



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

GISELLY PETERLINI

**ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE HÍDRICA EM
AQUÍFEROS FRATURADOS COMO FERRAMENTA DE
PLANEJAMENTO URBANO E AMBIENTAL**

GISELLY PETERLINI

**ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE HÍDRICA EM
AQUÍFEROS FRATURADOS COMO FERRAMENTA DE
PLANEJAMENTO URBANO E AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina – UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. André Celligoi

Londrina
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

- G532 Peterlini, Giselly.
Zoneamento da produtividade hídrica em aquíferos fraturados como ferramenta de planejamento urbano e ambiental / Giselly Peterlini. - Londrina, 2020.
108 f. : il.
- Orientador: André Celligoi.
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2020.
Inclui bibliografia.
1. Aquíferos fraturados - Tese. 2. Avaliação da produtividade hídrica - Tese. 3. Águas subterrâneas - Tese. 4. Sistema Aquífero Serra Geral - Tese. I. Celligoi, André. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

CDU 91

GISELLY PETERLINI

**ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE HÍDRICA EM AQUÍFEROS
FRATURADOS COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO
URBANO E AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina – UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. André Celligoi
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Marciel Lohmann
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Antonio Cezar Leal
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Filho – UNESP

Londrina, 11 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Celligoi, por me ajudar a transformar meu trabalho em algo muito maior do que eu pude imaginar. Agradeço imensamente por todas as ideias, dicas, conselhos, correções e por, principalmente, acreditar nesta pesquisa e compartilhar sua imensa experiência profissional e acadêmica comigo.

À Universidade Estadual de Londrina e professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia, por acreditarem no potencial do meu projeto de pesquisa e me permitirem ingressar no mestrado. Agradeço por todos os conhecimentos transmitidos e experiências vividas, dentro e fora da sala de aula, possibilitando a chegada até aqui.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Ao Prof. Dr. Edson Fontes de Oliveira, pelo auxílio com as análises estatísticas realizadas neste trabalho.

À SANEPAR por ceder as informações de localização dos poços tubulares localizados nos municípios de Cambé e Londrina e ao colega Glauber, pela ajuda nos trabalhos de campo.

À minha família (pais, irmãs, cunhados e sobrinhos), por todo apoio e força durante a realização do mestrado. Aos meus pais, principalmente, por sempre me aconselharem a dar o meu melhor e entenderem minhas ausências, muitas vezes devida aos estudos desta fase de pós-graduanda.

Ao meu namorado e parceiro de todas as horas, Henrique, por estar sempre ao meu lado, por me ouvir, me aconselhar, me apoiar, me acalmar nos momentos difíceis, por comemorar meus momentos de vitória, mas principalmente, por participar de forma ativa da minha pesquisa, me auxiliando nos trabalhos de campo e nas leituras da dissertação.

A todos, minha gratidão.

Obrigada.

*“Mais ouro tem sido minerado dos pensamentos dos
homens do que jamais foi extraído da Terra”.*

- Napoleon Hill

PETERLINI, Giselly. **Zoneamento da produtividade hídrica de aquíferos fraturados como ferramenta de planejamento urbano e ambiental**. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

