolomitos são rochas de granulação muito fina, localmente com bandamento pela intercalação de bancos de granulação fina, constituídos essencialmente por dolomita, com quartzo, tremolita e opacos como acessórios. Metadolomitos oolíticos também foram descritos nesta unidade (Bergmann 1988 apud CPRM, 2006a).
- NP3srpi - *Formação Piragibu (NP3srpi)*: definida por Hasui et al. (1976 apud CPRM, 2006a) e redefinida por Juliani e Beljavskis (1995 apud CPRM, 2006a), é constituída predominantemente por metarritmitos feldspáticos, com intercalações pouco espessas de filito, por vezes grafitoso, ardósia, metarenito, metarcóseo, raros metabasitos e rochas vulcanoclásticas, além de pequenas lentes de metaconglomerados e metabrechas na base. Esta unidade não foi descrita na região de Pirapora do Bom Jesus, mas pode corresponder lateralmente ao membro arenoso da Formação Estrada dos Romeiros.
- Q2a - Depósitos aluvionares: Constituem depósitos nas margens, fundos de canal e planícies de inundação de rios, as areias, cascalheiras, siltes, argilas e, localmente turfas, resultantes dos

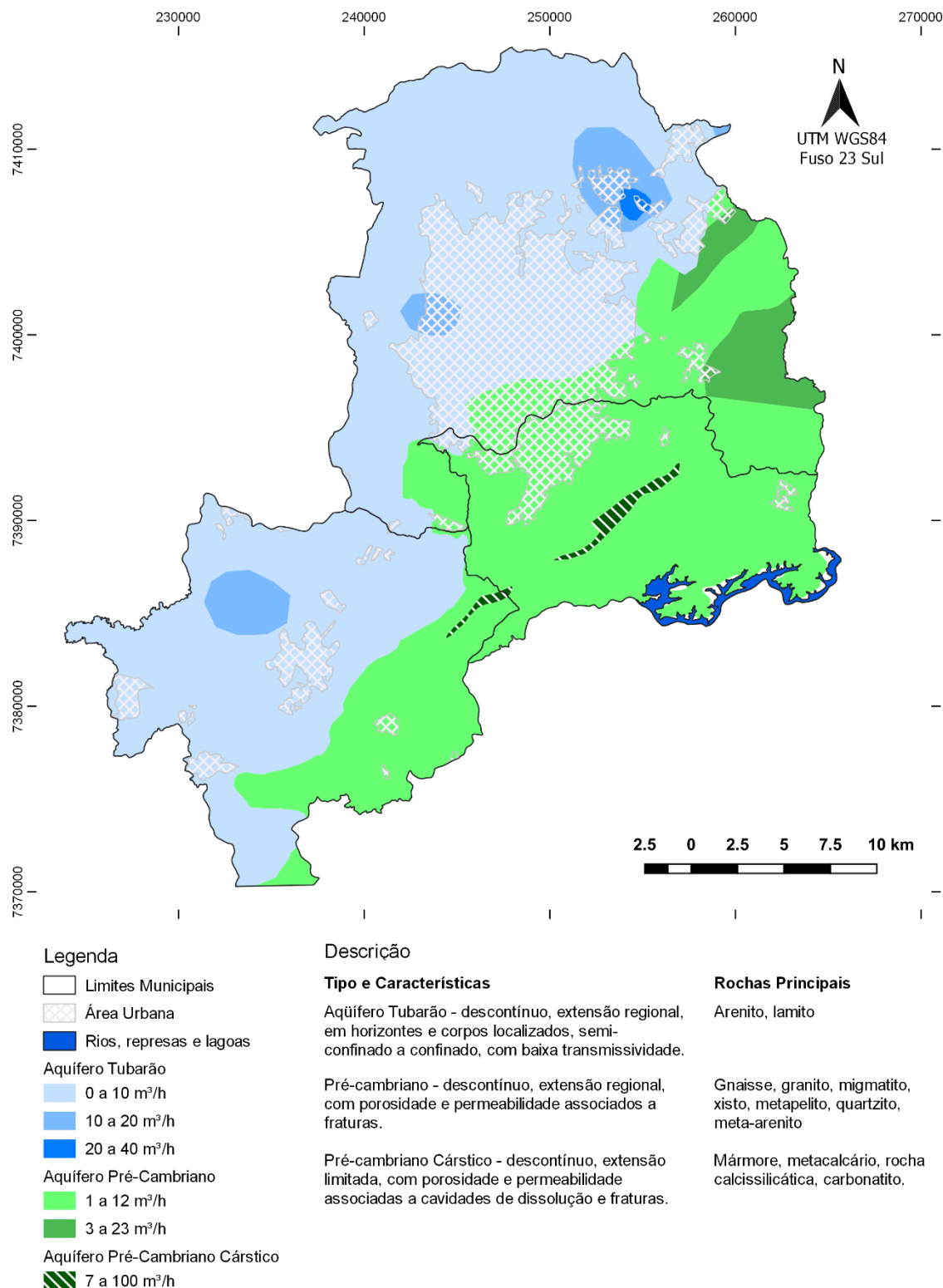
processos de erosão, transporte e deposição a partir de áreas-fonte diversas, desenvolvendo-se sobre a Província Paraná e estendendo-se para as províncias limítrofes.

Os aquíferos que ocorrem na área de estudo são apresentados na Figura 23. Existem três aquíferos regionais nessa área, o Aquífero Tubarão, onde ocorre as rochas do Grupo Itararé, o Aquífero Pré-Cambriano na área de ocorrência das rochas cristalinas (MP2si, NP3sy2Iso, NP3sy3Asf, NP3srer, NP3srpi) e o Aquífero Pré-Cambriano Cárstico, onde ocorrem as rochas da Formação Pirapora do Bom Jesus, unidade Carbonática.

A Figura 23 também apresenta a vazão potencial de exploração e uma breve descrição de cada aquífero.

O Aquífero Tubarão é constituído pelas seguintes unidades geológicas do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006): (1) Grupo Itararé e Formação Aquidauna (Permo-Carbonífero), depositados em ambiente glacial continental com ingressões marinhas; e (2) Grupo Guatá (Permiano), que contém as formações Tatuí (predominante), Rio Bonito e Palermo (subordinadas), depositado em ambiente marinho raso. O Grupo Guatá situa-se, estratigraficamente, abaixo do Grupo Passa Dois e o Grupo Itararé e Formação Aquidauna, acima do Grupo Paraná. Grande parte das duas últimas unidades (Itararé e Aquidauna) foi depositada diretamente sobre o embasamento pré-Cambriano (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

O Grupo Itararé constitui a unidade aquífera principal e compreende uma complexa associação de diamictitos, ritmitos, siltitos, argilitos, folhelhos, conglomerados e arenitos, de cor cinza claro a escuro, que se sucedem tanto na vertical como na horizontal; as camadas destas rochas sedimentares podem alcançar várias dezenas de metros de espessura e associam-se a diversos subambientes do ambiente glacial, isto é, fluvial, marinho, lacustre, praiano, deltáico, entre outros. A espessura do Grupo Itararé, na sua porção aflorante, pode alcançar cerca de 800 m (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).



Fontes: Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005). Área Urbana; Rios, Represas e Lagos - Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado (ROSSI, 2017).

Figura 23 – Mapa de Águas Subterrâneas da Área de Estudo (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

O estudo do DAEE/IG/IPT/CPRM (2005) sobre a capacidade específica do Aquífero Tubarão, realizado com 765 poços dos selecionados, oscila entre 0,002 e 4,67 m³/h/m e apresenta média, mediana e desvio padrão de 0,30 m³/h/m, 0,11 m³/h/m e 0,54, respectivamente. O estudo apontou a presença de áreas pontuais ou “ilhas” de elevada produtividade (2,2 a 4,6 m³/h/m), próximas a áreas de baixa e média produtividade, indicando a compartimentação do sistema em escala local (DAEE/IG/ IPT/CPRM, 2005).

O Aquífero Pré-Cambriano é constituído por rochas pré-cambrianas (mais antigas que 542 milhões de anos), que correspondem a rochas metamórficas (gnaisses, xistos, quartzitos, entre outras) e rochas ígneas (granitos maciços e foliados). Este aflora na porção leste do Estado de São Paulo. Localmente ocorrem rochas intrusivas mais jovens (do início do Fanerozóico ou do Cretáceo) que apresentam comportamento hidráulico similar às rochas pré-cambrianas. O potencial de produção de águas subterrâneas do Aquífero Pré-Cambriano é, de modo geral, mais baixo que o dos aquíferos granulares, no entanto, é de grande importância para o abastecimento local de, por exemplo, indústrias, propriedades rurais e condomínios. É importante lembrar que grandes centros urbanos, como a Grande São Paulo e as regiões metropolitanas de Campinas e Sorocaba, encontram-se atualmente em franca expansão sobre este aquífero (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

O aquífero Pré-Cambriano Cárstico, também de idade pré-cambriana, consiste em mármore e metacalcários que afloram principalmente no sul do Estado. Seu alto potencial de produção está associado a feições de dissolução (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

A vulnerabilidade dos aquíferos do estado de Estado São Paulo, avaliada por CETESB/IG/DAEE (1997), classificou os aquíferos na região de estudo como Alto deltaico para a área de ocorrência de Depósitos Quaternários e Baixo Alto para o Aquífero Tubarão, não classificando o Aquífero Pré-cambriano (Figura 24), baseando-se na metodologia GOD (FOOSTER e HIRATA, 1988).

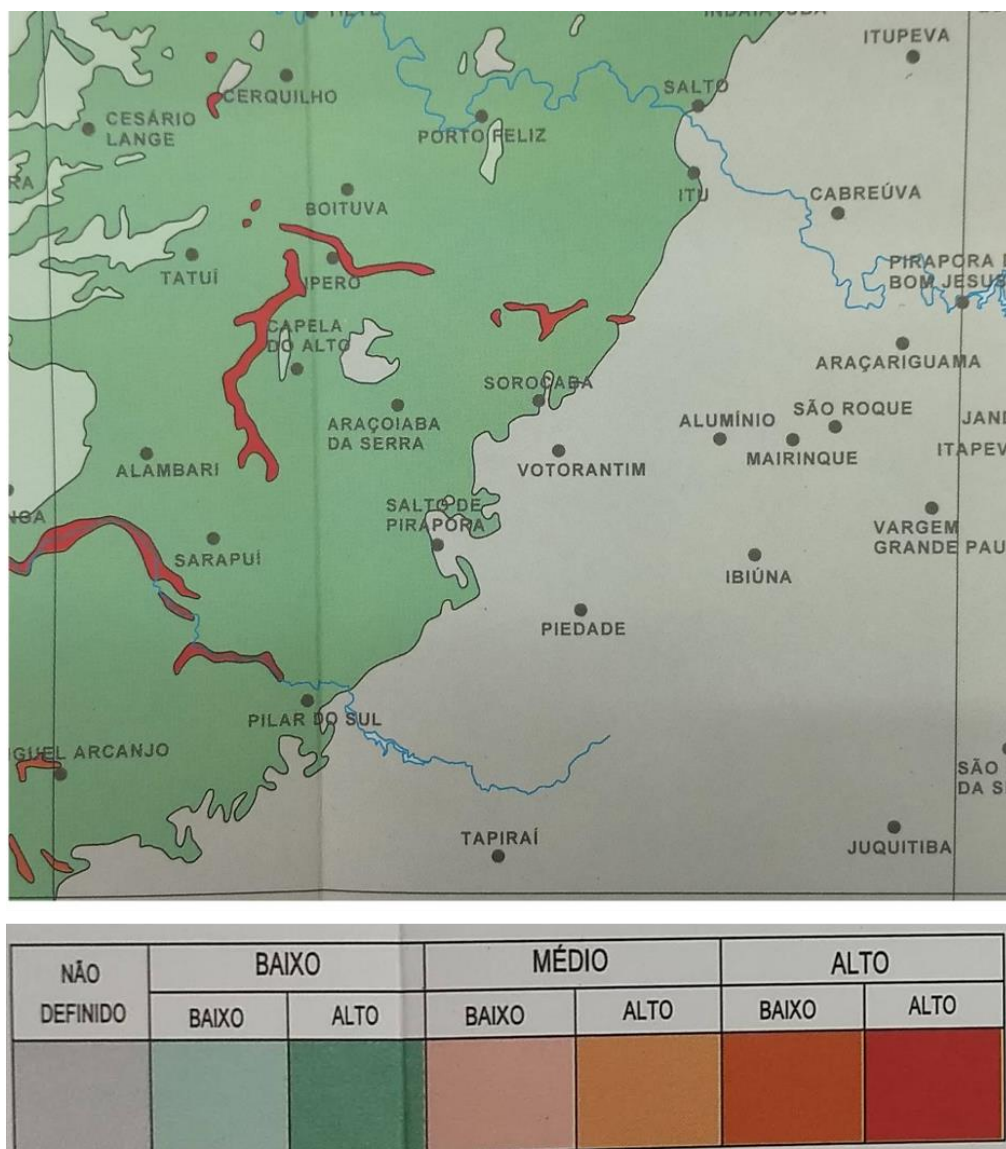


Figura 24 - Recorte da Região da Área de Estudo do Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (IG/DAEE/CETESB, 1997).

A vulnerabilidade natural dos aquíferos do estado também foi avaliada por DAEE/LEBAC (2013), é apresentada na Figura 25, delimitando a área de estudo no Mapa de Vulnerabilidade Natural do Aquíferos à Poluição do Estado de São Paulo (DAEE/LEBAC, 2013).

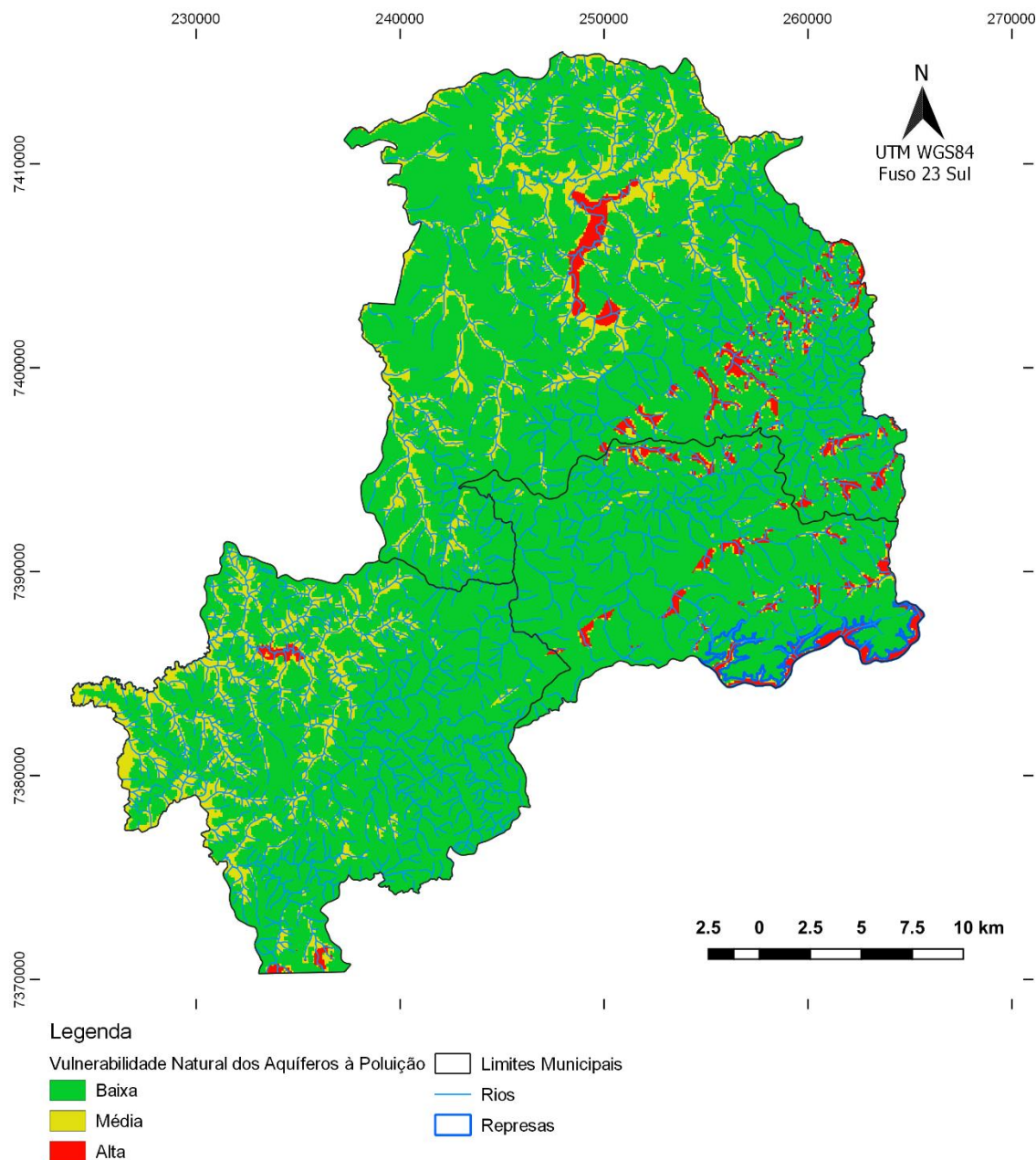


Figura 25 - Mapa de Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Poluição de Sorocaba (Recortado de DAEE/LEBAC, 2013).

Segundo DAEE/LEBAC (2013), esse mapa foi elaborado aplicando-se a metodologia GOD, proposta por Foster e Hirata (1988), considerando o valor 1 para o parâmetro ocorrência do aquífero em todos os aquíferos, sendo considerados todos como não confinados, representando somente essas porções.

A valoração do parâmetro “tipo litológico” foi baseada no Quadro 22 da publicação do IG/DAEE/CETESB (1997), considerando as características

litológicas das diferentes unidades aquíferas definidas no projeto (DAEE/LEBAC, 2013).

A profundidade do nível de água (NA) foi estimada com base em mapa potenciométrico gerado a partir da subtração de *grids* do modelo digital de terreno (MDT) e da superfície numérica gerada a partir dos pontos de intersecção da topografia com as drenagens superficiais (pontos de descarga de água subterrânea). Em relação ao método original (Foster e Hirata, 1988) uma nova classificação das profundidades foi adaptada, agrupadas em cinco categorias (< 2; 2-5; 5-10; 10-20; >20 m) (DAEE/LEBAC, 2013).

Segundo DAEE/LEBAC (2013), a análise do mapa revela a predominância de baixa vulnerabilidade dos aquíferos em quase todo o estado, e ressalta uma alta vulnerabilidade somente ao longo e nas imediações dos corpos de água superficiais, os quais constituem zonas de descarga dos aquíferos freáticos.

Esse estudo não detalha se há pontos de referência além das drenagens para a elaboração do mapa potenciométrico do nível freático. Considerando somente as drenagens para a elaboração do mapa, é esperado que a interpolação gere um resultado com profundidades do nível freático menores ao longo das drenagens e maiores, até superestimadas, ao longo dos divisores de água.

4.2 Metodologia da Pesquisa

Inicialmente foram buscados os dados disponíveis na área de estudo que poderiam ser utilizados, incluindo o cadastro do Sistema de Fontes de Poluição - SIPOL da CETESB.

Nessa área de estudo, além dos dados do SIPOL, foram avaliadas as bases de dados públicas disponíveis sobre a geologia, hidrogeologia, poços de captação e outras, sendo selecionadas as bases indicadas na Tabela 17.

O tratamento e análise de cada base de dados disponível foi realizado verificando as possíveis utilizações de cada uma.

Os dados após serem tratados foram implementados e um SIG – Sistema de Informação Geográfica, passando por georreferenciamento no caso dos que não estavam em bases vetoriais.

Tabela 17 - Dados de entrada necessários para a aplicação da metodologia proposta.

Dados de Entrada	Tipo	Formato	Referência
Cadastro do Sistema de Fontes de Poluição da CETESB (SIPOL)	Tabela	Planilha Excel ®	CETESB, 2019a
Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo – Dez/ 2018	Tabela	Planilha Excel ®	CETESB, 2018
Dados dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo: Cadastro de poços	Tabela	Planilha Excel	DAEE, 2020
SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas	Arquivo Vetorial	Shape file	CPRM, 2020
Mapa Geológico do Estado de São Paulo	Arquivo Vetorial	Shape file	CPRM, 2005
Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo	Arquivo Vetorial	Shape file	DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005
Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado	Arquivo Vetorial	Shape file	ROSSI, 2017
Mapa da vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo	Mapa impresso	-	IG/CETESB/DAEE, 1997

Com a base de informações montada aplicou-se análises aos dados visando avaliar: o potencial poluidor das fontes de poluição, a vulnerabilidade dos aquíferos e a relação espacial com os poços de captação cadastrados.

Para a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos foi escolhido o método GOD (FOOSTER et al., 2006) na sua versão mais atual por já haver uma avaliação prévia regional, o Mapa da vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo, realizada com base no método GOD (FOOSTER, 1987).

Foi proposto um conjunto de critérios iniciais para a realização dessas análises com a aplicação na área de estudo.

Os softwares utilizados na pesquisa estão listados na Tabela 18. Destaca-se que, entre eles, somente o Microsoft Excel® não é gratuito, no entanto é aplicativo básico do pacote do Office® adquirido pela maioria dos usuários do sistema operacional Windows®.

Tabela 18 - Softwares utilizados para o desenvolvimento e aplicação da metodologia proposta.

Software	Aplicação
Microsoft Excel 2016 e Microsoft Fuzzy Lookup Add-in for Excel	Uniformização e análise de dados tabulares e geração de gráficos.
QGIS 3.4	Montagem do SIG, análise de dados vetoriais e imagens <i>raster</i> , interpolações, cruzamento e elaboração de mapas intermediários e finais.
MMQGIS (plug in para QGIS) e Google Maps Geocoding API	Geocodificação de endereços de cadastros tabulares e geração de arquivo vetorial georreferenciado, pontos, desses dados.

4.3 Tratamento dos Dados

Os dados que constam na Tabela 17 foram tratados de acordo com as características de cada um. Para os dados já disponibilizados em formatos vetoriais (*Shapefile*) é necessário realizar apenas o recorte para área de estudo (os limites municipais são importados de DataGeo (2020)), seguido da elaboração da representação e legendas para cada mapa a ser elaborado, no Software QGIS 3.4.

Os dados do Mapa da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo (IG/CETESB/DAEE, 1997), na forma impressa, foram utilizados na construção de um *Shapefile* da classificação GOD (FOOSTER *et al.*, 2006) dos aquíferos na área de estudo.

Os dados dos poços cadastrados no DAEE (2020) são importados para o ambiente do QGIS 3.4, utilizando a ferramenta de importação de texto delimitado (planilha em formato .CSV), e salvos em formato *Shapefile*. Esses dados possuem as coordenadas de localização em km UTM SIRGAS 2000.

Para os dados do Cadastro do Sistema de Fontes de Poluição da CETESB (SIPOL) e Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo – 2019, disponibilizados pela CETESB em planilhas do Excel, é feito um tratamento manual, e com auxílio de uma macro de busca desenvolvida ou do plugin *Fuzzy Lookup*.

Os dados do SIPOL e do Cadastro de Áreas Contaminadas foram cedidos pela CETESB para o desenvolvimento da pesquisa com a condição de não haver a identificação de empresas no estudo, por questões éticas e jurídicas.

4.4 Sistema de Fontes de Poluição da CETESB (SIPOL) – 2019

A CETESB forneceu os dados do cadastro do SIPOL para área de estudo em planilha eletrônica, em 11/01/2019 para o município de Sorocaba, e em 30/06/2019 para os municípios de Votorantim e Salto de Pirapora.

O primeiro passo do tratamento do cadastro do SIPOL foi separar as atividades industriais com potencial de poluição e objeto de licenciamento ambiental de outras atividades comerciais cadastradas.

As formas de classificação das atividades foram mudando ao longo do tempo. Inicialmente elas eram cadastradas conforme o código do IBGE utilizado no sensu, posteriormente migrou para o CNAE 1.0 e recentemente está sendo utilizada a classificação atual do CNAE 2.0. Por essa razão, foi necessária a uniformização desse cadastro de atividade de cada empresa parte por meio manual e parte automatizada, descritas como segue:

- Manual: buscando a descrição da atividade do CNAE 2.0 mais próxima da atividade descrita no cadastro de fontes de poluição.

- Automatizada: utilizando o plugin *Fuzzy Lookup* do Excel. Esse plugin utiliza uma função *fuzzy* para comparar as palavras de duas frases de entrada e correlacionar essas frases retornando um índice de similaridade que vai de 0 a 1. Desta forma, pode-se determinar o índice mínimo de similaridade que se deseja correlacionar os dados.

Na utilização desse plugin foi testado numa base amostral de dados o fator de similaridade de 0.5 a 1, sendo verificado que o valor 0.7 retorna o melhor resultado de correspondências positivas, valores maiores acabavam retornando correspondências apenas para frases quase iguais, e mais baixos acabavam encontrando correspondências para frases com apenas algumas palavras iguais, mas com significados diferentes.

Na prática o plugin cria uma nova planilha a partir de duas outras planilhas, copiando uma das planilhas e em seguida inserido os dados da segunda planilha, conforme a correspondência de similaridade para as colunas de comparação selecionadas entre elas.

Assim, com uma planilha dos dados e outra com a lista das classificações do CNAE 2.0, pode-se criar uma nova com os dados e as classificações do CNAE 2.0 para cada registro na planilha do cadastro de fontes de poluição com base na descrição da atividade cadastrada.

A tabela final com os dados tratados foi elaborada selecionando as atividades classificadas como Indústria da Transformação conforme cadastro do CNAE 2.0 (IBGE, 2007), conforme os objetivos da pesquisa.

4.5 Aplicação do Método POSH-IG aos dados do SIPOL

A tabela fina de dados do SIPOL, possui o endereço, a razão social da empresa, o cadastrado e a descrição e código da atividade econômica conforme o CNAE 2.0.

Dentre as possibilidades de avaliação do potencial poluidor com base na descrição da atividade têm-se os métodos POSH (FOOSTER et al., 2006) e POSH-IG (IRATANI et al., 2013)

O método POSH-IG (IRATANI et al., 2013) foi desenvolvido com base na legislação da época, associando a classificação do CNAE junto com o fator de complexidade W, utilizado pela CETESB como um indicador de potencial poluidor. Esse fator é definido no Regulamento da Lei 997/76, aprovado pelo Decreto 8468/76. Ou seja, trata-se de uma adequação do POSH para a aplicação com os dados do SIPOL da CETESB.

Em 2017 e 2019 houve alterações da legislação que alteraram os valores de W. Assim, inicialmente foi criada uma planilha com a lista de atividades do CNAE 2.0 associados aos valores de W vigentes quando do desenvolvimento do método POSH-IG. Também foi criada uma planilha auxiliar de classificação pelo método POSH-IG, para as atividades do CNAE 2.0 e valores de W.

Para a automação da classificação foi desenvolvida uma função macro de busca, denominada “proc_y” em VBA no Excel com cujo código fonte se encontra no Anexo 1.

Com o uso da função “proc_y”, pôde-se inicialmente buscar o valor de W conforme a classificação do CNAE e trazê-lo para a planilha de dados do SIPOL. Posteriormente, junto com funções matemáticas de avaliação condicional (função SE), pôde-se buscar na tabela auxiliar a atividade e valor de W, encontrando a classificação POSH-IG daquela atividade e trazendo-a para a tabela de dados do SIPOL para cada empresa.

Esse procedimento resulta em uma Tabela com as informações das indústrias avaliadas e o índice POSH-IG determinado para cada empresa.

4.6 Geocodificação de Endereços (georreferenciamento)

Para a espacialização de todos os dados do SIPOL que constam na tabela e que já passaram pela triagem, uniformização e classificação pelo método POSH-IG, é necessário ter conhecimento das coordenadas geográficas de cada atividade.

Os dados do SIPOL têm apenas os endereços, e para a obtenção das coordenadas foi utilizado o método de geocodificação de endereços através do QGIS 3.4 com o uso do *plug-in* MMQGIS consultando o API (*Application Programming Interface*), serviço *on line* do Google®, denominado *Geoconding API*.

