



**ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SISTEMA
AQUÍFERO SERRA GERAL, ESTADO DO PARANÁ, BRASIL**

Porto Alegre, 2016

DÉBORA BAÚ

**ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SISTEMA
AQUÍFERO SERRA GERAL, ESTADO DO PARANÁ, BRASIL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Geólogo.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde

Porto Alegre, 2016

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia
Curso de Graduação em Geologia

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL, ESTADO DO PARANÁ, BRASIL**, elaborado por DÉBORA BAÚ, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Comissão examinadora:

Dr. José Luiz Flores Machado

Dr. Marcos Alexandre Freitas

Dr. Nelson Amoretti Lisboa

CIP - Catalogação na Publicação

Baú , Débora

Áreas potenciais à captação de água subterrânea no Sistema Aquífero Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil / Débora Baú . -- 2016.
68 f.

Orientador: Gustavo Barbosa Athayde.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Hidrogeologia. 2. Índice Relativo de Risco. 3. Sistema Aquífero Serra Geral. 4. Água subterrânea. I. Athayde, Gustavo Barbosa, orient. II. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha sobrinha e afilhada, Stella Baú Miranda, que nasceu junto com ele e me ajudou a passar por tudo com muito amor e sapequice.

Agradecimentos

Antes de tudo, quero agradecer aos meus pais, Mônica e Gilberto Baú, pelo suporte que sempre me deram, por acreditarem em mim mais do que eu mesma e por serem pais incríveis.

À minha irmã, Ágata Baú, por ser sempre o exemplo que vou querer seguir.

Aos meus amigos da Geologia por compartilharem comigo essa loucura.

À Cláudia Diniz por me ajudar a passar por tudo isso com um pouco mais de calma.

Aos professores que tive ao longo deste curso, em especial ao meu orientador, Gustavo Barbosa Athayde, pela paciência e orientação.

“Continue a nadar”

Dory

RESUMO

Com excelente aptidão química para consumo e bons índices de produção, o Sistema Aquífero Serra Geral, SASG, é de grande importância para o abastecimento público, industrial e agrícola no Estado do Paraná. Com o crescimento da demanda por água, o SASG se torna um recurso estratégico e necessita de preservação e gestão adequadas. Esta pesquisa tem como objetivo estabelecer uma rotina de trabalho para definir áreas potenciais à captação de água subterrânea, especialmente no SASG no Estado do Paraná, assim como caracterizar áreas com altos índices de produção e áreas com características químicas adequadas ao consumo humano, além de cartografar áreas potenciais à captação de água subterrânea na região de estudo. Foram utilizados dois bancos de dados para as análises. O primeiro contém informações relativas aos principais cátions e ânions, referentes a 343 poços tubulares profundos localizados na região do SASG, no Paraná, e foi utilizado para a análise da qualidade da água a partir do Índice Relativo de Risco, IRR, ferramenta que compara as concentrações dos elementos encontrados em cada poço com seus respectivos valores máximos permitidos para o consumo humano segundo a legislação. O segundo conta com informações de localização, profundidade dos níveis estático e dinâmico, tempo de bombeamento e espessura do solo em 1.626 poços tubulares profundos, fornecendo os dados para a análise de produtividade, avaliada pela capacidade específica dos poços. A partir destas informações, os valores encontrados para cada variável foram divididos em percentis e aplicados em uma base cartográfica. Nesta base, foram delimitados polígonos de características semelhantes para produtividade e IRR a partir de uma base cartográfica com lineamentos previamente traçados em uma escala de 1:600.000. Estes polígonos traçados foram intersectados a fim de encontrar as áreas de maior interesse para o estudo. Para os 343 poços analisados para o IRR, 12 são considerados de risco por possuírem parâmetros acima dos valores permitidos e foram excluídos das análises estatísticas. O valor médio encontrado foi de 0,68. Poços com anomalias positivas e negativas para o IRR apresentavam valores acima de 0,83 e abaixo de 0,41, respectivamente. Ocorrem três focos de poços com IRR mais elevado, localizados na região Oeste do Paraná, próximo à fronteira com o Paraguai, na região Centro-Sul e também na região Centro-Norte. Poços de baixo IRR ocorrem distribuídos ao longo de toda a área estudada, com apenas um foco próximo à cidade de Cascavel. Quanto à produtividade, a região Oeste do SASG apresenta poços com maiores valores de capacidade específica, sendo possível identificar um lineamento dividindo o aquífero quanto à níveis de produtividade. O valor médio de capacidade específica encontrado é de 1,798 m³/h/m, com anomalias positivas acima de 1,625 m³/h/m e negativas abaixo de 0,161 m³/h/m. Após a definição dos polígonos, foram identificadas áreas de interesse para gestão de recursos hídricos e distribuição de água para os municípios. A rotina de trabalho estabelecida neste estudo é uma ferramenta útil para a utilização de recursos hídricos subterrâneos, podendo servir como indicador de áreas para prospecção, proteção ou remediação.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Serra Geral; Índice Relativo de Risco; Água subterrânea; Hidrogeologia

ABSTRACT

With excellent chemical suitability for consumption and good production rates, the Serra Geral Aquifer System, SASG, has great importance for the public, industrial and agricultural supply in the State of Paraná, Brazil. With the increasing demand for water, SASG becomes a strategic resource and needs adequate preservation and management. This study aims to establish a work routine to define potential areas for groundwater abstraction, especially in the SASG in the State of Paraná, as well as characterize areas with high production rates and areas with chemical characteristics suitable for human consumption, as well as mapping potential areas for groundwater abstraction in the study region. Two databases were used for the analyses. The first one contains information about the main cations and anions referring to 343 deep tubular wells located in the region of SASG in Paraná. It was used for the analysis of water quality using the Relative Risk Index (IRR), a tool that compares the concentrations of the elements found in each well with their respective maximum values allowed for human consumption according to the legislation. The second one presents location information, static and dynamic depths, pumping time and soil thickness in 1,626 deep tubular wells, providing the data for the productivity analysis, evaluated by the specific capacity values. From this information, the values found for each variable were divided into percentiles and applied on a cartographic basis. On this basis, polygons of similar characteristics for productivity and IRR were delimited from a cartographic base with previously drawn lineaments on a scale of 1:600,000. These drawn polygons were intersected in order to find the areas of greatest interest for the study. For the 343 wells analyzed for IRR, 12 were considered at risk for presenting parameters above the allowed values and were excluded from the statistical analyses. The mean value found was 0.679838. Wells with positive and negative IRR anomalies showed values above 0.8336 and below 0.4155, respectively. There are three zones with higher IRR wells, located in the western region of Paraná, near the border with Paraguay, in the Center-South region and also in the Center-North region. Low IRR wells occur distributed throughout the studied area, with only one focus near the city of Cascavel. As far as productivity is concerned, the western region of the SASG presents wells with higher values of specific capacity, being possible to identify a lineament dividing the aquifer regarding productivity levels. The average value of specific capacity found is 1.798 m³/h/m, with positive anomalies above 1.625 m³/h/m and negative below 0.161 m³/h/m. After defining the polygons, areas of interest for water resources management and water distribution for the municipalities were identified. The work routine established in this study is a useful tool for the use of groundwater resources, and can serve as an indicator of areas for prospecting, protection or remediation.

Keywords: Serra Geral Aquifer System; Relative Risk Index; Groundwater; Hydrogeology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de trabalho do projeto. Sistema Aquífero Serra Geral no Brasil e no Estado do Paraná. Modificado de CPRM (2014).	15
Figura 2: Pluviometria no Estado do Paraná com destaque para a região do Sistema Aquífero Serra Geral (Modificado de CPRM, 2014).	19
Figura 3: Mapa de uso do solo no Estado do Paraná entre os anos de 2001 e 2002 (Modificado de ITCG, 2008).	20
Figura 4: Bacias hidrográficas nacionais nas quais o estado do Paraná está inserido (Modificado de CPRM, 2014).	21
Figura 5: Divisão das dezesseis sub-bacias hidrográficas existentes no Estado do Paraná (Modificado de SUDHERSA, 1998).	22
Figura 6: Distribuição das formações Covó, Candói, Barracão e Cascavel no Grupo Serra Geral no Paraná. (Modificado de Mineropar, 2013).	27
Figura 7: Divisão hidroestrutural do SASG no Estado do Paraná. Fonte: Athayde (2013)	30
Figura 8: Localização dos 343 poços com dados químicos utilizados no estudo.	39
Figura 9 Localização dos 1626 poços utilizados para análise potenciométrica	40
Figura 10: Cálculo do IRR. [A], [B] e [C] – concentrações dos parâmetros. VMP – Valores máximos permitidos pela legislação de cada parâmetro. Q – Quociente. O somatório de todos os valores de Q resultará em um Índice de Risco (IR) (Athayde, 2014).	42
Figura 11: Escala cromática para representação cartográfica de percentis. Tons mais frios representam valores menores de percentis, enquanto tons gradativamente mais quentes representam valores maiores.	43
Figura 12: Lineamentos utilizados para a definição dos polígonos. Os lineamentos foram traçados em escala 1:600.000 a partir da base altimétrica SRTM. (Modificado de Athayde, 2013).	44
Figura 13 Capacidades específicas dos poços estudados.	46
Figura 14 Relação dos poços pertencentes ao terceiro quartil e as bacias hidrográficas estaduais do Estado do Paraná.	47

Figura 15: Mapa representativo da relação dos poços abaixo do primeiro quartil com as Bacias Estaduais.....	48
Figura 16: Poços tubulares profundos com valores de capacidade específica dentro do percentil 15	49
Figura 18: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica abaixo do percentil 25.....	50
Figura 19: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica acima do terceiro quartil	51
Figura 20: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica abaixo do percentil 90.....	52
Figura 21 Mapa apresentando os 343 poços com análises hidroquímicas e seus respectivos riscos.....	53
Figura 22 Poços tubulares profundos com valores de IRR pertencentes ao terceiro quartil e sua relação com as bacias estaduais.....	54
Figura 23: Poços tubulares profundos com valores de IRR pertencentes ao primeiro quartil e sua relação com as bacias estaduais	55
Figura 24: Comparação dos compartimentos hidroestruturais de Athayde (2013) com os valores de IRR.....	57
Figura 25: Polígonos definidores de áreas de características semelhantes de produtividade. Os poços de capacidades específicas entre o primeiro e o terceiro quartis foram ocultados para facilitar a visualização.	58
Figura 26: Polígonos definidores de áreas de características semelhantes de IRR.	59
Figura 27: Intersecção dos polígonos de IRR e produtividade.....	60
Figura 28: Polígonos de intersecção de dados de produtividade e de IRR isolados.	60
Figura 29: Mapa de comparação entre taxa de crescimento populacional e os polígonos de intersecção (Modificado de IPARDES, 2010)	63
Figura 30: Fluxograma da rotina de trabalho sugerida neste estudo	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Zonas de potencial hidrogeológico (PH). Adaptado de Rosa e Filho (1987, apud Mineropar 2013)	28
Tabela 2: Classificação das águas subterrâneas (Brasil, 2008)	35
Tabela 3: Parâmetros analisados e métodos analíticos conforme a rotina do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas - Universidade Federal do Paraná.....	37
Tabela 4: Parâmetros analisados e métodos analíticos conforme a rotina do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas - Universidade Federal do Paraná.....	38
Tabela 5 Valores de percentil encontrados para os 1260 poços	45
Tabela 6: Comparação de dados de produtividade com as Bacias Estaduais.....	47
Tabela 7: Relação dos dados de produtividade com os compartimentos definidos por Athayde (2013)	50
Tabela 8 Percentis relativos ao IRR	53
Tabela 9: Relação dos valores de IRR com as Bacias Hidrográficas Estaduais.....	54
Tabela 10: Relação dos valores de IRR com os compartimentos definidos por Athayde (2013)	56

LISTA DE ABREVIATURAS

SASG – Sistema Aquífero Serra Geral

SAG – Sistema Aquífero Guarani

IRR – Índice Relativo de Risco

Q/s – Capacidade Específica

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Problema	16
1.2. Hipótese	16
1.3. Justificativa	16
1.4. Objetivos	17
1.4.1 Objetivos Gerais	17
1.4.2. Objetivos Específicos	17
2. Estado da arte	18
2.1. Considerações sobre o Estado do Paraná.....	18
2.1.1. Caracterização Geográfica e Geológica	18
2.1.2. Demografia	18
2.1.3. Clima	18
2.1.4. Uso do Solo	19
2.1.5. Hidrografia do Paraná.....	20
2.2. A Formação Serra Geral	25
2.2.1. A Formação Serra Geral no Estado do Paraná	26
2.2.2. Características Estruturais	27
2.2.3. Hidrogeologia do SASG no Paraná:	28
2.2.4. Quimismo do SASG no Estado do Paraná	30
2.3. A Formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul	31
2.4. A Formação Serra Geral no Estado de São Paulo.....	31
2.5. A Formação Serra Geral no Estado de Santa Catarina	32
2.6. A Formação Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul.....	32
2.7. Condicionantes Geológicos	33
2.8. Aptidão para o consumo humano	34

2.9.	Outros Aquíferos fraturados no mundo	35
2.9.1.	Deccan Traps	35
2.9.2.	Aquíferos de O'ahu, Havái	36
3.	Material e Métodos	37
3.1.	Base de dados.....	37
3.2.	Análise de produtividade	40
3.3.	: Seleção de áreas pelo IRR	40
3.4.	Análise estatística	42
3.4.1.	Aplicação cartográfica	42
3.5.	Definição dos polígonos	43
4.	Resultados e Discussão	45
4.1.	Produtividade	45
4.2.	Índice Relativo de Risco	52
4.3.	Definição de polígonos	57
5.	Aplicabilidade e Gestão.....	62
6.	Conclusões	64
7.	Referências	66

1. Introdução

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é um aquífero fraturado que ocorre na Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná. Ocupa cerca de 1.600.000 km² entre Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. No Brasil, ocorre em porções das regiões Sudeste e Centro-Oeste e na região Sul (Athayde, 2013). No estado do Paraná, localiza-se no terceiro planalto do estado do Paraná, abrangendo cerca de 102.000 km² (Fig. 1). A constituição é principalmente de basaltos toleíticos, formados durante diversos derrames de lava, com mineralogia principal sendo marcada por plagioclásio, augita e pigeonita (Rosa Filho *et al.*, 2006).

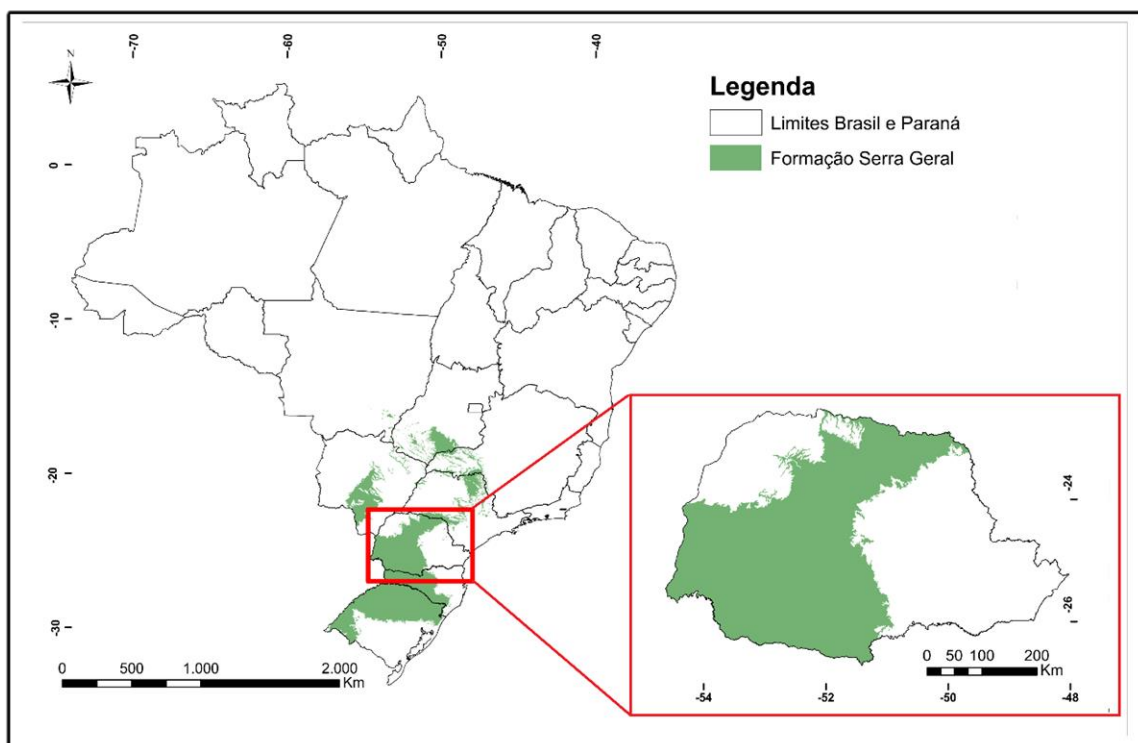


Figura 1: Área de trabalho do projeto. Sistema Aquífero Serra Geral no Brasil e no estado do Paraná. Modificado de CPRM (2014).

O SASG, por apresentar bons índices de produção (vazão e capacidade específica elevadas), e excelente aptidão química de suas águas para consumo, é um dos mananciais mais importantes do estado do Paraná, fornecendo 55%, o equivalente a aproximadamente 84 milhões de m³, da água subterrânea extraída no Paraná em 2014 (Sanepar, 2015). A água é fonte para o abastecimento público, industrial e agrícola para 300 municípios do estado, atingindo mais de 1 milhão de habitantes (Athayde, 2013).

Com o crescimento da população e conseqüente aumento da demanda nos municípios situados em sua área de afloramento, no estado do Paraná, o SASG torna-se um recurso estratégico, que deve ser preservado e gerido de maneira adequada.

1.1. Problema

A partir da necessidade de utilizar as fontes de águas subterrâneas como fonte de abastecimento público, surge a questão de estudo: Como otimizar o processo de prospecção de água do SASG?

1.2. Hipótese

Considerando as informações supracitadas, e partindo da premissa de que as áreas mais adequadas serão aquelas com melhor qualidade química e maiores índices de produtividade trabalha-se com a seguinte hipótese:

- A utilização de uma rotina de estudo que una características de qualidade química com dados de produção dos poços tubulares é um caminho eficaz no processo de prospecção de sistemas aquíferos, em específico o SASG.

1.3. Justificativa

Com a crescente demanda por águas subterrâneas nos municípios situados na área de afloramento do SASG, no estado do Paraná, este trabalho visa subsidiar gestores de recursos hídricos subterrâneos, na tomada de decisão, acerca das áreas mais favoráveis e daquelas com maior risco exploratório.

A política de industrialização do estado do Paraná gerou um crescimento industrial significativo próximo às áreas urbanas do estado, o que provocou um aumento da concentração populacional nas cidades médias do estado, como Londrina, Maringá, Cascavel e Ponta Grossa. Esta expansão industrial, juntamente com a aglomeração populacional tem gerado, entre outras conseqüências, um aumento bastante significativo na demanda de água tanto para uso doméstico quanto para uso industrial (SUDHERSA, 1998).

Atualmente, percebe-se um crescente problema na disponibilidade de água em algumas regiões do Brasil. Ocorrem estiagens e conseqüentes rebaixamentos de reservatórios, como observado no estado de São Paulo em 2015, tornando-se gradativamente mais necessários o conhecimento e a exploração das águas subterrâneas. O entendimento sobre áreas mais produtivas e áreas com maior risco exploratório permite que os gestores elaborem políticas visando o uso sustentável das águas subterrâneas.

Rosa Filho *et al.* (2006) apontam um grande prejuízo de cerca de 12 bilhões de reais na produção de grãos, principalmente na produção de milho e soja, apenas no mês de fevereiro de 2005 causado por problemas de irrigação ocorridos pela insuficiência de chuvas no estado. A captação de águas subterrâneas seriam uma maneira eficiente de diminuir tais problemas.

O estudo possibilitará o reconhecimento de áreas que merecem maior proteção, pois apresentam um perfil vantajoso à captação, fornecendo uma base para a criação de sistemas de preservação.

Além disso, em função da escassez de recursos financeiros geralmente disponíveis, este estudo traz a vantagem de fornecer um direcionamento preliminar de regiões de prospecção economicamente mais viáveis.

O trabalho contará com um banco de dados previamente coletados, contendo informações de poços localizados na área de estudo, o que o torna exequível e de baixo custo.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma rotina de trabalho para definir áreas potenciais à captação de água subterrânea.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar áreas com altos índices de produção (poços com vazões e capacidades específicas elevadas) no Sistema Aquífero Serra Geral.
- Definir áreas com características químicas adequadas ao consumo humano *in natura*.
- Cartografar áreas potenciais à captação de água subterrânea no SASG.

2. Estado da arte

2.1. Considerações sobre o estado do Paraná

2.1.1. Caracterização Geográfica e Geológica

Com uma área de cerca de 200.000 km², o estado do Paraná apresenta cinco paisagens principais, descritas por Maak (2001) e resumidas a seguir segundo a descrição do autor.