RESUMO

O aumento da utilização das águas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é uma realidade nos municípios do norte do estado do Paraná. Em contrapartida, a compreensão do funcionamento deste aquífero bem como dos fatores que controlam a ocorrência e produtividade hídrica neste ambiente hidrogeológico são pouco conhecidos e difundidos. Neste sentido, a presente pesquisa teve como objetivo compreender, determinar e mapear o fenômeno da produtividade hídrica do SASG em 7 bacias hidrográficas nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã/PR. A proposta foi criar um método que permitiu utilizar diferentes fatores ambientais que influenciam a produtividade hídrica de aquíferos fraturados e, ao combiná-los, o resultado retornou um mapa-síntese que indica as zonas de maior produtividade hídrica para a área de estudo. Foram escolhidos por meio de consulta na literatura existente, os fatores: Estruturas Interderrames (E), Distância do Lineamento (D), Vazão (V), Capacidade Específica (C), Profundidade (P), Direção do Lineamento (L) e Espessura de Solo (S). Como a influência dos fatores E e S ainda não haviam sido estudados para a área de estudo, esta influência foi analisada no artigo A, para confirmar se estes afetavam realmente a produtividade e se sim, qual exercia maior influência. Utilizando análises estatísticas como a Correlação Linear de Pearson, Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) foi confirmada a influência de ambos os fatores sobre a vazão dos poços analisados. Foi possível constatar que quanto maior é a quantidade de E, maior é a produtividade. Para o fator S, observou-se que quanto menor S, maior a produtividade hídrica. Além disto, pôde-se concluir que o fator E exerce maior influência que o fator S. Com estes resultados foi possível atribuir pesos a estes fatores e aos demais, pesos estes que variaram de 1 a 5, conforme sua importância. Também foram atribuídas classes que variaram de 1 a 10 para as faixas de valores de cada fator. Em ambiente SIG foram gerados os mapas de estimativa e de classe para cada fator e, posteriormente, estes mapas foram somados, gerando o mapa Índice de Produtividade de Aquíferos Fraturados (IPAF). Os resultados obtidos permitem observar que maior parte da área de estudo apresenta baixa produtividade. As zonas de maior produtividade concentram próximas às redes de drenagem e lineamentos de direção EW, bem como nas regiões N, NW e SE da área. Por meio da análise Regressão Linear Múltipla (RLM) foi possível validar os pesos atribuídos aos fatores e gerar uma equação que representa a produtividade hídrica do SASG. Os resultados da RLM demonstram que os pesos atribuídos foram, em sua maioria corretos, com exceção do fator C, que poderia ter sido menor. Apesar disto, o modelo gerado é considerado representativo do fenômeno em estudo e pode ser utilizado para estimar a produtividade hídrica. Considera-se, portanto que o método proposto é uma poderosa e inovadora ferramenta de planejamento, visto que pode auxiliar na futura locação de poços para abastecimento, bem como auxiliar no uso e ocupação do solo urbano, contribuindo para uma melhor gestão urbana e ambiental.

Palavras-chave: Proposta metodológica. Produtividade hídrica. Aquíferos fraturados. Planejamento ambiental. Recursos hídricos subterrâneos.

PETERLINI, Giselly. **Zoning of water productivity of fractured aquifers as a tool for urban and environmental planning**. 2020. 112 p. Dissertation (Master's degree in Geography) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

ABSTRACT

The increased use of the Serra Geral Aquifer System (SASG) waters is a reality in the counties of the north region of Paraná state. In contrast, the comprehension on the functioning of the aquifer as well as the factors that control the water productivity and occurrence in this hydrogeological environment are poorly known and widespread. Therefore, this research aimed to understand, determine and map the phenomenon of water productivity of the SASG in 7 watersheds in the cities of Londrina, Cambé and Ibiporã / PR. The intention was to create a method that allowed the use of different environmental factors that influence the water productivity of fractured aquifers and, by combining them, the result was a synthesis map that indicates the zones with higher water productivity for the studied area. By consulting the existing literature, the following factors were chosen: Inter-spill Structures (E), Lineament Distance (D), Discharge (V), Specific Capacity (C), Depth (P), Direction of the Lineament (L) and Soil Thickness (S). As the influence of factors E and S had not yet been studied for the study area, their influence was analyzed in article A to confirm if it really affected productivity and if so, which one had the greatest influence. Using statistical analyzes such as Pearson's Linear Correlation, Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) and Canonical Discriminant Analysis (CDA), the influence of both factors on the well flow rate was confirmed. It was found that the higher the amount of E, the higher the productivity. For this, it was noticed that the smaller S the higher the water productivity. In addition, it could be concluded that factor E plays a bigger role than factor S. With these results, it was possible to give values to these factors and the other. These values vary between 1 and 5 according to its importance. It was also assigned classes that range between 1 to 10 for value range of each factor. In GIS environment were generated estimative and class maps for each factor, and after, they were combined, resulting the Fractured Aquifers Productivity Index (IPAF). The results allow observing that the major part of the studied area has low productivity. Zones with higher productivity are concentrated near to the draining networks and lineament following the EW direction, as well as N, NW and SE of the area. By Linear Multiple Regression (LMR) analysis it was possible to validate the values assigned to the factor and generate an equation for the SASG hydric productivity. The LMR results show that the values assigned were, in majority, correct, unless the C factor that the value assigned could be lower. Nonetheless, the generated model is considered representative of the phenomenon in study e it can be used to estimate the hydric productivity. Therefore, it is considered that the proposed method is a powerful and innovating planning tool, since it can help in the future rent of wells as water supply and also help in the usage e occupancy of urban soil, contributing to a better urban and environmental management.