Sendo selecionados os resultados com melhor acurácia, ou seja, aqueles que retornaram as condições "ROOFTOP" e "RANGE_INTERPOLATED".

4.7 Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas da CETESB.

Com auxílio da CETESB, obteve-se uma versão do cadastro de áreas contaminadas (CETESB, 2018) integral em arquivo do Microsoft Excel, datada de dezembro de 2018, com 6111 registros.

Os dados foram tratados considerando as áreas contaminadas classificadas como industriais. A seguir, foram encontradas ou uniformizadas as atividades econômicas com base na classificação do CNAE 2.0 para cada registro de forma automatizada utilizando o plugin *Fuzzy Lookup* do Excel, da mesma forma que a realizada para o cadastro do SIPOL e manualmente.

Manualmente foi buscada a descrição da atividade do cadastro do banco de áreas contaminadas na lista de atividades classificada no CNAE 2.0. Para a empresa onde houve a mudança de razão social, foi realizada pesquisa no site da JUCESP da razão antiga para se encontrar o CNAE daquela atividade.

A partir dos dados uniformizados buscou-se identificar as atividades das empresas que geraram contaminação da água subterrânea no Estado de São Paulo.

A seguir, procurou-se estabelecer uma correlação entre as atividades e o número de áreas contaminadas, no geral, e relacionadas a contaminação por

DNAPLs. Uma análise da frequência de ocorrência de contaminação por tipologia industrial foi realizada com base numa análise de Pareto, ou curva ABC.

Com base nessa análise definiu-se critérios de classificação gerando um índice de potencial poluidor por frequência de ocorrência da contaminação denominado Índice PPOF - *Pollution Potential by Occurrence Frequency*.

Atividades como disposição de resíduos ou acidentes também não foram objeto de avaliação. Numa disposição irregular de resíduos seria difícil estabelecer alguma correlação, afinal pode haver uma ampla gama de contaminantes dispostos que varia sem previsibilidade de local para local, uma vez que não há qualquer controle sobre essa atividade. Em caso de acidentes rodoviários ou ferroviários, também há grande variação em função da carga transportada.

4.8 Aplicação do Método GOD

Na aplicação do método GOD (FOOSTER et al., 2006) adotou-se, de modo geral, os valores de vulnerabilidade determinados por DAEE/IG/CETESB (1997), enquadrando nas classes definidas por Fooster et al. (2006).

Em áreas de aquíferos cristalinos (Aquíferos Pré-Cambriano e Pré-Cambriano Cárstico), foi aplicado o método GOD, com base nas considerações de Conicelli (2014), e nos valores de nível estático de poços cadastrados no SIAGAS (CPRM, 2020).

A partir da delimitação dos aquíferos e da geologia contida em DAEE/IG/IPT/CPRM (2005) e CPRM (2005), é criado um *Shapefile* (vetor) para a área de estudo com as classificações pelo método GOD: vulnerabilidades baixa, média, alta e extrema. Desse vetor é criado um arquivo *raster* com o valor do índice de classificação para cada pixel: 1 – baixa, 2 - média, 3 – alta e 4 - extrema.

4.9 Mapas de densidade de Kernel

Visando a melhor visualização de dados foi empregada a geração de mapas de interpolação de Kernel (*heat maps*) filtrando-se o vetor de pontos de fontes potenciais de poluição para um determinado índice (EIP = 3, por exemplo),

utilizando a ferramenta Mapa de Calor do QGIS 3.4, adotando um raio de 1km, Kernel Epanchinkov, e resultados brutos na interpolação (soma dos valores de kernel sem divisão pela área do kernel).

Essa configuração da interpolação foi adotada após o teste em comparação a densidade de pontos em uma área de 1 km² definida por uma grade regular, apresentada na Figura 26.

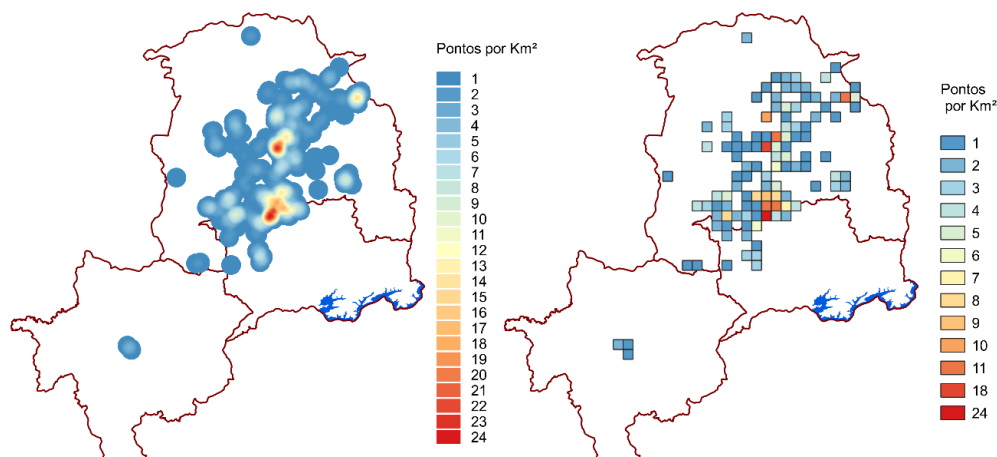


Figura 26 - Estimativa de densidade de Kernel a esquerda e número de pontos numa malha regular de 1x1 km² a direita para o mesmo conjunto de dados.

A Figura 26 mostra que tanto as regiões de *hot spots* como os valores de densidade calculados são próximas ou os mesmos, sendo que a interpolação permite uma localização espacial mais acurada dos *hot spots*. Assim, dessa comparação tem-se que os parâmetros adotados resultam num mapa de kernel com boa estimativa de densidade de pontos por km².

Vale destacar que a aplicação dos mapas kernel é dada apenas para visualizar melhor os dados e *hot spots*, e os valores de densidade estimados são orientativos, sendo aplicada a contagem de pontos numa determinada área para se ter o valor real do número pontos.

4.10 Critérios Iniciais Propostos

Frente aos dados disponíveis, após a aplicação do POSH-IG e PPOF aos dados do SIPOL com geocodificação dos endereços e aplicação do GOD na área

de estudo, nesse momento se tem montado um SIG com os pontos das industriais fontes de poluição, com os polígonos da vulnerabilidade dos aquíferos aflorantes ou diretamente subjacentes ao solo de cobertura, e com os pontos dos poços cadastrados no DAEE (2020).

Fooster et al. (2006) apresenta uma proposta de priorização de ações de controle em fontes de contaminação com base na avaliação de três componentes, o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero, delimitação das áreas de proteção das fontes de abastecimento e cadastro da carga contaminante de subsolo (fontes potenciais de poluição).

Considerando uma situação hipotética de uma indústria com potencial poluidor das águas subterrâneas sobre um determinado aquífero vulnerável e próxima a um ponto que representa um poço de captação. Há um cenário onde pode ocorrer uma via exposição a partir de contaminante liberado no solo que infiltra no aquífero e se move para o poço dependendo da dinâmica do fluxo subterrâneo, caracterizando uma situação de maior necessidade de inspeções periódicas.

Já no caso de uma indústria sobre um aquífero menos vulnerável e longe de poços de captação, não há uma via exposição pensando no consumo pelo poço, assim a exposição seria por eventual contato com a água do aquífero na área da empresa. Nesse caso a necessidade de inspeções periódicas seria menor, pois a possibilidade da ocorrência de um caso mais crítico é baixa.

Neste sentido, propôs-se inicialmente a análise espacial de três informações para a definição de critérios de classificação de prioridades para a fiscalização de atividades industriais com foco na prevenção da contaminação das águas subterrâneas:

- O potencial de poluição das águas subterrâneas da tipologia de atividade industrial desenvolvida obtida pelo POSH-IG e PPOF e seus índices;
- A vulnerabilidade do aquífero de relevância subjacente a indústria em avaliação obtida pelo índice GOD;
- Uma área circular de proteção no entorno de poços de abastecimento públicos ou privados de raio arbitrário;

Com relação a áreas de proteção de poços, inicialmente buscou-se encontrar zonas captura com base na avaliação da potenciométrica regional gerada a partir

dos dados de nível estático e dinâmico disponíveis no SIAGAS (CPRM, 2020), entretanto, a proposta não progrediu pois há falta de informações necessárias, como perfis construtivos e geológicos, para prover uma análise adequada dos dados visando gerar esse produto.

Numa segunda avaliação buscou-se a priorização entre áreas de proteção geradas por diferentes poços com base no tempo de trânsito que a água subterrânea leva do limite desse raio ao poço de captação. Quanto menor o tempo de trânsito estimado, maior o potencial de captação de uma possível contaminação por esse poço, assim, maior é a prioridade de fiscalização das fontes potenciais de contaminação inseridas nesse raio.

Nesse sentido propôs-se o índice PTOT – *Prioritization by Time of Travel*, ou Priorização por Tempo de Trânsito, descrito no item 4.10.2.

No Estado de São Paulo, a legislação assume um raio arbitrário de 500 m como zona de proteção de poços de captação de água subterrânea. Os poços que possuem áreas contaminadas conhecidas dentro desse raio passam por uma avaliação específica do órgão ambiental antes de obter sua autorização de uso.

Deste modo, foi adotado esse raio arbitrário de 500 m para a avaliação das áreas de proteção dos poços de abastecimento, o que está de acordo com a legislação existente. No entanto, em outras regiões ou países, pode-se adotar raios de acordo com regulações ou critérios técnicos específicos para aqueles locais.

A partir da análise crítica dos resultados do Índice PTOT e sua representatividade, foi adotado um índice mais simplificado denominado FQ – Fator de Vazão (*Flow Factor*), para a priorização entre áreas de proteção de poços apenas com base na distribuição dos valores de vazão outorgada na área de estudo, utilizando os quartis e a mediana com limites de classes.

A partir da ponderação dos três índices, um referente ao potencial poluidor (POSH-IG ou PPOF), um referente à vulnerabilidade do aquífero (GOD) e outro referente à priorização de áreas de proteção (PTOT ou FQ) foi definido um índice final de prioridade de fiscalização para cada fonte potencial de poluição. Esse índice final foi denominado de Índice de Priorização de Inspeções Ambientais em Indústrias visando a Prevenção da Poluição das Águas Subterrâneas, Índice EIP - *Environmental Inspection Prioritization*.

O cruzamento de todos esses índices é possível pela análise espacial empregando um Sistema de Informações Geográficas (SIG), no qual é possível relacionar a localização de cada indústria com o aquífero subjacente e poços de exploração próximos e suas áreas de proteção.

Cada atividade industrial conhecida e cadastrada, que é uma fonte potencial de poluição, é avaliada para as três informações citadas. A seguir é realizado o cruzamento dos índices de potencial de poluição com a classificação de vulnerabilidade do aquífero, resultando num índice que representa o perigo de contaminação (FOOSTER et al., 2006). O índice de perigo de contaminação é cruzado com o índice resultante da classificação priorização das áreas de proteção de poços para a determinação do Índice EIP.

Para a visualização dos resultados, dada a grande quantidade de pontos, que são as indústrias, aplicou-se a interpolação de mapas de Kernel que possibilitam avaliar a densidade de pontos e regiões de interesse.

A Figura 27 resume as etapas da metodologia proposta para a determinação do índice EIP.

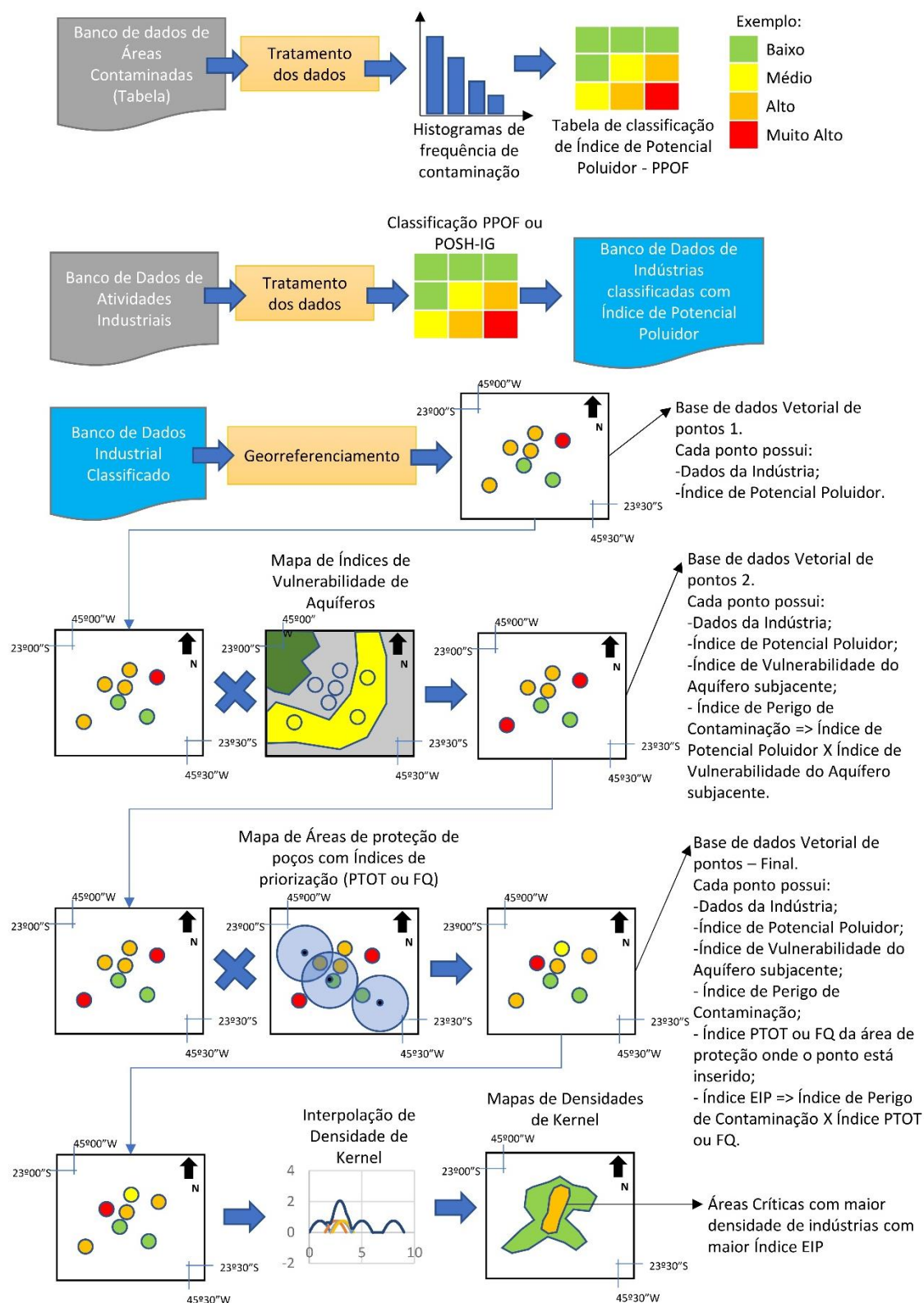


Figura 27 – Representação esquemática das etapas para definição do Índice EIP e sua representação em mapas Kernel.

4.10.1 Índice de Perigo de Contaminação e Índice EIP

O Índice de Perigo de Contaminação e Índice EIP possibilitam a Priorização de Inspeções Ambientais em Indústrias visando a Prevenção da Poluição das Águas Subterrâneas. Na tabela de atributos do vetor de pontos dos empreendimentos foram adicionados campos para receberem os valores dos Índices GOD, PTOT e FQ. Esse vetor já possui em sua tabela de atributos os índices POSH-IG e PPOF.

Os índices GOD dos aquíferos subjacentes aos pontos que representam as fontes potenciais de poluição foram extraídos do *raster* com seus valores utilizando o complemento do QGIS 3.4, denominado *Point Sampling Tool*, que cria um novo vetor de pontos com base num vetor de entrada adicionando na tabela de atributos, com todos os atributos selecionados das camadas ativas para cada ponto.

Os valores dos Índices PTOT ou FQ para os raios de 500 m do Aquífero Tubarão e do Aquífero Pré-Cambriano foram extraídos de seu *raster* final da mesma forma que os valores de GOD.

Fooster et al. (2006) apresentou um ábaco conceitual para o cruzamento da vulnerabilidade com o potencial poluidor para a determinação do nível de perigo de contaminação das águas subterrâneas. Eles também apresentam uma proposta para esse cruzamento, considerando os raios de proteção do poço para os tempos de chegada de 50 e 500 dias e estabelece a priorização de ações de controle (Figura 12 e Figura 13).

Para executar essa operação em muitos pontos é necessário definir uma formulação matemática que auxilie na automação do processo. Foram avaliadas três formas de cruzamento: pela soma dos fatores, pela multiplicação dos fatores e pela média geométrica, com posterior comparação com o proposto por Fooster et al. (2006), do seguinte modo:

$$\text{Soma: IPC (Potencial, GOD)} = (\text{Potencial} + \text{GOD}) / \text{maior soma} \quad (6)$$

$$\text{Multiplicação: IPC (Potencial, GOD)} = (\text{Potencial} \times \text{GOD}) / \text{maior multiplicação} \quad (7)$$

$$\text{Média Geométrica: IPC (Potencial, GOD)} = (\text{Potencial} \times \text{GOD})^{1/2} \quad (8)$$

Onde:

IPC – Índice de Perigo de Contaminação;

Potencial – Índice POSH-IG ou PPOF

Maior soma – soma dos dois maiores fatores de GOD e Potencial.

Maior multiplicação – multiplicação dos dois maiores fatores de GOD e Potencial.

Após a comparação dos resultados, adotou-se o arredondamento ao inteiro da média geométrica, ou seja:

$$\text{IPC} = \text{arredondamento} ((\text{Potencial} \times \text{GOD})^{1/2}) \quad (9)$$

O cruzamento do IPC com PTOT ou FQ para a determinação do Índice EIP é proposto do mesmo modo, com base na média geométrica arredonda ao inteiro.

Como o Índice PTOT varia de 1 a 5, sendo aplicado o valor 0 para os pontos que estão fora do raio de 500m, foi adotada a soma do valor 1 ao PTOT antes do cruzamento. Assim, as indústrias que não incidem sobre áreas de proteção de poços passam a ter o menor índice de priorização que aumenta para as indústrias incidentes nessas áreas, conforme seus respectivos índices.

No índice FQ foi adotado valor 1 para empresas fora das áreas de proteção de raio de 500m, assim, não houve necessidade da soma do valor 1.

Desse modo o Índice EIP é dado pela fórmula:

$$\text{Índice EIP} = \text{arredondamento} ((\text{IPC} \times (\text{PTOT} + 1))^{1/2}) \quad (10)$$

$$\text{Índice EIP} = \text{arredondamento} ((\text{IPC} \times \text{FQ})^{1/2}) \quad (11)$$

A Tabela 19 apresenta o resumo dos valores e classes de todos os índices utilizados ou resultantes dos cruzamentos apresentados. A Figura 28 e a Figura 29 apresentam os possíveis resultados para o IPC - Índice de Perigo de Contaminação e EIP – Índice de Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Poluição das Águas Subterrâneas.

Tabela 19 – Resumo dos valores e classes dos Índices POSH-IG, GOD, PTOT e EIP.

POSH-IG		PPOF		GOD		PTOT+1		FQ		EIP			
nº	Classes	nº	Classes	nº	Classes	nº	Classes	nº	Classes Q - Vazão	nº	Classes		
0	Muito Reduzida	0	Muito Reduzida	1	Baixa	1	Fora do Raio	1	Fora do Raio	0	Muito Reduzida		
1	Reduzida	1	Reduzida	2	Média	2	12-8 anos	2	0<=Q<=1º Quartil	1	Reduzida		
2	Moderada	2	Moderada	3	Alta	3	8-6 anos	3	1º Quartil <Q<=Mediana	2	Moderada		
3	Elevada	3	Elevada	4	Extrema	4	6-4 anos	4	Mediana <Q<=3º Quartil	3	Alta		
		4	Muito Elevada					5	4-2 anos	5	Q>3º Quartil	4	Muito Alta
								6	>2 anos			5	Extrema

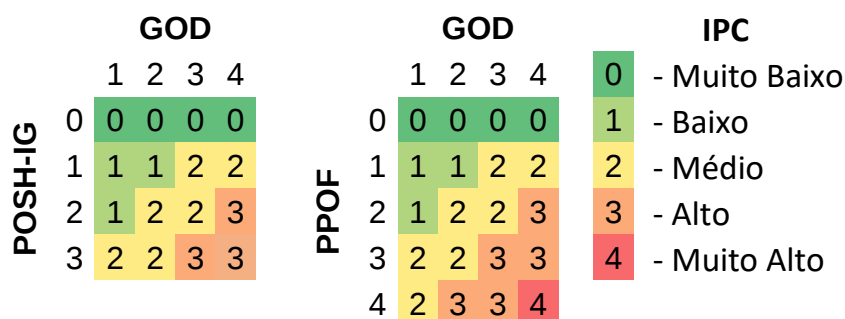
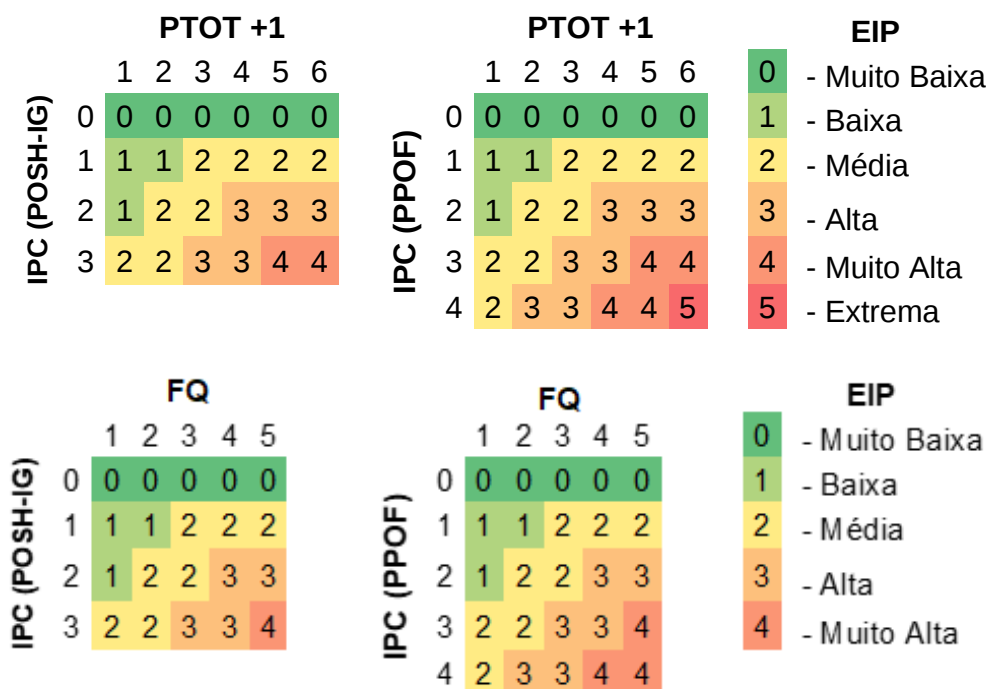


Figura 28 – Valores dos possíveis resultados do IPC – Índice de Perigo de Contaminação, para os cruzamentos dos índices POSH-IG com GOD e PPOF com GOD.



V

Figura 29 – Valores dos possíveis resultados do EIP – Priorização de Inspeções Ambientais para os cruzamentos dos índices IPC com o PTOT ou FQ.

4.10.2 Índice de Priorização por Tempo de Trânsito da água subterrânea (PTOT)

O termo tempo de trânsito (TOT – *Time of Travel*) é o tempo para a água subterrânea ou contaminante ir de um ponto em um aquífero para um poço de captação (USEPA, 1994).

O índice de priorização por tempo de trânsito (PTOT – *Prioritization by Time of Travel*) avalia num raio R arbitrário de cada poço de monitoramento, o tempo estimado que a água subterrânea levará para percorrer a distância R até chegar ao poço de captação. O tempo de trânsito incorpora, além da vazão de bombeamento do poço, as características de porosidade e transmissividade do aquífero explorado.

Como a maior parte do transporte de contaminantes ocorre por advecção (PAYNE et al., 2008) quanto menor esse tempo de chegada, maior a prioridade de ações de proteção do aquífero numa área circular de proteção do poço definida por esse raio arbitrário adotado.

O cálculo dos tempos de trânsito (PTOT) foi realizado aplicando-se o método de Wyssling (1979) adotando os parâmetros hidrogeológicos regionais apresentados por Iratani e Ezaki (2012).

Fixando o valor de S_0 em 500 m, o valor de t (anos) foi calculado para o intervalo de vazões Q (m^3/H) que ocorrem na área de estudo para cada aquífero, adotando-se os critérios da Tabela 20 para classificação quanto a necessidade de priorização de inspeções, dentro do raio de 500 m.

O mapa de classificação foi elaborado com base nos poços de captação cadastrados no órgão de controle para a área de estudo (DAEE, 2020), cadastro que possui os dados de vazão explorada, aquífero explorado e coordenada geográfica do poço utilizado. Assim, é criada uma camada vetorial pontual desses dados em SIG no QGIS.

Tabela 20 – Critérios de classificação do Índice PTOT.

Critérios	Índice de Prioridade PTOT
Faixas de vazão de exploração do poço que representam tempos de trânsito da água de 0-2 anos da distância R (raio) arbitrada.	5 - Muito Alta
Faixas de vazão de exploração do poço que representam tempos de trânsito da água de 2-4 anos da distância R (raio) arbitrada.	4 - Alta
Faixas de vazão de exploração do poço que representam tempos de trânsito da água de 4-6 anos da distância R (raio) arbitrada.	3 - Média
Faixas de vazão de exploração do poço que representam tempos de trânsito da água de 6-8 anos da distância R (raio) arbitrada.	2 - Baixa
Faixas de vazão de exploração do poço que representam tempos de trânsito da água maior que 8 anos da distância R (raio) arbitrada.	1 - Muito Baixa

A essa camada vetorial pontual de poços é aplicada a interpolação de densidade de Kernel do QGIS, utilizando um Kernel uniforme de valor 1 para todos os pixels dentro do alcance adotado, o raio de 500 m, multiplicado pelo valor da vazão de cada poço. O arquivo *raster* gerado representa os raios de 500 m de cada poço com valor de elevação (valor do pixel) igual a vazão do poço em m³/h (Figura 30). Na interseção de raios tem-se a soma das vazões, como valor de elevação, representando de modo simplificado o incremento de rebaixamento que ocorre em poços próximos com bombeamento simultâneo (Figura 31) para poços instalados no mesmo aquífero. Em poços de aquíferos diferentes foi adotada a classificação de maior prioridade.

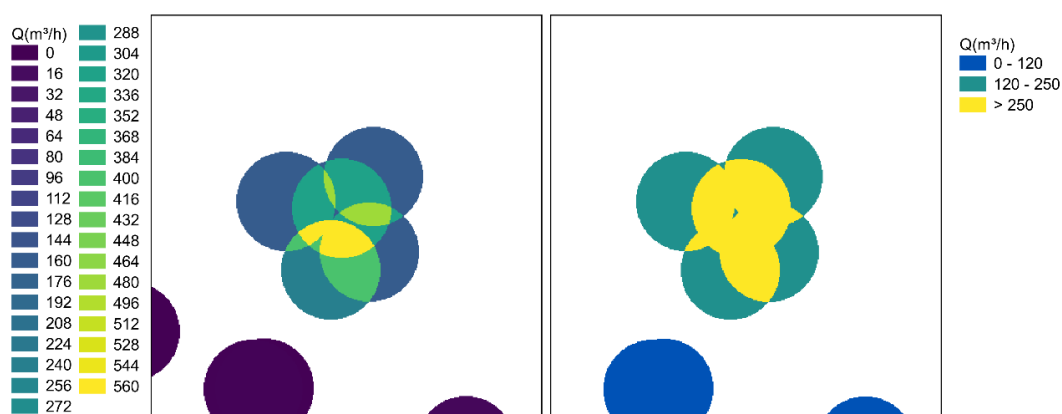


Figura 30 – Mapeamento dos perímetros de proteção com raio de 500 m: a esquerda o raster dos raios com elevação igual as vazões (somando nas interseções de raios); a direita os raios após a classificação pelo tempo de trânsito.