O Litoral é a porção mais a leste do estado, inclui tanto porções do complexo cristalino quanto acúmulos sedimentares. Imediatamente a Oeste, ocorre a Serra do Mar, que tem elevações que variam de 500 a 1000 m de altitude e é dividida em diversos blocos que são caracterizados individualmente. Iniciando a porção de planaltos do estado, o Primeiro Planalto é o degrau mais oriental, atingindo altitudes que variam entre 850 e 950 m. O Segundo Planalto ocorre com altitudes variando entre 1090 e 1200 m na testa da escarpa e de 750 a 775 m próximo ao Terceiro Planalto. Por fim, o Terceiro Planalto é formado por rochas vulcânicas mesozoicas da Formação Serra Geral que são recobertas por sedimentos de idade Cretácica (Mineropar, 2016).

2.1.2. Demografia

Em 2010, o Paraná apresentava uma população total de 10.444.526 pessoas. Destas, cerca de 85% (8.912.692 pessoas) habitavam áreas urbanas, enquanto apenas cerca de 15% (1.531.834 pessoas) eram habitantes de zonas rurais (IBGE, 2010).

O Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social – IPARDES fez uma estimativa de crescimento populacional baseando-se em tendências passadas de crescimento populacional para o estado do Paraná e concluiu uma tendência a uma população de cerca de 11,5 milhões de habitantes em 2020, representando uma taxa de 0,74% de crescimento ao ano, e cerca de 12 milhões em 2030, 0,43% a.a. Este decréscimo no ritmo de aumento é atribuído à redução da fecundidade e a existência de um saldo migratório negativo em trocas interestaduais. O IPARDES ainda prevê um aumento nas áreas com decréscimo populacional causado pela migração para os maiores centros urbanos do estado que, por sua vez, tendem a apresentar um ritmo de crescimento superior ao dobro da taxa esperada para o estado.

2.1.3. Clima

Segundo o ITCG, Instituto de Terra, Cartografia e Geociências, o Paraná apresenta predominantemente os climas Cfa e Cfb, de acordo com a classificação de Köppen. Na região do SASG, ocorre principalmente o tipo Cfb que, segundo a Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, é um clima temperado com verão ameno que não apresenta uma estação seca, podendo ter precipitações mensais de até 2.000 mm. Abaixo, a Figura 2 está apresentado

o mapa de pluviometria de acordo com os dados do Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo (CPRM, 2014). Neste mapa percebe-se que o maior acúmulo de chuvas ocorre na região costeira do estado, principalmente no litoral Norte. A região do SASG compreende outra área com quantidade significativa de chuvas, localizada no Centro-Sul do estado, principalmente no Sudoeste do aquífero.

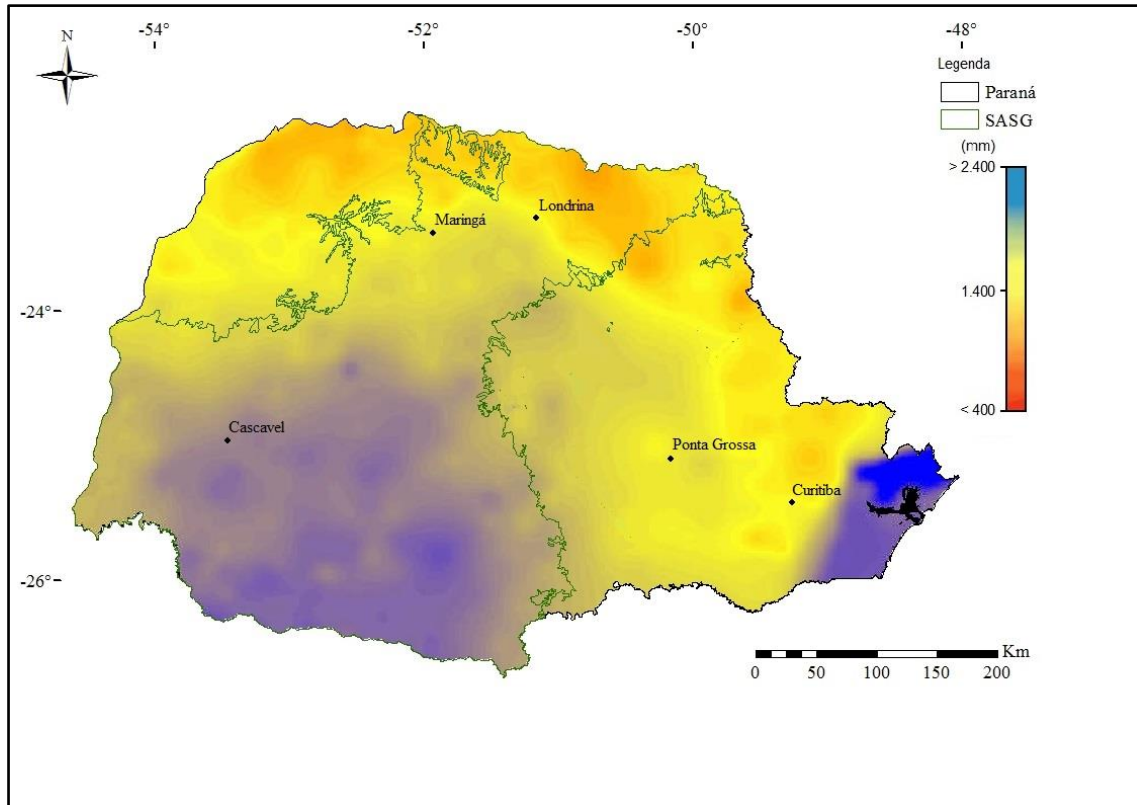


Figura 2: Pluviometria no estado do Paraná com destaque para a região do Sistema Aquífero Serra Geral (Modificado de CPRM, 2014)

2.1.4. Uso do Solo

O solo no estado do Paraná tem como principal uso a agricultura. Mapa publicado pelo ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geociências – em 2008 mostra o uso do solo no estado do Paraná entre os anos de 2001 e 2002 (Fig. 3). A região central tem como principal uso a agricultura intensiva com áreas de uso misto onde ocorre também o uso para pastagem. Há uma concentração de uso somente como pastagem e campo na porção central do estado, porém a grande ocorrência deste tipo de uso de solo se dá na porção Noroeste do estado. São escassas as áreas de cobertura florestal natural, ocorrendo principalmente na porção Leste/litorânea do Paraná. Áreas de reflorestamento são raras, ocorrendo principalmente na porção Norte/Nordeste. A região do SASG é quase completamente utilizada para fins de agricultura, com escassas áreas de cobertura florestal.

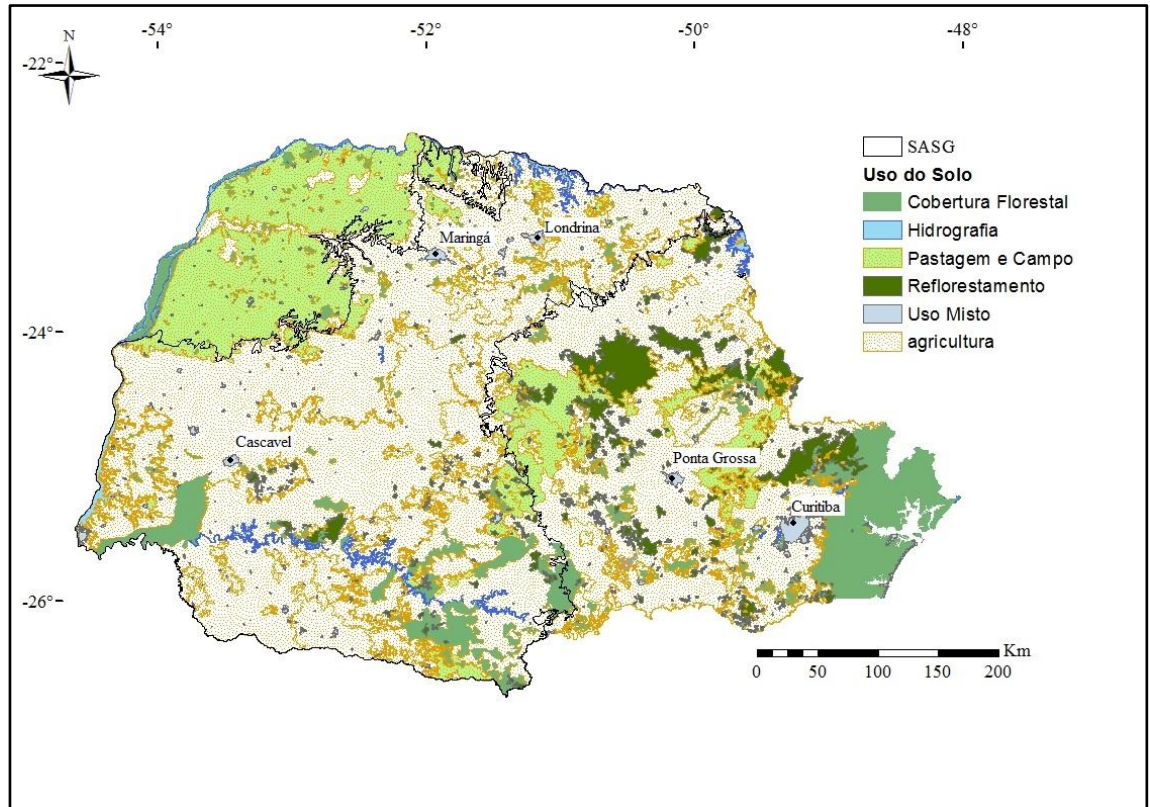


Figura 3: Mapa de uso do solo no estado do Paraná entre os anos de 2001 e 2002 (Modificado de ITCG, 2008)

2.1.5. Hidrografia do Paraná

Bacias Nacionais

Segundo a Agência Nacional de Águas, o estado do Paraná está inserido em três Regiões Hidrográficas nacionais: Região Hidrográfica do Paraná, Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste e Região Hidrográfica do Atlântico Sul (Figura 4). A região do SASG está totalmente inserida na Região Hidrográfica do Paraná.

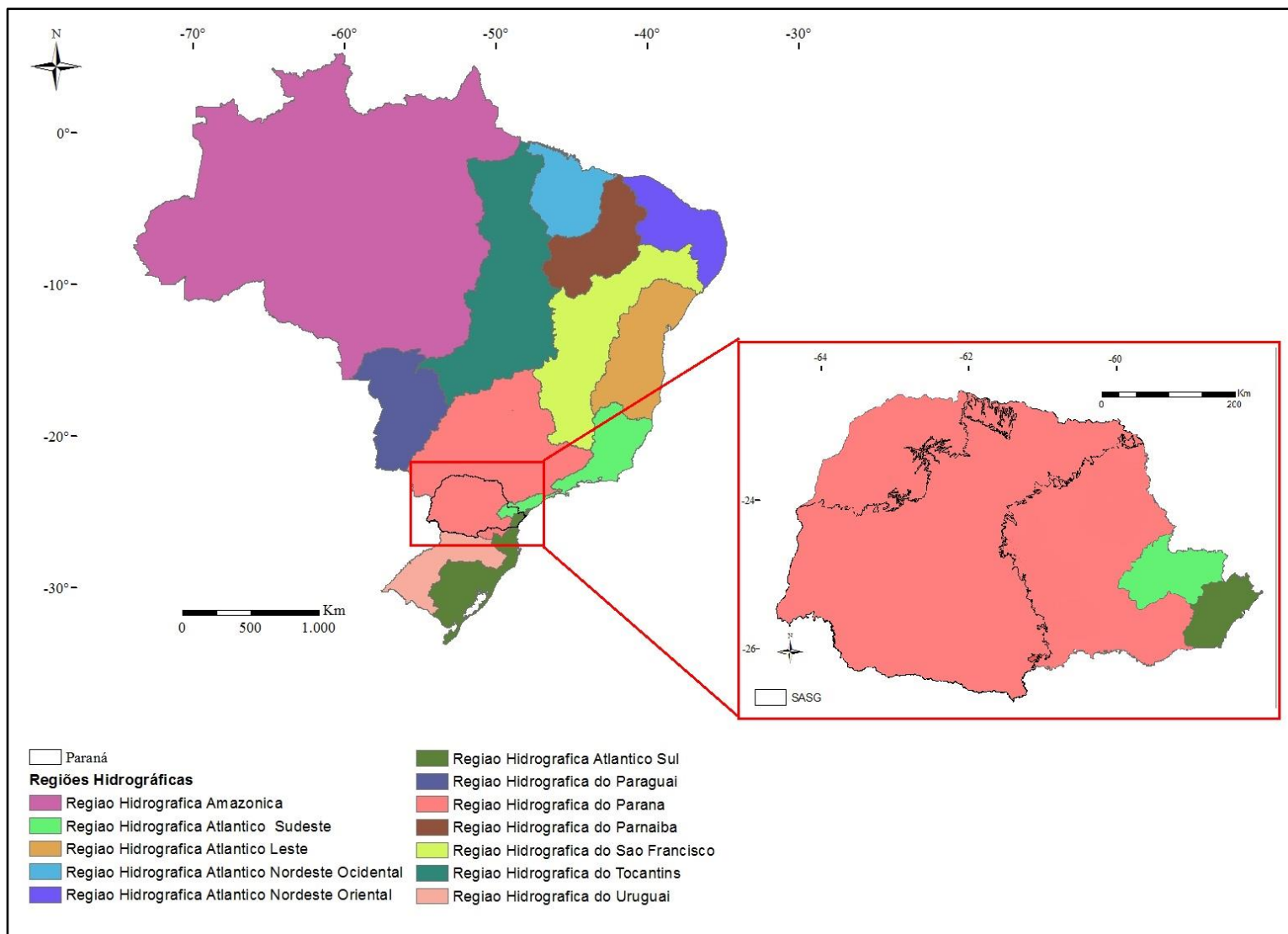


Figura 4: Bacias hidrográficas nacionais nas quais o estado do Paraná está inserido (Modificado de CPRM, 2014).

Bacias Estaduais

O estado do Paraná foi subdividido em dezesseis bacias hidrográficas (Cinzas, Iguaçu, Ivaí, Itararé, Litorânea, Ribeira, Paraná 1, 2 e 3, Paranapanema 1, 2, 3 e 4, Piquiri, Pirapó e Tibagi), individualizadas por divisores de água. As bacias que fazem parte do SASG estão brevemente descritas abaixo de acordo com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, em 2010, e demonstradas na Figura 5.

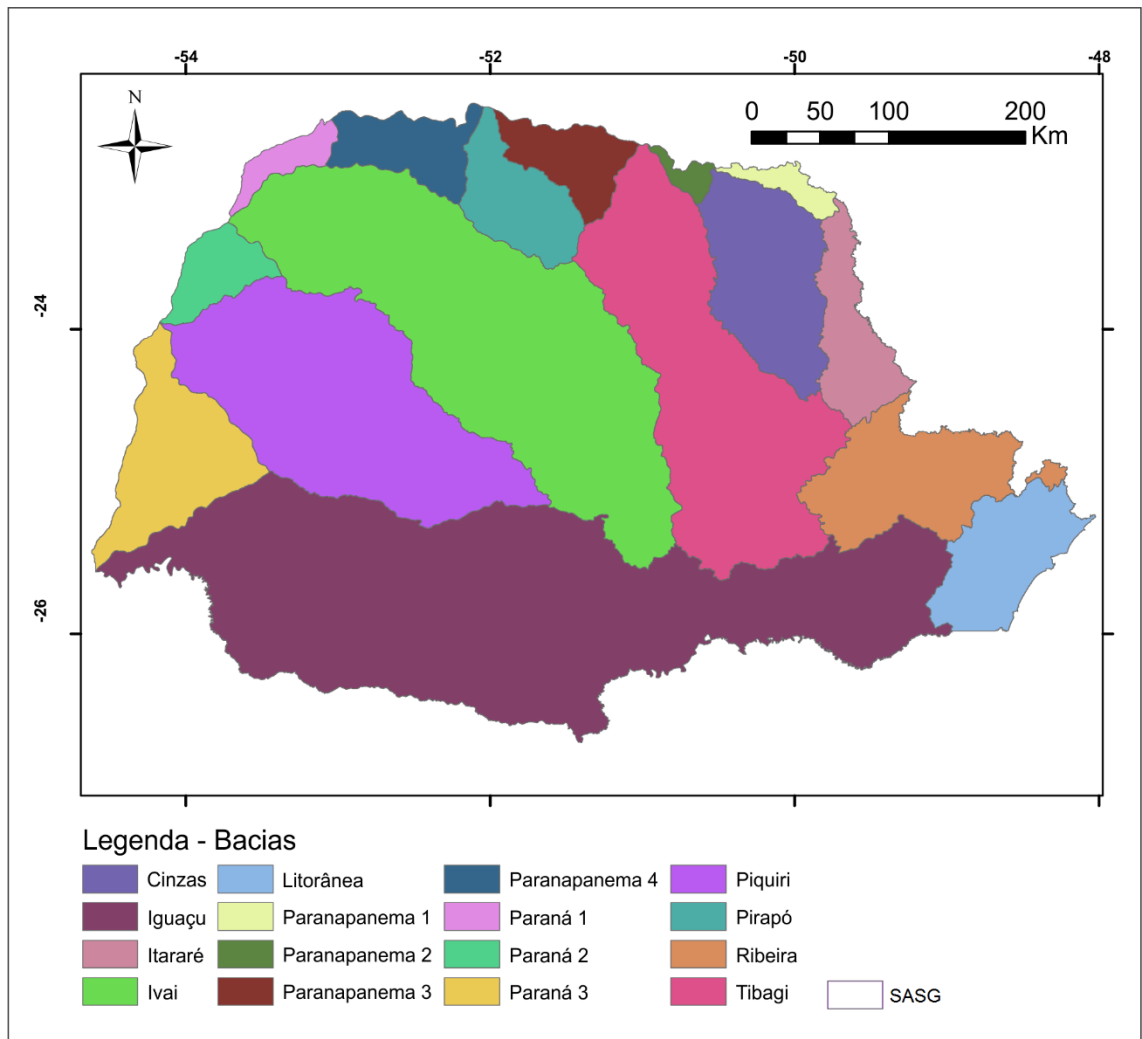


Figura 5: Divisão das dezesseis sub-bacias hidrográficas existentes no estado do Paraná (Modificado de SUDHERSA, 1998)

- Bacia do Rio Iguaçu

Ocorre em uma área de 54.842,4 km², atingindo uma população de cerca de 4,5 milhões de habitantes. As águas têm qualidade predominantemente boa e razoável, porém nas localidades mais próximas à cidade de Curitiba apresentam maior risco de contaminação e, conseqüentemente, acabam tendo uma qualidade ruim. A água é predominantemente

superficial, com 81% do total disponível no estado, com uma disponibilidade de cerca de 291 mil L/s. Já as águas subterrâneas, 19% do total, apresentam uma disponibilidade hídrica de 72 mil L/s, provenientes de diversos aquíferos. O abastecimento público é o principal uso desta bacia, representando 62% do total de uso, seguido pelo abastecimento industrial (18%) e pelo setor agrícola (10%).

- Bacia do Rio das Cinzas

A bacia está contida numa área de 9.612,8 km², atingindo cerca de 300 mil habitantes. Sua principal fonte hídrica é superficial, representando 70% do total, com uma disponibilidade de 28 mil L/s. As fontes subterrâneas representam 30% do total, com uma disponibilidade de 9 mil L/s. A utilização é bem distribuída entre abastecimento público (29%), abastecimento industrial (23%), agricultura (23%) e pecuária (23%).

- Bacia do Paranapanema 1

A bacia tem uma área de 1.231,7 km² e atinge uma população de mais de 70 mil pessoas. As águas subterrâneas representam 87% do total de água disponível na bacia, com uma disponibilidade hídrica de 3 mil L/s. As águas subterrâneas representam 13% do total disponível, com uma disponibilidade de 1,6 mil L/s. A maior utilização desta água é no setor agrícola (64%) seguido pelo abastecimento público (27%).

- Bacia do Paranapanema 2

Com apenas 663,8 km², a bacia atinge uma população de cerca de 17 mil pessoas. A bacia é hidrograficamente pouco expressiva, com os 95% de água superficial tendo uma disponibilidade de 2 mil L/s e os 5% de água subterrânea tendo cerca de 1 mil L/s disponíveis. A água é utilizada principalmente no setor agrícola (78% do total).

- Bacia do Tibagi

Com cerca de 25 mil km², a bacia do Rio Tibagi atinge cerca de 1,5 milhões de pessoas. Suas águas provêm principalmente de fontes superficiais (86%) com uma disponibilidade de 111 mil L/s. As águas subterrâneas têm uma disponibilidade de 23 mil L/s. Os principais usos desta água são o abastecimento público e industrial, representando 38% e 37% do total de água, respectivamente.

- Bacia do Pirapó

A bacia do Pirapó tem 5.098,1 km² e abastece cerca de 486 mil pessoas. 75% das águas se encontram superficialmente, disponibilizando 30 mil L/s. Os 30% de água subterrânea disponibilizam 6 mil L/s. Os principais usos são o abastecimento industrial (43%) e o abastecimento público (38%).

- Bacia do Paranapanema 3

A bacia tem uma área de 5.564,3 km² e atinge uma população de 110,5 mil pessoas. 81% das águas são de fontes superficiais, com uma disponibilidade de 16 mil L/s. As águas subterrâneas têm uma disponibilidade de 4 mil L/s. Os setores agrícolas e industriais são os maiores receptores desta bacia, com 41% e 31%, respectivamente.

- Bacia do Rio Ivaí

Tem uma área de 35.540 km² e atinge cerca de 1,3 milhões de pessoas. Três quartos da água desta bacia estão em fontes superficiais, com uma disponibilidade de 233 mil L/s. O restante está em fontes subterrâneas localizadas nas unidades aquíferas com uma disponibilidade de 39 mil L/s. Os principais usos destas águas estão no setor agrícola (39%) e no abastecimento público (26%).

- Bacia do Rio Piquiri

A bacia possui uma área total de 24.171,7 km² e uma população de mais de 600 mil habitantes. 52% da água utilizada provém de mananciais superficiais, com uma disponibilidade hídrica de 157 mil L/s. As águas subterrâneas têm uma disponibilidade de aproximadamente 32 mil L/s.

- Bacia do Paraná 3

Possui uma área de 7.979,4 km² e atinge uma população de quase 650 mil pessoas. 63% da água utilizada provém de áreas superficiais, com uma disponibilidade de 58 mil L/s. Os mananciais subterrâneos têm uma disponibilidade estimada de 14 mil L/s proveniente dos aquíferos Guarani e Serra Geral.

2.2.A Formação Serra Geral

A Bacia do Paraná, localiza-se no centro-oeste da América do Sul, ocupando cerca de 1.600.000 km² entre Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. No Brasil, é encontrado na região sul e em partes das regiões sudeste e centro-oeste (Athayde, 2013). A Formação Serra Geral, por sua vez, constitui uma série de derrames mesozoicos que ocorreram sobre a bacia do Paraná. Ocupa uma área de aproximadamente 1,1 x 10⁶ km² só no Brasil (75% da Bacia do Paraná), sendo cerca de 102.000 km² só no estado do Paraná, com espessura máxima chegando a mais de 1700 m. (Mineropar, 2013).

Segundo Milani (1997), a Fm. Serra Geral foi gerada a partir do extenso magmatismo que ocorreu com a abertura do Oceano Atlântico e separação da Gondwana, devido à influência de plumas mantélicas. Existem duas vertentes de pensamento a respeito da duração do magmatismo do Serra Geral. Thiede e Vasconcelos (2010) defendem que o magmatismo ocorreu em um curto espaço de tempo, de cerca de 1 Ma, e em grandes volumes, o que corrobora com a indicação de um ambiente de abertura de rift oceânico com a descompressão rápida em esforços distensionais. Como contraponto, existem autores que defendem o magmatismo de duração na ordem de 10 Ma. (Peate *et al*, 1992; Renne *et al*, 1992).

Bongiolo *et al*. (2011) descreve as principais características encontradas nos derrames do Serra Geral como “contatos interderrames, zonas de basalto vesicular amigdaloidal preenchidas por calcita, quartzo e zeólitas, tratos de basalto compacto geralmente diaclasado e níveis de base de derrame com fraturas paralelas ao contato”.

Bellieni (1984, *apud* Mineropar, 2013) definiu três subprovíncias que dividem o magmatismo do Serra Geral de acordo com dois lineamentos que ocorrem ao longo dos rios Uruguai e Piquiri. Esses domínios são caracterizados pelos seus teores de TiO₂, mas apresentam também uma associação diversa de rochas. O Domínio Setentrional ocorre com altos a médios valores de Ti. Sua composição é básica, com raros tufos ácidos. São encontrados soleiras e diques de diabásio como forma predominante de rochas intrusivas. O Domínio Central representa as maiores espessuras da formação, ocorrem pilhas de baixo Ti sobre pilhas de alto Ti. Há domínio de rochas de baixo Ti (45%), com proporções semelhantes de médio e alto Ti. As rochas ácidas encontradas são predominantemente o riódacito e o riolito. O Domínio Meridional apresenta basaltos e andesitos de baixo Ti, juntamente com tufos ácidos riódacíticos e riolíticos.

Há controvérsias a respeito do desenvolvimento do sistema vulcânico da Formação Serra Geral. Tradicionalmente, diz-se que os magmas fluíram por falhas e fraturas NW-SE, com condutos que seriam zonas de fraqueza geradas por flexura devido à passagem de pluma mantélica. (Athayde, 2013). Contudo, encontram-se características de vulcanismo de aparelho central (basalto vesicular intercalado com brechas vulcânicas e sedimentos terrígenos) em diversos membros da Formação Serra geral. Estruturas circulares fechadas também foram encontradas em imagens de sensoriamento remoto, por vezes consideradas astroblemas, também são possíveis feições de caldeiras (Mineropar, 2013). O estudo uniu informações de posicionamento diversas estruturas como mineralizações e feições circulares (astroblemas, domos e outros) e definiu um padrão de lineamento N10-20E, condizente com os lineamentos tidos como controladores da formação da Bacia do Paraná. Isso indica que é provável que sejam todos recorrentes devido a estruturas mais profundas e antigas.

2.2.1. A Formação Serra Geral no estado do Paraná

Por sua variância composicional entre rochas aflorantes, entre básicas (basaltos/andesitos) e ácidas (riolitos/riodacitos), entende-se o magmatismo do Serra Geral como bimodal (Milner *et al.*, 1995). Contudo, em um estudo mais completo sobre a Formação Serra Geral no estado do Paraná, a Mineropar (2013) subdividiu a área do magmatismo baseando-se em aspectos da arquitetura faciológica, como a geometria e organização interna dos derrames, os padrões de vesiculação e as características litoquímicas, chegando a quatro formações descritas abaixo e apresentadas na Figura 6:

- Formação Cascavel: constitui-se de uma sequência de derrames lobados, lobos tabulares e derrames tabulares de basalto avermelhado intercalado com rochas vulcanoclásticas e sedimentos terrígenos.
- Formação Barracão: Derrames predominantemente lobados de basalto vesicular avermelhado devido à oxidação pervasiva com intercalações de brechas vulcanoclásticas e rochas sedimentares
- Formação Candói: Derrames tabulares espessos de basalto cinza, com zona de topo descontínua e frequentemente ausente, disjunção colunar e entablamento sigmoidais bem desenvolvidos. Ocorrência de basaltos hipohialinos.
- Formação Covó: Interdigitação de depósitos de ignimbrito reomórfico de composição riodacíticas, com textura porfirítica e lava riolítica que recobrem os basaltos da Fm. Barracão e da Fm. Candói. Associados com quartzo-latito, andesito e vitrófiro.

Este estudo não trabalhará com essa nova classificação pois ela não abrange toda sua área de cobertura.

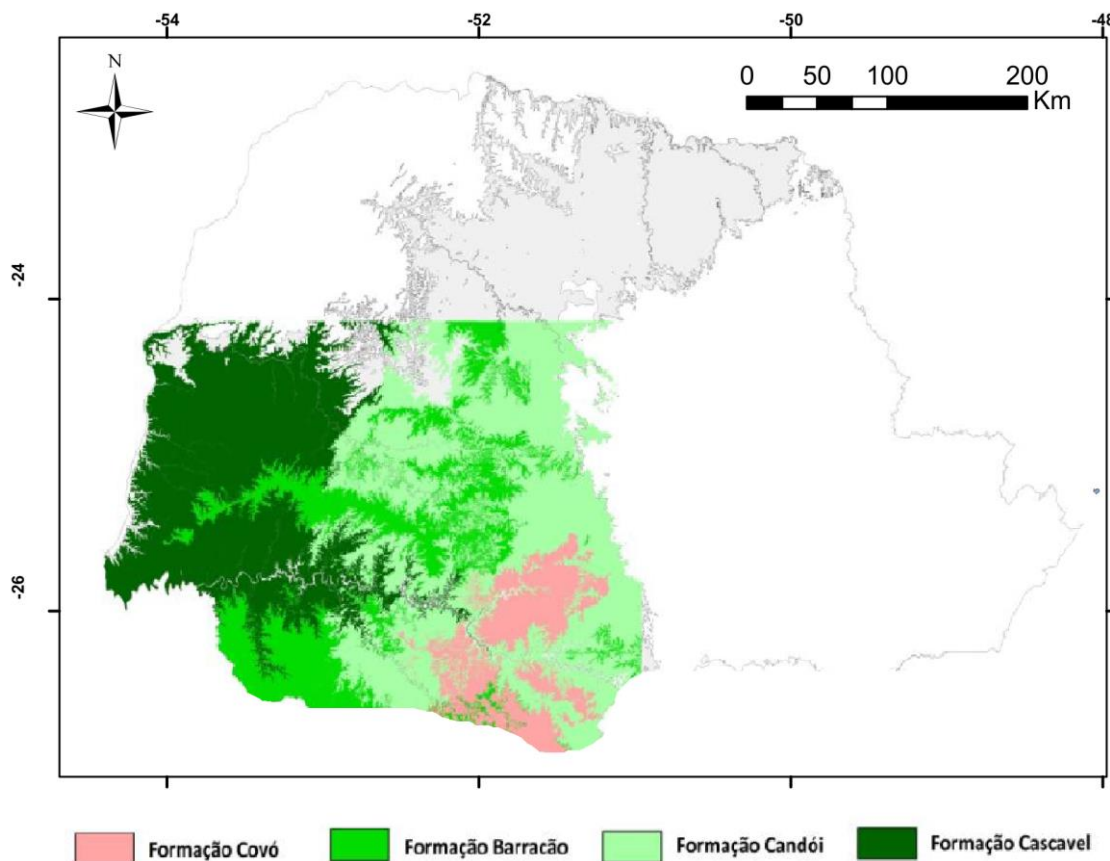


Figura 6: Distribuição das formações Covó, Candói, Barracão e Cascavel no Grupo Serra Geral no Paraná. (Modificado de Mineropar, 2013).

2.2.2. Características Estruturais

As mais importantes estruturas regionais de ocorrência na região da Formação Serra Geral no Paraná são o Arco de Ponta Grossa e os lineamentos de Rio Piquiri, Rio Alonzo, São Jerônimo-Curiúva e Jucutinga. São lineamentos de grande extensão e de importância geológica para o desenvolvimento da Bacia do Paraná. (Mineropar, 2013). As principais estruturas identificadas para o levantamento estrutural são fraturas, zonas de fraturas, veios e diques (Reginato e Strieder, 2007).

Percebe-se a importância sistema NE-SW, tido como formador do *rift* que deu origem à Bacia do Paraná (Milani, 1998). Concordando com isso, estudos encontram fraturas de orientação preferencial NE, marcadas pelo posicionamento de corpos preenchimentos minerais (Mineropar, 2013; Reginato e Strieder, 2006, 2007).

Segundo Athayde (2013), a proximidade com o Arco de Ponta Grossa faz com que o SASG apresente deformações mais intensas, ocorrendo falhas transtensionais, transpressionais e enxames de diques. Esta proximidade por vezes possibilita o contato lateral entre o SASG e o Sistema Aquífero Guarani. Este estudo também descreveu três direções principais de lineamentos, uma E-W que coincide com as falhas da deriva continental e também reflete a direção atual de esforço tectônico; uma segunda direção NE-SW que coincide com a estruturação do embasamento; e por último uma de direção NW-SE, na qual os diques do Arco de Ponta Grossa intrudem. Diversos estudos corroboram com os lineamentos observados neste estudo (Fernandes et al, 2012, Reginato e Strieder, 2006, Mocellin e Ferreira, 2009 e Bongioiolo et al, 2011).

2.2.3. Hidrogeologia do SASG no Paraná:

O SASG é um aquífero fraturado que ocorre confinando o Sistema Aquífero Guarani e aflora em uma área de aproximadamente 800.000 km² no Brasil, chegando a mais de 1570 m de espessura (Athayde, 2013). É a unidade aquífera sobre a Bacia do Paraná com maior número de poços, sendo a principal fonte de abastecimento de águas subterrâneas na região Sul do Brasil (Bittencourt et al., 2003). No estado do Paraná, em 2009, o SASG abasteceu 1 milhão de habitantes, representando 61% do volume de água distribuído no estado (Athayde, 2013). Diversos estudos citam a importante anisotropia encontrada no SASG (Bittencourt et al., 2003; Reginato e Strieder, 2006; Athayde, 2013), anisotropia esta ocorrida devido às discontinuidades físicas existentes na rocha e são responsáveis pelo transporte e armazenamento da água (Rebouças, 1978). O SASG tem seu reabastecimento principalmente através da pluviometria (Mocellin e Ferreira, 2009).

Em 1987, Rosa Filho definiu seis zonas dentro do SASG de acordo com seus potenciais hidrogeológicos. Esta definição está descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Zonas de potencial hidrogeológico (PH). Adaptado de Rosa e Filho (1987, apud Mineropar 2013) (Continua)			
Zona	PH	Entrada d'água / Características	Vazão
A: Rio Iguaçu	Baixo	80 m Alto relevo	Acima de 90 m: 10 m ³ /h Abaixo de 90 m: 1-2 m ³ /h
B: Rio Piquiri	Alto	70 m	Média: 27 m ³ /h Abaixo de 90 m: 15 m ³ /h

Tabela 1: Zonas de potencial hidrogeológico (PH). Adaptado de Rosa e Filho (1987, apud Mineropar 2013) (Continuação)			
C: Rio Paraná	Muito Alto	90 – 110 m A zona mais produtiva do Terceiro Planalto (basalto vesicular, alto faturamento tectônico)	Média: 35 m ³ /h Abaixo de 90 m: 15 m ³ /h
D: Rio Ivaí	Alto	30 – 90 m Denso fraturamento tectônico	Média: 21 m ³ /h Abaixo de 90 m: 1 m ³ /h
E: Rios Pirapó e Paranapanema	Alto, homogêneo	30 – 70 m	Média: 27 m ³ /h

De acordo com SUDERHSA (1998), 12 bacias hidrográficas fazem parte do SASG: Cinzas, Tibagi, Pirapó, Paranapanema 1, 2 e 3, Ivaí, Piquirí, Paranapanema, Paraná 3 (BP3) e Iguaçu. É possível identificar menores escoamentos superficiais na região noroeste do aquífero e maiores próximos às bacias BP3 e Iguaçu, enquanto a maior precipitação é encontrada no sudoeste do estado, próximo ao Rio Iguaçu.

Tal entendimento corrobora a indicação de Rosa Filho (1987), que em sua divisão determinou baixo potencial hidrogeológico para a zona do Rio Iguaçu. Na região noroeste do estado, o baixo escoamento superficial e baixa precipitação indicam boa permeabilidade, já que o SASG apresenta excedente hídrico (Athayde, 2013).

Uma terceira segmentação do SASG foi feita por Athayde (2013), baseando-se em características hidroestruturais (Fig. 7). Estas são: Compartimento Hidroestrutural Maringá, Compartimento Hidroestrutural Campo Mourão, Compartimento Hidroestrutural Foz do Iguaçu e Compartimento Hidroestrutural Foz do Areia. Este estudo definiu áreas de acordo com a produtividade, baseada em valores de capacidade específica, concluindo que as regiões mais produtivas se encontram predominantemente no compartimento Maringá e as menos produtivas no compartimento Foz de Areia.

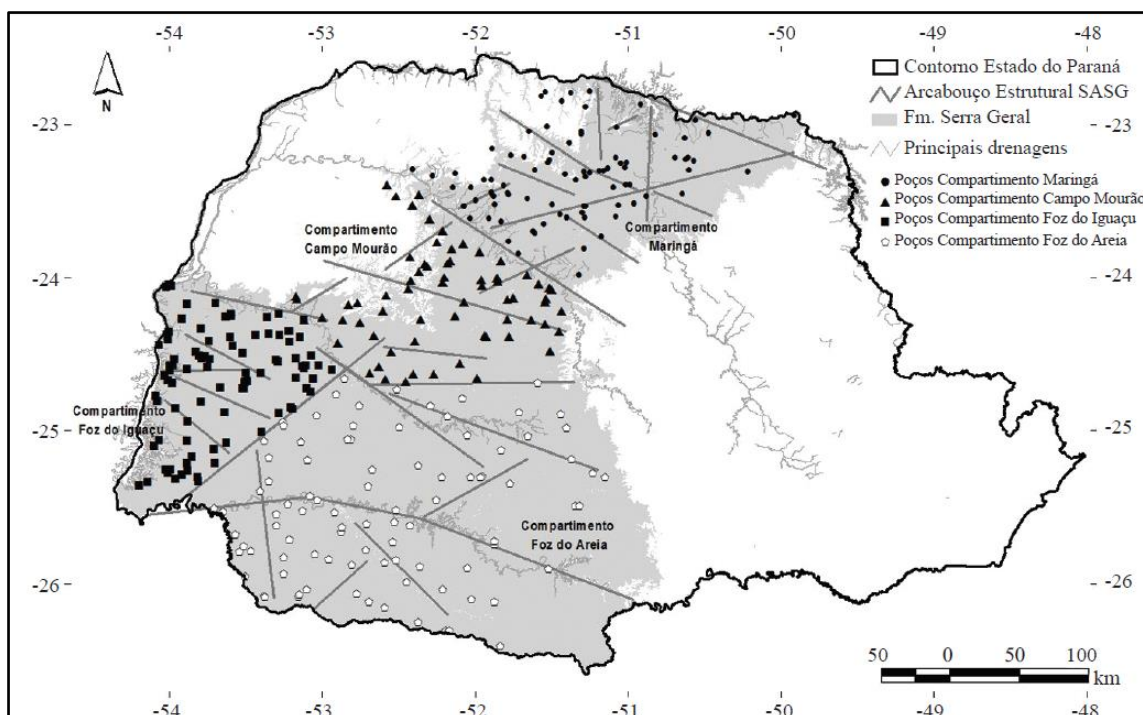


Figura 7: Divisão hidroestrutural do SASG no estado do Paraná. Fonte: Athayde (2013)

Mocellin e Ferreira (2009) descreveram maiores valores de capacidade específica e vazão na região Norte do SASG no estado do Paraná quando comparada à região Sul, indicando heterogeneidade e anisotropia no aquífero.

2.2.4. Quimismo do SASG no estado do Paraná

Segundo Rosa Filho e Hindi (2006), regionalmente no estado do Paraná, o SASG apresenta teores de sólidos totais dissolvidos entre 100 e 150 mgL^{-1} , pH entre 6,6 a 7,2 e dureza em torno de 40 $\text{mg-1CaCO}_3/\text{L}$. O teor médio de cálcio é 9 mgL^{-1} . As concentrações de magnésio variam de 3,5 a 6,5 mgL^{-1} , as de sódio, entre 1,2 a 3,7 mgL^{-1} , e as de potássio, entre 1,5 a 3 mgL^{-1} . O teor médio de bicarbonato é 38 mgL^{-1} , o de cloreto, 1,5 mgL^{-1} e o de sulfato, 2,5 mgL^{-1} . Estes valores corroboram o estudo de Bittencourt *et al.* (2003), que encontraram valores médios semelhantes para os parâmetros químicos analisados. Estes últimos, contudo, encontraram maior variação nos valores de pH, chegando a 9,5, associando valores acima de 8 à mistura de águas com o SAG. Em ambos os trabalhos, tais valores mais altos foram associados em parte à possível mistura local com águas do SAG.

De modo geral, o SASG apresenta boa qualidade de água para consumo humano, industrial e agrícola tendo predominantemente problemas em função de valores de pH encontrados em poços (Athayde, 2013). As águas são principalmente bicarbonatadas cálcicas, com íons provenientes da alteração de plagioclásios e minerais ferromagnesianos dos basaltos,

e bicarbonatadas sódicas. Águas bicarbonatadas sódicas não condizem com a química de águas suportadas por basaltos, sendo atribuídas em alguns casos principalmente à influência do SAG e da mistura de águas. [Bittencourt et al. (2003), Reginato e Strieder (2006) e Mocellin e Ferreira (2009)]. Em menor escala, ainda são encontradas águas bicarbonatadas magnesianas e sulfatadas sódicas, representando aproximadamente 1% do total cada uma (Mocellin e Ferreira, 2009).

Entende-se que a mistura de águas dos SASG e SAG ocorrem a partir de estruturas tectônicas que conectem os aquíferos, em áreas onde a superfície potenciométrica do SAG está em uma cota superior à do SASG (Athayde *et al.*, 2014).

2.3.A Formação Serra Geral no estado do Mato Grosso do Sul

A Formação Serra Geral no estado do Mato Grosso do Sul tem uma área aflorante de cerca de 40.000 km², localizada na região centro-sul do estado. Boa parte da Formação tem a Formação Bauru acima de si, acrescentando cerca de 178.000 km² à sua área e, segundo Lastória *et al.* (2006), tem uma espessura variável entre 50 e 500m. Lastória *et al.* (2006) encontraram uma vazão média em poços de 21,88 m³/h, com águas com temperaturas variando entre 24 e 28°C, pH entre 5,5 e 7,8. As águas apresentaram baixa mineralização, e uma tendência bicarbonatada cálcica.

2.4.A Formação Serra Geral no estado de São Paulo

A Formação Serra Geral tem uma área aflorante de 32.115 km² no estado de São Paulo, com espessura total variando de poucos metros na porção periférica até mais de 1.500 m em porções centrais (Gimpiá e Souza, 1982), podendo chegar a 2.000 m próximo ao Pontal do Paranapanema (Fernandes *et al.*, 2007). São principalmente basaltos básicos-intermediários compostos principalmente por plagioclásio e olivina (Gastman, Menegário e Moura, 2013). Fernandes *et al.* (2007) indicam que o SASG está sobreposto ao SAG e recoberto pelo Formação Bauru e tem ainda intrusões de diabásio que formam um outro sistema aquífero chamado Aquífero Diabásio.