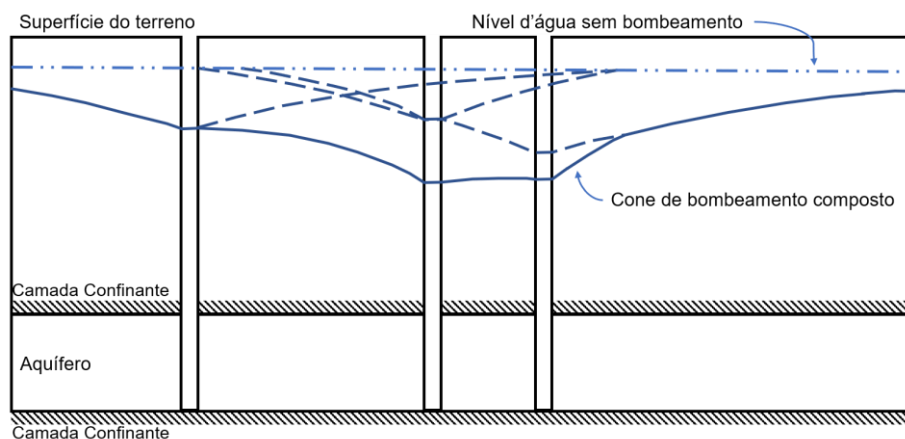


Figura 31 – Cone de bombeamento para três poços explorando o mesmo aquífero. Cada poço possui vazões de bombeamento diferente, assim, o nível dinâmico de cada poço considerando o bombeamento individual é diferente (FETTER, 2001).

Para a finalização do mapa, o *raster* é classificado para as faixas de vazões definidas a partir da Tabela 20 utilizando a ferramenta calculadora *raster* do QGIS. Assim, os pixels que possuíam valores de vazões passam a ter valores de priorização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo

A partir do tratamento dos dados do Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo (CETESB, 2018) foi possível avaliar relações entre os tipos de contaminantes e as atividades industriais dos empreendimentos cadastrados.

Nesse arquivo, com foco nas áreas cadastradas com contaminação de fonte industrial (1158 registros), a descrição da atividade cadastrada para cada empresa foi atualizada e uniformizada para as descrições de atividades da base do Código Nacional de Atividades Econômicas - CNAE 2.0 do IBGE (2007).

Parte das áreas cadastradas encontram-se em processo de remediação e mudança de uso do solo sob responsabilidade de novas empresas, distintas das fontes causadoras da contaminação, em geral do ramo imobiliário. Por uma limitação do banco de dados, não é possível realizar um cadastramento do histórico de uso das áreas. Nesses casos, perdeu-se o nome das empresas e a descrição de suas atividades que originaram as contaminações, e assumiu-se o nome e descrição da atividade da nova empresa responsável. O mesmo ocorre para áreas que mudaram de razão social e de atividade ao longo do tempo.

Deste modo, dos 1158 registros, foi possível resgatar a descrição da atividade uniformizada no CNAE 2.0 de 768 registros pertencentes às atividades da Indústria da Transformação e Extrativa, ou seja, 66,3% das áreas contaminadas cadastradas como industriais.

Com base nas atividades do CNAE 2.0 é possível realizar uma avaliação da ocorrência de contaminantes por tipologia industrial. A Tabela 21 apresenta o número de áreas contaminadas para cada divisão do CNAE para as atividades industriais. Também apresenta o número de casos por tipo de contaminante considerando os de maior ocorrência.

Especificamente no Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo, são indicados os grupos de contaminantes encontrados em cada área. São potenciais geradores de DNAPLs, os contaminantes halogenados:

Solventes Halogenados, Solventes Aromáticos Halogenados, Fenóis Halogenados; e PCBs (Bifenilas Policloradas). Assim, as tipologias industriais que possuíam contaminação por pelo menos uma dessas substâncias foram contabilizadas como de ocorrência de contaminação na coluna DNAPL da Tabela 21.

Tabela 21 – Número de ocorrências de áreas contaminadas por tipologia industrial.

DIV.	ATIVIDADE INDUSTRIAL	Nº	Solventes Halogenados	Solventes Aromáticos Halogenados	Fenóis Halogenados	DNAPL	Metais
C - INDÚSTRIA DA TRANSFORMAÇÃO		758	305	38	53	351	541
10	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS	26	7	0	0	7	14
11	FABRICAÇÃO DE BEBIDAS	6	0	0	1	1	5
13	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS TÊXTEIS	20	9	1	1	9	16
14	CONFECÇÃO DE ARTIGOS DO VESTUÁRIO E ACESSÓRIOS	2	0	0	0	0	2
15	PREPARAÇÃO DE COUROS E FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE COURO, ARTIGOS PARA VIAGEM E CALÇADOS	10	0	0	0	0	10
16	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE MADEIRA	3	0	0	0	0	2
17	FABRICAÇÃO DE CELULOSE, PAPEL E PRODUTOS DE PAPEL	16	2	0	1	3	14
18	IMPRESSÃO E REPRODUÇÃO DE GRAVAÇÕES	4	1	0	0	1	3
19	FABRICAÇÃO DE COQUE, DE PRODUTOS DERIVADOS DO PETRÓLEO E DE BIOCOMBUSTÍVEIS	37	6	1	3	8	23
20	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS	201	68	14	25	88	141
21	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS FARMOQUÍMICOS E FARMACÊUTICOS	22	17	1	2	17	12
22	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE BORRACHA E DE MATERIAL PLÁSTICO	24	16	3	0	17	13
23	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE MINERAIS NÃO-METÁLICOS	43	4	1	3	7	24
24	METALURGIA	60	21	3	4	24	55
25	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE METAL, EXCETO MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	67	27	0	1	28	61
26	FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE INFORMÁTICA, PRODUTOS ELETRÔNICOS E ÓPTICOS	14	10	0	0	10	9
27	FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS, APARELHOS E MATERIAIS ELÉTRICOS	54	28	3	2	30	41
28	FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	42	21	4	4	24	26
29	FABRICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, REBOQUES E CARROCERIAS	75	51	4	5	60	48
30	FABRICAÇÃO DE OUTROS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE, EXCETO VEÍCULOS AUTOMOTORES	13	8	1	0	8	9
31	FABRICAÇÃO DE MÓVEIS	2	1	1	0	1	2
32	FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DIVERSOS	9	5	0	0	5	5
33	MANUTENÇÃO, REPARAÇÃO E INSTALAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	8	3	1	1	3	6
B - INDÚSTRIA EXTRATIVA		10	0	0	0	0	8
7	EXTRAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS	1	0	0	0	0	1
8	EXTRAÇÃO DE MINERAIS NÃO-METÁLICOS	9	0	0	0	0	7
Total Geral		768	305	38	53	351	549

Os dados da Tabela 21 foram avaliados em gráficos de Pareto, Figura 32 e Figura 33, de modo a buscar a representatividade de cada tipologia industrial em relação ao número de total de áreas contaminadas.

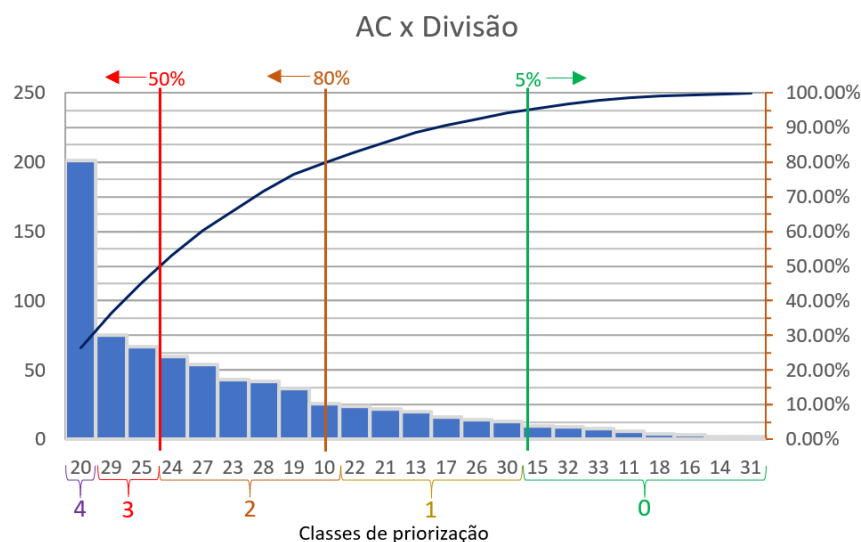


Figura 32 – Resultados da análise de Pareto para contaminação em geral (na abscissa tem-se os números das divisões do CNAE 2.0)

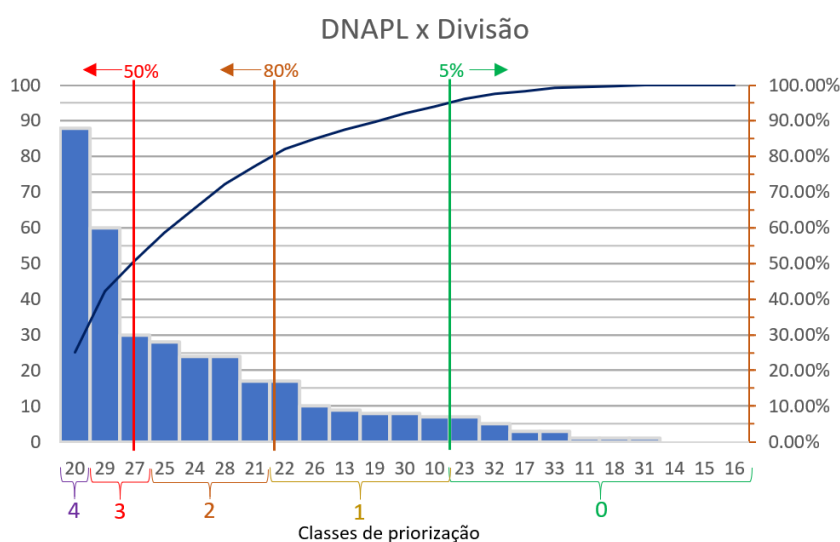


Figura 33 – Resultados da análise de Pareto para contaminação por DNAPLs (na abscissa tem-se os números das divisões do CNAE 2.0)

Da análise das ocorrências de contaminação dentro da seção C, indústria da transformação, conforme classificação do CNAE 2.0, observa-se que para

contaminação em geral e contaminação por metais, apenas 9 das 24 divisões representam 80% das ocorrências, e para contaminantes DNAPLs, apenas 7 representam o mesmo montante. Assim, tem-se um parâmetro de classificação prático para indicar as tipologias industriais que necessitam de uma intervenção com maior prioridade.

Assim, com base na análise realizada com foco nas divisões industriais mais significativas, foi possível reduzir o universo de divisões industriais em aproximadamente 2/3. Isto representa um grande ganho de agilidade e melhoria na utilização de recursos na fiscalização ambiental.

A parti dessa análise de frequências de ocorrência de áreas contaminadas por tipologia de atividade realizada, propôs-se um índice de classificação de potencial poluidor denominado de Índice PPOF - Pollution Potential by Occurrence Frequency, ou Potencial Poluidor por Frequência de Ocorrência, cujos critérios de classificação são descritos na Tabela 22.

Tabela 22 – Critérios de Classificação do Índice PPOF.

Critérios	Índice PPOF de Potencial Poluidor
Atividades de menores para maiores frequências de ocorrência de contaminação das águas subterrâneas que representam o acumulado de até 5% das ocorrências	0 - Muito Reduzido
Atividades de menores para maiores frequências de ocorrência de contaminação das águas subterrâneas que representam o acumulado de até 20% das ocorrências excluindo as classificadas acima	1 - Reduzido
Atividades que representam o acumulado de até 80% das ocorrências de contaminação excluindo as que representam 50%	2 - Moderado
Atividades que representam o acumulado de até 50% das ocorrências excluindo a atividade de maior número de ocorrências	3 - Elevado
Atividade de maior número ocorrências de contaminação das águas subterrâneas	4 - Muito Elevado

A aplicação da análise Pareto e critérios da Tabela 22 aos dados da Tabela 21 obteve como resultado a classificação apresentada na Tabela 23.

O PPOF permite estimar o potencial de contaminação por DNALPs, por exemplo, de uma determinada tipologia de atividade, bem como seu potencial de contaminação geral.

Como resultado tem-se uma tabela (Tabela 23) com as tipologias industriais (Divisões do CNAE 2.0) e seus índices PPOF para a contaminação em geral e para a contaminação por DNALPs.

Tabela 23 – Índice PPOF - Classificação de priorização para fiscalização com base no número de ocorrências de áreas contaminadas cadastradas por tipologia industrial (divisão do CNAE 2.0).

Descrição	Divisão	Índice PPOF	
		Geral	DNAPLs
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS	10	2	1
FABRICAÇÃO DE BEBIDAS	11	0	0
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DO FUMO	12	0	0
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS TÊXTEIS	13	1	1
CONFECÇÃO DE ARTIGOS DO VESTUÁRIO E ACESSÓRIOS	14	0	0
PREPARAÇÃO DE COURO E FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE COURO, ARTIGOS PARA VIAGEM E CALÇADOS	15	0	0
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE MADEIRA	16	0	0
FABRICAÇÃO DE CELULOSE, PAPEL E PRODUTOS DE PAPEL	17	1	0
IMPRESSÃO E REPRODUÇÃO DE GRAVAÇÕES	18	0	0
FABRICAÇÃO DE COQUE, DE PRODUTOS DERIVADOS DO PETRÓLEO E DE BIOCOMBUSTÍVEIS	19	2	1
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS	20	4	4
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS FARMOQUÍMICOS E FARMACÊUTICOS	21	1	2
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE BORRACHA E DE MATERIAL PLÁSTICO	22	1	1
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE MINERAIS NÃO-METÁLICOS	23	2	0
METALURGIA	24	2	2
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE METAL, EXCETO MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	25	3	2
FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE INFORMÁTICA, PRODUTOS ELETRÔNICOS E ÓPTICOS	26	1	1
FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS, APARELHOS E MATERIAIS ELÉTRICOS	27	2	3
FABRICAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	28	2	2
FABRICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, REBOQUES E CARROCERIAS	29	3	3
FABRICAÇÃO DE OUTROS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE, EXCETO VEÍCULOS AUTOMOTORES	30	1	1
FABRICAÇÃO DE MÓVEIS	31	0	0
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DIVERSOS	32	0	0
MANUTENÇÃO, REPARAÇÃO E INSTALAÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	33	0	0

Essa classificação foi definida com base em 66,3% das áreas contaminadas industriais conhecidas do estado de São Paulo que possui diferentes vocações industriais em diferentes regiões do estado, bem como, podem haver diferentes formas de controle ambiental, recomenda-se sua utilização como orientativa e nunca excludente, ou seja, excluindo de fiscalizações atividades classificadas como de baixo potencial poluidor.

Outra limitação consiste no fato de ter se conseguido correlações com base nas tipologias gerais de atividades industriais, quando aplicada a mesma análise especificando mais as atividades, as correlações decaem em função do aumento da especificidade.

Assim, podem haver atividades específicas de alto potencial poluidor das águas subterrâneas que estariam enquadradas em tipologias gerais de baixo potencial.

Como exemplo temos a atividade curtimento e outras preparações do couro (classe 15.10-6 do CNAE 2.0), que possui alto potencial poluidor das águas subterrâneas por manipular grandes volumes de efluentes com cromo e outros compostos, que está incluída na tipologia preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados (divisão 15 do CNAE 2.0) que foi classificada como de potencial poluidor muito reduzido pelo método PPOF.

5.2 Cadastro de Fontes de Poluição da CETESB

O cadastro das empresas licenciadas ou já fiscalizadas pela CETESB (CETESB, 2019 a) na área de estudo possuía 409 empresas em Salto de Pirapora, 771 empresa em Votorantim e 6783 empresas Sorocaba.

O tratamento e georreferenciamento dos dados na área de estudo definiu-se um banco de dados (vetor pontual) de 2887 indústrias na área de estudo (Tabela 24). Esse banco de dados também possui campo que indica a situação da empresa em relação ao licenciamento. Ele foi utilizado para agrupar as empresas em atividades que são objeto de licenciamento via municipal ou via licenciamento automatizado com base nas informações prestadas pelo usuário (VRA – Via Rápida Ambiental), atividades com licenciamento via CETESB: ativas, inativas ou de atividades encerradas e com contaminação do solo ou das águas subterrâneas.

Tabela 24 – Número de Indústrias (Seção C do CNAE 2.0) encontradas com boa acurácia no georreferenciamento nos municípios de Sorocaba, Salto de Pirapora e Votorantim.

Cadastro de Fontes de Poluição da CETESB: C - Indústria da Transformação	Nº
1. Total das Fontes Cadastradas Georreferenciadas com acurácia	2887
1.1. VRA e Licenciamento Municipal	378
1.2. Licenciamento via CETESB	2509
1.2.1. Ativas	1716
1.2.2. Inativas	789
1.2.3. Encerrada contaminada	4

Em Votorantim foram identificadas 330 atividades pertencentes à Seção C - Indústria da Transformação, sendo possível o georreferenciamento com acurácia de 280 empresas (85%).

No município de Salto de Pirapora foram encontradas 138 atividades da Indústria da Transformação, sendo possível o georreferenciamento com acurácia de 65 empresas (47%). Neste caso, a menor taxa de georreferenciamento está associada as características mais rurais do município com endereços sem padrão e não encontrados pelo API do Google Maps ®. Lembra-se que o objetivo da pesquisa está restrito as áreas urbanas, e nas áreas rurais inevitavelmente é necessária a realização de levantamento de campo para o georreferenciamento das empresas fontes de poluição.

A Tabela 25 apresenta para Sorocaba, município com maior número de empresas, o detalhe do processo de tratamento de dados e uma análise de eficiência desse tratamento, em porcentagem. Do total das atividades industriais (2946) da seção C do CNAE 2.0, 86,3% (2542) foram georreferenciadas com boa acurácia.

Tabela 25 – Síntese dos resultados após tratamento e geoespacialização das informações disponíveis do cadastro de atividades licenciadas ou fiscalizadas pela CETESB no município de Sorocaba (CETESB, 2019a).

Registros	Nº	%
1. Brutos	6783	-
2. Brutos, após primeira exclusão de atividades comerciais	4396	100
3. Uniformizados para CNAE 2.0 e classificados conforme método POSH-IG automaticamente com auxílio do Excel®	4008	91
4. Não Classificados	388	9
4.1. Revisão que resultou em atividades comerciais removidas	242	6
4.2. Uniformizados e Classificados manualmente	146	3
5. Total, após uniformização e classificação	4154	100
6. Atividades industriais (Seção C)	2946	71
7. Atividades industriais (Seção C) com acurácia no Georreferenciamento	2542	61

Na Tabela 26 são apresentados os resultados da amostragem de controle realizada para os dados que foram tratados e classificados automaticamente com

auxílio de macros e do *plug-in Fuzzy Lookup* no Excel 2016®, onde se observa 95% de acertos para o total de 401 amostras de controle.

Tabela 26 – Amostra de controle de qualidade realizada nos dados uniformizados empregando a CNAE 2.0 e classificados conforme o método POSH-IG de forma automática com auxílio de macros no Excel®.

Registros	Nº	%
Amostra de controle	401	100%
Acertos	382	95%
Erros	19	5%

5.3 Aplicação dos Índices POSH-IG e PPOF na área de estudo

As Figura 34, Figura 35, Figura 36 apresentam os mapas de densidade de indústrias por índice POSH-IG e PPOF para contaminação em geral e por DNAPLs. A Figura 37 apresenta esses dois índices com as empresas de potencial poluidor mais elevados, elaborada com a finalidade de compará-los.

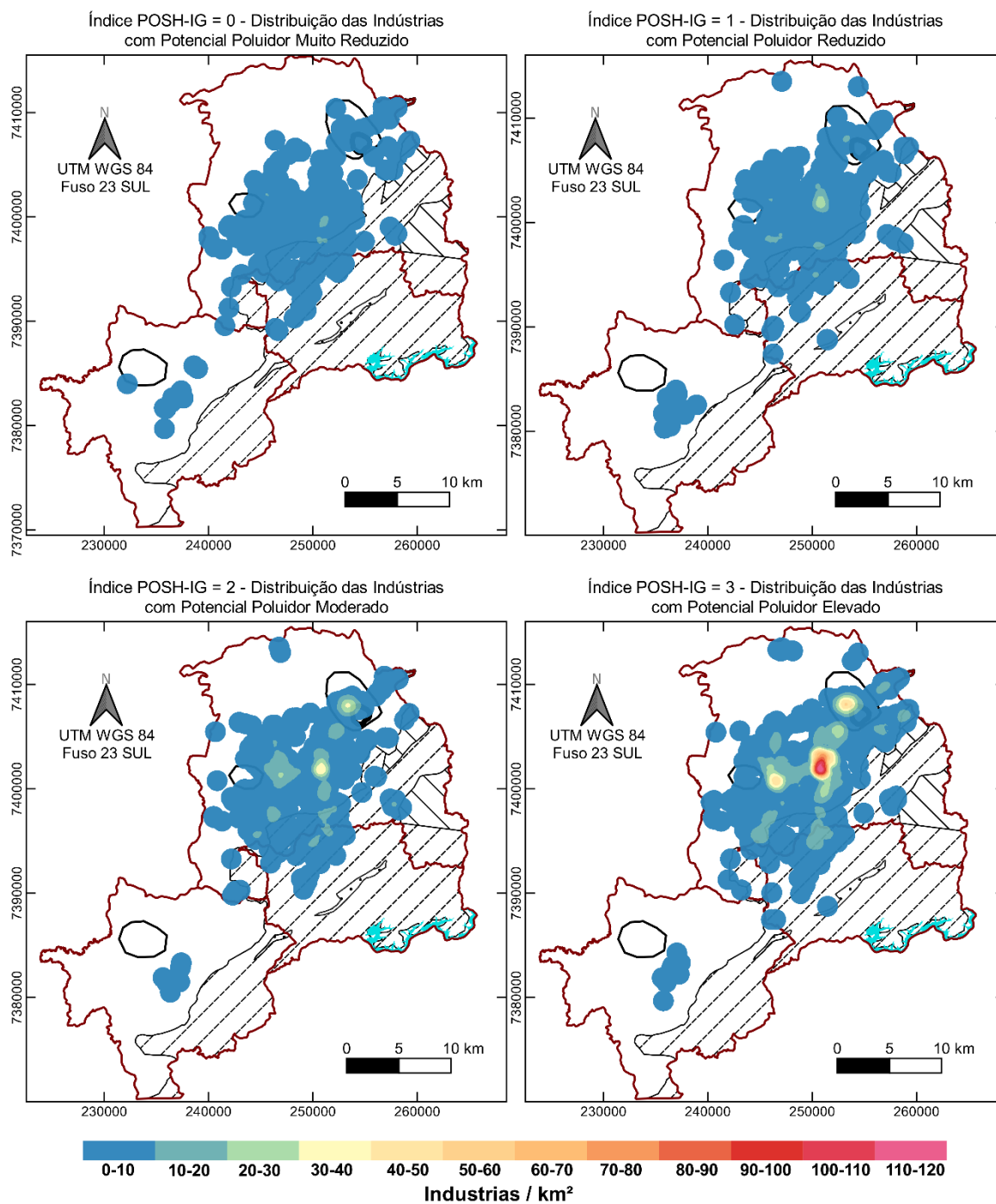


Figura 34 – Mapas de densidade de indústrias por índice POSH-IG.

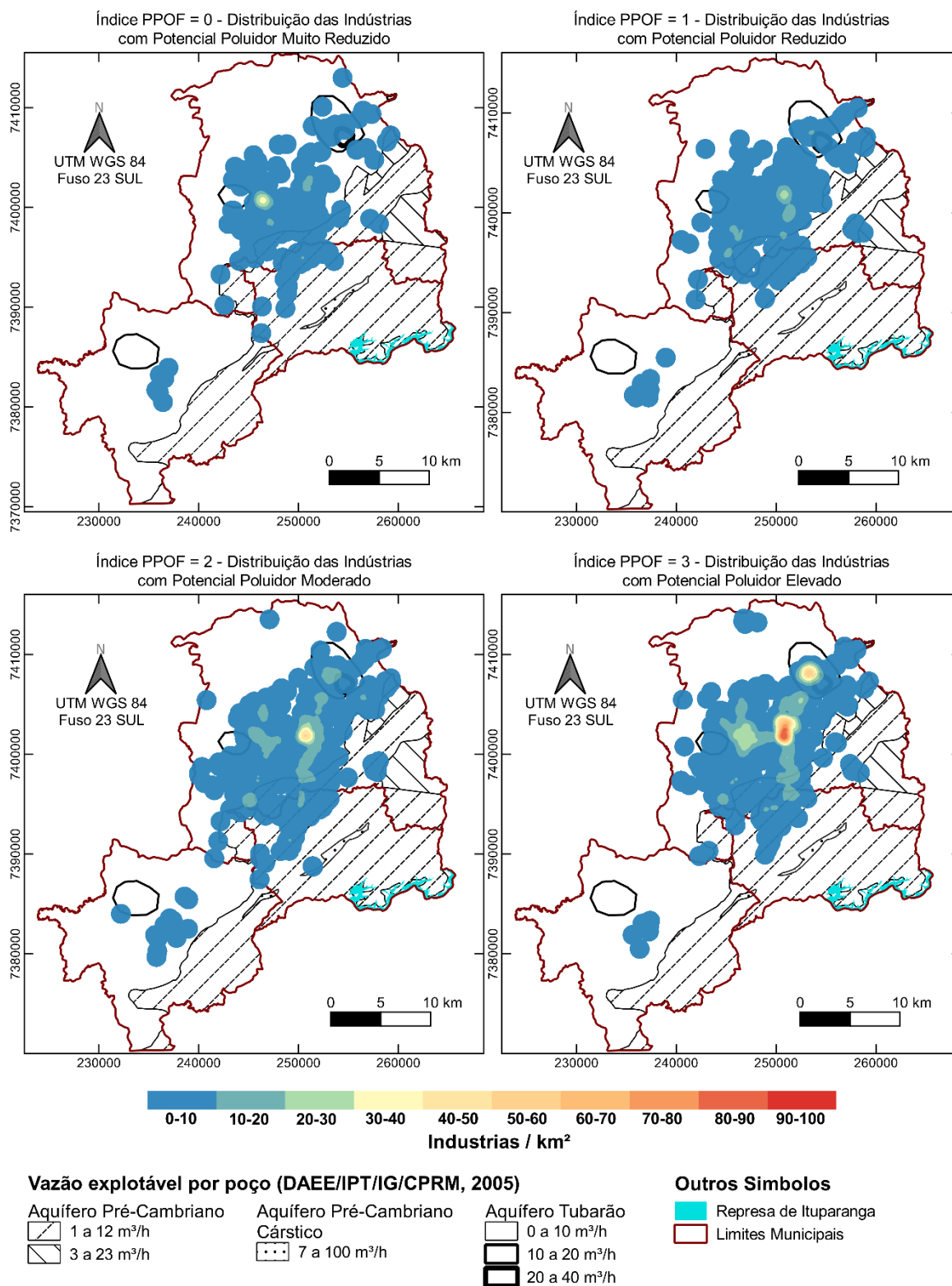


Figura 35 – Mapas de densidade de indústrias por índice PPOF para contaminação geral.

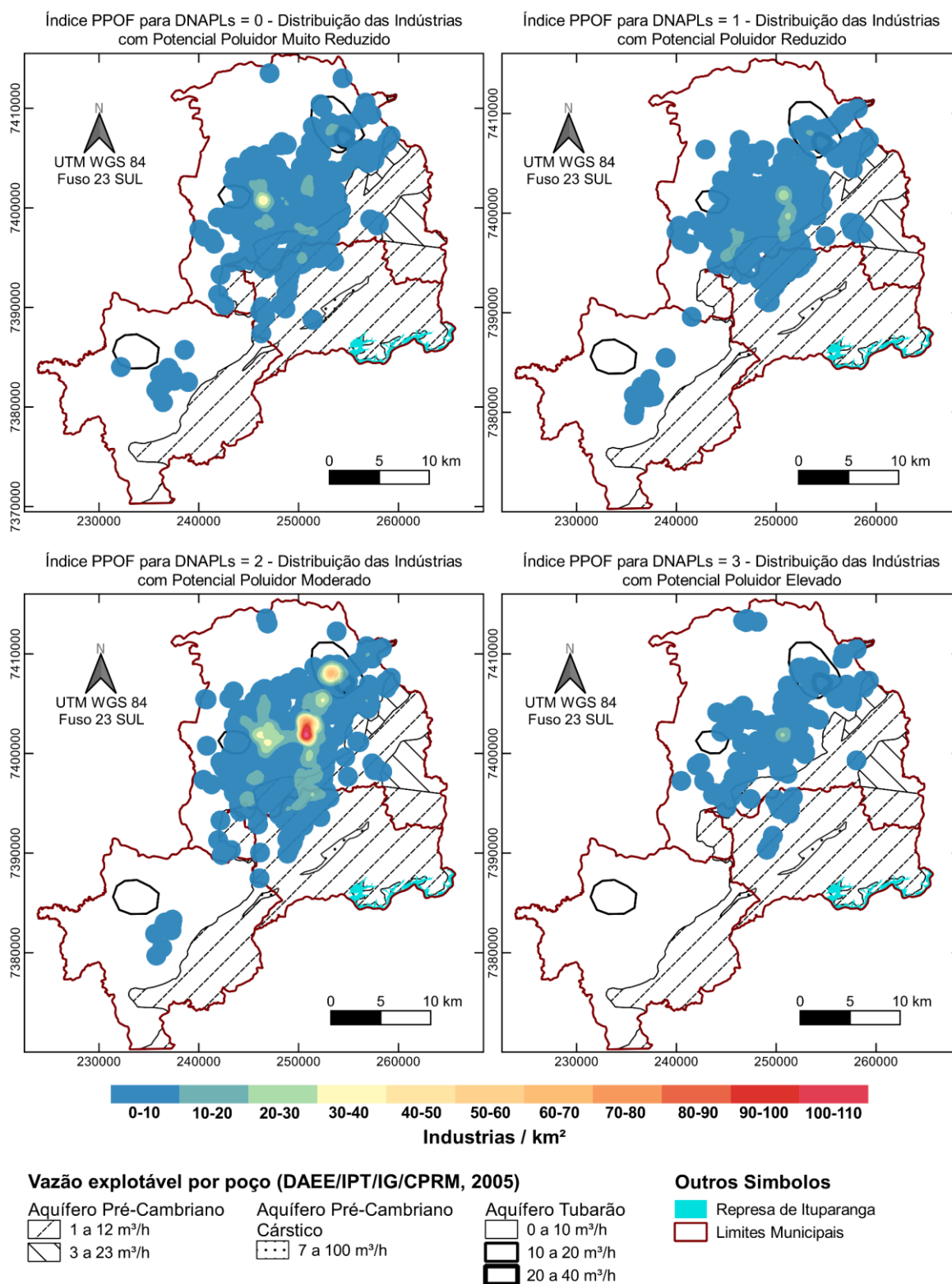


Figura 36 – Mapas de densidade de indústrias por índice PPOF para contaminação por DNAPLs.

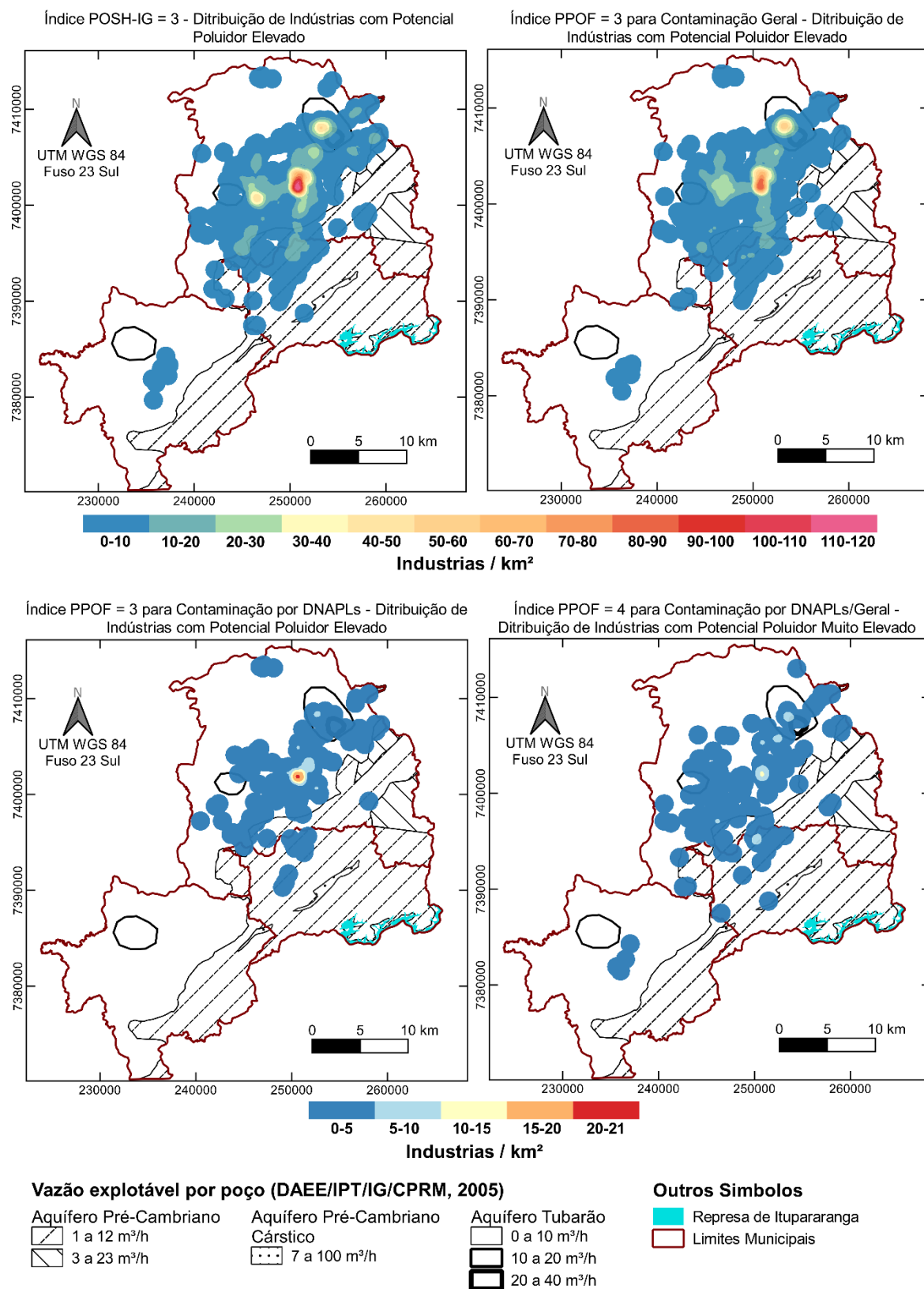


Figura 37 – Mapas de densidade de indústrias para os índices POSH-IG e PPOF.

Os mapas de densidades de indústrias com potencial poluidor igual a 3, elevado, pelos métodos PPOF para contaminação em geral e POSH-IG levaram a resultados semelhantes, identificando dois *hotspots*, um na região central de Sorocaba e outro na região nordeste desse município. Esses mapas também apresentam regiões de maiores densidades a Oeste do *hotspot* central e junto a região norte de Votorantim. Entretanto, as densidades foram maiores pelo método POSH-IG, pois pelo método PPOF há uma divisão a mais, o índice 4, muito elevado, para indústrias da área química.

Nos índices PPOF para DNAPLs de maior potencial poluidor (índices 3 e 4) observa-se que as empresas de índice igual a 3 estão mais distribuídas ao longo da área de estudo com apenas um *hotspot* central (abrangendo densidades de 5 a 21 indústrias/km²) e as empresas de índice 4 estão espalhadas em pequenos *hotspots* na direção sul norte com densidades variando de 5 a 10 e de 10 a 15 indústrias/km².

O município de Salto de Pirapora possui baixa densidade de indústrias/km², entretanto há empreendimentos de índice PPOF igual a 4 nessa região.

5.4 Vulnerabilidade dos Aquíferos – Índice GOD

A Figura 38 apresenta os resultados da aplicação do método GOD na área de estudo. Na mesma figura os pontos azuis demonstram os 57 poços cadastrados no SIAGAS (CPRM, 2020) utilizados na aplicação do GOD na região do Aquífero Pré-Cambriano.

As áreas de baixa vulnerabilidade consistem do Aquífero Tubarão que, conforme CETESB/IG/DAEE (1997), na área de estudo é de porosidade principal primária e composto predominantemente por sedimentos finos, com baixa transmissividade, com os fatores $G = 0,6$ (não confinado coberto), $O = 0,6$ (siltitos) e $D =$ variando de 0,6 a 0,8 (profundidades de 10 a 100 m), resultando nos índices finais de 0,216 a 0,288, ou seja, uma baixa vulnerabilidade.

As áreas de alta vulnerabilidade são definidas pelos Depósitos Aluvionares Quaternários também classificados por CETESB/IG/DAEE (1997).

Conicelli (2014), na região da bacia do Alto Tietê, adotou para associações de rochas granitoides, gnáissicas, quartizitos, micaxistos, anfibolitos, filitos e xistoss subordinados no Aquífero Pré-Cambriano, o fator O (Ocorrência de estratos de cobertura) igual a 0,6 (formações magmáticas, metamórficas e vulcânicas mais antigas). Ao fator G (Grau de Confinamento), o mesmo autor adotou o valor 0,9 (não confinado) considerando o aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas as falhas e fraturas nas rochas.

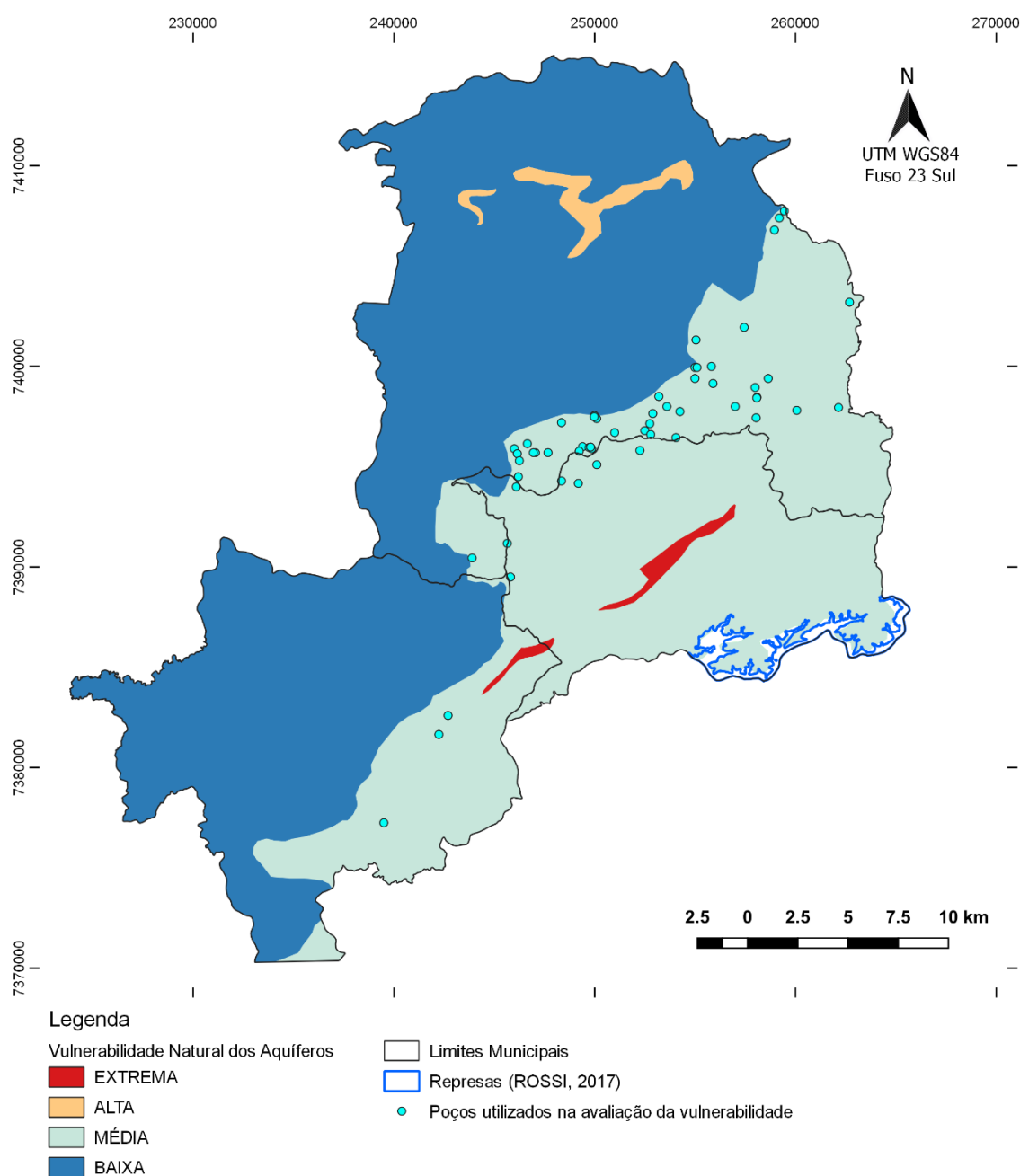


Figura 38 – Mapa da Vulnerabilidade de Aquíferos na área de estudo pelo método GOD.

Em um Aquífero Pré-Cambriano Cárstico, de associações de rochas metacarbonáticas, Conicelli (2014) adotou para o fator O o valor de 0,9 (Calcário Cárstico), e adotou o para o fator G o valor de 1,0 (não confinado) considerando o aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas às falhas, fraturas e cavidades das rochas metacarbonáticas.

Os Aquíferos Pré-Cambriano e Pré-Cambriano Cárstico que ocorrem na área de estudo são semelhantes aos avaliados por Conicelli (2014), assim foram adotados os fatores G e O propostos pelo autor. A Tabela 27 apresenta os resultados da aplicação o método GOD utilizando os fatores G e O propostos por Conicelli (2014). Nela tem-se também os dados de nível estático de 57 poços (CPRM, 2020) distribuídos ao longo desse aquífero, obtendo-se níveis d'água de 0,2 a 59,0 m (média de 12 ± 10 m), com fatores D de 0,9 a 0,6 (média de $0,8 \pm 0,1$), resultando em índices finais de 0,324 a 0,489, média vulnerabilidade, na melhor condição (N.E. > 50m e D=0,6) e na pior condição (N.E. < 5m e D=0,9).

Neste sentido, apesar dos poços avaliados não abrangerem toda a região do Aquífero Pré-Cambriano na área de estudo, considerando a variação entre a melhor e a pior condição encontradas, ambas com a mesma classificação, é possível concluir que o Aquífero Pré-Cambriano é de média vulnerabilidade.

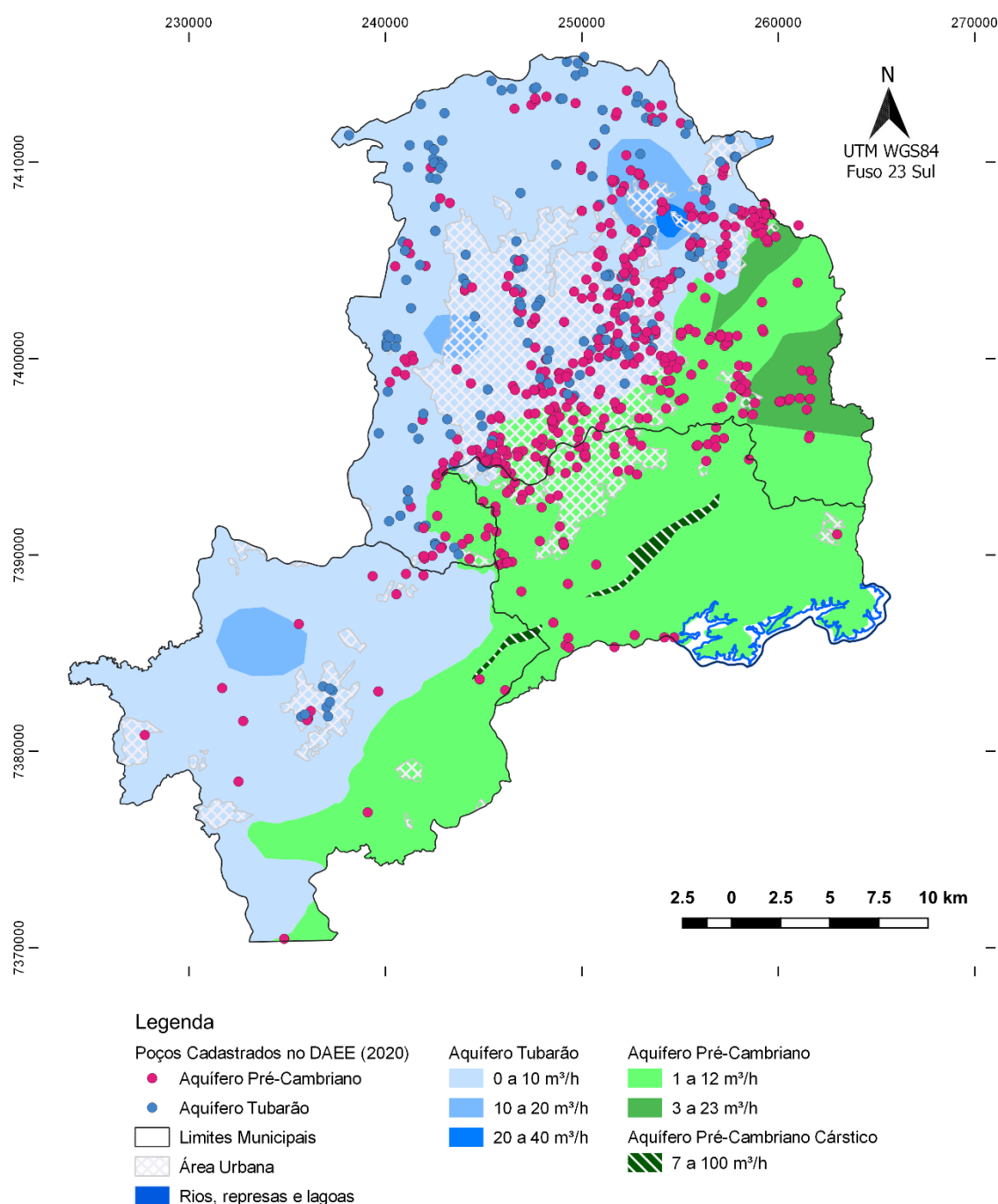
No Aquífero Pré-Cambriano Cárstico, para rochas calcáreas O=0,9, o fator D é igual a 1,0 para todas as profundidades. Assim, adotando-se G=1,0 (CONICELLI, 2014), o valor final de vulnerabilidade encontrado foi de 0,9, ou seja, uma vulnerabilidade extrema.

Tabela 27 – Valores de Nível Estático e dos Fatores G, O e D e Índice GOD para os poços avaliados no Aquífero Pré-Cambriano.

Nº	X(m)	Y(m)	N.E. (m)	D	G	O	GOD
1	255000	7399950	2	0.9	0.9	0.6	0.486
2	257450	7401950	4	0.9	0.9	0.6	0.486
3	255000	7399400	4	0.9	0.9	0.6	0.486
4	255900	7399150	8.3	0.8	0.9	0.6	0.432
5	255820	7400000	15.09	0.8	0.9	0.6	0.432
6	258960	7406800	3	0.9	0.9	0.6	0.486
7	262700	7403200	16	0.8	0.9	0.6	0.432
8	242700	7382600	12.2	0.8	0.9	0.6	0.432
9	255100	7399950	3	0.9	0.9	0.6	0.486
10	259450	7407750	23	0.7	0.9	0.6	0.378
11	258650	7399400	11	0.8	0.9	0.6	0.432
12	254050	7396450	43	0.7	0.9	0.6	0.378
13	246650	7396150	16	0.8	0.9	0.6	0.432
14	246000	7395900	3	0.9	0.9	0.6	0.486
15	246150	7395650	2	0.9	0.9	0.6	0.486
16	246250	7395300	10	0.8	0.9	0.6	0.432
17	247050	7395700	5	0.8	0.9	0.6	0.432
18	246950	7395700	4.2	0.9	0.9	0.6	0.486
19	248350	7397200	8	0.8	0.9	0.6	0.432
20	249400	7396000	9	0.8	0.9	0.6	0.432
21	250100	7397400	3	0.9	0.9	0.6	0.486
22	251000	7396700	0.2	0.9	0.9	0.6	0.486
23	253200	7398500	14	0.8	0.9	0.6	0.432
24	253600	7398000	5	0.8	0.9	0.6	0.432
25	252900	7397650	9	0.8	0.9	0.6	0.432
26	252750	7397150	23	0.7	0.9	0.6	0.378
27	252500	7396800	6	0.8	0.9	0.6	0.432
28	252794	7396605	12	0.8	0.9	0.6	0.432
29	254250	7397750	59	0.6	0.9	0.6	0.324
30	258000	7398950	6	0.8	0.9	0.6	0.432
31	257000	7398000	12	0.8	0.9	0.6	0.432
32	258050	7397440	18	0.8	0.9	0.6	0.432
33	262150	7397950	4	0.9	0.9	0.6	0.486
34	249850	7395900	24	0.7	0.9	0.6	0.378
35	249232	7395775	6	0.8	0.9	0.6	0.432
36	243900	7390450	20	0.8	0.9	0.6	0.432
37	242241	7381650	19	0.8	0.9	0.6	0.432
38	239500	7377250	20	0.8	0.9	0.6	0.432
39	246100	7394000	13.1	0.8	0.9	0.6	0.432
40	247680	7395700	5.85	0.8	0.9	0.6	0.432
41	245810	7389500	5	0.8	0.9	0.6	0.432
42	249730	7395960	10	0.8	0.9	0.6	0.432
43	252260	7395810	22.25	0.7	0.9	0.6	0.378
44	249190	7394170	36	0.7	0.9	0.6	0.378
45	245650	7391180	8.12	0.8	0.9	0.6	0.432
46	248350	7394290	5	0.8	0.9	0.6	0.432
47	260070	7397810	13.5	0.8	0.9	0.6	0.432
48	249990	7397530	9	0.8	0.9	0.6	0.432
49	249990	7397550	8.7	0.8	0.9	0.6	0.432
50	258090	7398460	6.98	0.8	0.9	0.6	0.432
51	258080	7398430	5.84	0.8	0.9	0.6	0.432
52	259200	7407400	16.2	0.8	0.9	0.6	0.432
53	255050	7401320	10	0.8	0.9	0.6	0.432
54	246200	7394500	19.6	0.8	0.9	0.6	0.432
55	249800	7395980	14.5	0.8	0.9	0.6	0.432
56	250110	7395100	3.4	0.9	0.9	0.6	0.486
57	249980	7397490	9.8	0.8	0.9	0.6	0.432

5.5 Área de Proteção de Poços com Raio de 500 m – Índices PTOT e FQ

A Figura 39 apresenta a camada vetorial de pontos, criada a partir dos dados de poços cadastrados no DAEE (2020).



Fontes: Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005). Área Urbana; Represas e Lagoas - Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado (ROSSI, 2017).

Figura 39 – Aquíferos e Camada dos Poços Cadastrados no DAEE (2020).

A área de estudo possui 716 poços ativos cadastrados no DAEE (2020), sendo que parte deles é outorgado para exploração no Aquífero Tubarão e parte no Aquífero Pré-cambriano. Não há poços outorgados na região de ocorrência do Aquífero Pré-Cambriano Cárstico, ou para o aquífero superficial formado pelos Depósitos Quaternários.

Parte dos poços com outorga no Aquífero Pré-cambriano se localizam na região em que o Aquífero Tubarão aflora ou é diretamente subjacente ao solo de cobertura, o que ocorre devido maior à profundidade desses poços, que pode ser visualizado nos dados disponíveis de perfil de alguns poços no SIAGAS (CPRM, 2020).

A Tabela 28 apresenta os dados utilizados nos cálculos dos tempos de trânsito para os aquíferos Tubarão e Pré-Cambriano considerando o valor de S_0 de 500m pelo método de Wyssling (1979).

Tabela 28 - Parâmetros utilizados nos cálculos dos tempos de trânsito (IRATANI e EZAKI, 2012).

Aquíferos	n_e	K (m³/dia)	b	i	$2\pi Kbi$	Ve (m/dia)
Aquífero Tubarão	0,1	0,3	350	0,04	26,39	0,12
Aquífero Pré-Cambriano	0,05	0,3	200	0,04	15,08	0,24

A Figura 40 apresenta os gráficos de estimativas de tempos de trânsito para as faixas de vazão de captação de poços que ocorrem na área de estudo fixando S_0 em 500 m.

A partir da Figura 40 são estabelecidas as faixas de vazão respectivas aos intervalos de tempo de trânsito utilizados na classificação do índice PTOT.

A Tabela 29 apresenta os resultados das faixas de vazão classificadas para cada índice PTOT. Nessa tabela observa-se que a maior faixa de vazões do aquífero Tubarão e a menor faixa vazões do aquífero Pré-Cambriano foram classificadas como de prioridade média, com a mesma faixa de tempos de trânsito (4 a 6 anos).

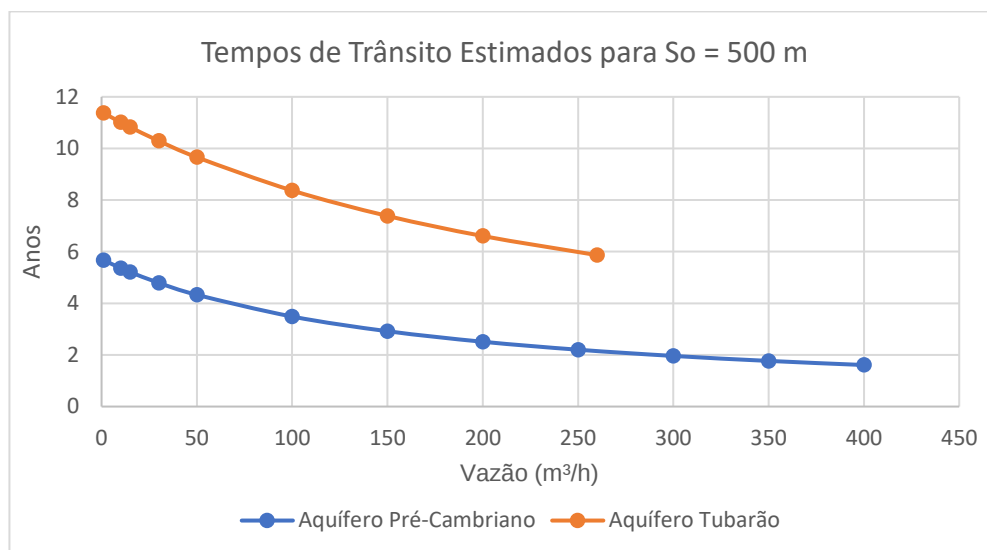


Figura 40 – Tempos de Trânsito Estimados para o Raio de 500m nos aquíferos de interesse na área de estudo.

Tabela 29 – Classes PTOT definidas para as faixas de vazão que ocorrem na área de estudo com base nos tempos de trânsito para áreas de proteção com Raio de 500 m.