Gastman, Menegário e Moura (2013) encontraram em estudo na porção centro-sul do SASG no estado de São Paulo águas com baixa salinidade e pH altamente variáveis. As águas são classificadas principalmente como bicarbonatadas calco-magnesianas, nas porções Leste e Oeste da área, e bicarbonatadas sódicas, na porção central – uma variação composicional que não indica a existência de um efeito importante da composição das rochas sobre a fácies hidroquímica das águas.

Foram observadas ocorrências de altas concentrações de flúor nas águas do SASG de composição mais sódica que estão possivelmente associadas a fenômenos estruturais (Gastmans, Menegário e Moura, 2013)

2.5.A Formação Serra Geral no estado de Santa Catarina

Machado e Freitas (2000) encontraram em estudo na porção Oeste do estado de Santa Catarina três subunidades geológicas de composições diferentes: basaltos básicos-intermediários (andesíticos e traquibasaltos), com espessuras variáveis, podendo chegar a dezenas de metros, e níveis bem marcados, com ocasionais intercalações com rochas ácidas formando platôs; dois conjuntos de rochas ácidas, porfíricas e afíricas, que geralmente apresentam arenitos intratrâpicos, de grande extensão lateral e espessura máxima de dez metros.

Os poços de Santa Catarina apresentam vazão predominante de 2 m³/h, mas podem variar de 0,5 até 50 m³/h, com capacidade específica média de 0,9 m³/h/m. As zonas mais favoráveis para o acúmulo de água subterrânea são as com rochas ácidas, devido às disjunções tabulares e às autobrechas. As águas apresentam pH variável de aproximadamente 5,5 a 10, com associação de águas alcalinas e rochas básicas, alcalinidade entre 32 e 138 mg/l, dureza total entre 8 e 150 mg/l, com predominância de valores baixos. Bicarbonatos são encontrados num valor de 139,1 mg/l, cloretos 58,14 mg/l e sulfatos 18 mg/l. Este estudo de Machado e Freitas (2000) classificou a maioria das águas analisadas como bicarbonatadas sódicas ou bicarbonatadas magnésico-sódicas, ao contrário do padrão bicarbonatado cálcico que costuma-se encontrar preferencialmente no SASG.

2.6.A Formação Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul

A Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul ocupa uma área aproximada de 137.000 km², sendo muito importante pois fornece água para abastecimento público, industrial, doméstico e para a recreação. Reginato, Ahlert e Schneider caracterizaram as águas do SASG no estado do RS como predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, porém com significativa ocorrência de bicarbonatadas sódicas e, mais restritamente, sulfatadas cálcicas ou magnesianas, com valores de cálcio, magnésio, sódio, carbonatos e bicarbonatos variáveis e pH geralmente abaixo de 7,5. Os autores frisam que a presença de águas dos grupos menos expressivos associados a valores aumentados dos componentes pode significar mistura de águas com o SAG.

Reginato e Strieder (2006) indicaram altos índices de Fe e Mn como um problema comumente encontrado na região nordeste do Rio Grande do Sul. Contudo, as águas são

adequadas a diversos usos para abastecimento humano, como abastecimento público e agricultura.

2.7. Condicionantes geológicos dos aquíferos

Como um aquífero basáltico apresenta baixa porosidade primária, suas características de fluxo de água subterrânea dependem da conectividade e da abertura das fraturas presentes. A investigação do comportamento de aquíferos fraturados tem sido usada para reduzir os insucessos na locação de poços para a captação de água nesses aquíferos (Fernandes, 2008).

Os principais fatores estudados como influência na hidráulica são a tectônica, a ocorrência de lineamentos próximos, o manto inconsolidado, a litologia, a topografia e as profundidades de entrada de água nos poços. Desses, entende-se que a tectônica é o que apresenta maior influência na circulação de água, devido à geração de percolação de água (Fernandes, 2008). Abaixo estes fatores são descritos quanto à sua influência, por Fernandes, 2008 e Athayde, 2013.

- **Tectônica:** Controle sobre a abertura, direção e densidade das fraturas, responsável pela conectividade e armazenamento do aquífero. Aquíferos com maior densidade e espessura de fraturas tendem a ser mais produtivos. Reginato e Strieder (2007) consideram os processos tectônicos os principais condicionantes do aquífero.
- **Lineamentos:** Lineamentos que se intersectam apresentam maior conectividade e, conseqüentemente, maiores produções em poços. Fernandes (2008) não encontrou correlação entre produção de poços de densidade de intersecções em basaltos, possivelmente devido à maior permeabilidade dessas rochas corresponder a fraturas subhorizontais. Fraturas verticais são responsáveis pela recarga e pela mistura de águas. De modo geral, a proximidade dos poços com lineamentos tem influência positiva na produção. Reginato e Strieder (2006, 2007) encontraram uma forte relação entre poços produtivos e proximidade a lineamentos NW e NE.
- **Manto inconsolidado:** Importante para a recarga do aquífero, pois a recarga em aquíferos fraturados são de origem local. As áreas mais permeáveis estão relacionadas à base do saprólito e à parte superior da rocha alterada.
- **Litologia:** Rochas que apresentam descontinuidades prévias, como xistosidade e bandamentos, tendem a apresentar maior potencial hidráulico. O modo como as fraturas se dispersam em cada tipo litológico também é relevante.

- Geomorfologia: Poços perfurados em vales tendem a apresentar maior potencial exploratório em relação a terrenos de topo. Isso ocorre devido à maior proximidade do nível d'água e à maior quantidade de fraturas em níveis mais próximos à superfície.
- Profundidade de entrada d'água: O aumento da profundidade diminui a quantidade de fraturas e, como consequência da pressão litostática, as fraturas são menos abertas. Consequentemente, poços com entrada de água mais profundas tendem a ser menos produtivos.

As características de aquíferos de basaltos, a estruturação interna e empilhamento de derrames, juntamente com a intercalação com rochas sedimentares, são os principais condicionantes de suas características (Mineropar, 2013). Regiões com basaltos muito fraturados verticalmente e com intercalações de arenitos e rochas vulcanoclásticas são considerados os aquíferos preferenciais em basaltos continentais (Mineropar, 2013). Reginato e Strieder (2006) citam as estruturas tectônicas rúpteis como principal fator geológico adotado nos estudos de prospecção.

2.8. Aptidão para o consumo humano

A Portaria 2.914 do Ministério da Saúde, de dezembro de 2011 define água para consumo humano como “água destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente de sua origem”. Esta portaria estabelece um padrão de potabilidade envolvendo características químicas, microbiológicas, físicas, organolépticas e de radioatividade para as águas, considerando substâncias nocivas ao consumo humano

A Resolução CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente – nº 396, de 3 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, também oferece diretrizes de potabilidade de água quanto aos componentes que apresentem risco ao consumo humano (Anexo II). A resolução também classifica as águas subterrâneas quanto à sua qualidade e uso. De modo geral, espera-se que um aquífero mais adequado à captação para o consumo humano pertença à Classe Especial e à Classe 1. As definições estão transcritas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Classificação das águas subterrâneas (Brasil, 2008)	
Classe Especial	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas a preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como classe especial
Classe 1	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido as suas características hidrogeoquímicas naturais
Classe 2	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido as suas características hidrogeoquímicas naturais;
Classe 3	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido as suas características hidrogeoquímicas naturais
Classe 4	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo
Classe 5	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não tem requisitos de qualidade para uso

2.9. Outros Aquíferos fraturados no mundo

2.9.1. Deccan Traps

Datadas do início do Eoceno, as *Deccan traps* ocupam uma área de cerca de 500.000 km² entre o Oeste, o Sul e o Centro da Índia. São derrames basálticos de composição predominantemente toleítica, horizontais a subhorizontais. Com grande distribuição lateral, os fluxos individuais têm uma média de 15 m de espessura, que variam de menos de 1 m até cerca de 35 m. A espessura de pacote é bastante variável, partindo de 150 cm na região Leste das traps e chegando a 2.000 m de espessura próximo a Bombay (Singhal, 1997).

Características hidrogeológicas semelhantes outros fluxos basálticos, com porosidade primária ocorrendo devido a vesículas, contatos de fluxos e tubos de lava e porosidade secundária desenvolvida a fraturas e juntas (Singhal, 1997). Presença de disjunções pouco espaçadas, assim como dos fluxos, facilitam a percolação de água e garantem o suprimento

adequado de água. As águas ficam preferencialmente retidas em zonas de porosidade secundária, relativa às disjunções, às fraturas e ao intemperismo, sendo a frequência e a extensão destes parâmetros os principais fatores que tornam as *Deccan traps* um bom reservatório (Maikar e Nilawar, 2014).

Singhal (1997) determinou que capacidade específica das *Deccan traps* varia entre 5×10^{-4} e $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

2.9.2. Aquíferos de O'ahu, Havaí

O'ahu é a maior ilha do arquipélago do Havaí, tendo cerca de 960 km² e uma população de aproximadamente 980 mil habitantes e há uma previsão de crescente demanda por água subterrânea (USGS, 2015). As principais fontes de água subterrânea desta ilha são Sistemas Aquíferos de Peral Harbour e Honolulu, aquíferos basálticos localizados no sul da ilha. São, assim como o SASG, heterogêneos e anisotrópicos, com fluxo horizontal preferencial (USGS, 2010)

Os fluxos de lava dos vulcões que deram origem à ilha de O'ahu são os responsáveis pelas estruturas que permitem a formação de aquíferos na região. Ocorrem intrusões de diques de rochas densas e de baixa permeabilidade, que ocorrem principalmente no centro da ilha, que reduzem a permeabilidade geral dos aquíferos. Nos flancos, onde não ocorrem diques, as rochas costumam ter alta permeabilidade e existem corpos laminares de água subterrânea localizados abaixo de água salgada. Existem depósitos sedimentares de baixa permeabilidade confinadas entre camadas vulcânicas de alta permeabilidade (USGS, 2015).

Foram encontrados muitos voláteis orgânicos em aquíferos no Aquífero de Pearl Harbour (Mink e Lau, 1990).

3. Material e Métodos

Este trabalho consiste em definir um método para definição de áreas alvo para captação de água subterrânea. Esta análise é feita a partir da sobreposição cartográfica de dois estudos: um relativo à qualidade hidroquímica e outro relativo à produtividade dos poços. A qualidade hidroquímica da região é estudada a partir do Índice Relativo de Risco – IRR, que correlaciona valores máximos dos principais cátions e ânions determinados pela legislação com os valores encontrados em cada um dos poços estudados. A análise de produtividade é feita a partir dos valores de capacidade específica dos poços. Os dados adquiridos são tratados cartograficamente, com a delimitação de polígonos de características semelhantes para as duas variáveis feitos a partir de lineamentos previamente traçados, e posteriormente intersectados para a definição das características gerais da área.

Os limites do Brasil, seus estados e do SASG foram extraídos do Mapa Hidrogeológico do Brasil (CPRM, 2014).

Os dados georreferenciados utilizados neste estudo estão projetados em coordenadas geográficas, *datum* WGS 84.

3.1. Base de dados

Este trabalho utiliza dados referentes a dois bancos de dados.

O primeiro banco de dados, de Athayde (2013) contém informações referentes a 343 poços tubulares profundos pertencentes à SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, à Prefeitura de Marechal Cândido Rondon, à Prefeitura de Pato Bragado e à Prefeitura de Entre Rios do Oeste (Figura 8). As amostras foram coletadas entre 2007 e 2009 e analisadas quanto aos principais cátions e ânions. Ainda em campo, valores de pH, temperatura e condutividade elétrica foram analisados (Athayde, 2013). Os métodos utilizados para as análises químicas estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros analisados e métodos analíticos conforme a rotina do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas - Universidade Federal do Paraná (Continua)	
Parâmetro	Método Analítico LPH
pH	Potenciométrico
Condutividade	-
Turbidez	Método Nefelométrico
Cor	Colorímetro
Cloretos	Titulométrico - Nitrato de mercúrio
Sulfatos	Turbidimétrico
Fluoretos	Colorimétrico - Spadnss
Fosfatos	Colorimétrico –Ácido Ascórbico
Nitritos	Colorimétrico
Nitratos	Redução pelo Cádmio
Nitrogênio total	Kjeldahl
Nitrogênio orgânico	
Nitrogênio amoniacal	Fenato
Sólidos Totais	Gravimétrico
Sólidos Suspensos	
Sólidos Totais Dissolvidos	
Alcalinidade Total	Titulométrico
Alcalinidade à fenolftaleína	
Carbonatos	
Bicarbonatos	
Hidróxidos	
Dióxido de Carbono livre	Titulométrico
Acidez	
Dureza	Titulométrico - EDTA
Cálcio	Titulométrico - EDTA
Magnésio	Titulométrico - EDTA
Sódio	Emissão de chama
Potássio	Emissão de chama

Tabela 3: Parâmetros analisados e métodos analíticos conforme a rotina do Laboratório Pesquisas Hidrogeológicas - Universidade Federal do Paraná (Continuação)	
Parâmetro	Método Analítico LPH
Ferro total	Fenantrolina
Sílica solúvel	Molibdato

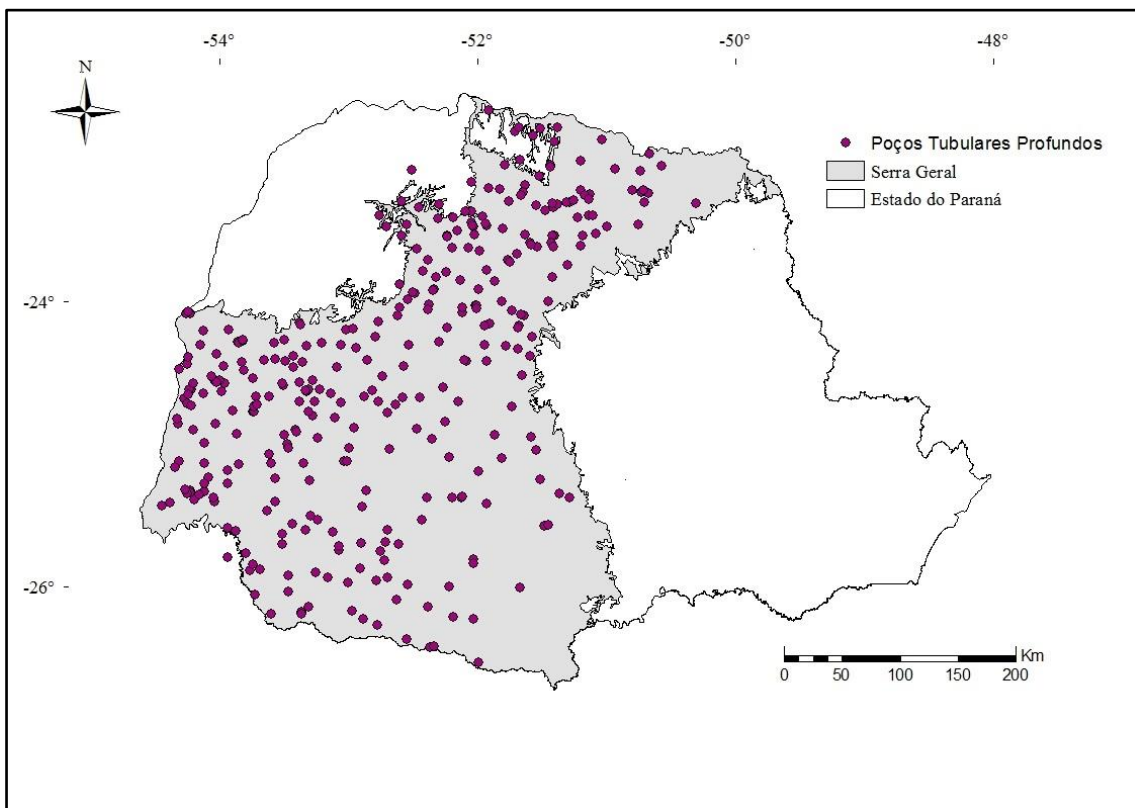


Figura 8: Localização dos 343 poços com dados químicos utilizados no estudo.

O segundo banco de dados conta com informações de coordenadas, profundidade do nível estático e dinâmico, vazão, tempo de bombeamento e espessura do solo, coletadas nas fichas construtivas de 1.626 poços tubulares (Figura 9), que permitirão a avaliação da produtividade em áreas do SASG (Athayde, inédito).

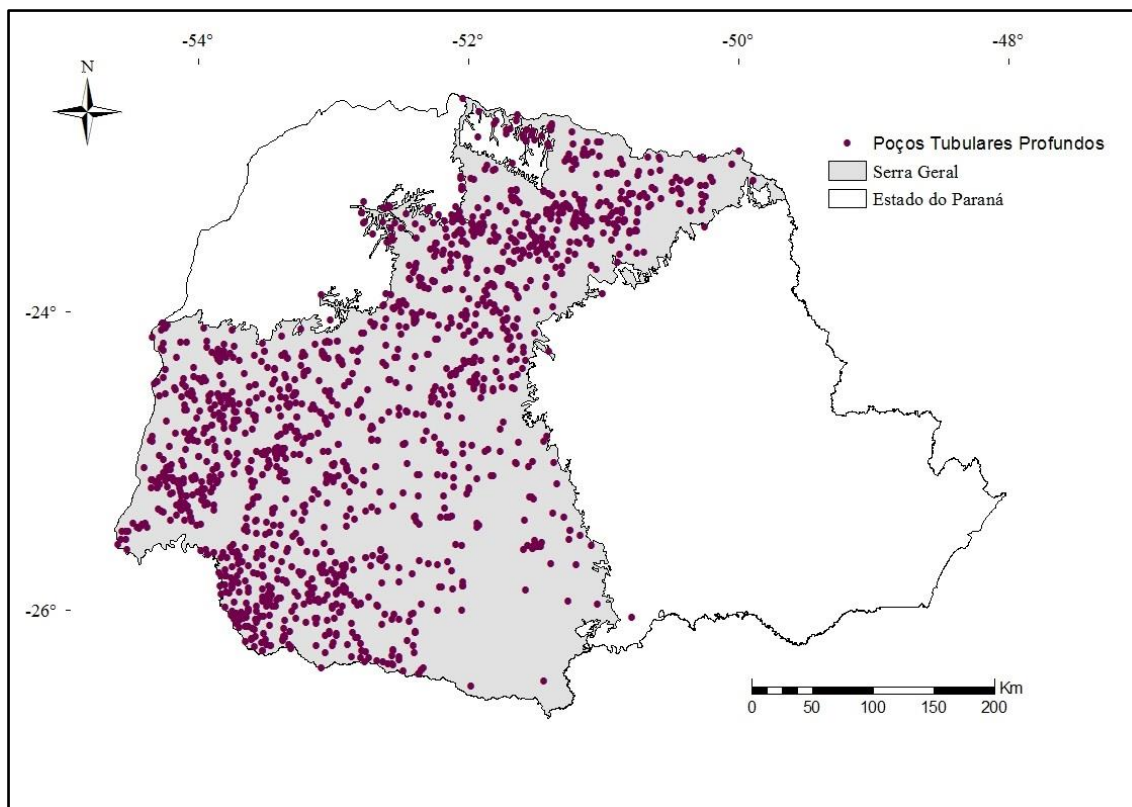


Figura 9 Localização dos 1626 poços utilizados para análise potenciométrica

3.2. Análise de produtividade

A produtividade é caracterizada a partir da análise estatística de dados de vazão e capacidade específica dos dados de poços tubulares do segundo banco de dados citado acima. O cálculo da capacidade específica foi feito baseado nos níveis estáticos registrados nas fichas de perfuração dos poços.

3.3.: Seleção de áreas pelo IRR

Athayde (2014) propõe o método do Índice Relativo de Risco – IRR, utilizado para a análise hidroquímica deste trabalho. O método correlaciona concentrações de parâmetros físico-químicos encontrados nos poços com os valores máximos permitidos para consumo humano encontrados na legislação (Tabela 4) e está descrito abaixo. Neste trabalho, os dados utilizados para análise foram as concentrações de bicarbonato, cálcio, carbonato, cloreto, ferro, fluoreto, fosfato, magnésio, potássio, sílica, sódio e sulfato, a alcalinidade, a condutividade elétrica, a dureza, o pH e o total de sólidos dissolvidos. Os demais dados disponíveis não foram analisados devido à falta de leis disponíveis.