Aquífero	Tempo de Trânsito Estimado para So = 500m	Vazão (m³/h)	Classes de Prioridade
Tubarão	> 8 anos	≤ 120	Muito Baixo
	6 - 8 anos	(120, 250]	Baixo
	4 - 6 anos	> 250	Médio
Pré-Cambriano	4 - 6 anos	≤ 70	Médio
	2 - 4 anos	(70, 300]	Alto
	< 2 anos	> 300	Muito Alto

A aplicação do método de Wyssling (1979) sobre o aquífero Pré-Cambriano é controversa, pois esse método adota um aquífero poroso, homogêneo e isotrópico como simplificação para sua solução analítica. O que não ocorre no aquífero Pré-Cambriano, o qual é fraturado e heterogêneo.

Bradburry e Muldoon (1994) realizaram a comparação de modelos baseados em meios porosos e modelos de fluxo em fraturas para a delimitação de áreas de proteção de poços em um aquífero fraturado, e concluíram que mesmo em aquíferos densamente fraturados, a zona de contribuição determinada pelos modelos de fluxo em fraturas é significativamente maior que a zona de captura de modelos determinadas por modelos baseados em meios porosos.

Entretanto, com os dados disponíveis não é possível realizar uma avaliação mais detalhada, assim, foi realizada uma estimativa de tempos de trânsito no

aquífero Pré-Cambriano utilizando o método de Wyssling (1979) sabendo-se que tempo real pode ser significativamente menor que o encontrado, bem como podem haver fraturas que guiam o fluxo preferencial das águas subterrâneas.

Avaliando a Tabela 29, na área de estudo aplicada têm-se que os tempos de trânsito do aquífero Tubarão são significativamente menores que os encontrados no Pré-Cambriano, assim, a classificação PTOT acaba resultando numa priorização maior para o aquífero Pré-Cambriano, reduzindo eventuais problemas devido o método de cálculo, pois no caso da ocorrência de tempos menores que os calculados, ao aquífero Pré-Cambriano já está sendo priorizado em relação ao Tubarão.

Porém esse resultado ocorreu em função das características da área de estudo, onde o aquífero Tubarão possui vazões menores e devido aos valores regionais adotados de porosidade específica.

As Figura 41 e Figura 42 apresentam o mapeamento das áreas de proteção dos poços com raio de 500 m com as faixas de valores de vazão dos poços e respectiva classificação PTOT, para os aquíferos Tubarão e Pré-Cambriano, lembrando que nas áreas de sobreposição foi aplicado o somatório das vazões.

Nos mapas também são apresentadas áreas de raios de 500 m de poços sem dados de vazão cadastrada no DAEE (2020). Assim, devido à falta dos dados de vazão, eles não foram considerados na aplicação do índice EIP. No entanto, esses poços usualmente são aqueles dispensados de outorga (autorização de uso) com vazões pequenas de até 15 m³/dia, ou seja, 0,63 m³/h.

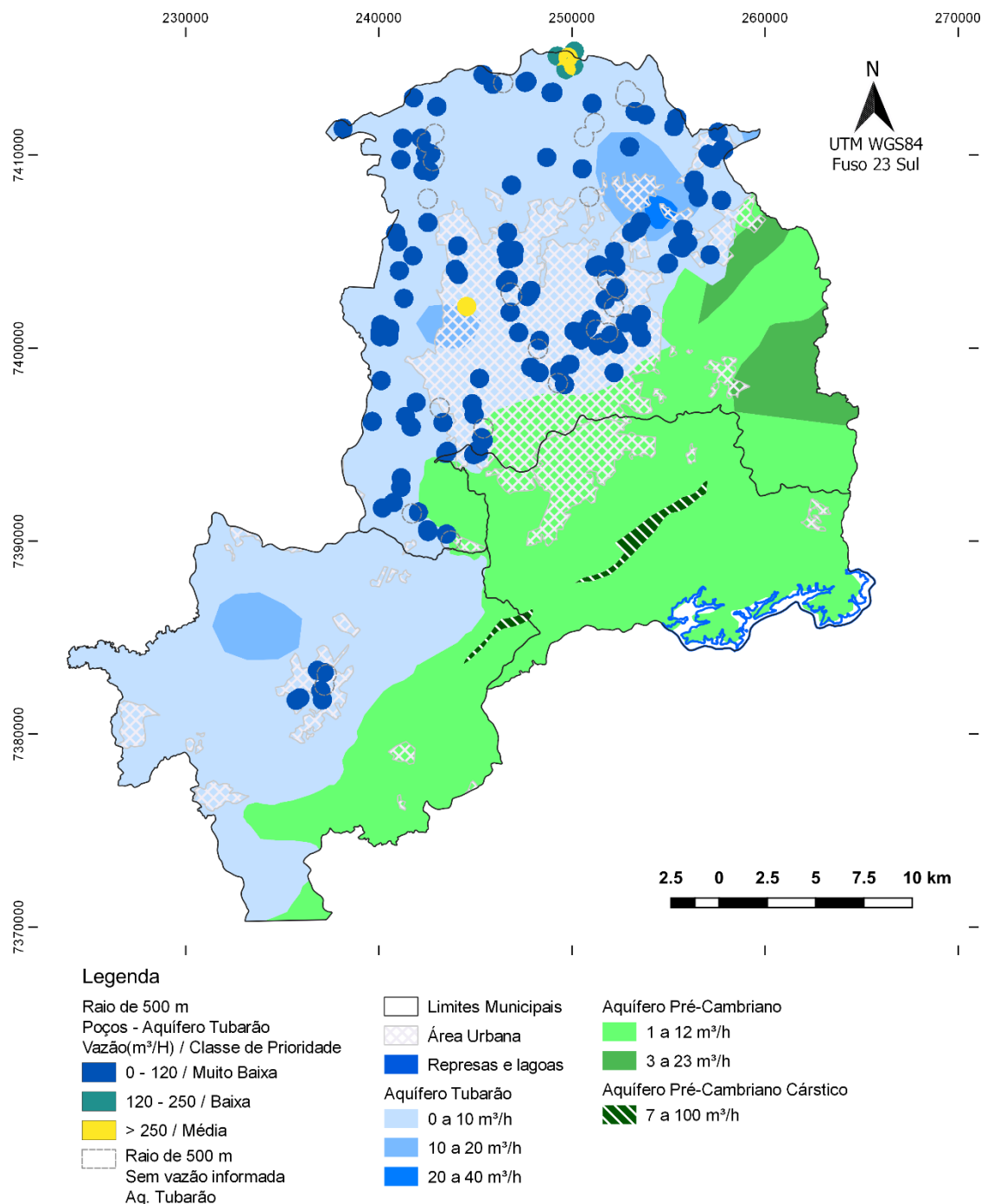


Figura 41 – Classificação PTOT para áreas de proteção com raio de 500 m dos poços de captação que exploram o Aquífero Tubarão.

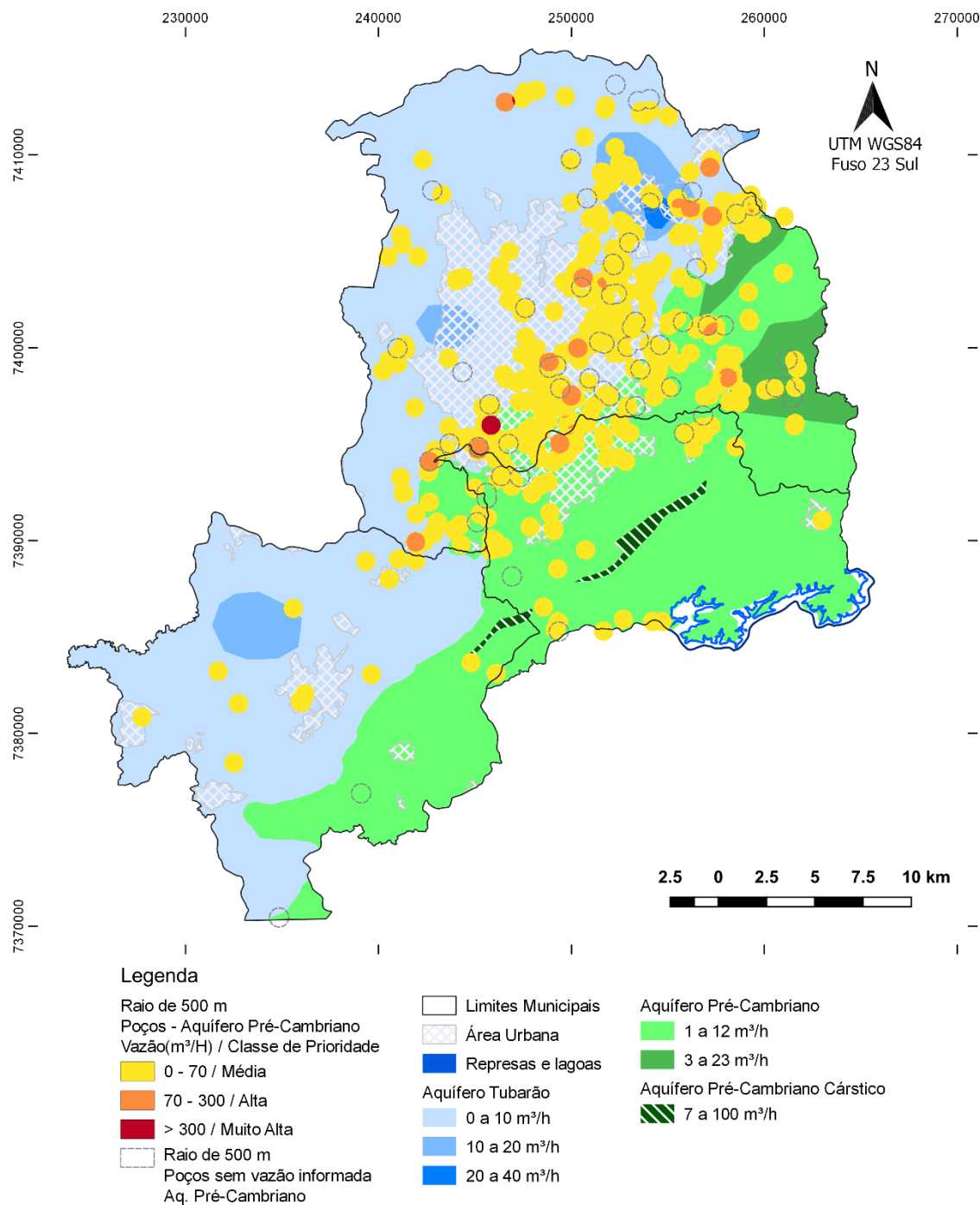


Figura 42 – Classificação PTOT para áreas de proteção com raio de 500 m dos poços de captação que exploram o Aquífero Pré-Cambriano.

Na avaliação com os resultados apresentados na Figura 41 e na Figura 42, foi considerado que os poços cadastrados se encontram explorando somente os aquíferos descritos na outorga, porém, na Figura 43 se observa que os dados

disponíveis no SIAGAS (CPRM, 2020) de poços instalados na região onde aquífero superficial é o Tubarão possuem 75% de seus níveis estáticos variando de 0 a 26,5 m, relativamente rasos. A partir dos dados do DAEE (2020), 65,2% dos poços na região onde o aquífero Tubarão aflora ou está sob o solo de cobertura estariam explorando o aquífero Pré-Cambriano. Assim, esses dados sugerem que boa parte dos poços seriam mistos, conjugando a exploração de ambos os aquíferos.

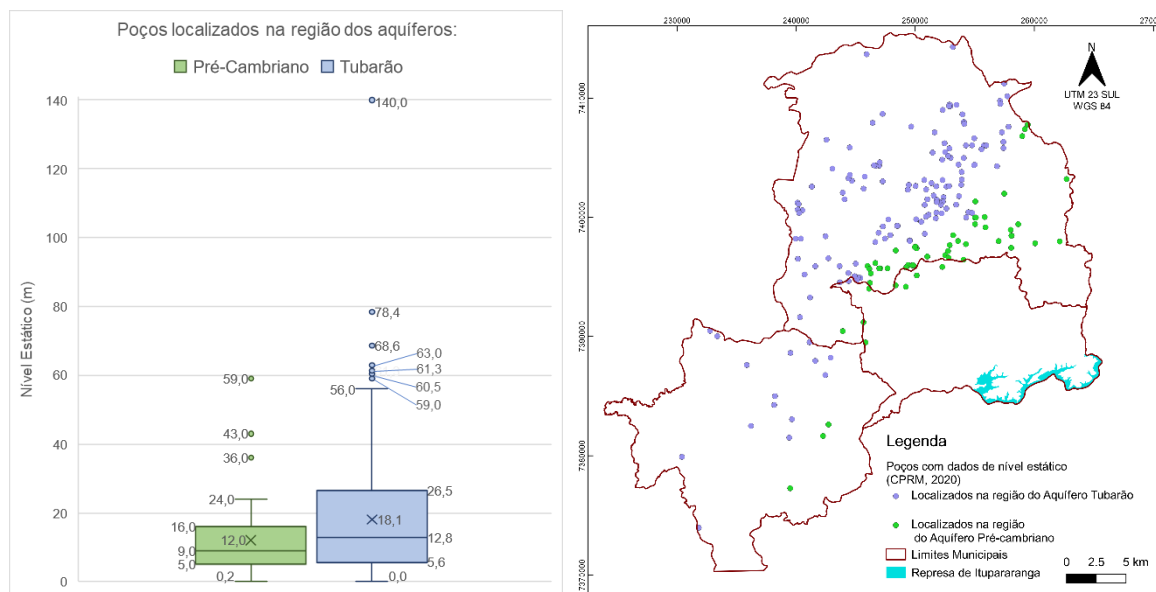


Figura 43 – Avaliação dos níveis estáticos disponíveis no SIAGAS (CPRM, 2020).

Nesse contexto, a aplicação de métodos que avaliam o tempo de trânsito fica prejudicada, pois seria necessário o conhecimento do perfil geológico e construtivo dos poços e modelos numéricos mais detalhados para poder verificar o tempo de trânsito compondo as características dos dois aquíferos explorados.

Também pode ocorrer nessa condição a exposição via contaminação cruzada no próprio poço, ou seja, o aquífero superficial contaminado pode contribuir com o poço levando contaminação também para o aquífero mais profundo.

Face às limitações do método de Wyssling(1987) e falta de informações sobre os perfis geológicos e construtivos dos poços na área de estudo, aplicou-se também uma classificação com base no mapa das áreas de proteção dos poços com raio de 500 m com valores das vazões de seus respectivos poços, aplicando-se o somatório na sobreposição (vide Figura 30), assim como no método PTOT

proposto, mas sem aplicação dos tempos de trânsito na classificação ou diferenciação por aquífero.

Deste modo, está sendo priorizado o poço com maior produção, que seria um recurso mais importante do ponto de vista de disponibilidade hídrica, considerando apenas o raio de 500 m arbitrário como área proteção contra eventual contaminação.

Na Figura 44 é apresentada a estatística das vazões encontradas na área de estudo. Observa-se que o intervalo de confiança de 95% ficou entre 0 e 114 m³/h, e 75% dos resultados ficou na faixa de 12 m³/h (1º Quartil) a 53 m³/h (3º Quartil).

Com base nessa análise estatística, foram definidos os limites das classes ao longo da distribuição, considerando os valores mais extremos de vazão como de maior prioridade, conforme apresentado na Tabela 30.

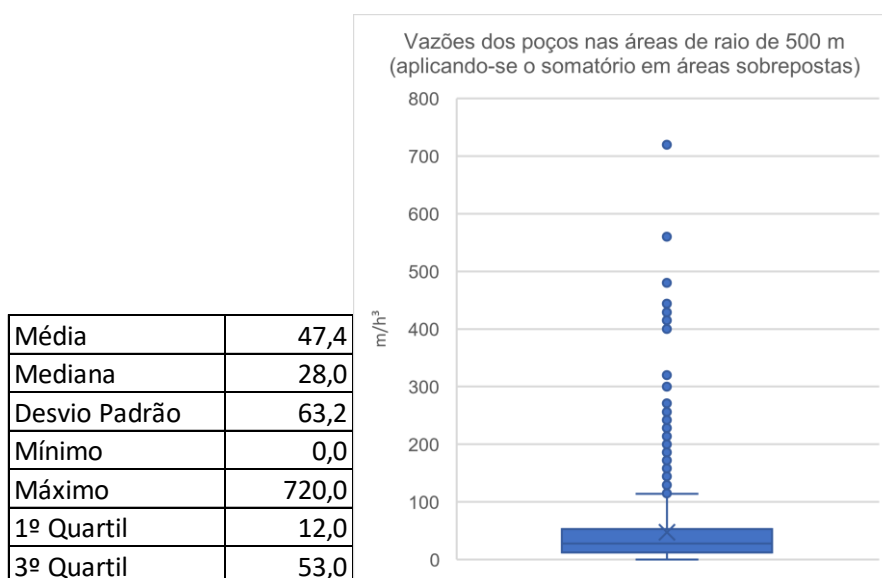


Figura 44 – Gráfico *box plot* das vazões de cada poço adotada para sua respectiva área de proteção com raio de 500 m, com aplicação do somatório em áreas sobrepostas.

Tabela 30 – Fatores de priorização com base nas vazões dos poços da área de estudo

Critério	Classes de Prioridade	Índice FQ
Regiões fora de áreas de proteção definidas pelo raio de 500 m	Muito Baixa	1
Vazões de 0 à 12 m³/h (1º Quartil)	Baixa	2
Vazões maiores que 12 até 28 m³/h (Mediana)	Média	3
Vazões maiores que 28 até 53 m³/h (3º Quartil)	Alta	4
Vazões maiores que 53 m³/h (3º Quartil)	Muito Alta	5

Com aplicação dessa sistemática alternativa, sem realizar o cálculo do tempo de trânsito, obteve-se o resultado apresentado na Figura 45.

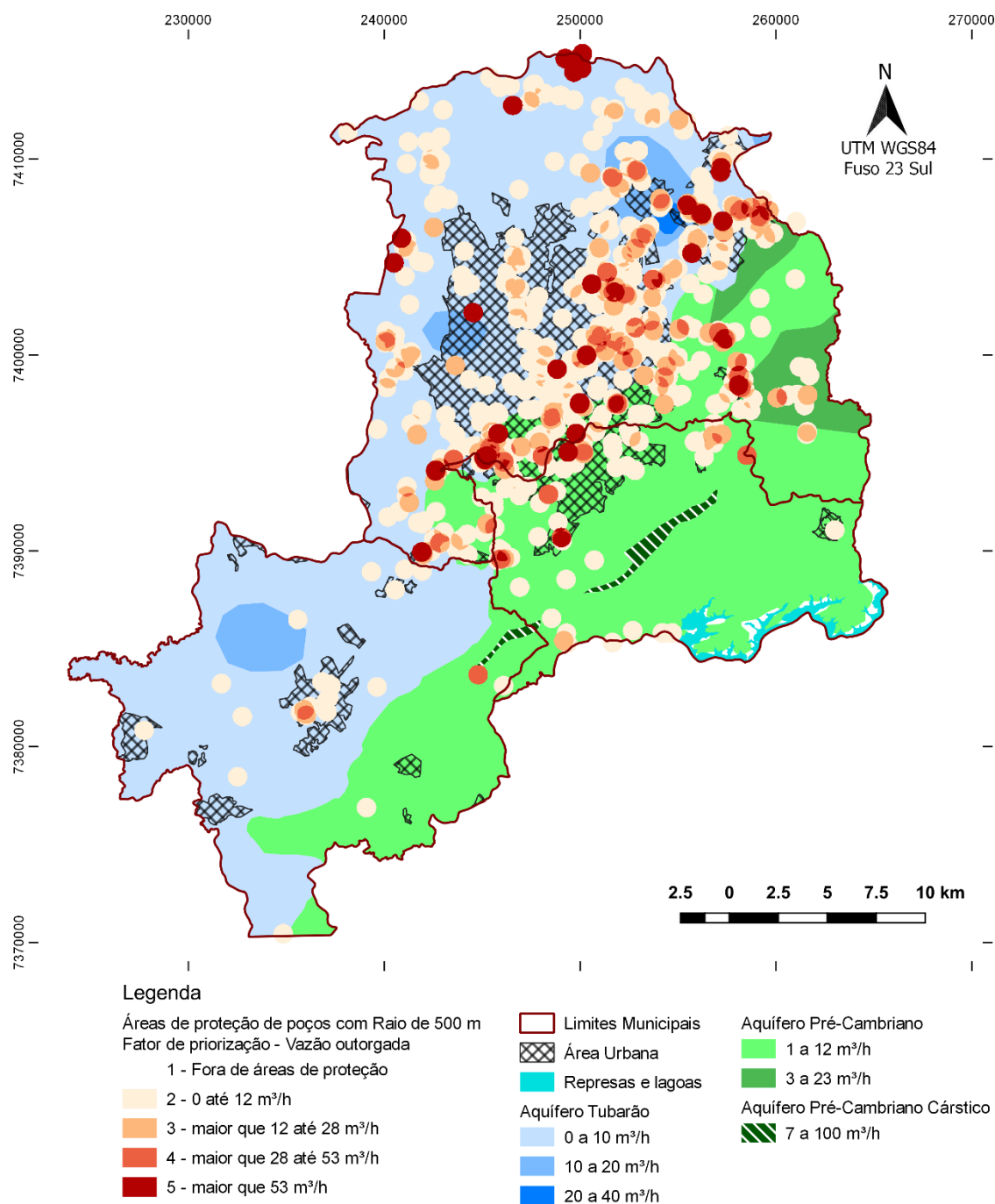


Figura 45 – Mapa de priorização das áreas de proteção de poços considerando as vazões outorgadas, sem avaliar o tempo de trânsito.

Comparando com os mapas por tempo de trânsito, observa-se que além das regiões destacadas anteriormente com prioridade muita alta, também foram destacadas novas regiões em função da delimitação realizada com base nos quartis.

Esse índice com base nas vazões outorgadas foi denominado como índice de Fator de Vazão – FQ.

5.6 Índices de Perigo de Contaminação

A Figura 46 apresenta os mapas de densidade de indústrias por resultados do Índice de Perigo de Contaminação (IPC) utilizando a classificação POSH-IG, onde se observa que a maior concentração de indústrias foi classificada com índice de perigo de contaminação 2 – médio, e 4 empresas foram classificadas com o índice 3 – alto.

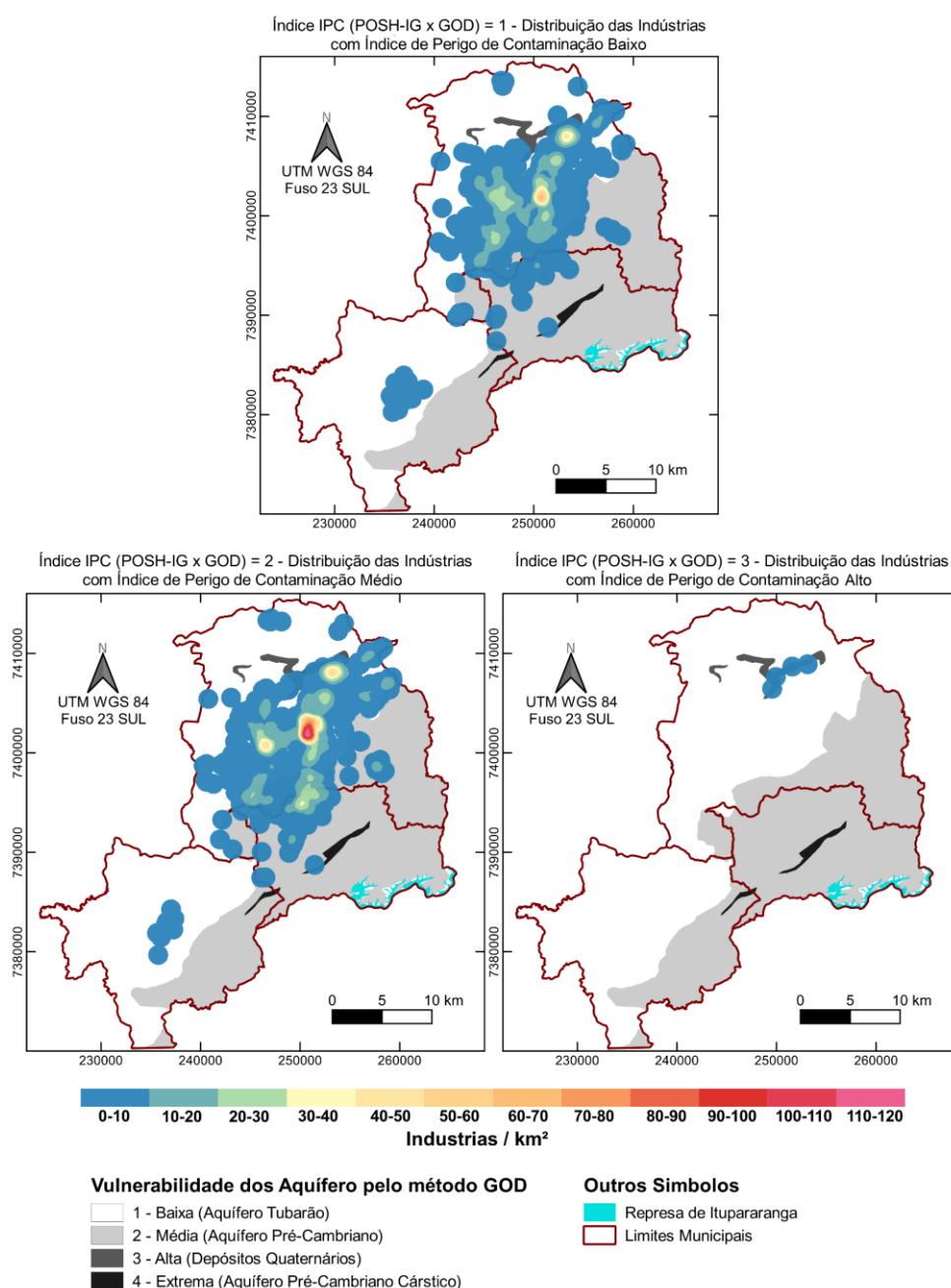


Figura 46 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice POSH-IG.

Isso ocorre em função dessas empresas estarem sobre o aquífero formado pelos Depósitos Quaternários, alúvios ao longo das várzeas do Rio Sorocaba. Em um primeiro momento avaliou-se que esse aquífero possui pouca relevância para a captação de águas subterrâneas, pois na área de estudo, conforme apresentado na Figura 39, não há poços declarados extraíndo águas desse aquífero, assim, esse aquífero poderia ser desconsiderado nesse caso específico, com os resultados apresentados na Figura 47.

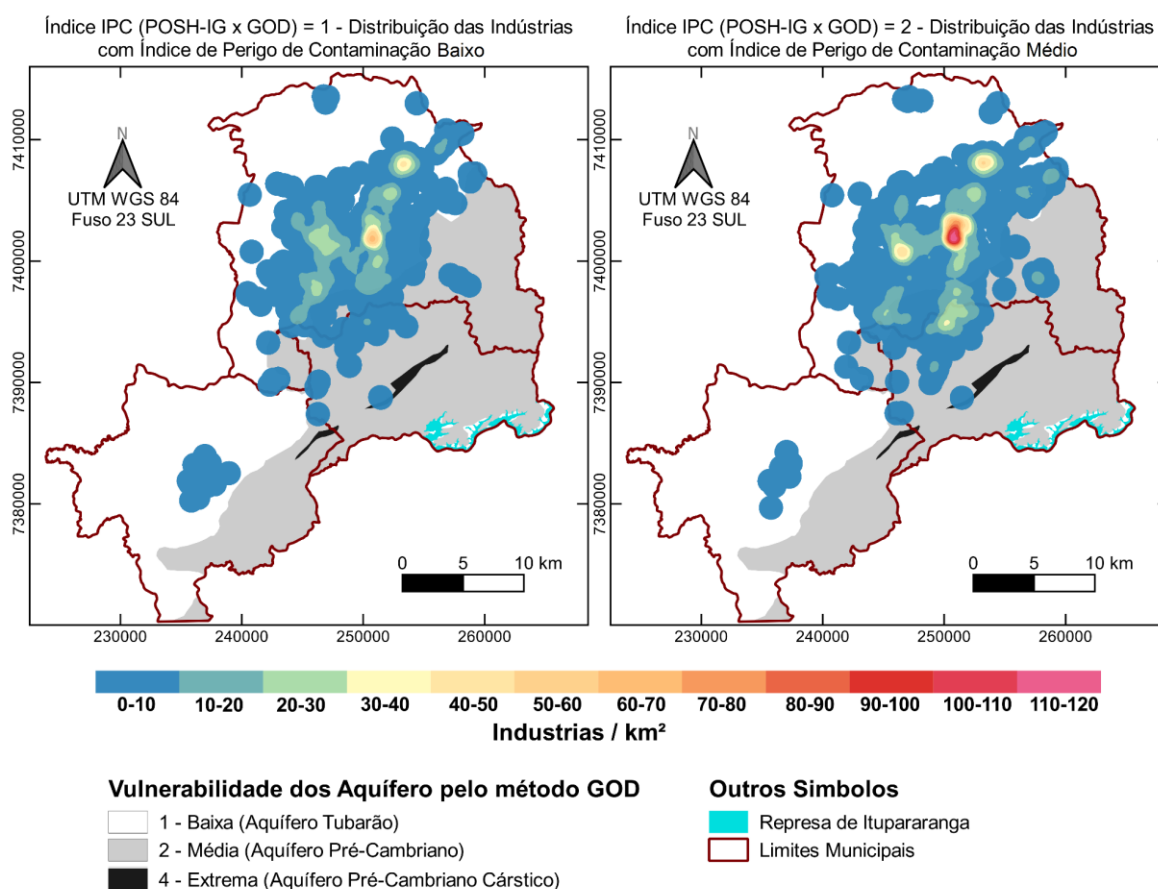


Figura 47 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice POSH-IG, sem considerar os Depósitos Quaternários.

Entretanto, podem haver poços não declarados nessa região e a vulnerabilidade desse aquífero é alta, assim, é mais adequado para a prevenção da contaminação considerar esse aquífero nas análises. Também há a possibilidade de ocorrência de contaminação ocorrer através do próprio poço dado um perfil construtivo que não isole adequadamente o aquífero mais superficial (no caso, os Depósitos Quaternários).

Também foi calculado o Índice IPC utilizando o Índice PPOF para contaminação geral e para contaminação por DNAPLs, com mapas de densidades de indústrias apresentados na Figura 48 e na Figura 49, respectivamente.

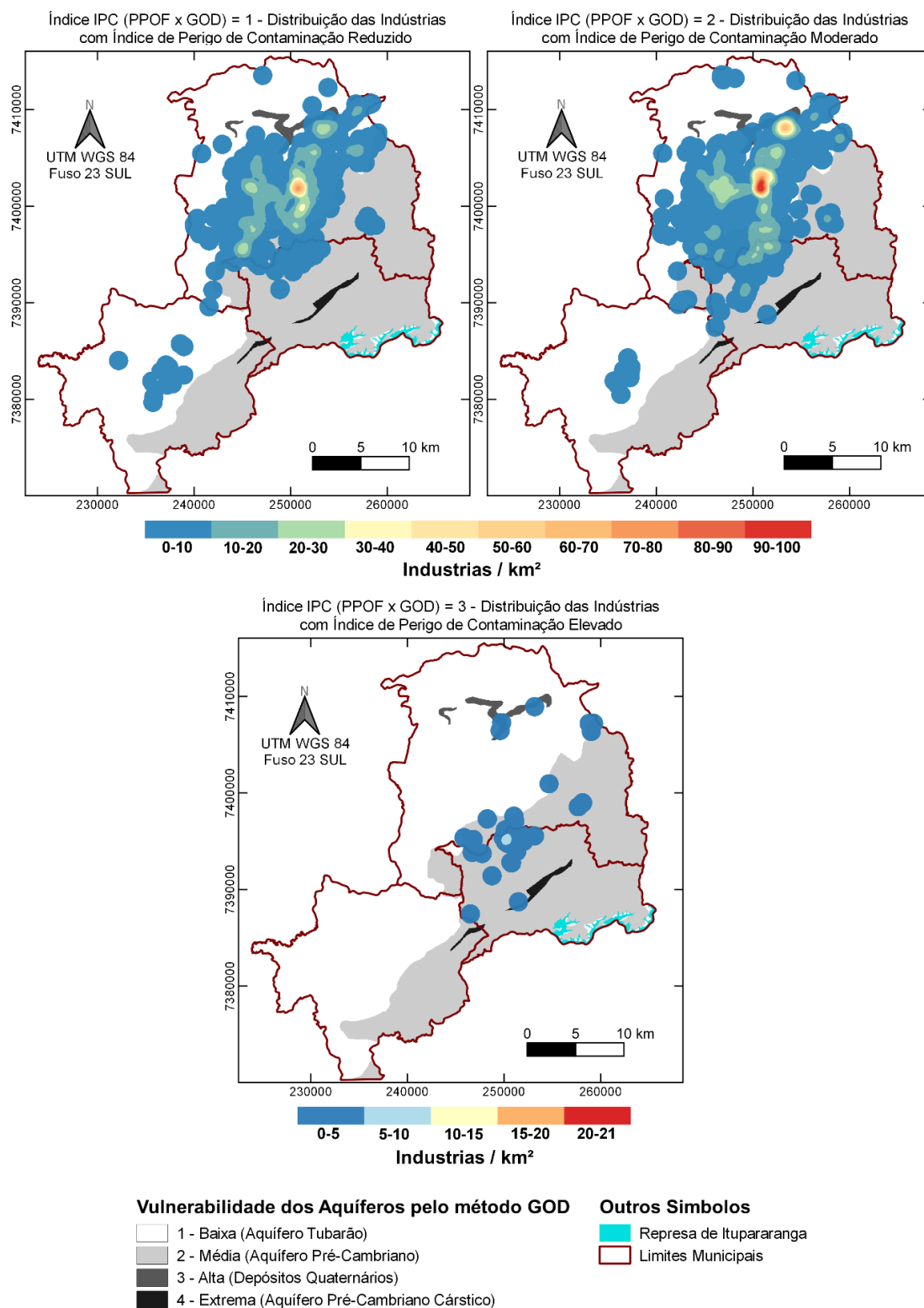


Figura 48 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice PPOF para contaminação geral.

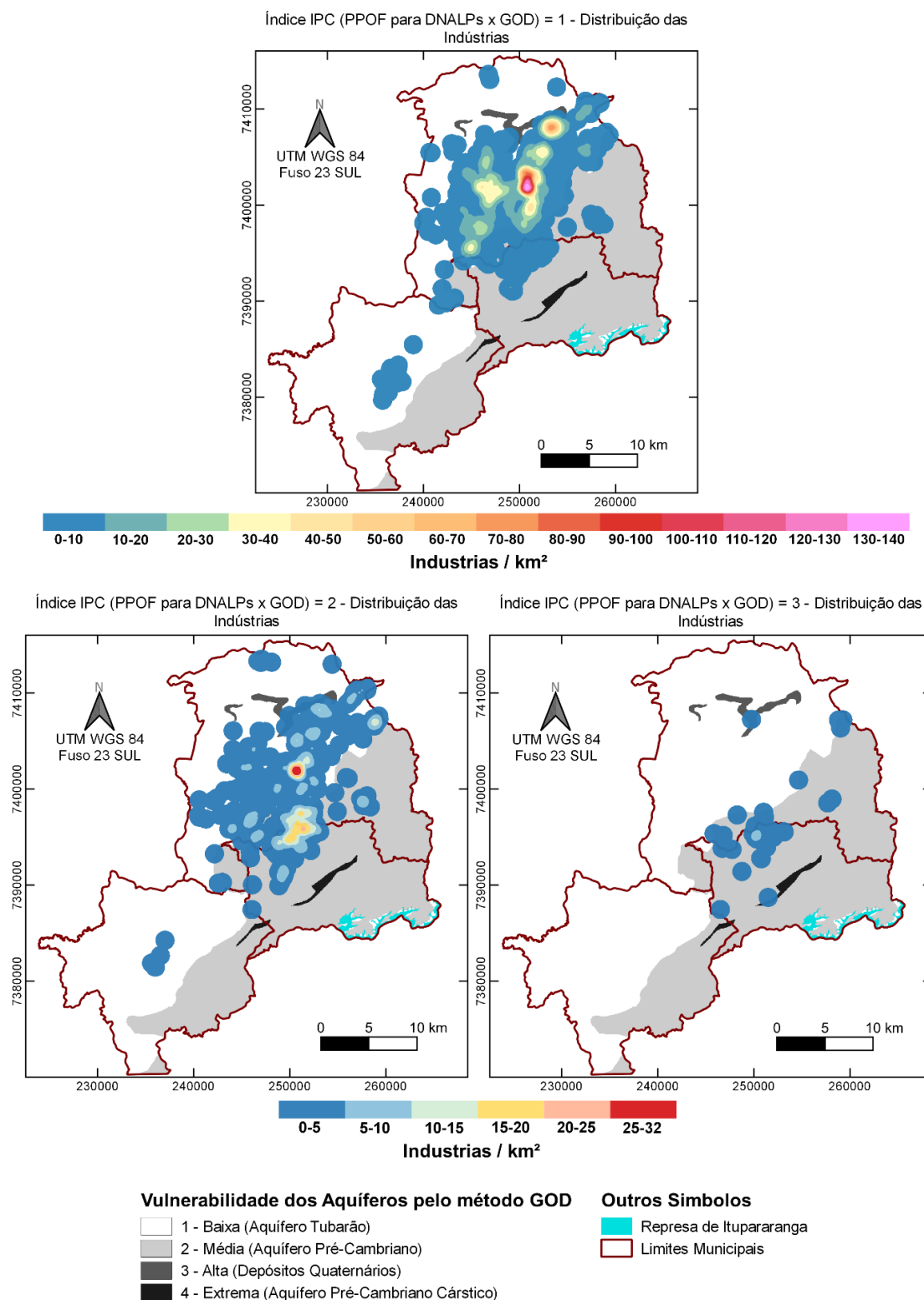


Figura 49 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice de Perigo de Contaminação utilizando o índice PPOF para contaminação por DNALPs.

Os mapas de IPC demonstram que a maior parte das fontes potenciais de poluição na área de estudo possuem baixo ou médio perigo de contaminação das águas subterrâneas.

De modo geral, a distribuição de densidades de fontes potenciais de contaminação considerando o POSH-IG e o PPOF-geral foram semelhantes. Este resultado sugere a aplicabilidade do método PPOF, o qual também foi capaz de destacar regiões com fontes de maior índice IPC, o que leva a uma melhor priorização entre as empresas.

Entretanto esse resultado também pode ser devido à distribuição das empresas na área de estudo, ou seja, nos locais de maior de densidade de empresas há atividades classificadas como de alto potencial para uma ou para outra classificação ambas em grande quantidade.

O mapa de densidade de fontes de índice IPC igual a 1 (Figura 49), com o IPC resultante do índice PPOF para DNAPLs, apresentou distribuição com maiores concentrações de fontes com distribuição semelhantes aos mapas de índices IPC igual a 2 e 1, com IPCs gerados a partir dos índices POSH e PPOF geral.

Já o mapa de IPC igual a 2, médio perigo de contaminação, para PPOF para DNAPLs, apresentou dois *hotspots* com concentrações de 15-20 e de 21-32 indústrias/Km². O mapa de IPC igual a 3, alto perigo de contaminação, apresentou indústrias esparsas.

Ou seja, a maior parte das fontes potenciais foram classificadas com baixo perigo de contaminação por DNAPLs, sendo possível destacar duas áreas de interesse, *hotspot*, para a fiscalização com médio perigo de contaminação para DNAPLs e as empresas esparsas que representam alto perigo de contaminação para DNAPLs.

5.7 Priorização de Inspeções – Índice EIP

A Tabela 31 apresenta os resultados em números absolutos de fontes potenciais classificadas por todos os índices empregados na pesquisa até a determinação dos valores do Índice EIP.

Tabela 31 – Resultados em número de indústrias, fontes potenciais de poluição, classificadas pelos Índices POSH-IG, PPOF para contaminação geral e para DNAPLs.

Cadastro de Fontes de Poluição da CETESB: C - Indústria da Transformação	Nº	POSH-IG					PPOF - Geral					PPOF - DNAPL				
		Não Class.	0	1	2	3	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
1. Todas as Fontes Cadastradas	2887	12	400	516	743	1216	386	458	824	1060	159	638	607	1304	179	159
1.1. VRA e Licenciamento Municipal	378	5	75	115	101	82	92	81	86	119	0	124	112	125	17	0
1.2. Licenciamento via CETESB	2509	7	325	401	642	1134	294	377	738	941	159	514	495	1179	162	159
1.2.1. Ativas	1716	6	227	282	433	768	219	255	520	615	107	363	355	781	110	107
1.2.2. Inativas	789	1	98	119	207	364	75	121	217	324	52	151	139	396	51	52
1.2.3. Encerrada contaminada	4	0	0	0	2	2	0	1	1	2	0	0	1	2	1	0
Cadastro de Fontes de Poluição da CETESB: C - Indústria da Transformação	Nº	IPC (POSH-IGxGOD)				IPC (PPOFxGOD)				IPC (PPOF DNAPLxGOD)						
		1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4			
1. Todas as Fontes Cadastradas	2887		1114	1357	4		1118	1344	39	0		1713	500	36	0	
1.1. VRA e Licenciamento Municipal	378		195	103	0		144	141	1	0		220	34	0	0	
1.2. Licenciamento via CETESB	2509		919	1254	4		974	1203	38	0		1493	466	36	0	
1.2.1. Ativas	1716		632	847	4		676	799	22	0		1013	320	20	0	
1.2.2. Inativas	789		285	405	0		296	402	16	0		478	144	16	0	
1.2.3. Encerrada contaminada	4		2	2	0		2	2	0	0		2	2	0	0	
Cadastro de Fontes de Poluição da CETESB: C - Indústria da Transformação	Nº	EIP (POSH-IGxGODxPTOT)				EIP (PPOFxGODxPTOT)				EIP (PPOF DNAPLxGODxPTOT)						
		1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4			
1. Todas as Fontes Cadastradas	2887		928	688	859		911	764	826	0		864	1034	351	0	
1.1. VRA e Licenciamento Municipal	378		123	115	60		116	98	72	0		111	129	14	0	
1.2. Licenciamento via CETESB	2509		805	573	799		795	666	754	0		753	905	337	0	
1.2.1. Ativas	1716		564	399	520		551	460	486	0		523	607	223	0	
1.2.2. Inativas	789		240	173	277		243	205	266	0		229	297	112	0	
1.2.3. Encerrada contaminada	4		1	1	2		1	1	2	0		1	1	2	0	

A partir dos dados que constam na Tabela 31 foram elaborados gráficos com o objetivo de comparar o total de empreendimentos industriais na área de estudo e a priorização final por meio dos valores dos índices EIP, conforme se observa na Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

A partir do total de 2887 fontes potenciais de contaminação, e empregando o Índice EIP foi possível reduzir esse número para 858 (29,7%) e 826 (28,6%) indústrias de maior prioridade para inspeções ambientais utilizando os Índices POSH-IG e PPOF-geral, respectivamente (Figura 50 e Figura 51).

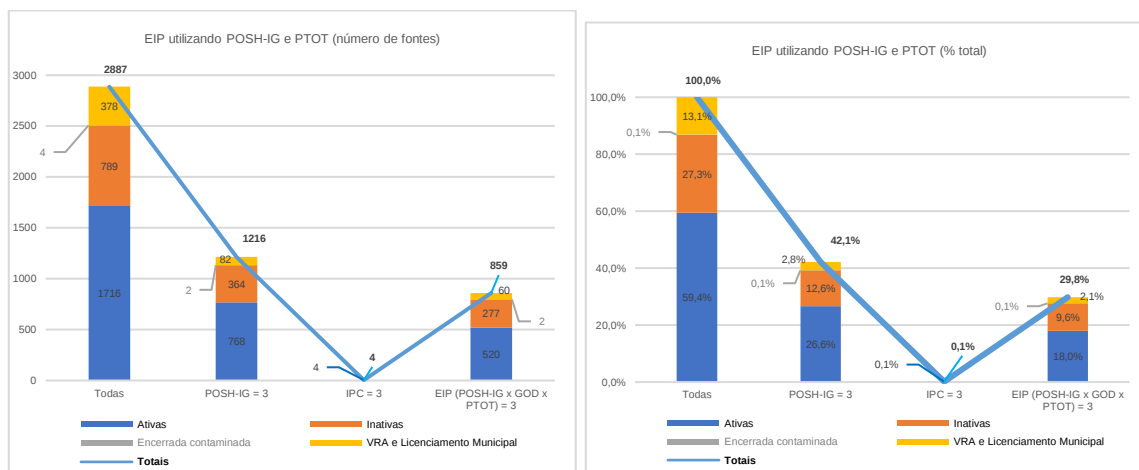


Figura 50 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o POSH-IG.

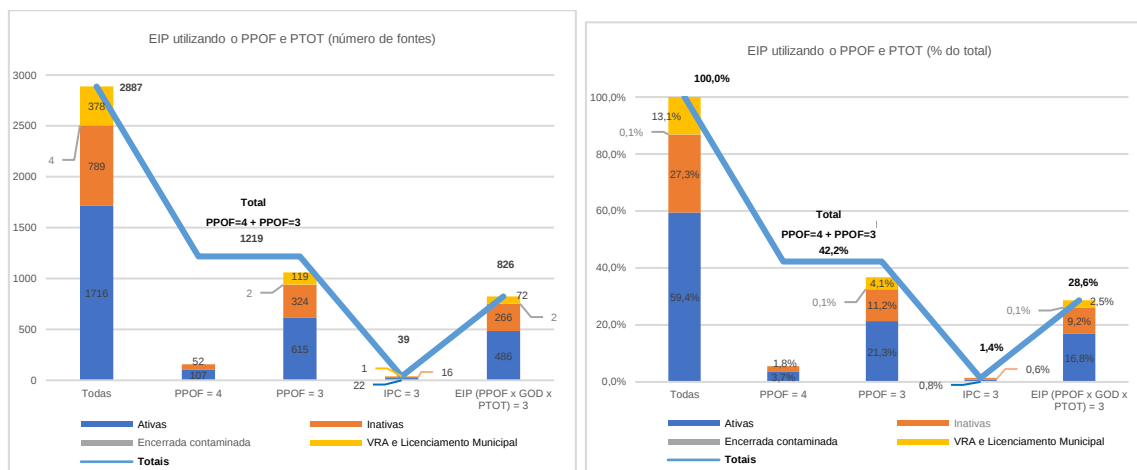


Figura 51 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o PPOF para contaminação geral.

Na Figura 52 observa-se um outro nível de priorização, com um total de 351 fontes potenciais de poluição, ou seja, 12,2% do total, considerando o potencial para geração de DNAPLs pelo critério PPOF desenvolvido.

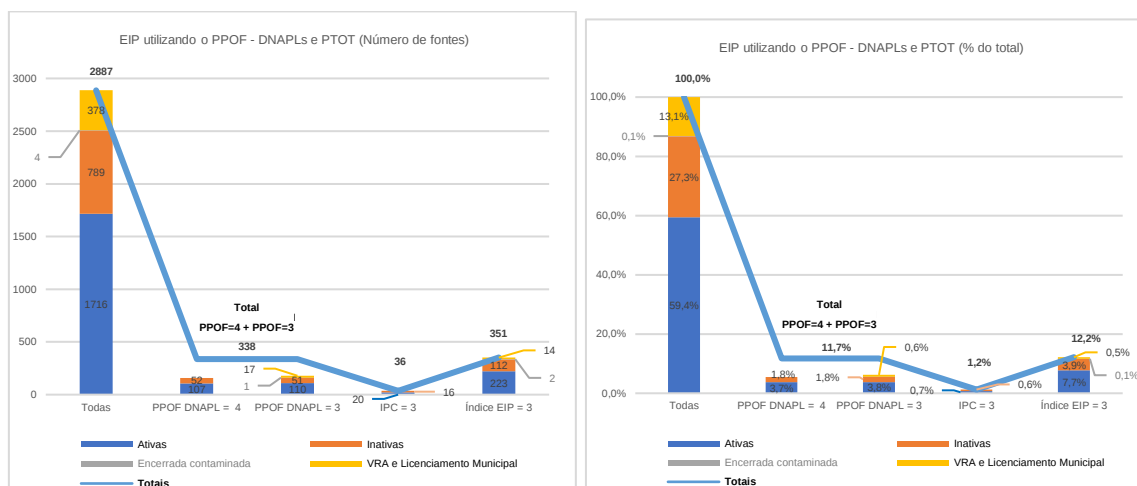


Figura 52 – Números absolutos e em porcentagem da priorização das fontes potenciais de contaminação pelo Índice EIP utilizando o PPOF para DNAPLs.

Na Figura 51 e na Figura 52 nota-se que apesar do índice IPC = 3 (Alto) representar 1,2% do total de fontes potenciais, o índice EIP=3 (elevado) subiu para 28,6% e 12,2%. Isto se deve a influência das áreas de proteção de poços com raio de 500 m, que acaba funcionando como um orientador adicional da priorização, definindo assim os extremos.

A Tabela 32 apresenta a comparação em números e em porcentagem das classificações dos índices EIPs calculados utilizando os índices PTOT e FQ para as atividades fontes de poluição com licenciamento via CETESB.

Tabela 32 - Resultados em número de indústrias, fontes potenciais de poluição com licenciamento via CETESB, com EIPs calculados com base nos Índices PTOT e FQ.

Fontes com Licenciamento via CETESB					
Número de fontes (% em relação ao total de 2509 fontes)					
Índice	1	2	3	4	
EIP (POSH-IG x GOD x FQ)	1046 (41,7%)	886 (35,3%)	245 (9,8%)	-	-
EIP (PPOF x GOD x FQ)	1041 (41,5%)	943 (37,6%)	227 (9,0%)	4 (0,2%)	
EIP (PPOF - DNAPL x GOD x FQ)	1182 (47,1%)	699 (27,9%)	110 (4,4%)	4 (0,2%)	
EIP (POSH-IG x GOD x PTOT)	805 (32,1%)	573 (22,8%)	799 (31,8%)	-	-
EIP (PPOF x GOD x PTOT)	795 (31,7%)	666 (26,5%)	754 (30,1%)	0 (0,0%)	
EIP (PPOF - DNAPL x GOD x PTOT)	753 (30,0%)	905 (36,1%)	337 (13,4%)	0 (0,0%)	

Nessa tabela observa-se que, utilizando o índice PTOT na composição dos índices EIPs, o número de fontes classificadas para cada classe segue de 30 a 32,1% (EIP=1) para 22,8 a 36,1% (EIP=2), para 31,8 a 13,4% (EIP=3), ou seja,

segrega em proporções semelhantes as fontes de poluição, dentro de uma variação de 10%, para cada índice EIP, exceto para o índice obtido com o PPOF-DNALP que cai de 36,1% (EIP=2) para 13,4% (EIP=3).

Já utilizando o índice FQ na composição dos índices EIP, essa proporção cai conforme os índices EIPs aumentam. Do EIP=1 para EIP=2 houve uma queda leve de 6,4 e 3,9 % utilizando o POSH-IG e PPOF-geral, respectivamente, e com o PPOF-DNALP houve uma queda de 19,2%. Do EIP = 2 para o EIP = 3 houve quedas de 25,5, 28,6 e 23,5% utilizando o POSH-IG, PPOF-geral e PPOF-DNALP respectivamente.

Quatro empresas foram classificadas com o EIP=4 compondo com o índice FQ, e nenhuma empresa teve essa classificação com o índice PTOT.

Assim, é possível afirmar que na área de estudo a aplicação da composição com o índice FQ gerou um Índices EIP que tenderam a afunilar mais a priorização com o aumento da prioridade para inspeções, o que é desejável como resultado visando encontrar-se um ponto de partida para a programação logística de inspeções.

Da Figura 53 à Figura 55 são apresentados os mapas de densidades de indústrias (fontes potenciais de poluição), objeto de licenciamento da CETESB (com empresas ativas, inativas e encerradas), para os índices EIP calculados compondo com o índice PTOT.

Da Figura 56 à Figura 58 são apresentados os mapas de densidades de indústrias (fontes potenciais de poluição), objeto de licenciamento da CETESB (com empresas ativas, inativas e encerradas), para os índices EIP calculados compondo com o índice FQ.

As distribuições de empresas para os índices EIP a partir dos métodos POSH-IG e PPOF para contaminação geral levaram a resultados semelhantes, exceto pela maior da priorização por meio do índice PPOF. Neste caso, esse índice reduziu a faixa máxima de concentração de fontes potenciais de poluição de 80-90 (POSH-IG) para 70-80 indústrias/km², na composição com o PTOT, e de 90-10 a 80-90 indústrias/km², na composição com o FQ.

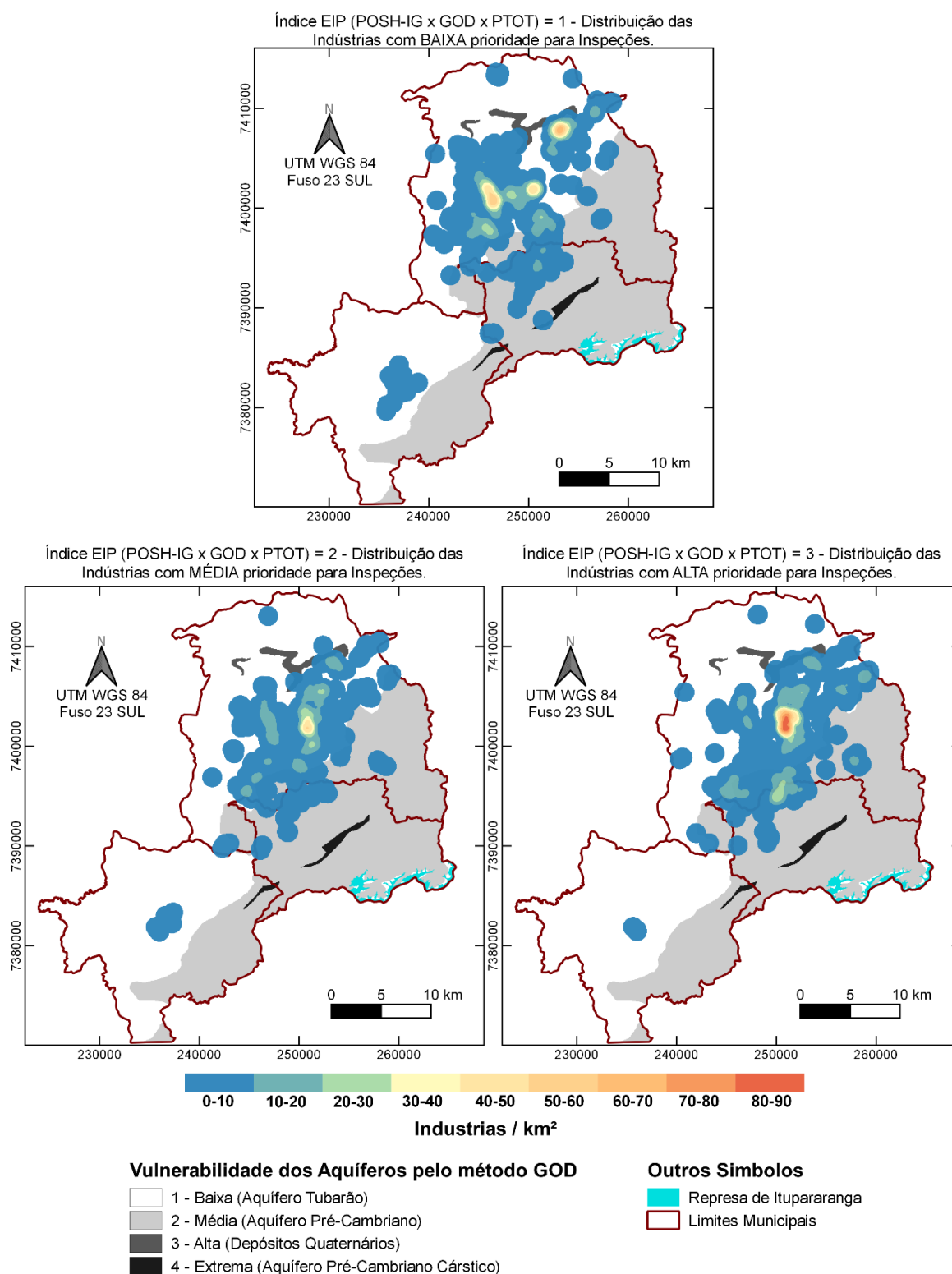


Figura 53 – Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices POSH-IG, GOD e PTOT.