Tabela 4: Parâmetros com os respectivos valores máximos permitidos em (mg/L)			
Parâmetro	Símbolo	VMP (mg/L)	Referência
Cloreto	Cl-	250	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Condutividade elétrica		2.500 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a 20° C)	DC 98/83/CE (UE, 1998)
Dureza		500	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Ferro	Fe	0,3	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Fluoreto	F-	1,5	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Nitrito	N-NO ₃	1	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Nitrato	N-NO ₂	40	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
pH		6,5-8,5	USEPA (2009)
Sódio	Na	200	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Sulfato	SO ₄	250	PRT 2914/11 (Brasil,2011)
Total de sólidos dissolvidos		1000	PRT 2914/11 (Brasil,2011)

Os valores obtidos para cada parâmetro são comparados com valores de referência definidos através da legislação nacional e internacional para a potabilidade da água. Estes valores de referência são chamados Valores Máximos Permitidos (VMP) e são preferencialmente retirados de fontes nacionais, optando-se por internacionais apenas quando não houver orientações nacionais. Dentre os parâmetros inicialmente propostos, cinco não foram encontrados na legislação e não são utilizados no cálculo do IRR (bicarbonato, carbonato, fosfato, potássio e sílica). Os valores de pH, por terem como parâmetro um intervalo de valores e não um valor específico e por serem facilmente corrigidos por tratamentos simples, também não é utilizado no cálculo.

Poços que apresentem qualquer parâmetro acima do seu respectivo VMP para consumo humano já apresentam risco à saúde e foram eliminados da análise.

O IR para cada poço é calculado através da soma dos Quocientes (Q) da concentração de cada parâmetro com o respectivo VMP. O IR é calculado para cada um dos 343 poços do estudo e, após o tratamento estatístico o IRR é definido. A Figura 10 demonstra o funcionamento da técnica.

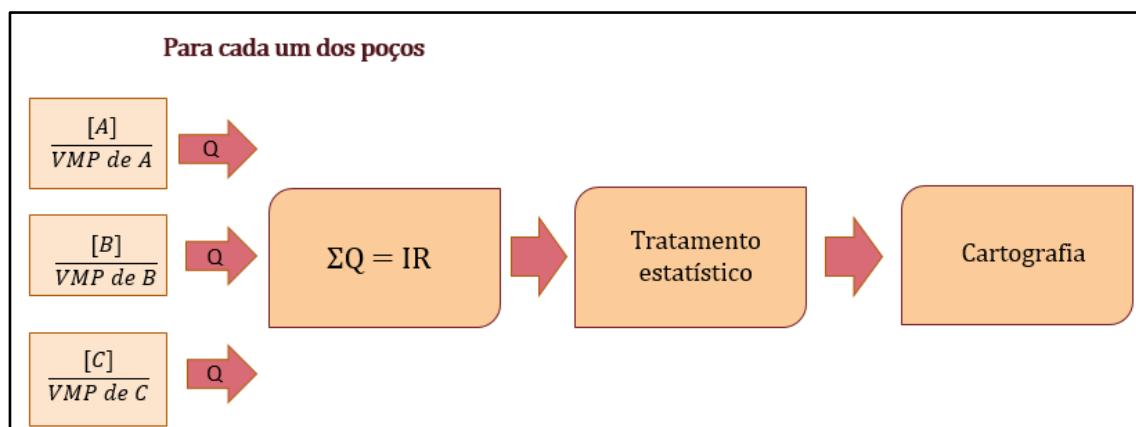


Figura 10: Cálculo do IRR. [A], [B] e [C] – concentrações dos parâmetros. VMP – Valores máximos permitidos pela legislação de cada parâmetro. Q – Quociente. O somatório de todos os valores de Q resultará em um Índice de Risco (IR) (Athayde, 2014).

3.4. Análise estatística

A análise estatística forneceu suporte para a aplicação cartográfica deste trabalho. A partir dela foi possível definir uma hierarquia dos poços, indicando assim as áreas a serem demarcadas como de maior ou menor importância.

Foram calculados os valores mínimos e máximos, a média e a mediana para os valores de IRR e de capacidade específica. Após, os parâmetros foram divididos em percentis, uma representação comumente utilizada em Atlas Geoquímicos, como os da Grã-Bretanha e da Finlândia, e utilizada por serviços geológicos ao redor do mundo. Este trabalho aplica a escala de percentis escolhida para o Atlas Geoquímico do Paraná (Licht, 2001), que utilizou para suas linhas de contorno o valor mínimo, os percentis 5, 10, 15, 25, 40, 50, 65, 75, 85, 90, 91, 93, 95, 97, 98 e 99 e o valor máximo das variáveis, permitindo uma boa aplicação gráfica dos dados.

3.4.1. Aplicação cartográfica

Os mapas são produzidos no programa *ArcMap* 10.1. Eles possibilitam a visualização dos parâmetros isolado, a análise dos tratamentos estatísticos e a correlação de dados.

A representação cartográfica dos percentis utiliza a mesma escala de cores utilizada por Licht (2001) no Atlas Geoquímico do Paraná, que tem como objetivo ressaltar anomalias negativas e positivas. A escala cromática está demonstrada abaixo na Figura 11, e representa os valores mais baixos com cores frias e passa para cores quentes gradativamente com o aumento dos valores. A simbologia varia também em tamanho da representação, aumentando proporcionalmente aos valores.

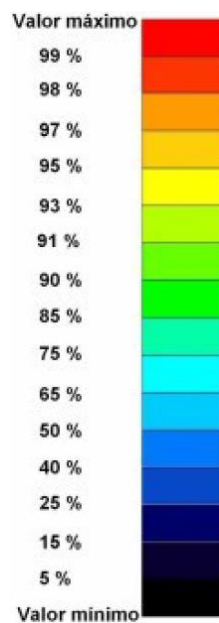


Figura 11: Escala cromática para representação cartográfica de percentis. Tons mais frios representam valores menores de percentis, enquanto tons gradativamente mais quentes representam valores maiores.

3.5. Definição dos polígonos

A figura 12 apresenta os lineamentos traçados em escala 1:600.000 elaborado por Athayde (2012), a partir de modelo digital de terreno – os lineamentos só estão traçados caso tenham sido identificados em todas as pseudoiluminações utilizadas (direções azimutais 45, 315, 0 e 90°). Este conjunto de lineamentos serviu de base para a divisão da área de estudo em polígonos de características semelhantes de qualidade hidroquímica ou produtividade.

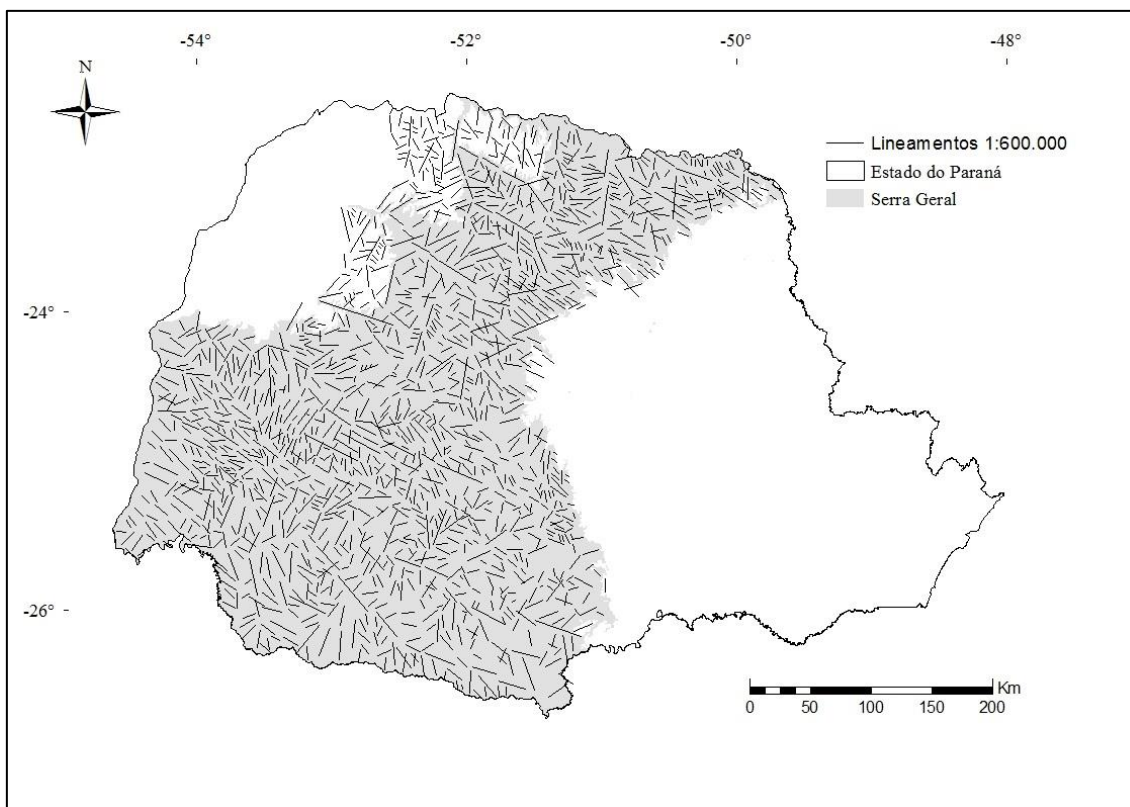


Figura 12: Lineamentos utilizados para a definição dos polígonos. Os lineamentos foram traçados em escala 1:600.000 a partir da base altimétrica SRTM. (Modificado de Athayde, 2013).

A análise da relação dos dados dos poços com os lineamentos foi feita em escala 1:600.000. Áreas contidas entre lineamentos que apresentassem características semelhantes de qualidade de água ou capacidade específica foram delimitadas, isolando-se locais de acordo com sua característica geral. Aglomerados que possuíssem também muitos poços de qualidade oposta próximos não foram delimitados.

Após a definição dos polígonos iniciais, foi utilizada a ferramenta de intersecção do programa *ArcGIS*, localizada dentro da caixa de ferramentas de sobreposição, para definir áreas que fossem comuns entre os polígonos de IRR e produtividade. Isto permitiu definir quais as áreas que merecem maior atenção para a prospecção de água subterrânea.

4. Resultados e Discussão

4.1. Produtividade

Dos 1626 poços analisados, nove não apresentavam dados de capacidade específica (Q/s), e foram deixadas de fora do cálculo dos dados estatísticos. O valor mínimo de capacidade específica encontrado foi de 0,005299 m³/h/m, enquanto o máximo foi de 45 m³/h/m. O valor médio encontrado é de 1,7980 m³/h/m e a mediana é de 0,537346 m³/h/m. Os poços que apresentavam uma anomalia positiva, ou seja, estavam acima do percentil 75, apresentavam valores de Q/s superiores a 1,625 m³/h/m, enquanto em poços com anomalia negativa (abaixo do percentil 25) ocorreram valores de Q/s inferiores a 0,161 m³/h/m. Abaixo, na tabela 5, os valores encontrados para cada percentil analisado.

Tabela 5: Valores de percentil encontrados para os 1260 poços					
Percentil	(Q/s)	Percentil	(Q/s)	Percentil	(Q/s)
1	0,0053	50	0,5373	93	5,5829
5	0,0293	65	1,0197	95	7,1818
10	0,0591	75	1,6230	97	10,8297
15	0,0830	85	3,0000	98	14,1587
25	0,1610	90	4,2165	99	20,5250
40	0,3575	91	4,6086	100	45,0000

Na região Sudeste do estado existem poucos poços analisados, contudo percebe-se uma distribuição regular no restante da região do SASG. Com a classificação dos poços nos percentis de Capacidade Específica, é possível perceber uma divisão clara entre uma zona mais produtiva (Noroeste) e uma menos produtiva (Sudeste). A Figura 13 mostra a distribuição dos poços, já com os valores de capacidade específica representados de acordo com os percentis aos quais pertencem. Esta caracterização de produtividade é muito semelhante à encontrada por Athayde (2013), que constatou que as províncias hidroestruturais do Noroeste do aquífero definidas em seu trabalho apresentavam os maiores índices de produtividade.

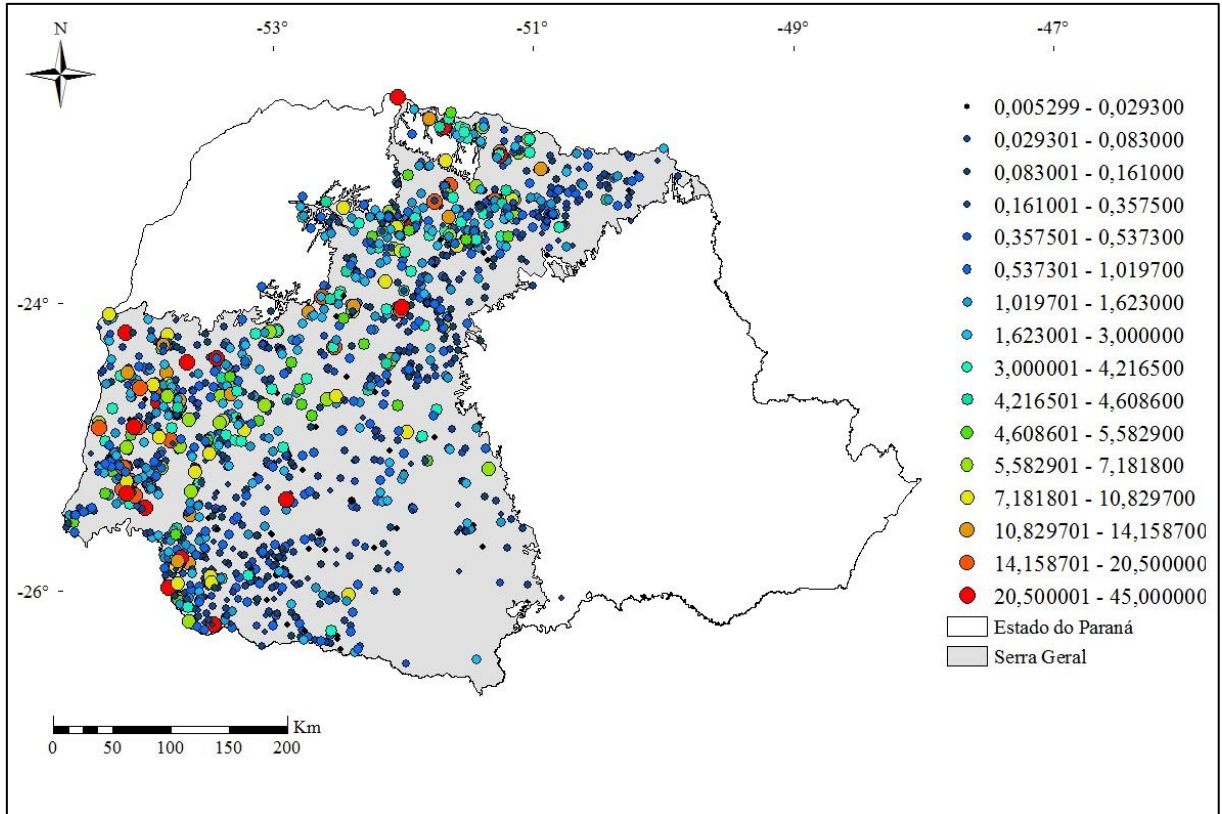


Figura 13 Capacidades específicas dos poços estudados.

Ao isolarem-se os poços com valores de capacidade específica pertencentes ao terceiro quartil, é possível comprovar a ocorrência maior destes na porção noroeste do SASG, em especial próximo às margens do aquífero no Paraná. A partir da sobreposição dos dados de capacidade específica com os dados de bacias hidrográficas estaduais, é perceptível um grande aglomerado de poços com produtividade alta na área relativa à Bacia Hidrográfica do Paraná 3 (Fig. 14). A tabela 6 demonstra que as bacias do Paraná 3 e do Piquiri apresentam a números semelhantes quanto aos poços mais produtivos. Uma análise da imagem de sobreposição de poços abaixo ao primeiro quartil (Fig. 15) percebe-se que eles estão distribuídos ao longo de toda a área, contudo os dados apresentados na tabela 6 demonstram uma forte prevalência destes poços na Bacia do Iguçu.

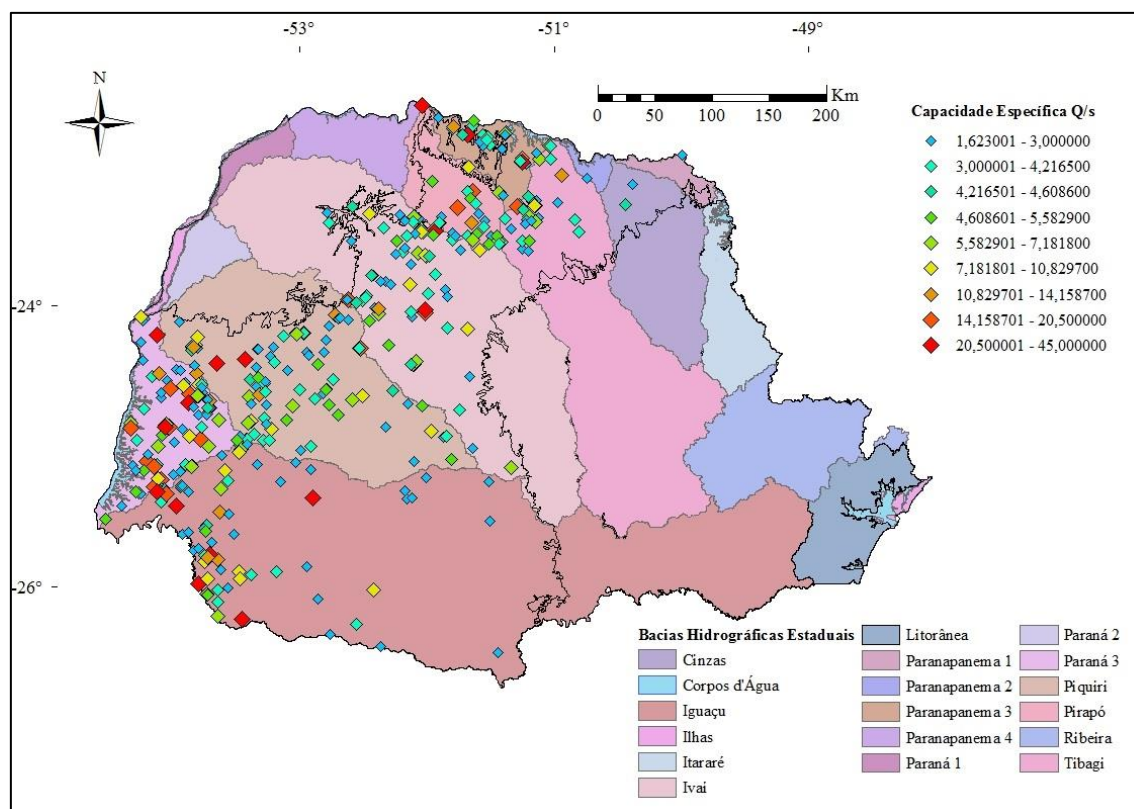


Figura 14 Relação dos poços pertencentes ao terceiro quartil e as bacias hidrográficas estaduais do estado do Paraná.

Tabela 6: Comparação de dados de produtividade com as Bacias Estaduais.

Bacia Estadual	Mínimo	Média	Máximo	Abaixo do 1º Quartil	Acima do 3º Quartil	Total de poços
Iguaçu	0,0053	1,3203	45	182	68	472
Paraná 3	0,0072	2,6729	35,0877	29	80	222
Piquiri	0,0113	1,8456	27,2727	41	83	268
Ivaí	0,0099	1,7412	42,5	74	78	324
Pirapó	0,0055	2,1647	34,2796	24	27	94
Paranapanema 3	0,0194	3,4345	39,823	6	27	54
Tibagi	0,0092	1,5431	15,6006	35	43	141
Paranapanema 2	0,0436	0,7538	2,3126	2	1	9
Cinzas	0,015	0,5975	4,4	9	2	24
Paranapanema 1	0,0489	0,6623	2,0408	1	1	5

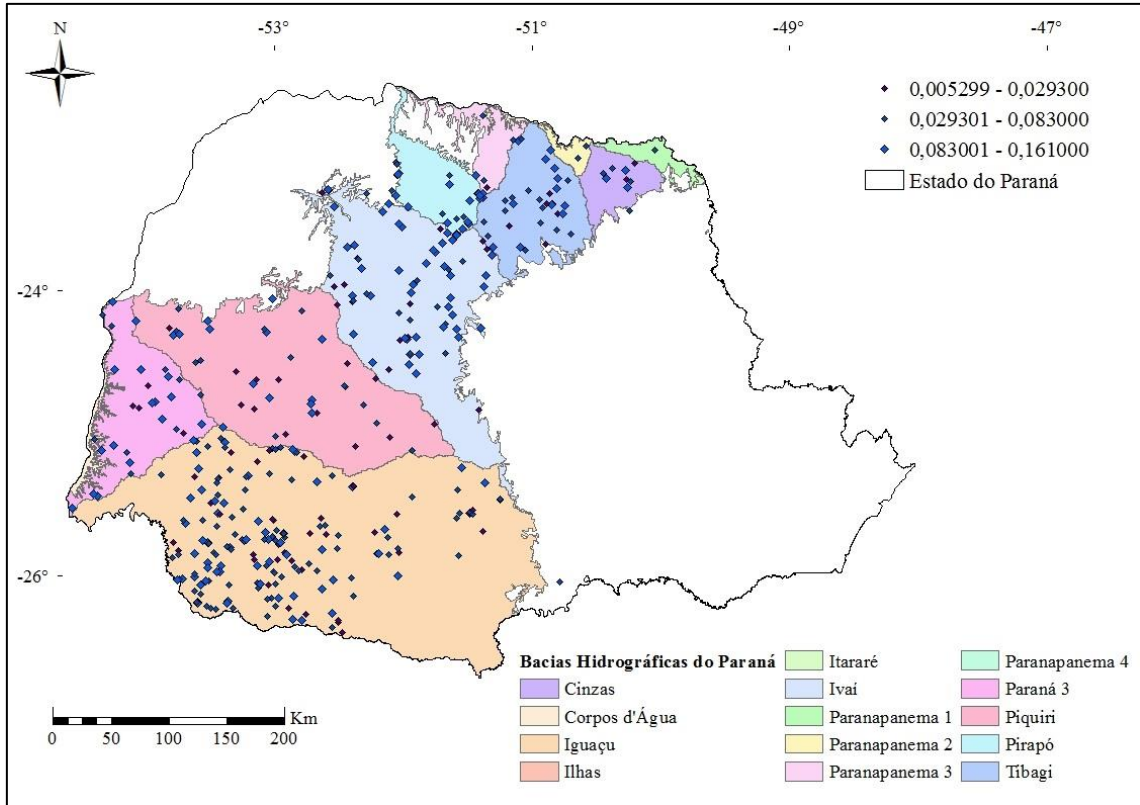


Figura 15: Mapa representativo da relação dos poços abaixo do primeiro quartil com as Bacias Estaduais

A análise cartográfica dos dados isolados em percentis acima do terceiro quartil permite observar uma progressiva ocorrência de poços mais produtivos nas porções mais oeste/sudoeste e norte do SASG.