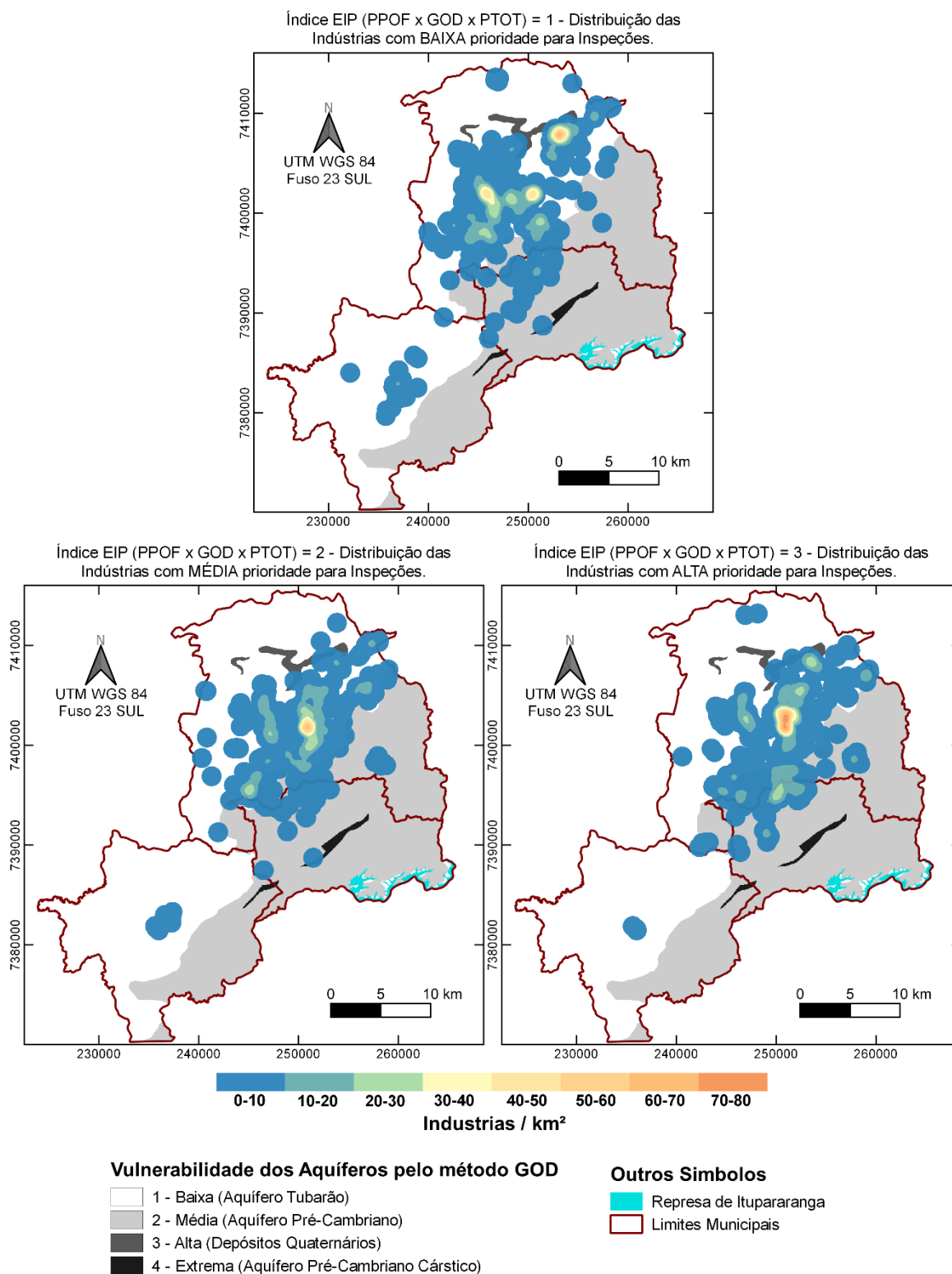


Figura 54 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-geral, GOD e PTOT.

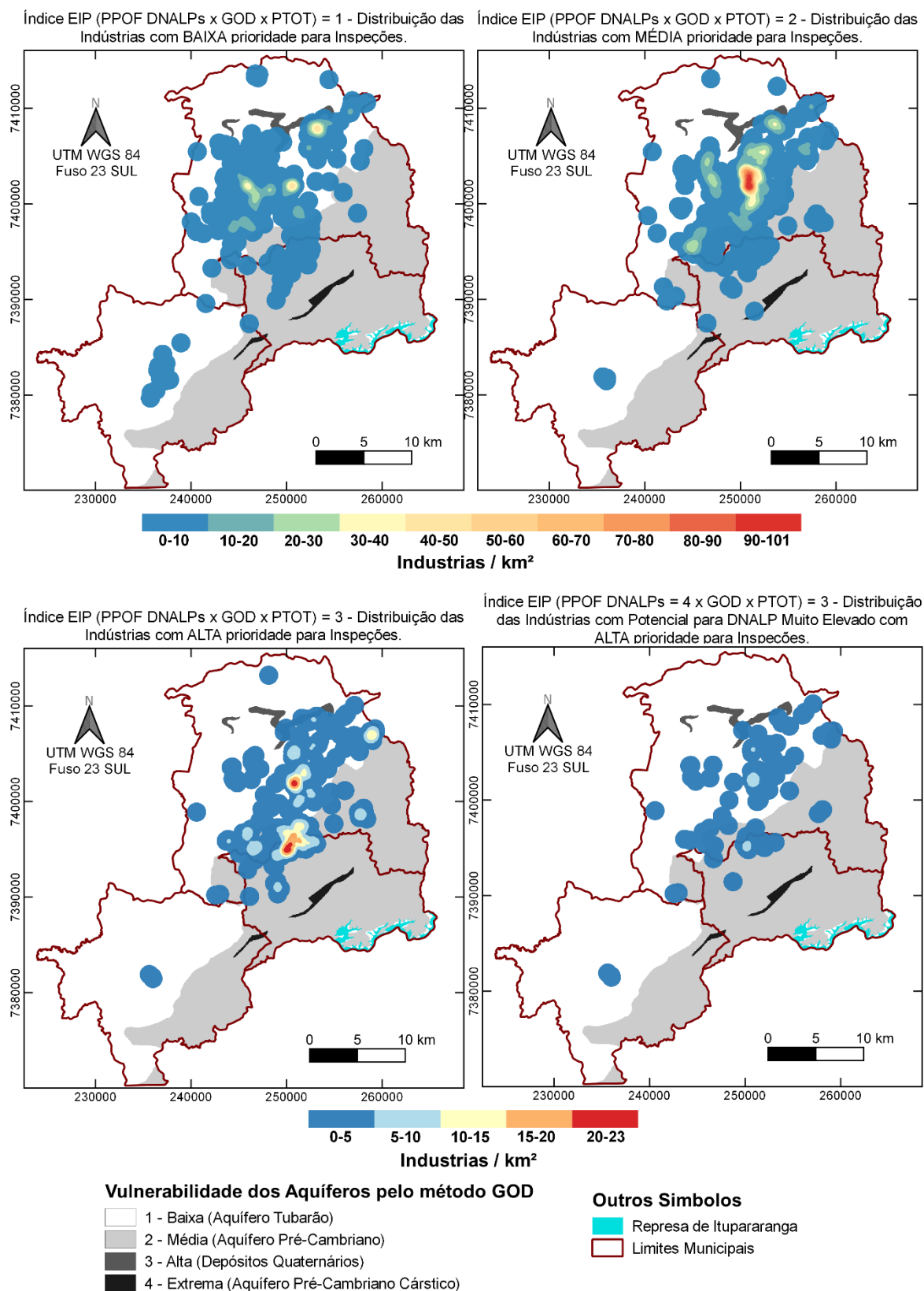


Figura 55 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF- DNAPL, GOD e PTOT.

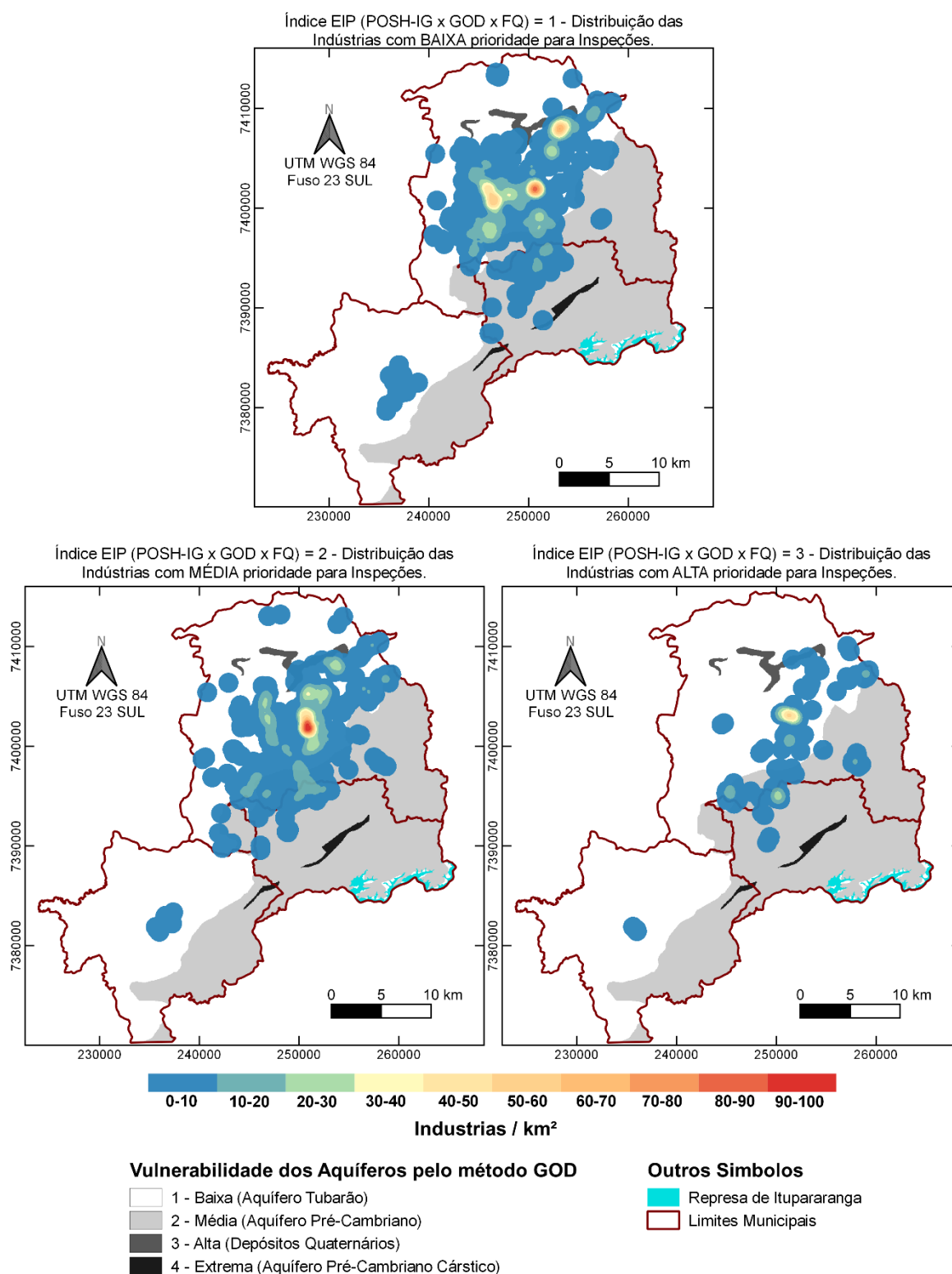


Figura 56 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices POSH-IG, GOD e FQ.

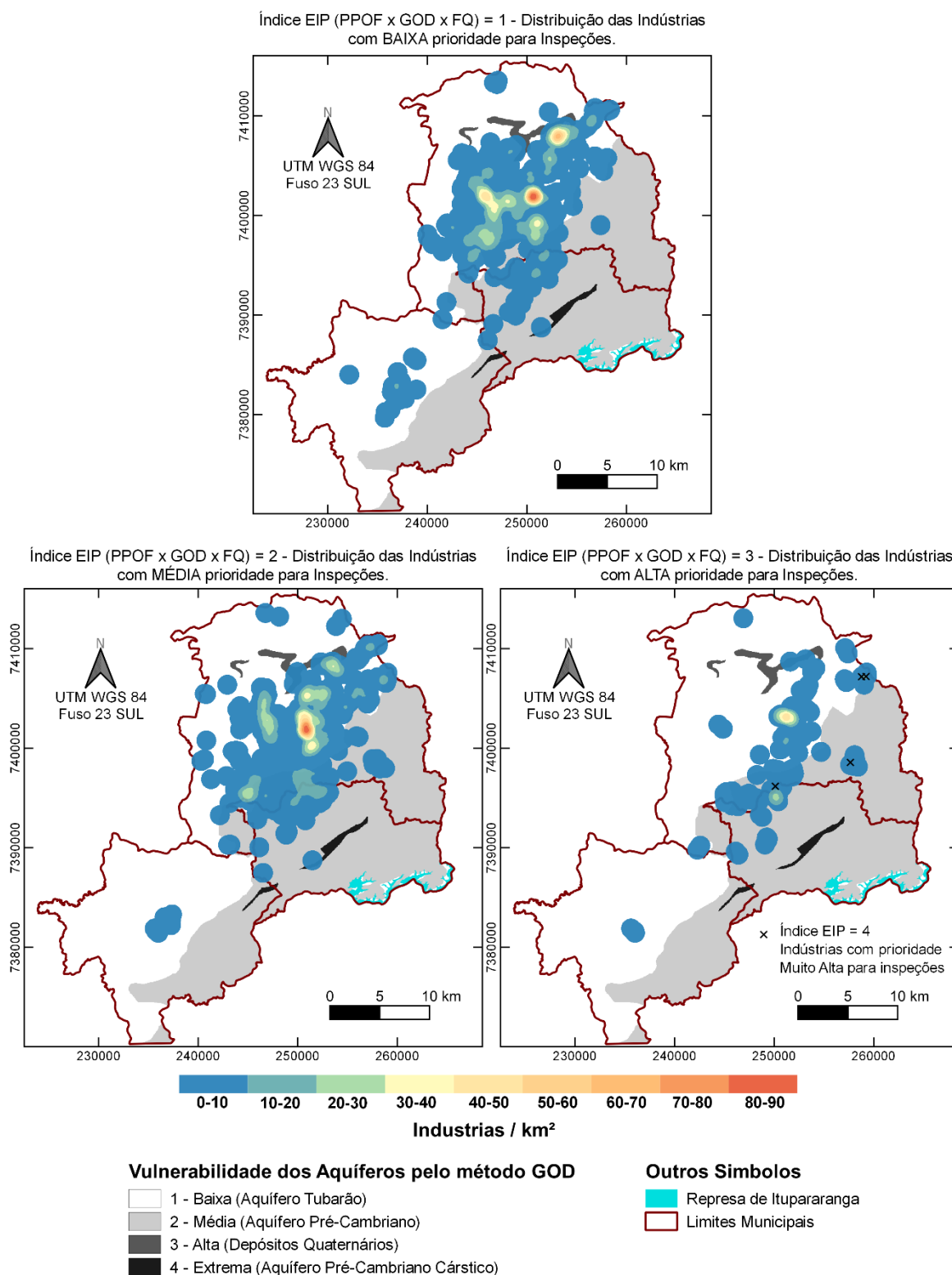


Figura 57 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-geral, GOD e PTOT.

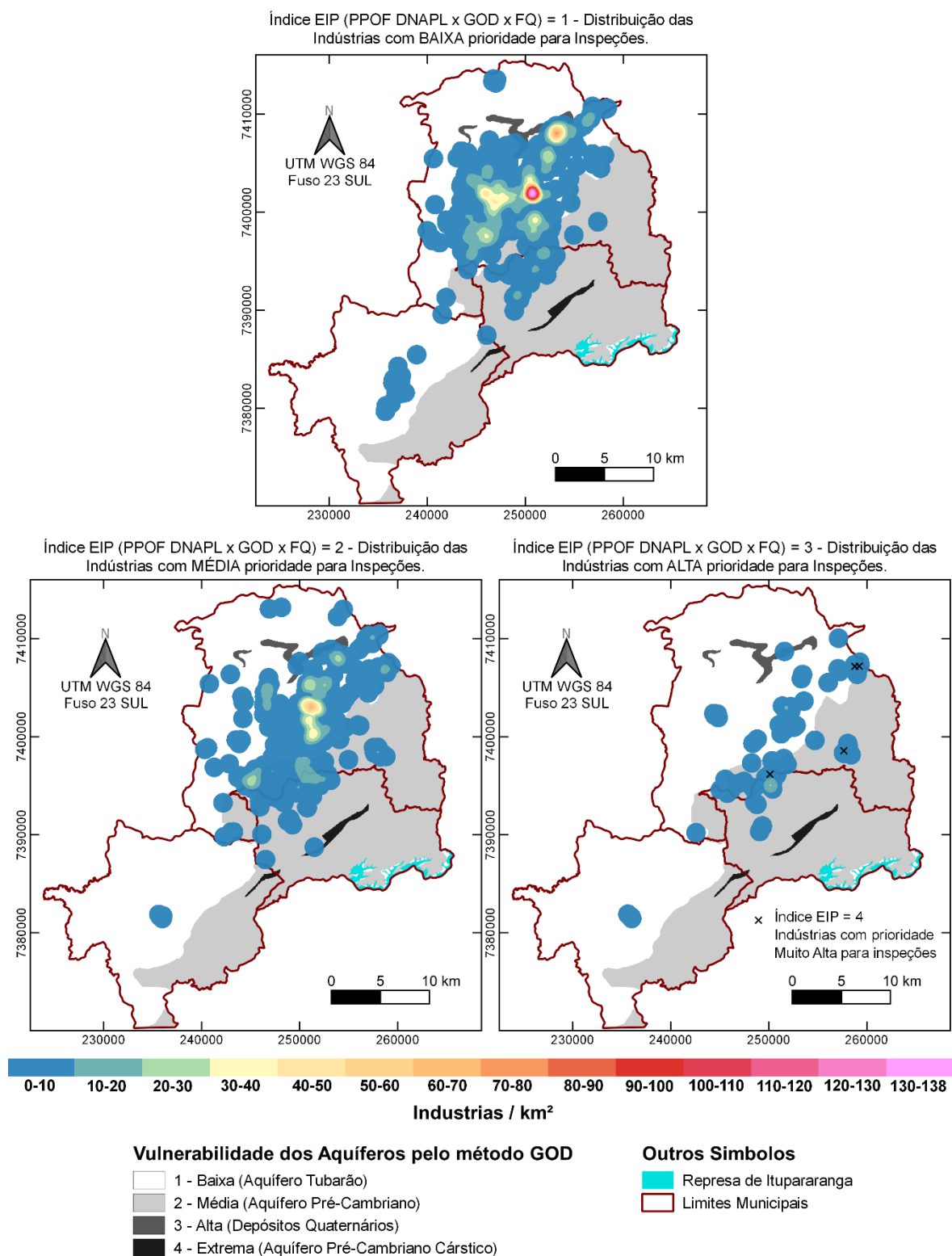


Figura 58 - Mapas de densidade de Indústrias por Índice EIP – Priorização de Inspeções Ambientais visando a Prevenção da Contaminação das Águas Subterrâneas composto com os índices PPOF-DNAPL, GOD e FQ.

A Figura 59 apresenta a comparação da distribuição das empresas com EIPs = 3, alta prioridade para inspeções, calculados com as diferentes composições de critérios (índices), propostas.

Na comparação entre os índices obtidos compondo com o índice PTOT e índice FQ, fica claro que o índice PTOT acabou selecionando mais áreas de proteção de poços como de maior prioridade, aumentando a área de dispersão das empresas de índice EIP=3. Já o índice FQ foca nos poços de maior vazão, estreitando essa área de dispersão e selecionando menos fontes de poluição como de alta prioridade, o que resulta numa priorização mais efetiva do ponto de vista numérico.

Com relação aos *hot spots* observa-se que praticamente todos tem uma correspondência espacial comparando o obtido com o PTOT e com o FQ, isso mostra a influência dos índices IPC no mapa final de áreas prioritárias para a fiscalização.

Com a análise desses *hot spots* pode-se delimitar áreas de interesse prioritárias para a fiscalização, as quais estão indicadas na Figura 59 com o número de fontes de poluição existentes e área de abrangência. Lembrando que esse número foi contado do vetor de pontos das fontes de poluição, ou seja, não resulta da interpolação de Kernel a qual foi utilizada para evidenciar os *hotspots*.

Assim, a partir dos resultados encontrados tem-se uma área prioritária na porção central de Sorocaba, e uma área prioritária na divisa Sul de Sorocaba com Votorantim.

Na priorização realizada com base nos critérios propostos conseguiu-se sair de 2509 indústrias objeto de licenciamento da CETESB e focar inicialmente nessas duas áreas que variam sua delimitação e número de fontes conforme a variação dos critérios aplicados, variando de 212 fontes em área de 5,25 km² (Figura 59 – A) para 74 fontes em área de 2,35 km² (Figura 59 – D) para área prioritária central de Sorocaba.

A área prioritária na divisa Sul de Sorocaba com Votorantim está relacionada com o índice PPOF para DNAPL, com 39 fontes em área de 2,5 km² e 21 fontes em 1,62 km², utilizando respectivamente os índices PTOT e FQ na composição. Utilizando o índice PTOT na composição, há para o PPOF-DNALP uma área de 1,13 km² com 23 fontes na região central de Sorocaba.

Ainda ficaram evidências 4 empresas com EIP = 4, muito alta prioridade para inspeções, na composição com os índices PPOF, PPOF-DNALP e FQ.

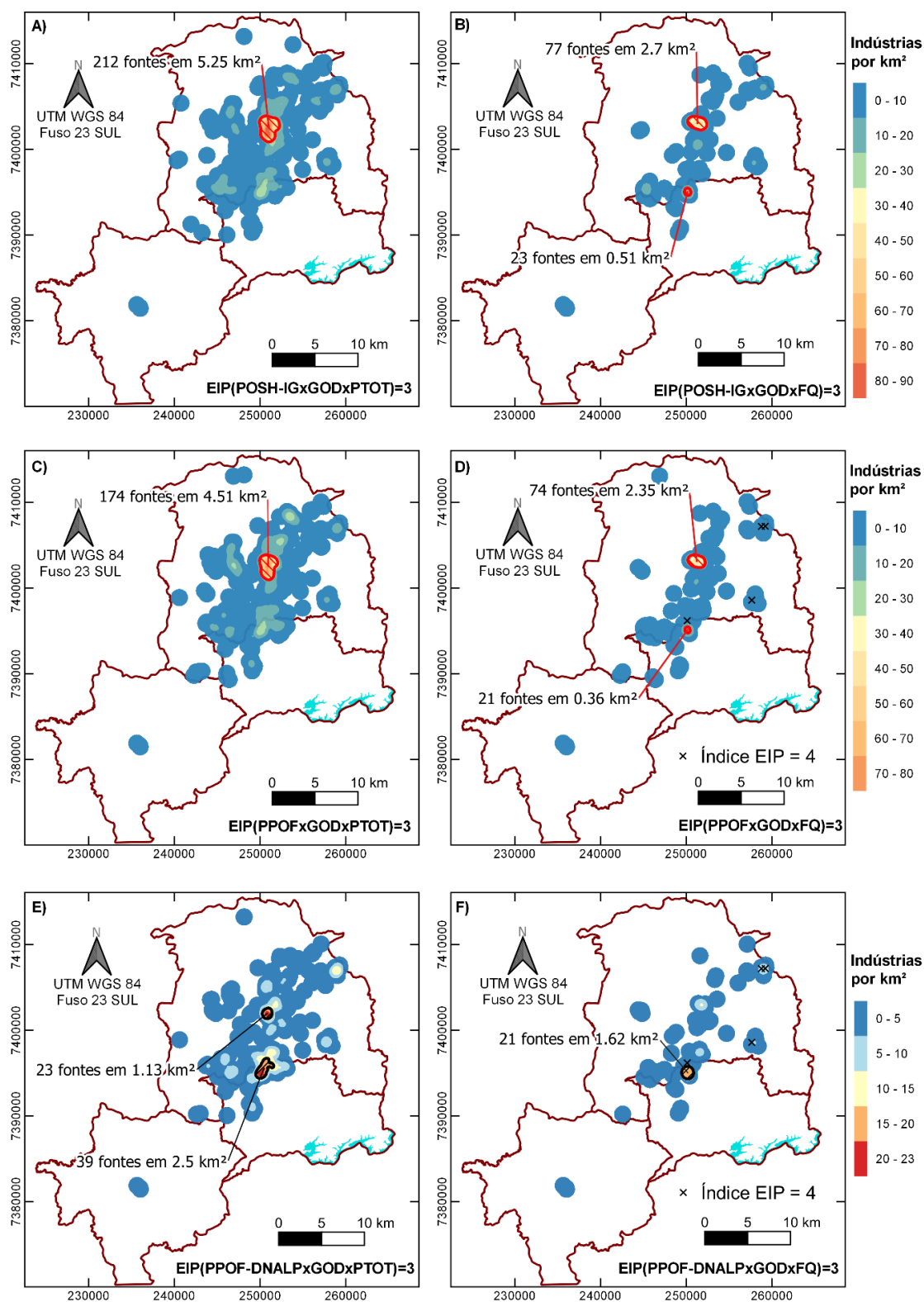


Figura 59 – Análise dos hot spots encontrados para os índices EIP=3 em todas as composições realizadas (os números de fontes foram contados do vetor de pontos e áreas indicadas foram medidas).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Os critérios propostos para identificação e seleção das áreas com maior prioridade para a fiscalização visando a prevenção da poluição das águas subterrânea pode ser empregada para orientar a fiscalização de indústrias. Os mapas apresentados também permitem identificar as áreas onde se deve priorizar campanhas de inspeção de campo. Tal abordagem otimiza o foco das ações, e permite racionalizar os recursos necessários, de modo mais objetivo e com melhor produtividade.

Com a aplicação dos critérios propostos na área de estudo foi possível priorizar as fontes industriais com potencial de poluição das águas subterrâneas reduzindo o universo de 2887 empresas para 114 fontes (EIP = 3 e 4) com potencial para geração de contaminação por DNAPLs, com base no índice EIP composto dos índices PPOF-DNALP, GOD e FQ, ou seja, uma redução de 96%. Considerando a possibilidade de contaminação de modo geral, a redução foi de 91,5% (de 2887 para 245) utilizando o POSH-IG e de 91,8% (de 2887 para 231, EIP = 3 e 4) utilizando o PPOF-geral, ambos combinados com o GOD e FQ para o cálculo do EIP.

Não só do ponto de vista do número de empresas a serem fiscalizadas, mas também foi possível indicar espacialmente as áreas com maiores concentrações de empresas com alta prioridade para a realização de inspeções ambientais visando a prevenção da poluição das águas subterrâneas.

Na área de estudo, que possui 913,6 km² e 2887 indústrias cadastradas, foi possível indicar uma área prioritária de fiscalização 1,62 km² e 21 empresas considerando uma eventual contaminação por DNAPLs. Identificou-se também duas áreas prioritárias de fiscalização que somam 2,71 km² e 95 indústrias considerando uma eventual contaminação das águas subterrâneas por contaminante genérico. Também foram identificadas 4 empresas com prioridade

muito alta para a realização de inspeções. Tais resultados foram obtidos com o EIP composto pelos índices PPOF-DNALP ou PPOF-geral, GOD e FQ.

Métodos de classificação de prioridade e o mapeamento de áreas de interesse são ferramentas importantes para orientar a tomada de decisão, e pelos resultados obtidos, a abordagem proposta tem potencial para esse tipo de aplicação.

Com a aplicação do método proposto, o Sistema de Informação Geográfica criado possui as áreas de interesse para a fiscalização, bem como os dados das empresas, sua localização, razão social, índices de potencial poluidor e de priorização para inspeção, permitindo assim o planejamento logístico de inspeções ambientais.

Importante destacar que os dados avaliados são tanto de indústrias ativas como inativas. Deste modo, é possível diferenciar as áreas com atividades potencialmente poluidoras ativas daquelas abandonadas devido a atividades industriais que ocorreram no passado, ou seja, os *brownfields*.

A definição de áreas prioritárias pelo órgão ambiental contribui para que se atinjam os objetivos de proteção ao meio ambiente com economia de recursos do poder público, e a metodologia apresentada pode auxiliar objetivamente na priorização das áreas a serem consideradas nas atividades de fiscalização ambiental em municípios ou regiões com grande número de empreendimentos industriais, potencialmente causadores de contaminação das águas subterrâneas.

Neste sentido, conclui-se que a metodologia proposta apresentou um ganho importante para a racionalização de atividades de fiscalização ambiental com foco na prevenção da poluição das águas subterrâneas.

6.2 Limitações

A principal limitação para propostas que visam utilizar dados existentes é a qualidade desses dados. Na proposta de critérios apresentada, a falta de dados mais detalhados da hidrogeologia levou a simplificações a partir do uso de dados regionais. Essas simplificações impuseram limitações na definição dos tempos de trânsito, principalmente nas regiões de aquíferos fraturados.

Considerando as deficiências do índice PTOT proposto para aquíferos fraturados, onde podem ser selecionadas áreas de proteção de poços como prioritárias, porém sem considerar eventual contribuição mista de mais de um aquífero ou ainda subestimando o tempo de trânsito, é mais adequada a utilização somente do índice IPC do ponto vista técnico.

A aplicação do índice FQ auxiliou em considerar os raios de proteção de poços de 500 m na priorização, porém só considera os valores de vazão outorgada classificando como mais prioritários os poços de com maior disponibilidade hídrica, numa visão qualitativa da preservação da água subterrânea.

O uso de dados regionais também apresenta limitações de escala, pois a escala das fontes de poluição mapeadas é de maior detalhe, enquanto os levantamentos regionais, mapas geológicos e hidrogeológicos utilizados, são de escalas da ordem 1:750.000 de 1:1.000.000. Assim as delimitações estabelecidas nesses mapas podem ser menos definidas e mais heterogêneas no detalhe.

Nesse sentido, os produtos gerados de áreas prioritárias para a fiscalização ambiental são orientativos, não podendo ser utilizados para restringir essa fiscalização.

Destaca-se que na proposta apresentada as atividades que possuem potencial de poluição das águas subterrâneas muito reduzido são os menos priorizados recebendo índice = 0 em todas as composições de índices propostos.

Nesse caso, para o índice PPOF proposto, a classificação muito reduzida não pode ser aplicada como fator de exclusão, pois foram avaliados os números de ocorrências de contaminações dentro das divisões gerais do CNAE 2.0, podendo haver atividades específicas dentro dessas divisões com alto potencial poluidor.

Na classificação realizada pelo índice POSH-IG, o potencial poluidor muito reduzido também não pode ser considerado como fator de exclusão, apesar das atividades enquadradas nessa classe não manipularem diretamente substâncias perigosas, pode haver áreas de apoio na atividade, como oficinas, tanques de combustíveis, setor de manutenção que podem representar risco de contaminação do solo e água subterrânea.

Nesse sentido, a fiscalização das atividades com potencial muito reduzido deve ser mantida na rotina de inspeção no âmbito do licenciamento ambiental, obtenção e renovação de licenças e atendimento de denúncias.

6.3 Recomendações

Recomenda-se que os critérios de mapeamento de áreas prioritárias propostos sejam utilizados de modo orientativo e não excludente, visando incrementar a periodicidade da fiscalização, dentro do possível, inicialmente nessas áreas prioritárias, passando para outras áreas menos prioritárias posteriormente após uma campanha programada de inspeções.

Tal ação não deve impactar nas fiscalizações de rotina no âmbito do licenciamento ambiental e atendimento às denúncias / reclamações.

Propõe-se para a continuidade da pesquisa o teste dos critérios apresentados em diferentes áreas, visando avaliar sua aplicabilidade em diferentes cenários de fontes industriais distintas e contexto hidrogeológico, e em área com maior nível de detalhe para as informações do meio físico.

Para a continuidade da pesquisa na área de estudo avaliada propõe-se o planejamento e realização de campanha de inspeções com base nos resultados obtidos, e avaliar um conjunto de empresas indicadas como prioritárias a fim de identificar o potencial poluidor de seus processos industriais e as eventuais áreas suspeitas de contaminação.

Assim, num primeiro momento, a partir dos resultados da campanha de campo realizada pode-se refinar os índices de potencial de poluição calculados pela comparação com os dados encontrados em campo. Para isso seria necessário estabelecer uma metodologia de avaliação de potenciais poluidores das águas subterrâneas em campo, podendo-se adotar como base os conceitos utilizados em Avaliações Preliminares no âmbito do GAC, associada a uma escala de gradação de potencial poluidor a ser pesquisada e elaborada.

E, em caso da ocorrência de áreas suspeitas de contaminação, com possibilidade da exigência de estudos de investigação geoambiental, pode-se comparar os critérios adotados nessa tese com os dados detalhados no estudo a ser apresentado por exigência da fiscalização.

Uma grande dificuldade encontrada foi a etapa de tratamento de dados. O grande volume de dados com diferentes padrões de formatação e de códigos para

um mesmo campo tornou a etapa de tratamento e uniformização de dados a mais demorada e trabalhosa. Somente com o auxílio do *plugin Fuzzy Lookup* do Excel foi possível trabalhar com mais rapidez, porém, ainda é bastante limitado quando se trabalha com grandes volumes de dados, pois exige etapas não automatizadas. Deste modo, recomenda-se que na etapa de tratamento de dados sejam utilizadas ferramentas mais robustas de mineração de dados e *big data*, como aplicações em *Python*, com apoio de profissional da área de Ciência de Dados.

Deste modo, recomenda-se melhorar as bases de informações disponíveis, buscando o desenvolvimento de métodos de aquisição de dados dentro do solicitado no licenciamento ambiental.

Com dados mais precisos e em formato mais acessível, em uma base georreferenciada, ou dentro de um SIG, com sistema de validação, seria possível ter-se dados melhores e mais confiáveis.

E um âmbito mais geral a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas no cadastro de atividades fontes de poluição dos órgãos ambientais pode auxiliar também na fiscalização e prevenção da poluição das águas superficiais. Assim, a utilização de bancos de dados em SIG tem grande potencial na melhoria dos serviços públicos na área ambiental.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTO, M. C. Heterogeneidades geológicas e o gerenciamento de áreas contaminadas em local situado na interface da Serra do Mar com a planície aluvionar do Rio Cubatão (Cubatão/SP). 2010. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – IGCE, UNESP, Rio Claro, 2010.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. Drastic: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential hydrogeologic setting. Environmental Protection Agency (EPA), Washington (DC), Report 600/2- 87-035, 1987.
- ALVAREZ, P. J. J.; ILLMAN, W. A. (2006) Bioremediation and natural attenuation. New Jersey: John Wiley & Sons. 2006.
- API – American Petroleum Institute. Soil and Groundwater Research. Disponível em: <<https://www.api.org/oil-and-natural-gas/environment/clean-water/ground-water>>. Acesso em: 30/06/2021.
- APICCIRELLA, Emanuel S. P. Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do canal Jurubatuba em São Paulo – SP. 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 2009.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, n. 4, p. 85-103, 2004. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/hidrogeologia/article/view/2652/2193>>. Acesso em: 08 set. 2016.
- BRADBURY, K. R.; MULDOON, M. A. Effects of fracture density and anisotropy on delineation of wellhead-protection areas in fractured-rock aquifers. Applied Hydrogeology, p. 17-23, 1994.
- BRAGA, A. C. O.; FRANCISCO, R. F. Natural vulnerability assessment to contamination of unconfined aquifers by Longitudinal Conductance – (S) method. Journal of Geography and Geology, p. 68-79, 2014.
- BRASIL. Resolução CONAMA 273/2000, 29 de novembro de 2000. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de postos de combustíveis e serviços e dispõe sobre a prevenção e controle da poluição. Diário Oficial da União. República Federativa do Brasil. 2001 jan. 5; p. 20-23.

- BRASIL. Resolução CONAMA 420/09, 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União. República Federativa do Brasil. 2009 dez. 30; p. 81-84.
- CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. Sistemas de Informação Geográfica para Aplicações Ambientais e Cadastrais: Uma Visão Geral. INPE. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf> acesso 02/07/2018 >. Acesso em: 02/07/2018
- CARRA, T. A. Comunicação Verbal In: CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. e-Cênários: Geoportal para Análises Ambientais. Curso on-line interno não publicado. 2020.
- CASAS, A.; DIAZ, Y.; FONT, X.; HIMI, M.; PINTO, V.; TAPIAS, J. C. Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. Environmental Geology, v. 54, n. 3, p. 515–520, 2008.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, 1999. Disponível em:<<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7-manual>>. Atualizado em out/2001. Acesso em: 30/10/2016.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria 23/2000/C/E. São Paulo. 2000.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, 2001.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria 010/2006/C de 26 de janeiro de 2006. São Paulo. 2006.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Procedimento para Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC). Anexo IV da Decisão de Diretoria 010/2006/C. São Paulo, 2006a

- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria 103/2007/C/E. São Paulo. 2007.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria 263/2009/P. São Paulo. 2009.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Lista de Compostos Orgânicos Voláteis. 2013. Disponível em: <http://cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/47/2013/11/tetraclororoetilen.pdf>, acessado em 25/03/2017.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria 256/2016/E. São Paulo. 2016.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria 038/2017/C. São Paulo. 2017.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Planilha eletrônica do Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo - Dezembro de 2018. Não Publicado, 2018.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2019). Instrução Técnica nº 039. São Paulo. 2019.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2019a). Dados do cadastro de atividades licenciadas ou fiscalizadas pela CETESB disponíveis no SIPOL – Sistema de Fontes de Poluição colhidos em janeiro de 2019 para os municípios de Sorocaba, Salto de Pirapora e Votorantim. Não Publicado. 2019.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2020). Texto explicativo. Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo – Dezembro de 2020. São Paulo, 2020.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2020a). Busca no site por FEPRAC. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 20/09/2020.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2021). Qualidade do Solo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/>>. Acesso em: 20/09/2021.

- CIVITA, M.; DE MAIO, M. SINTACS: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automazione. Bologna: Pitagora, 1997. 191 p.
- CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Perfil da Indústria nos Estados: São Paulo. Ranking dos Estados em 2019. Disponível em <<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/ranking?cat=3&id=3210>>. Acesso em 28/06/2020.
- CONICELLI, Bruno Pirilo. Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. 2014. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências - Hidrogeologia e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 2014.
- COUTO, M. L. T. Atualização dos fatores de exposição e sua influência nos valores de intervenção para solo do Estado de São Paulo. 2006. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 2006.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2006). Mapa Geológico do Estado de São Paulo Escala 1:750.000. Dados Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil. Downloads. Arquivos Vetoriais. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 30/06/2018.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2006a). Breve descrição das Unidades Litoestratigráficas Aflorantes no Estado de São Paulo. 2006.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2020). SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 06/06/2020.
- CUNHA, R. C. A. (2017). Aplicação da Decisão de Diretoria 038/2017 no Setor da Construção Civil. Comunicação verbal. Workshop Técnico SINDUSCON – SP, Sorocaba: 31 de agosto de 2017.
- CUNHA, Rodrigo César de Araújo. Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas – Estudo de caso. Dissertação (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997. 128 f.
- DAAE/LEBAC (2013). Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo: Diretrizes de Utilização e Proteção. Departamento de Águas e Energia Elétrica. UNESP –

Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Laboratório de Estudo de Bacias.
São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. Pesquisa de dados dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo: Cadastro de Poços. Disponível em: <<http://www.aplicacoes.daee.sp.gov.br/usuarios/fchweb.html>>. Acesso em: 26/09/2020.

DAEE/IG/IPT/CPRM (2005). Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica: IG – Instituto Geológico: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005.

DAEE/IG/IPT/CPRM (2005a). Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000: Nota Explicativa. São Paulo: DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica: IG – Instituto Geológico: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005.

DAVES Jr., C. A.; FONSECA, F. T. (2007) Assessing the certainty of locations produced by an address geocoding system. *Geoinformatica*, v. 11, p. 103-129.

DATAGEO – Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo. Sítio da Internet. Disponível em: < <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/> >, Acesso em: 14/08/2020.

DENNY, S. C.; ALLEN, D. M.; JOURNEAY, J. M. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 15, p. 483-493, 2007.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: GUNAY, G.; JONSHON, A. I. (Ed.). *On Karst Water and Environmental Impacts*. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 1997. p. 117- 223.

ENSP (2006) Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Informe. Cidade dos Meninos: voz aos movimentos sociais. Disponível em:< <http://www.ensp.fiocruz.br/portal-ensp/informe/site/materia/detalhe/2406>>. Acesso em 08/06/18.

- FETTER, C. W. (2001). Applied hydrogeology. 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. c2001.
- FETTER, C. W. (2008). Contaminant hydrogeology. 2nd ed. Long Grove: Waveland Press. c2008.
- FIOCRUZ (2018) - Agência Fiocruz de notícias. Fiocruz participa de reunião sobre descontaminação da Cidade dos Meninos (RJ). Disponível em: <<https://agencia.fiocruz.br/fiocruz-participa-de-reuniao-sobre-descontaminacao-da-cidade-dos-meninos-rj>>. Acesso em 08/06/18.
- FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUIJVENBODEN, W; VAN WAEGENINGH, H. G. (Eds.). Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Noordwijk: TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, v. 38, 1987. p. 69-86.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. 1998. Groundwater pollution risk assessment. WHO/PAHO – CEPIS Technical paper. Lima, 81 pp.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea. São Paulo: Servmar, 2006.
- FRANCISCO, Richard Fonseca. Contribuição Metodológica à Estimativa da Vulnerabilidade Natural e Perigo de Contaminação de Aquíferos Livres Granulares. 2018. Tese de Doutorado (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, UNESP, Rio Claro, 2018.
- GLOEDEN, E. Gerenciamento de Áreas Contaminadas na Bacia Hidrográfica do Reservatório Guarapiranga. 1999. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1999.
- GOOGLE (2018). Geocoding API usage and Billing. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/usage-and-billing>>. Acesso em: 30/06/2018.
- GOOGLE (2020). Google maps geocoding API [Internet]. 2020. Disponível em:<<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/overview?hl=pt>>. Acesso em:15/07/2020.
- GUO, Q.; YANXIN WANG, Y.; GAO, X.; MA, T. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a

- case study in Taiyuan basin, northern China. *Environmental Geology*, v. 52, p. 923-932, 2007.
- HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. *Environmental Geology*, n. 53, p. 249-255, 2007.
- IG/CETESB/DAEE (1997). Mapeamento de vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. IG; CETESB; DAEE. 1997. V. 1. 129 p.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2007. Classificação nacional de atividades econômicas. Versão 2.0. Subclasses para uso da administração pública. Comissão Nacional de Classificação – CONCLA, IBGE, Rio de Janeiro, 616 p.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>>. Acesso em: 30/06/2020.
- INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Cadastro de Área Contaminadas e Reabilitadas – Indústrias e outros 3ª edição. 2015. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dilam/documents/document/zww/mte0/~edisp/inea0114618.pdf>. Acesso em 08/06/18.
- IRATANI, M. A.; EZAKI, S. (2012) Roteiro de orientativo para delimitação de áreas de proteção de poço. Cadernos de projeto ambiental estratégico aquíferos nº 2. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.
- IRATANI, M. A.; ROSSINI-PENTEADO. D.; EZAKI. S.; ODA. G. H. Proposta de classificação das fontes potenciais de contaminação da água subterrânea. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v 2, p 34, 2013.
- ITRC – Interstate Technology Regulatory Council. Site da internet. Disponível em: <<https://itrcweb.org/home>>. Acesso em: 30/06/2021.
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2018. *Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies. LNAPL-3*. Washington, D.C.

- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). *Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPL Site Characterization Team. 2015
- JAFFÉ, P.; NICKOL, P.; SEELHORST, B. Gerenciamento de contaminações por solventes organoclorados: Manual para levantamento, investigação, avaliação e remediação de contaminações de solo e água subterrânea por solventes clorados na indústria metalúrgica / eletro-eletrônica. 1ª Ed. Cotia: Nickol do Brasil, 2008.
- LISBOA FILHO, J.; IOCHPE, C. Introdução a Sistemas de Informações Geográficas com Ênfase em Banco de Dados. Apostila. XV JAI - Jornada de Atualização em Informática, XVI Congresso da SBC, Recife-PE, 1996. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1414/apostila_sig.pdf>. Acesso em: 02/07/2018.
- LOBO FERREIRA, J. P. C.; CHACHADI, A. G. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. Coastin – a coastal policy research newsletter, n. 4, 12 p, 2001.
- Microsoft Excel 2016. Versão Professional Plus 2016 [S. l.]. Microsoft Corporation, 2016.
- Microsoft Fuzzy Lookup Add-In for Excel. Versão 1.3.00. Microsoft Corporation, 2020.
- MMQIS. Versão 2020.1.16. Minn, M. 2020. Disponível em: <<http://michaelminn.com/linux/mmqgis/>>, Acesso em: 10/02/2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Áreas Contaminadas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas>>. Acessado em 10 de Maio de 2017.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas. Brasília: MMA, 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Notícias: Brasil e Estados Unidos avançam em cooperação pela Agenda Ambiental Urbana. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-estados-unidos-avancam-em-cooperacao-pela-agenda-ambiental-urbana>>. Acessado em 12 de setembro de 2021.

- MORAES, S. L.; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. S. Guia de Elaboração de Planos de Intervenção para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Centro de Pesquisa em Áreas Contaminadas do IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2013.
- OLIVEIRA, R. M. (2008) Cidade dos meninos, Duque de Caxias, RJ, linha do tempo sobre a contaminação ambiental e humana. Fundação Oswaldo Cruz, Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: 2008
- OLIVEIRA, U. C.; OLIVEIRA, P. S. (2017). Mapas de kernel como subsídio à gestão ambiental: Análise dos focos de calor na bacia hidrográfica do Rio Acaraú, Ceará, nos anos 2010 a 2015. Espaço Aberto, PPGG-UFRJ, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 87-99.
- PAYNE, F. C.; QUINNAN, J. A.; POTTER, S. T. (2008) Remediation hydraulics. Boca Raton, London: CRC Press, c2008.
- Point Sample Tool. Versão 0.5.3. Jugiel, B. 2020. Disponível em: <<https://plugins.qgis.org/plugins/pointsamplingtool/version/0.5.3/>>, Acesso em: 01/04/2020.
- QGIS Geographic Information System. Versão 3.4.14 [S. l.]. Open Source Geospatial Foundation Project, 2018. Disponível em <https://www.qgis.org/pt_BR/site/index.html>. Acesso em 23/12/2019.
- QGIS Project. (2021) Qgis Documentation: 24.1.4.1. Heatmap (kernel density estimation). Disponível em <https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/interpolation.html?highlight=kernel>. Acesso em 25/06/2021.
- RIYIS, Marcos Tanaka. Investigação Ambiental de Áreas Contaminadas Utilizando a Abordagem de Alta Resolução. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, Bauru, 2017.
- RISSE, D. W.; BARTON, G. J. (1995). A strategy for delineating the area of groundwater contribution to wells completed in fracture bedrock aquifers in Pennsylvania. US Geological Survey.
- ROONGPIBOONSOPIT, D.; KARIMI, H. A. (2010) Comparative evaluation and analysis of online geocoding services, International Journal of Geographical Information Science, 24:7, 1081-1100, DOI: 10.1080/13658810903289478.

- ROONGPIBOONSOPIT, D.; KARIMI, H. A. (2010a) Quality Assessment of Online Street and Rooftop Geocoding Services, Cartography and Geographic Information Science, 37:4, 301-318, DOI: 10.1559/152304010793454318.
- ROSSI, M. 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.
- SÁNCHEZ, L. E. (2004) Revitalização de áreas contaminadas In: MOERI, E.; COELHO, R.; MARKER, A.; Ed. Remediação e Revitalização de Áreas Contaminadas: Aspectos Técnicos, Legais e Financeiros. São Paulo: Signus. 2004.
- SÃO PAULO. Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei Estadual nº 997, de 31 de março de 1976. São Paulo, 1976. Legislação Estadual.
- SÃO PAULO. Lei nº 997, de 31 de março de 1976. Dispõe sobre o Controle da Poluição do Meio Ambiente. São Paulo, 1976. Legislação Estadual.
- SÃO PAULO. Decreto Estadual n. 32955, 07 de fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 02/06/1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado. São Paulo, 1991. Legislação Estadual.
- SÃO PAULO. Decreto Estadual n. 47397, 04 de dezembro de 2002. Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os Anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo, 2002. Legislação Estadual.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Secretaria da Saúde. Resolução Conjunta SMA/SERHS/SS n. 3, 21 de junho de 2006. Dispõe sobre procedimentos integrados para controle e vigilância de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano proveniente de mananciais subterrâneos. São Paulo, 2006. Legislação Estadual.
- SÃO PAULO. Lei n. 13577, 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas

contaminadas, e dá outras providências correlatas. São Paulo, 2009. Legislação Estadual.

SÃO PAULO. Decreto Nº 59.263, de 05 de junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009, que dispõe sobre as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. São Paulo. 2013. Legislação Estadual.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. Resolução SMA nº 10, de 8 de fevereiro de 2017

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. Resolução SMA nº 11, de 8 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre a definição das regiões prioritárias para a identificação de áreas contaminadas. São Paulo. 2017. Legislação Estadual.

SÃO PAULO. Decreto Estadual n. 63261, 09 de março de 2018. Altera o Decreto nº 32.955, de 7 de fevereiro de 1991, que regulamenta a Lei nº 6.134, de 2 de junho de 1988. São Paulo, 2018. Legislação Estadual.

SÃO PAULO. Conselho Estadual de Meio Ambiente. Deliberação CONSEMA nº 1, de 26 de março de 2019. Define as atividades e empreendimentos de baixo impacto ambiental passíveis de licenciamento por procedimento simplificado e informatizado, bem como autorizações. São Paulo. 2019. Legislação Estadual.

SCIVERSE Scopus. Pesquisa por palavras chave. Disponível em <<https://www.scopus.com/search/form.uri?zone=TopNavBar&origin=searchbasic&display=basic#basic>>. Acesso em 12/09/2021.

SMA - Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Busca no site por FEPRAC. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/>>. Acesso em: 20/04/2018.

STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Review of U.S. EPA-recommended and german wellhead protection area delineation methods. Journal of environmental hydrology. v 13, p 3, 2005.

SUTHERSAN, S.S.; HORST, J.; SCHNOBRICH, M.; WELTY, N.; MCDONOUGH, J. (2017) Remediation Engineering: Design Concepts. Boca Raton: CCR Press. 2017.

SUTTON, T.; DASSAU, O.; SUTTON, M. (2009) Uma breve introdução ao SIG. Documentação QGIS. Disponível

em:<https://docs.qgis.org/2.18/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/preamble.html>. Acesso em: 20/04/2018.

TEIXEIRA, C. E.; MOTTA, F. G.; MORAES, S. L. Org. Panorama GAC: Mapeamento da Cadeia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. 1ª Ed. São Paulo: IPT, 2016.

TIRLONE, C. E. (2004) Avaliação dos procedimentos para definição dos responsáveis pela execução de investigação e remediação nos casos de contaminação do solo e água subterrânea no Estado de São Paulo. 2004. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 2004.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). Handbook: Groundwater and Wellhead Protection. EPA 265-R-94-001. Office of Research and Development. Office of Science, Planning and Regulatory Evaluation. Center of Environmental Research Information, Cincinnati, OH.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2008). A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems: Final Project Report. EPA 600-R-08-003. Office of Research and Development. National Risk Management Research Laboratory. Ground Water and Ecosystems Restoration Division.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2016). Pre-CERCLA Screening Guidance. Office of Land and Emergency Management. OLEM Directive 9200.3-107.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2017). Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup: Sixth Edition. EPA 542-R-17-003. Office of Land and Emergency Management.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Overview of the Brownfields Program. Disponível em <https://www.epa.gov/brownfields/overview-brownfields-program>. Atualizado em 17/11/2017. Acessado em 01/12/2017.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2018). Superfund History. Disponível em <<https://www.epa.gov/superfund/superfund-history>>. Acessado em 20/04/2018.

- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2018a). EPA's Risk-Screening Environmental Indicators (RSEI) Methodology. Office of Pollution Prevention and Toxics, Washington, DC.
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2021) National Service Center for Environmental Publications. Disponível em: <<https://www.epa.gov/nscep>>. Acesso em: 30/06/2021.
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2021a) Contaminated Site Clean-Up Information. Disponível em: < <https://clu-in.org/default.cfm>>. Acesso em: 30/06/2021.
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2021b). Toxic Release Inventory (TRI) Program. Disponível em: <<https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/what-toxics-release-inventory#What%20is%20the%20Toxics%20Release%20Inventory?>>. Acesso em: 12/09/2021.
- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. AVI: a method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada. 1992. 23 p.
- VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifer: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, v. 33, p. 23-33, 2006.
- WYSSLING, L. Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungs-dauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, v. 72/2, p. 401-406, 1979.
- ZUCCHINI, W. (2003) Applied smoothing techniques: Part1: Kernel Density Estimation. Disponível em: <<http://staff.ustc.edu.cn/~zwp/teach/Math-Stat/kernel.pdf>>. Acesso em: 13/08/2020.

8 ANEXOS

ANEXO I – CÓDIGO FONTE DA MACRO VBA EXCEL DE BUSCA “proc_y”

```
“Public Function proc_y(vlproc1 As Range, tbl_base As Range, col1 As Integer,
col_out As Integer) As String
```

```
Dim Busca1 As Range
```

```
Dim Lin As Integer
```

```
Dim reslt As String
```

```
Lin = 0
```

```
Set Busca1 = tbl_base.Columns(col1).Find(What:=vlproc1.Value,
LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole, SearchOrder:=xlByRows,
SearchDirection:=xlNext, MatchCase:=False, MatchByte:=False,
SearchFormat:=False)
```

```
If Not Busca1 Is Nothing Then
```

```
    Lin = Busca1.Row
```

```
    reslt = tbl_base.Worksheet.Cells(Lin, col_out).Value
```

```
Else
```

```
    reslt = "N/D"
```

```
End If
```

```
proc_y = reslt
```

```
End Function
```

```
Sub Func_proc_y()
```

```
Application.MacroOptions Macro:="proc_y", Category:=7
```

End Sub”

A função criada é utilizada diretamente na célula no Excel com o chamado usual de funções matemáticas:

= proc_y(valor procurado; tabela base; coluna de busca; coluna de saída)

Valor procurado – texto ou número, ou célula com texto ou número, a ser procurado.

Tabela base – Seleção das células que compõe uma tabela de valores com linhas e colunas onde será realizada a busca;

Coluna de busca – Número da coluna onde será realizada a busca do texto ou número a ser procurado dentro da Tabela Base linha a linha de cima para baixo. As colunas são numeradas de 1 em diante, da direita para a esquerda, dentro do intervalo selecionado.

Coluna de saída – Número da coluna de onde será retornado o valor na linha (resultado mostrado pela função) na qual se encontra o valor procurado na coluna de busca.