Ao isolarmos os poços com percentil menor ou igual a 15 (Fig. 17), percebe-se o início de uma tendência a ocorrerem na porção sul/sudeste do SASG, seguindo o mesmo lineamento descrito anteriormente na figura 12. Contudo, a distribuição é visivelmente mais ampla do que quando comparado aos poços com valores maiores ou iguais ao terceiro quartil.

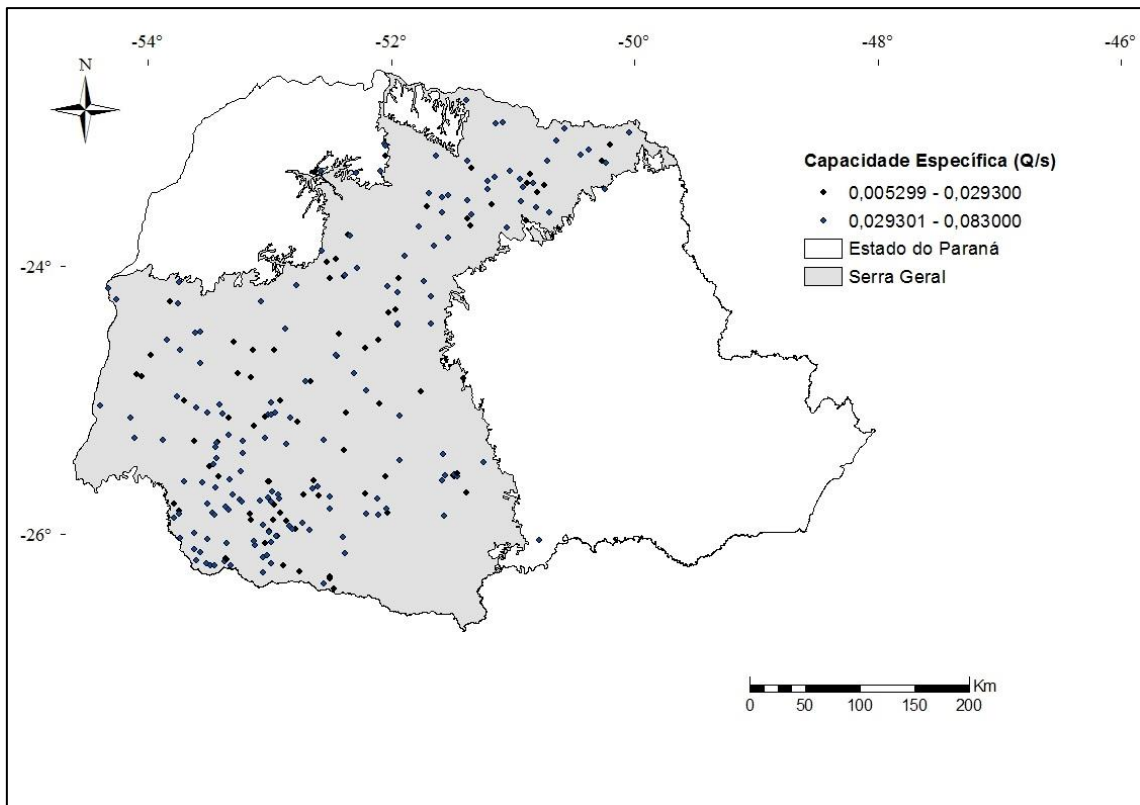


Figura 16: Poços tubulares profundos com valores de capacidade específica dentro do percentil 15

A tabela 7 apresenta dados relativos à capacidade específica com os compartimentos hidroestruturais de Athayde (2013). Percebe-se uma grande prevalência de poços produtivos no Compartimento Foz do Iguaçu, distribuídos por toda a área, e no compartimento Maringá. Embora ocorram quantidades semelhantes de poços altamente produtivos em ambos os compartimentos, o Compartimento Maringá contém também um valor semelhante de poços pouco produtivos, evidenciando a qualidade do Foz do Iguaçu. Os compartimentos de Campo Mourão e Maringá têm uma tendência a poços altamente produtivos em suas regiões centrais a Noroeste. A maior parte dos poços de menor produtividade está localizada no compartimento de Foz do Areia, onde poços acima do terceiro quartil ocorrem em menor quantidade e estão escassamente distribuídos pelo compartimento. Quando observamos em um mapa os poços acima do percentil 90, percebemos que eles são muito restritos no Compartimento da Foz da Areia, ocorrendo principalmente próximos ao limite com o Compartimento Foz do Iguaçu e na região Sudoeste. As figuras 18 a 20 mostram esta comparação.

Compartimento	Mínimo	Média	Máximo	Abaixo do 1º Quartil	Acima do 3º Quartil	Total de poços
Foz do Iguaçu	0,0072	2,5836	35,0877	45	119	344
Foz do Areia	0,0053	1,2302	45	197	78	533
Campo Mourão	0,0099	1,7032	42,5	57	76	279
Maringá	0,0055	1,9524	39,823	104	133	455

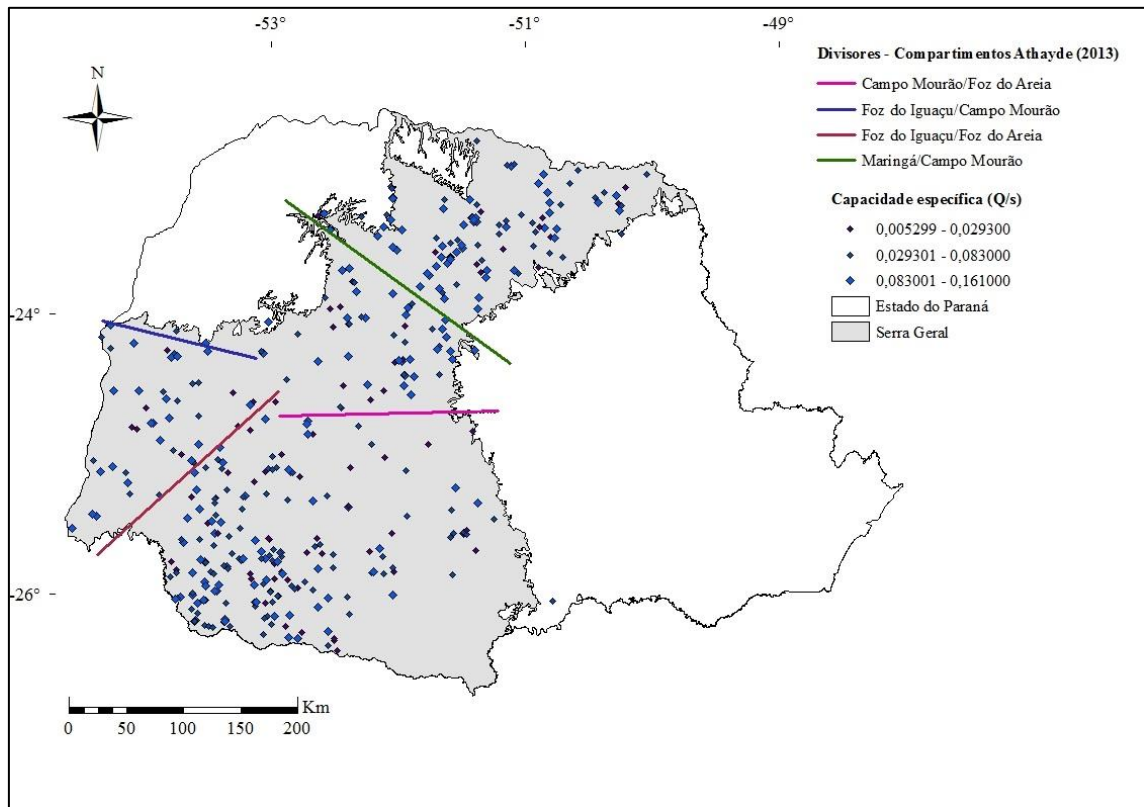


Figura 17: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica abaixo do percentil 25

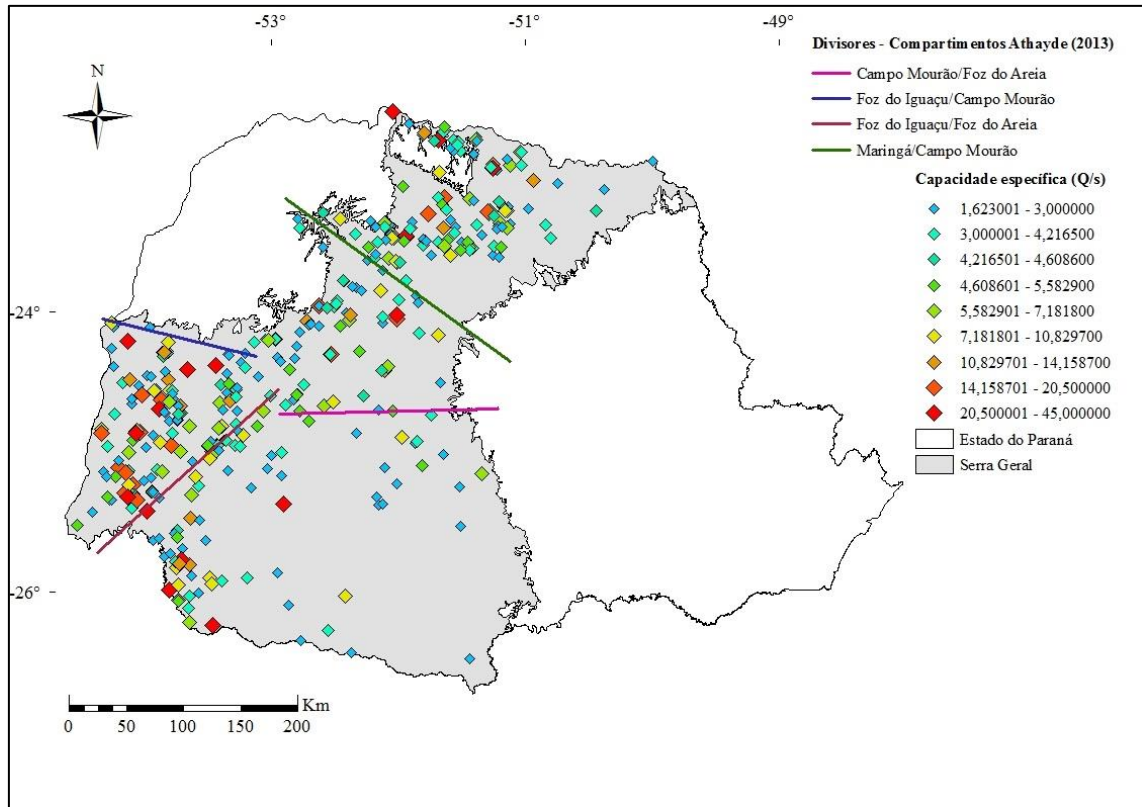


Figura 18: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica acima do terceiro quartil

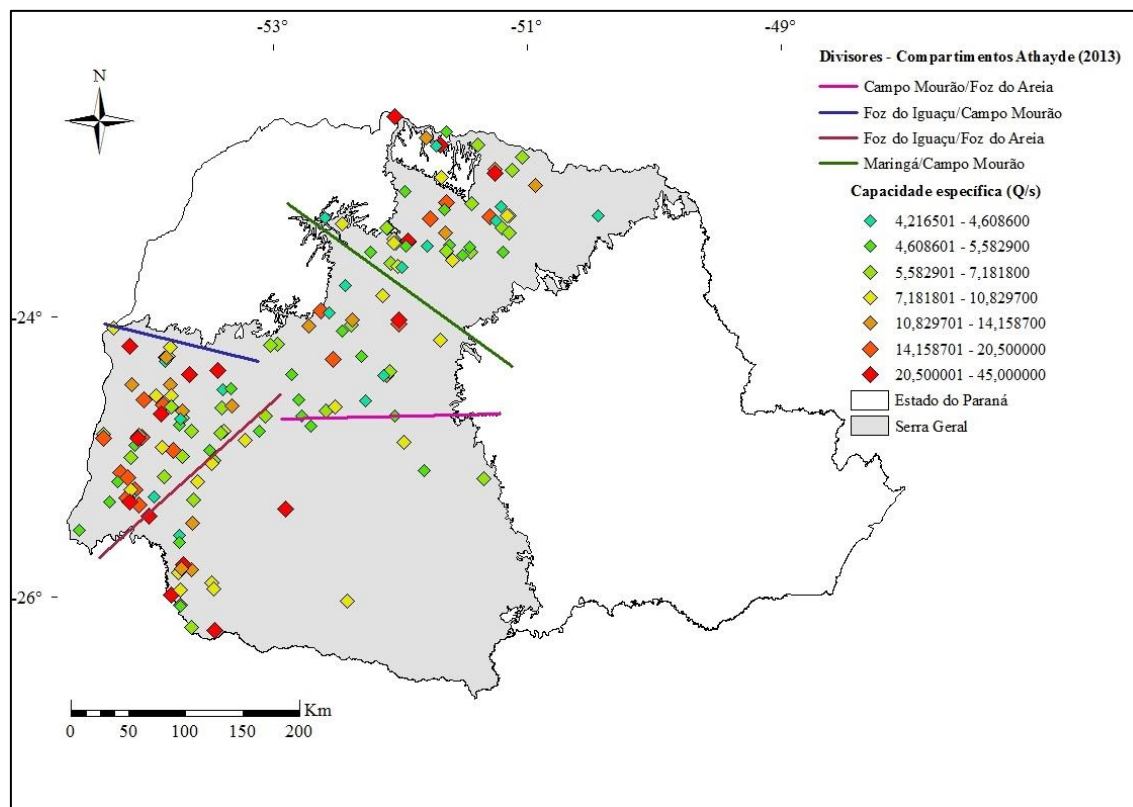


Figura 19: Comparação entre os compartimentos definidos por Athayde (2013) e os poços com capacidade específica abaixo do percentil 90

4.2. Índice Relativo de Risco

Dos 343 poços analisados, doze apresentaram parâmetros com valores acima dos respectivos VMP e foram excluídos dos cálculos estatísticos. Dentre estes poços, sete apresentaram valores acima dos VMP fluoretos, três de ferro, dois de sódio, dois de sulfatos, um de nitratos e um de total de sólidos dissolvidos. Dez poços apresentam apenas um parâmetro alterado, uma apresenta dois parâmetros e uma apresenta quatro. A distribuição geográfica dos poços em risco não apresenta um padrão e eles ocorrem em todas as regiões do SASG.

Dos poços analisados, 93 mostraram valores de pH fora da faixa de potabilidade, contudo, devido a facilidade de correção desse problema, este parâmetro foi desprezado como fator de corte.

O cálculo do IRR e a análise estatística foram feitos a partir dos resultados hidroquímicos de 331 poços tubulares profundos que não apresentavam características de não potabilidade. Os valores encontrados de IRR variam de 0,267580 a 1,920103, com uma média de 0,679838 e uma mediana de 0,62385. Os valores de corte do primeiro e do terceiro quartis foram, respectivamente, 0,415525 e 0,833623. A tabela 8 demonstra os valores encontrados nos

cálculos de percentil. A figura 21 mostra a distribuição geográfica dos poços analisados e seus respectivos índices de risco.

Percentil	(Q/s)	Percentil	(Q/s)	Percentil	(Q/s)
Mínimo	0,2676	P50	0,6238	P93	1,2743
P05	0,2605	P65	0,7200	P95	1,4105
P10	0,3121	P75	0,8336	P97	1,5704
P15	0,3562	P85	1,0181	P98	1,6136
P25	0,4155	P90	1,1517	P99	1,7070
P40	0,5560	P91	1,1826	Máximo	1,9501

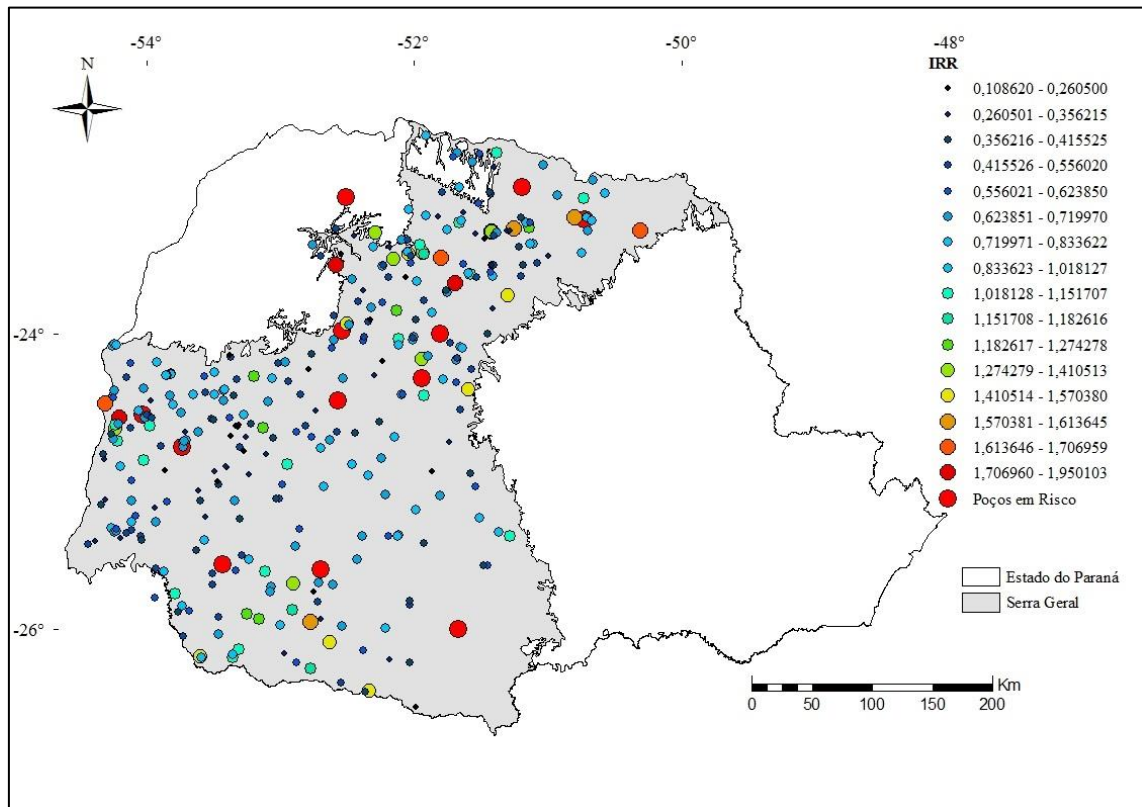


Figura 20 Mapa apresentando os 343 poços com análises hidroquímicas e seus respectivos riscos.

Ao analisar a relação da distribuição dos poços com o seu índice de risco, observam-se três áreas com maior ocorrência de poços com risco mais alto (Fig. 22). A primeira ocorrência é no Norte do SASG, principalmente na região correspondente à Bacia do Ivaí, que contém poços de risco mais elevado por toda a sua área dentro do SASG. A segunda ocorrência é na porção Sul do SASG, também bem a Sul da Bacia do Iguaçu. A terceira e última aglomeração é percebida a Oeste do SASG, atingindo a porção Norte-Noroeste da Bacia do Paraná 3. Esta última, contudo, apresenta na sua porção Centro-Sul uma grande quantidade de poços com

baixo índice de risco. A porção central do aquífero, correspondente à Bacia do Piquiri, contém a maior concentração de poços com baixo índice de risco de toda a área estudada (Fig. 23). A tabela 9 compara os valores de IRR com as bacias estaduais que ocorrem sobre o SASG e corrobora com as análises feitas através do mapa, com número mais elevado de poços acima do terceiro quartil nas bacias do Iguaçu, Ivaí e Paraná 3.

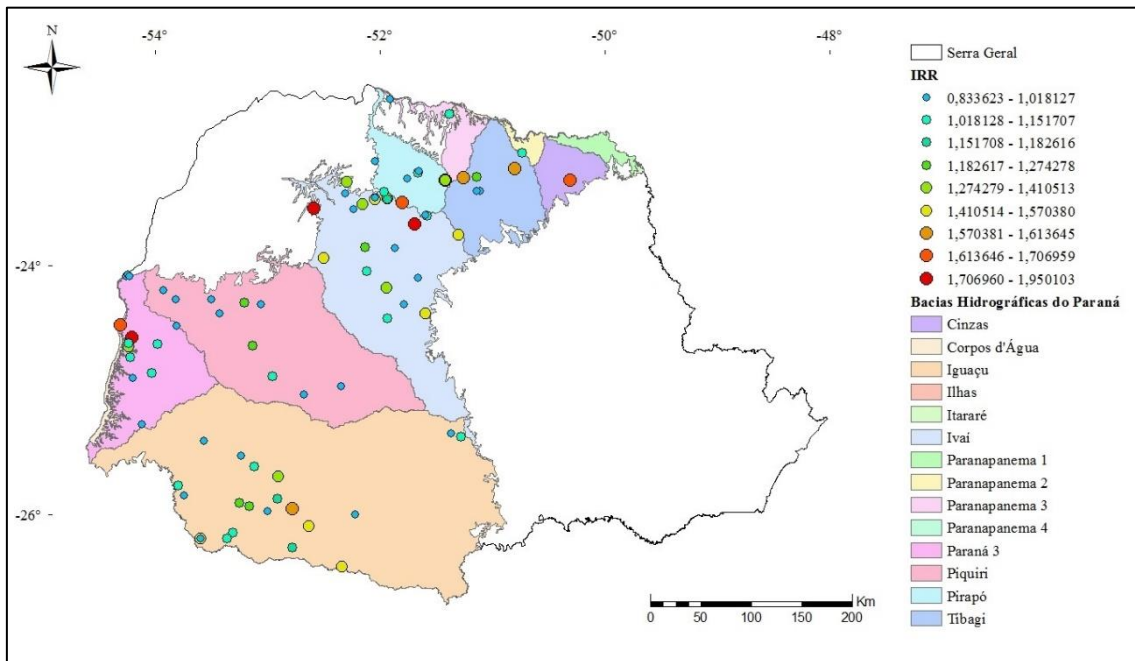


Figura 21 Poços tubulares profundos com valores de IRR pertencentes ao terceiro quartil e sua relação com as bacias estaduais.

Tabela 9: Relação dos valores de IRR com as Bacias Hidrográficas Estaduais (Continua)							
Bacia Estadual	Mínimo	Média	Máximo	Abaixo do 1º Quartil	Acima do 3º Quartil	Total de poços	Poços em Risco
Iguaçu	0,2141	0,6775	1,6031	22	21	81	3
Paraná 3	0,2590	0,6828	1,7092	11	13	51	2
Piquiri	0,1086	0,5814	1,2165	21	10	68	1

Tabela 9: Relação dos valores de IRR com as Bacias Hidrográficas Estaduais (Continuação)							
Ivaí	0,1660	0,7442	1,9501	14	21	73	4
Pirapó	0,2199	0,7677	1,7096	4	8	20	0
Paranapanema 3	0,2980	0,61822	1,0431	2	2	9	1
Tibagi	0,2786	0,6559	1,5943	9	5	24	1
Paranapanema 2	0,6272	0,8326	1,0775	0	1	3	0
Cinzas	1,6295	1,6295	1,6295	0	1	1	0

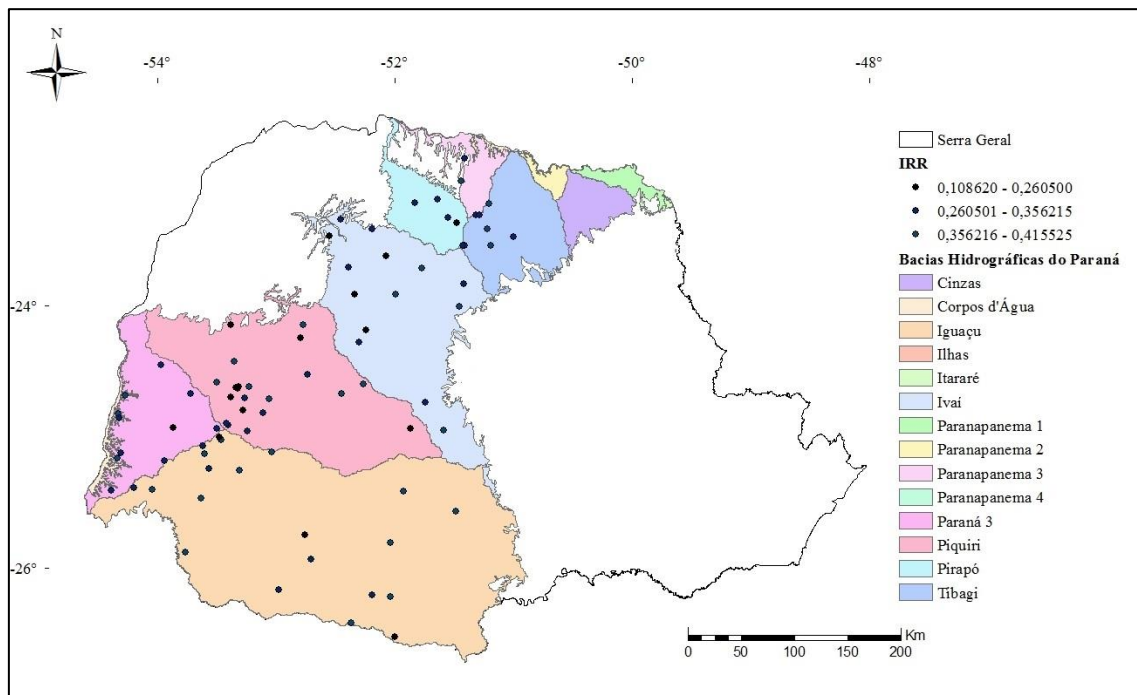


Figura 22: Poços tubulares profundos com valores de IRR pertencentes ao primeiro quartil e sua relação com as bacias estaduais

Comparando-se os valores de IRR com os compartimentos hidroestruturais propostos por Athayde (2013) (Tabela 10), percebe-se que o Compartimento Maringá, localizado na porção Norte do SASG apresenta a maior concentração de poços com risco elevado (acima do

terceiro quartil), que estão distribuídos ao longo de toda a sua área. No Compartimento Campo Mourão, porção central do aquífero, os poços com risco mais elevado estão localizados de modo geral mais à Nordeste do compartimento, com poços de baixo risco distribuídos por toda a área. Com maior área e menor concentração e poços, há um acúmulo de poços com risco maior no Sul do Compartimento do Foz do Areia, tendo no seu limite com o Compartimento Foz do Iguaçu uma porção representativa de poços de baixo risco. Este último, localizado na porção Oeste do SASG, apresenta a maior concentração de poços com baixo risco, ocorrendo um aglomerado de elevado IRR no extremo Oeste, próximo ao limite com o Paraguai (Fig. 24). A tabela 10 ainda demonstra a ampla distribuição de poços de baixo IRR por todos os compartimentos.

Compartimento	Mínimo	Média	Máximo	Abaixo do 1º Quartil	Acima do 3º Quartil	Poços em risco	Total de poços
Foz do Iguaçu	0,1086	0,6278	1,7092	25	18	2	89
Foz do Areia	0,2141	0,6839	1,6031	25	24	3	90
Campo Mourão	0,1660	0,6553	1,9501	12	11	4	63
Maringá	0,2199	0,7492	1,8516	21	30	3	88

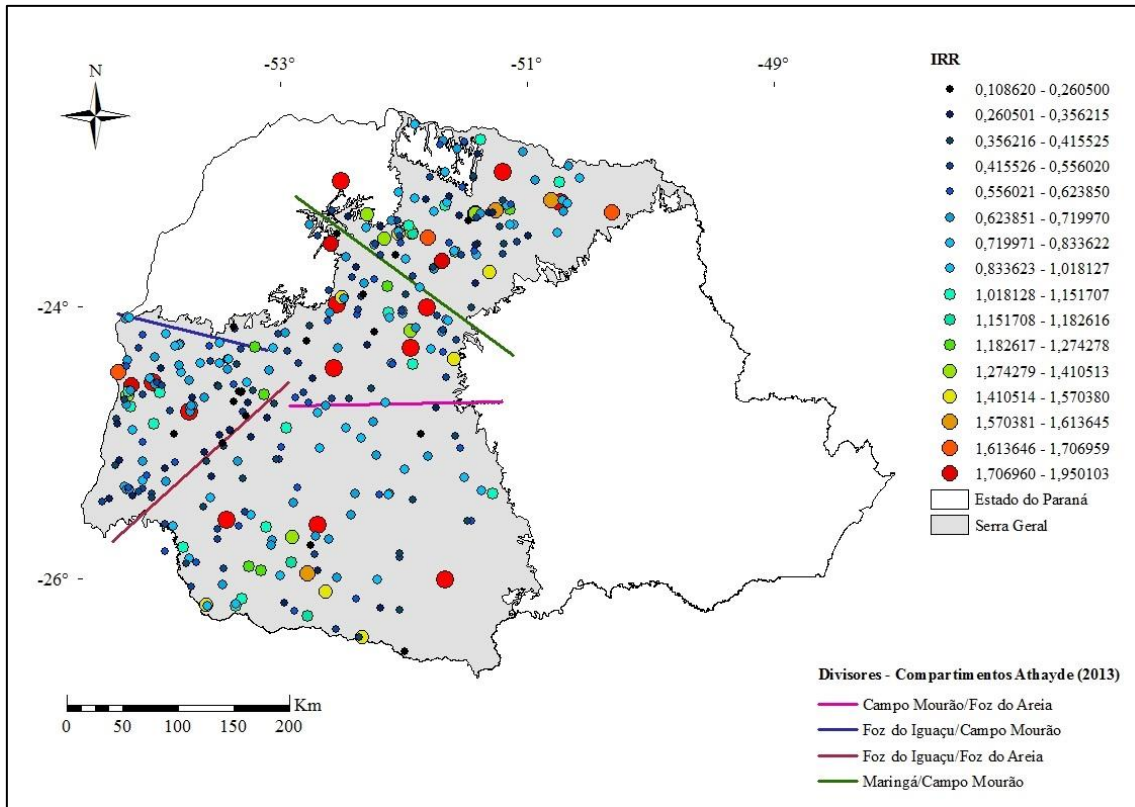


Figura 23: Comparação dos compartimentos hidroestruturais de Athayde (2013) com os valores de IRR

4.3. Definição de polígonos

As figuras 25 e 26 abaixo mostram os polígonos definidos a partir de aglomerações de poços com características semelhantes. Foi possível definir um maior número de polígonos de produtividade do que de IRR, isso ocorreu devido ao maior número de poços analisados para produtividade e pela ocorrência mais homogênea das características.

É perceptível que grande parte da porção Noroeste do SASG no estado do Paraná é composta por áreas altamente produtivas (Fig. 25), não havendo aglomerados de poços pouco produtivos na região. As áreas não cobertas por polígonos ou não apresentam poços próximos, ou apresentam poços de produtividade mediana. As porções Nordeste e Sul são as grandes áreas com poços de menor produtividade na região de estudo. É interessante ressaltar a maior ocorrência de poços de menor produtividade na região Noroeste, entre os poços mais produtivos, do que o contrário.

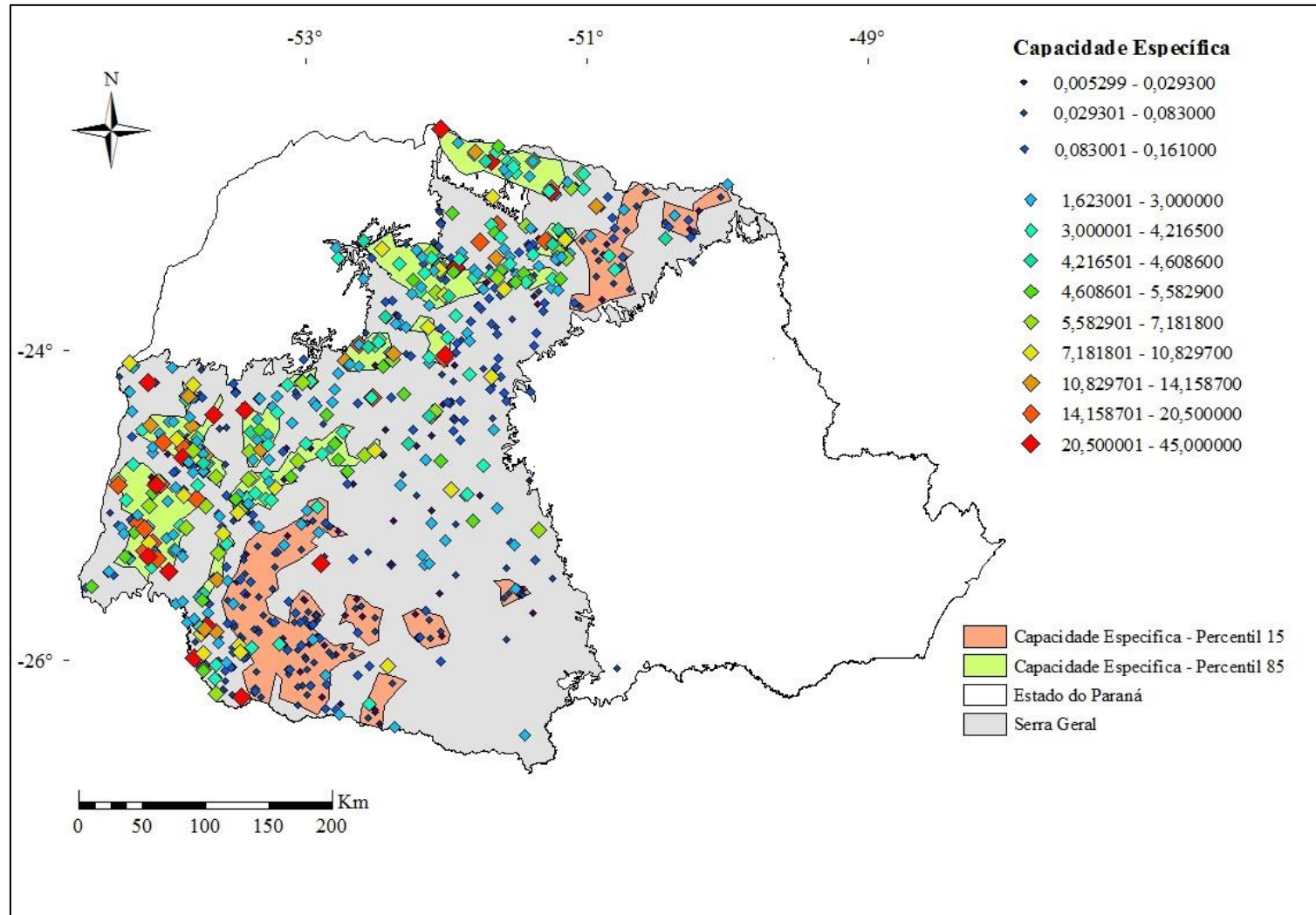


Figura 24: Polígonos definidores de áreas de características semelhantes de produtividade. Os poços de capacidades específicas entre o primeiro e o terceiro quartis foram ocultados para facilitar a visualização.

Quanto ao IRR, o menor número de poços analisados fez com que aglomerados fossem menos comuns e, conseqüentemente, fossem traçados menos polígonos (Fig. 26). É possível observar um número maior de áreas de risco elevado em relação a áreas de risco mais baixo, isso ocorre devido à distribuição dos poços de baixo risco ser mais abrangente, enquanto os poços em risco mais elevado tendem a ocorrer próximos a uma mesma área. Além disso, é provável que exista uma fonte específica de contaminação na área afetada.

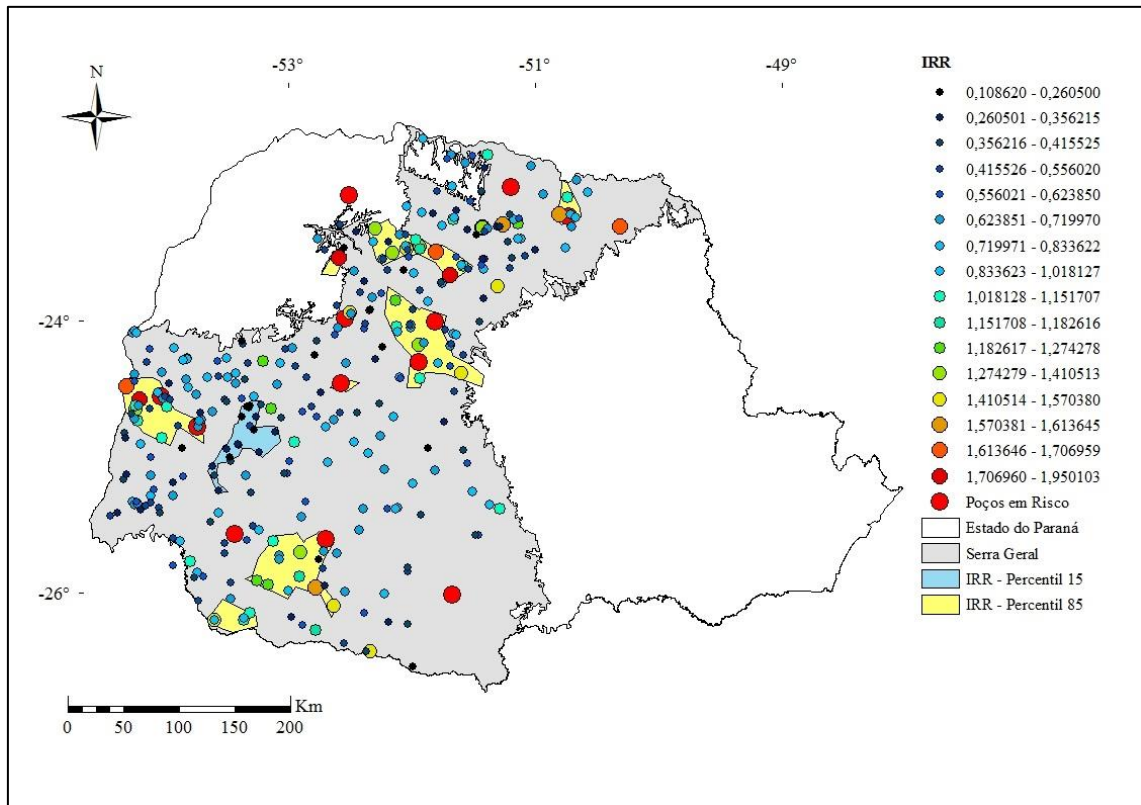


Figura 25: Polígonos definidores de áreas de características semelhantes de IRR.

A figura 27 mostra as diferentes combinações de informações obtidas a partir dos polígonos. Os polígonos verdes representam as intersecções entre polígonos de alta produtividade e de baixo IRR, os polígonos amarelos representam áreas que apesar de apresentarem uma alta produtividade também apresentam elevados valores de IRR, por fim, os polígonos vermelhos representam áreas que apresentam baixos valores de produtividade e altos valores de IRR. Não ocorreram intersecções entre áreas de baixa produtividade e baixo índice de risco. A figura 28 mostra os polígonos isolados.

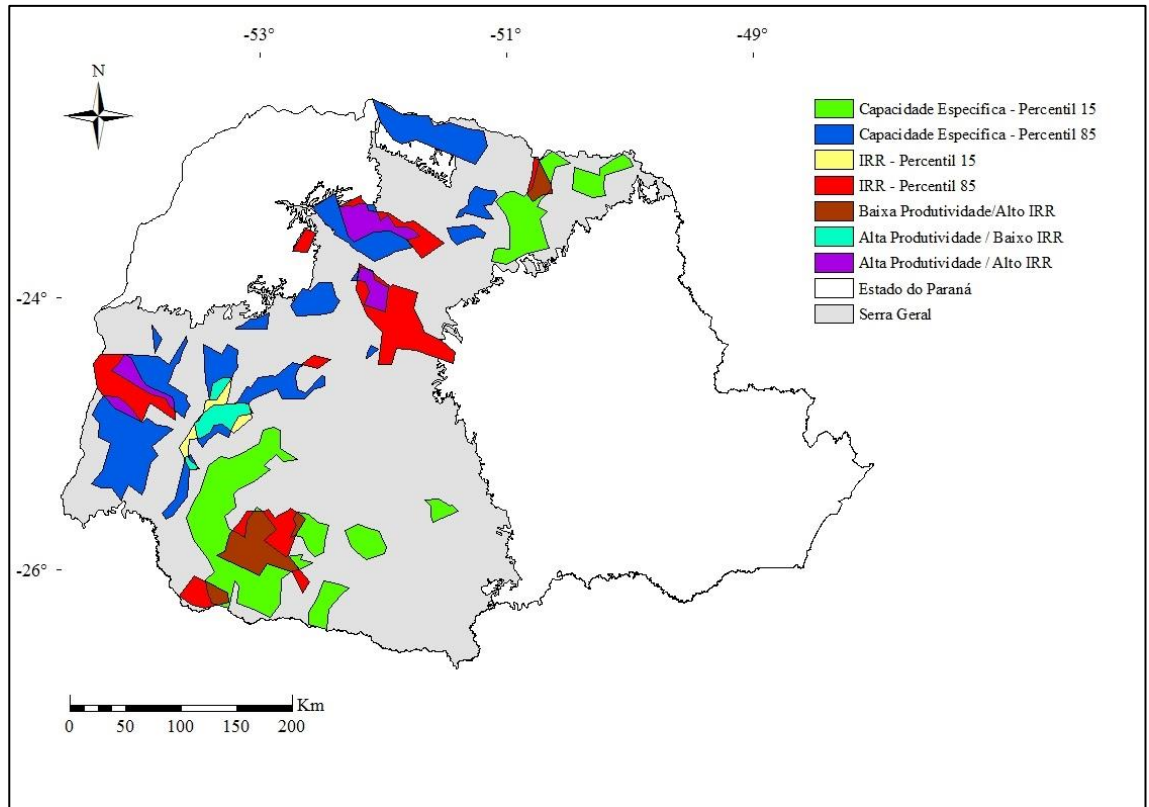


Figura 26: Intersecção dos polígonos de IRR e produtividade

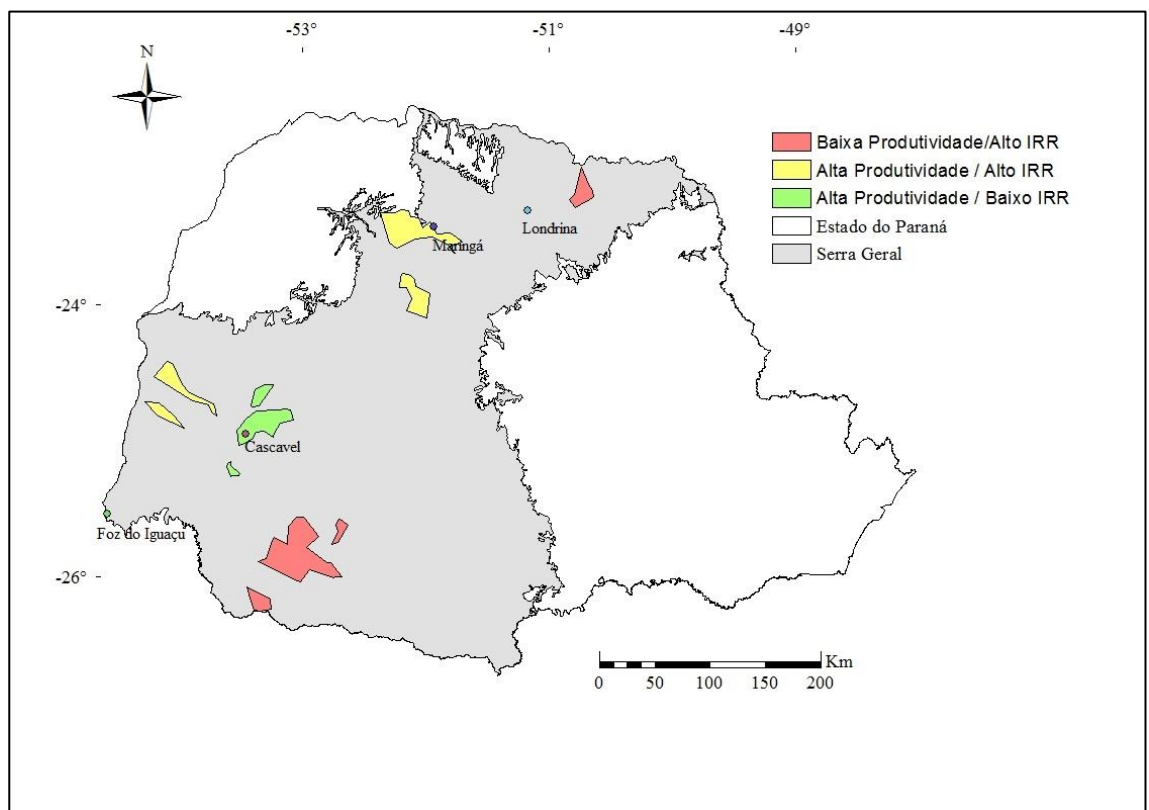


Figura 27: Polígonos de intersecção de dados de produtividade e de IRR isolados.

Os dados apresentados na figura 28 podem ser aplicados na gestão de recursos hídricos. Polígonos caracterizados por apresentarem alta produtividade e baixo risco são áreas mais propícias à captação de água. Áreas com alta produtividade e alto IRR são importantes pois indicam regiões que necessitariam de estudos para a diminuição das fontes de contaminação e/ou tratamento da água contaminada. Por fim, áreas caracterizadas baixa produtividade e alto IRR indicam maiores problemáticas, sendo possivelmente necessária a busca de outros meios de abastecimento, como fontes superficiais de água.

5. Aplicabilidade e Gestão

Este trabalho fornece ferramentas para a gestão de recursos hídricos subterrâneos. Quando se intersectam dados de crescimento populacional com os dados de intersecção do IRR com a produtividade, é possível identificar áreas de risco ou áreas com bom indicativo para o uso de águas subterrâneas. A figura 29 mostra a taxa de crescimento populacional ocorrido entre 2000 e 2010 nos municípios do Paraná sobrepostos com os polígonos apresentados na figura 28.

A região do município de Cascavel, na região Oeste do estado, está localizada sobre o polígono indicativo de alta produtividade e baixo IRR, considerada a área mais adequada à utilização de fontes subterrâneas. Dada a elevada taxa de crescimento populacional do município (entre 0,88 e 1,76%), o conhecimento e a utilização desta fonte pode significar otimização de recursos com prospecção e tratamento de água para a distribuição pública.

Em contrapartida, os municípios de Francisco Beltrão, Dois Vizinhos e Itapejara d'Oeste, na região Sudoeste do estado, apresentam crescimento populacional semelhante ao de Cascavel, mas estão localizados sobre uma área de baixa produtividade e alto IRR. Para estes municípios, seria indicado buscar outras fontes de água além das subterrâneas, com maior qualidade e maior produtividade.

Regiões como as das cidades de Toledo, a Oeste, e Maringá, no Norte-Central, apresentam altíssimas taxas de crescimento (acima de 1,76%) e localizam-se em áreas de produtividade elevada, porém com altos IRR. Nestas áreas, fontes subterrâneas seriam indicadas mediante tratamento na qualidade da água antes da distribuição, a fim de evitar problemas de saúde pública.

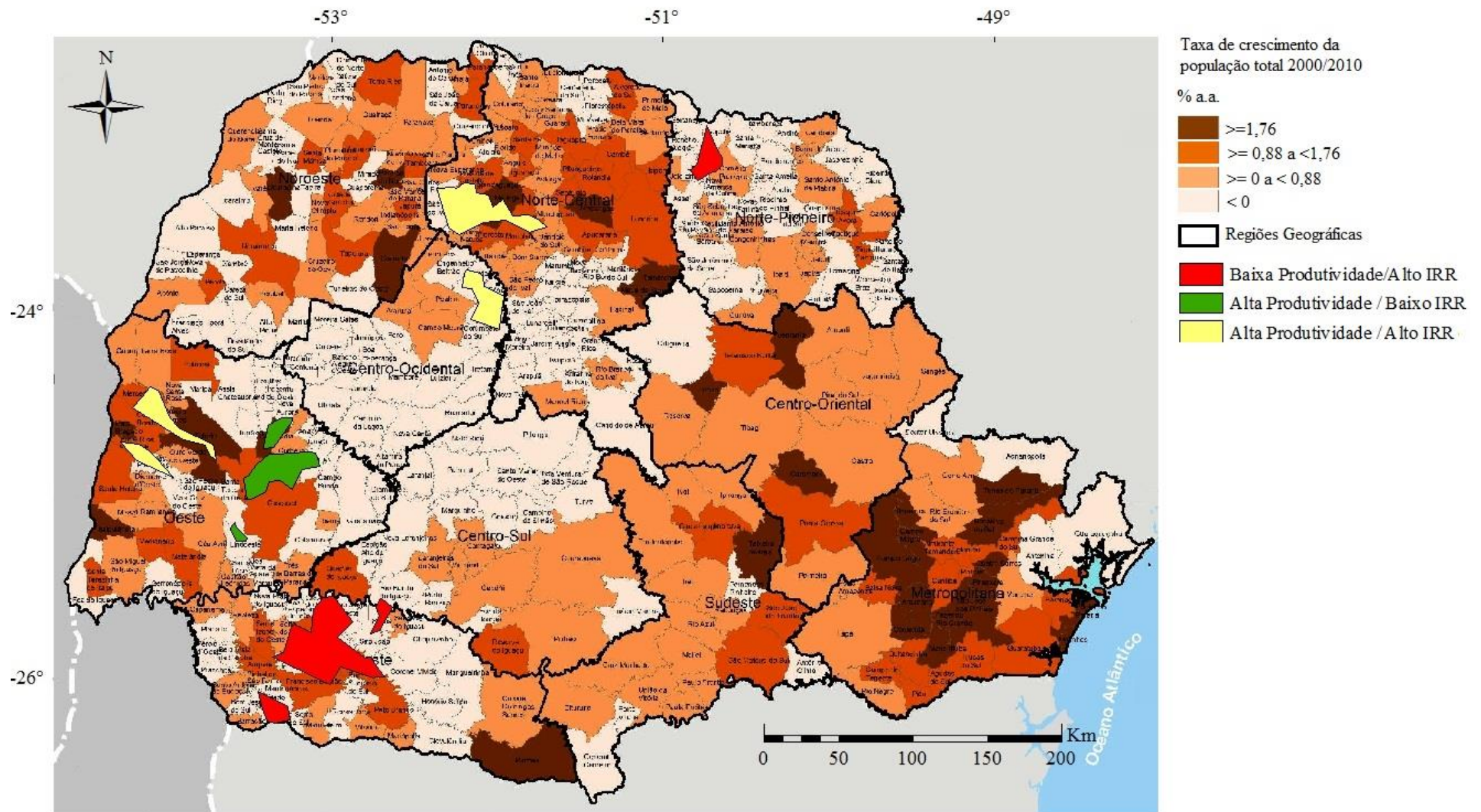


Figura 28: Mapa de comparação entre taxa de crescimento populacional e os polígonos de intersecção (Modificado de IPARDES, 2010)

6. Conclusões

Ao analisarmos dados referentes à produtividade do SASG, é fácil a percepção de que a região Noroeste do aquífero apresenta as melhores condições. É possível visualizar a diferença entre a porção Noroeste, muito produtiva, da Sudeste, com poços sensivelmente menos produtivos. A grande quantidade de poços analisados também permitiu que grandes áreas do mapa fossem cobertas pelos polígonos delimitados.

A avaliação dos Índices Relativos de Risco indicou uma grande variação na distribuição da qualidade da água. Os poços de IRR mais baixo ocorrem por toda a área do aquífero, com apenas um aglomerado na região Oeste. Focos de poços com IRR elevado ocorrem no Norte, no Sul e no extremo Oeste do SASG.

A intersecção dos dados de produtividade e de Índice Relativo de Risco permitiu a análise quanto a possibilidades de gestão de recursos. A definição de áreas com alta produtividade e baixo IRR em regiões de grande crescimento populacional, como o município de Cascavel, indica áreas potenciais à captação de água subterrânea para abastecimento público. Áreas com baixa produtividade e alto IRR, como próximo às cidades de Francisco Beltrão e Dois Irmãos, por exemplo, indicam a necessidade de fontes diversas à subterrânea para o abastecimento público. Este tipo de informação pode ser aplicado em maior ou menor escala em outras regiões para a diminuição de gastos públicos e melhorias na qualidade de água entregue à população.

A utilização de uma rotina de estudos que una dados de produtividade com dados hidroquímicos é um procedimento eficaz na prospecção de água em aquíferos fraturados. A rotina estabelecida neste trabalho (Fig. 30) foi útil na delimitação de áreas com indicativos de uso de água subterrânea, assim como de áreas que necessitariam de fontes alternativas para abastecimento.

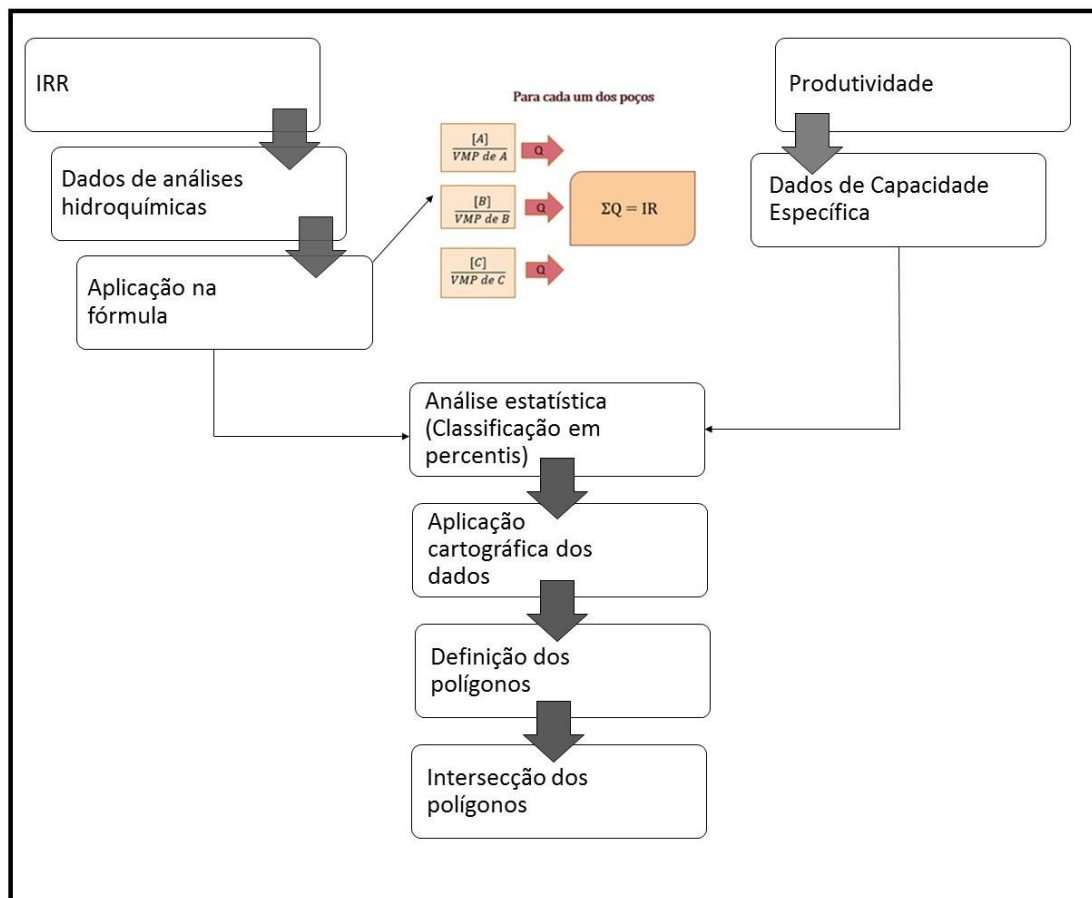


Figura 29: Fluxograma da rotina de trabalho sugerida neste estudo

Estudos futuros que utilizem o método elaborado neste estudo são necessários para aprimorar os resultados obtidos. Dentre as adaptações que acrescentariam aos resultados atuais, indica-se:

- Aplicar o método em escala mais detalhada a fim de estabelecer áreas mais restritas para a captação;
- Análise química de um número maior de poços para cálculo do IRR, a fim de melhorar a qualidade dos polígonos definidos neste aspecto;
- Análise detalhada da relação dos polígonos definidos com as necessidades dos municípios.

7. Referências

- Athayde G.B., Müller C., Rosa Filho E., Hindi E. (2007). Estudo Sobre Os Tipos Das Águas do Aquífero Serra Geral, no Município de Marechal Cândido Rondon -PR. *Revista Águas Subterrâneas*, **21**(1): 111-122
- Athayde, C.M., Athayde, G.B., Licht, O.A.B., Rosa Filho, E.F. (2014). Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público. *Boletim paranaense de geociências*, **71**(1): 21-36
- Athayde, G.B. (2013). *Compartimentação hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no estado do Paraná, Brasil*. Curitiba, 177f. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- Athayde, G.B., Athayde, C.M., Filho, E.F.R., Licht, O.A.B. (2014). Contribuição ao estudo de conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. *Boletim paranaense de geociências*, **71**(1): 36-45
- Bittencourt A., Filho E., Hindi E., Buchmann Filho A. (2003). A Influência dos Basaltos e de Misturas com Águas de Aquíferos Sotopostos nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio Piquiri, Paraná - Br. *Revista Águas Subterrâneas* **17**(1): 67-75.
- Bittencourt A., Filho E., Hindi E., Buchmann Filho A. (2003). A Influência dos Basaltos e de Misturas com Águas de Aquíferos Sotopostos nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio Piquiri, Paraná - Br. *Revista Águas Subterrâneas* **17**(1): 67-75.
- Bongiolo A., Soares A., Bittencourt A., Ferreira F. (2011). Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geologia*, **41**(2): 319-333.
- BRASIL. (2008). Resolução CONAMA Nº 396/2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências - Data da legislação: 03/04/2008 - Publicação DOU nº 66, de 07/04/2008, págs.66-68
- BRASIL. Portaria Ministério da Saúde Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
- Conselho da União Europeia. (1998). Directiva 98/83/CE do Conselho de 3 de novembro de 1998 – Relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2014). Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo.
- Fernandes, A.J. (2008). Aquíferos Fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, **29**(1/2): 49-72
- Fernandes, A.J., Negri, F.A., Azevedo Sobrinho, J.M., Varnier, C. (2012). Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guarani. *Boletín Geológico y Minero*, **123**(3): 325-339.

Fernandes, A.J., Perrota, M.M., Salvador, E.D., Azevedo, S.G., Filho, A.G., Paulon, N. (2007). Potencial dos aquíferos fraturados do Estado de São Paulo: Condicionantes geológicos. *Revista Águas Subterrâneas*, **21**(1):65-84.

Gastmans, D., Menegário, A.A., Moura, C.C. (2013). Hidrogeoquímica das Águas subterrâneas o Aquífero Serra Geral na porção Centro Sul do Estado de São Paulo. *Revista Águas Subterrâneas*, **27**(3): 27-44.

Gimpiá, C.E.Q., Souza, J.C. (1982). Potencial Aquífero dos Basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2, Salvador. *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. P. 3-15.

<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=106> em 05/08
IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Projeção da população total dos municípios do Paraná para o período 2016-2030 – Alguns resultados.

IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. (2010). Mapa da Taxa de Crescimento da População total – 2000/2010.

Lastoria, G., Sinelli, O., Kiang, C.H., Hutcheon, I., Paranhos Filho, A.C., Gastmans, D. (2006). Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, **20**(1):239-150

Licht O. A. B. (2001). Atlas geoquímico do Estado do Paraná – sedimentos de fundo e águas superficiais. Curitiba, MINEROPAR, 80 p.

Machado, J.L.F., Freitas, M.A. (2000). Hidroquímica do Aquífero Serra Geral no Oeste de Santa Catarina. In: 1ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. *Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater*. 2000. v. 1. p.1-13

Milani, E.J. (1997). Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental. Porto Alegre, 255f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Milani, E.J., Ramos, V.A. (1998). Orogenias paleozoicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**(4): 473-484.

Milner, S.C., Duncan, A.R., Whittingham, A.M., Ewart, A. (1995). Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **69**: 137-157.

Mineropar. Serviço Geológico do Paraná. (2013). O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná – Mapeamento geológico das cartas 1:250.000 de Guaíra, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Pato Branco e Clevelândia. Curitiba.

Mocellin R., Ferreira F. (2009). Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, **39**(3): 567-579.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M. (1992). Chemical Stratigraphy of the Paraná Lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119-139.

Reginato P., Ahlert S., Schneider V. (2012). Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, 27(1): 65-78.

Reginato P., Strieder A. (2006). Caracterização Estrutural dos Aquíferos Fraturados as Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geologia*, 36(1): 13-22.

Reginato P., Strieder A. (2007). Análise Estrutural Visando a Locação de Poços Tabulares em Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral. *In: XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste*.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prevot, M., Perrin, M. (1992). The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, 258: 975-979.

Rosa Filho E. F., Hindi E., Mantovani L., Bittencourt A. (2006). A Importância do Sistema Aquífero Serra Geral para a Cultura da Soja no Estado do Paraná. *Revista Águas Subterrâneas*, 20(2):49-56

SEMA. Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2010). Bacias Hidrográficas do Paraná – Série Histórica.

SEMA. Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2010). Elaboração do plano estadual de recursos hídricos, Produto 1.1, Anexo I.

Singhal, B.B.S. (1997). Hydrogeological characteristics of Deccan trap formations of India. *Hard Rock Hydrosystems*, 241: 75-80.

SUDHERSA. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. (1998). Atlas de Recursos Hídricos do Estado do Paraná. Recuperado de <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=73> em outubro de 2015.

USGS. United States Geological Survey. (2010). Effects of Groundwater Withdrawal on Borehole Flow and Salinity Measured in Deep Monitor Wells in Hawai'i – Implications for Groundwater Management. *Scientific Investigations Report 2010 – 5058*.

USGS. United States Geological Survey. (2015). Spatially Distributed Groundwater Recharge for 2010 Land Cover Estimated Using a Water-Budget Model for the Island of O'ahu, Hawai'i. *Scientific Investigation Report 2015 – 5010*.