Keywords: Methodological proposal. Water productivity. Fractured aquifers. Environmental planning. Underground water sources.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Estruturação de um derrame basáltico | 26 |
| Figura 3.1 – Localização da área de estudo..... | 34 |
| Figura 3.2 – Mapa hipsométrico da área de estudo..... | 37 |
| Figura 3.3 – Mapa de declividade da área de estudo..... | 37 |
| Figura 3.4 – Mapa de solos da área de estudo..... | 38 |
| Figura 3.5 – Domínio de bacias hidrográficas urbanas da área de estudo | 40 |
| Figura 4.1 – Localização da Área de Estudo..... | 44 |
| Figura 4.2 – Exemplo de um perfil geológico de poço tubular | 46 |
| Figura 4.3 – Localização dos poços tubulares profundos presentes na área de estudo | 49 |
| Figura 4.4 – Gráficos de dispersão dos grupos de estruturas com os indicadores de produtividade hídrica | 52 |
| Figura 4.5 – Análise Discriminante Canônica entre os grupos de quantidade de espessura e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica | 55 |
| Figura 4.6 – Gráficos de dispersão dos dados de Espessura de Solo com os indicadores de produtividade hídrica | 56 |
| Figura 4.7 – Análise Discriminante Canônica entre os grupos de espessura de solo e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica | 59 |
| Figura 4.8 – Localização dos poços no mapa de declividade de acordo com a espessura de solo..... | 60 |
| Figura 5.1 – Localização da área de estudo..... | 66 |
| Figura 5.2 – Localização dos poços tubulares presentes na área de estudo | 68 |
| Figura 5.3 – Etapas do processo de geração do mapa IPAF | 78 |
| Figura 5.4 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de estruturas | 80 |
| Figura 5.5 – Mapa de contorno estimado para o fator Estruturas Interderrames | 81 |
| Figura 5.6 – Mapa de Lineamentos Estruturais identificados na área de estudo | 82 |
| Figura 5.7 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de distância do lineamento | 82 |
| Figura 5.8 – Mapa de contorno para o fator Distância do Lineamento..... | 83 |
| Figura 5.9 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de vazão | 84 |
| Figura 5.10 – Mapa de contorno estimado para o fator Vazão | 84 |
| Figura 5.11 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de capacidade específica..... | 85 |
| Figura 5.12 – Mapa de contorno estimado para o fator Capacidade Específica | 86 |
| Figura 5.13 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de profundidade | 87 |
| Figura 5.14 – Mapa de contorno estimado para o fator Profundidade | 87 |
| Figura 5.15 – Diagrama roseta da frequência de direção dos lineamentos | 88 |
| Figura 5.16 – Mapa de contorno estimado para o fator Direção do Lineamento..... | 88 |
| Figura 5.17 – Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de profundidade | 89 |
| Figura 5.18 – Mapa de contorno estimado para o fator Espessura de Solo | 90 |
| Figura 5.19 – Mapa da produtividade hídrica do SASG para a área de estudo..... | 91 |
| Figura 5.20 – Bairros que podem apresentar maior produtividade aquífera e sua localização por bacia hidrográfica | 95 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Estatística Descritiva dos dados de poços utilizados | 50 |
| Tabela 4.2 – Correlação existente entre o tipo de estrutura interderrame e a produtividade hídrica | 51 |
| Tabela 4.3 – Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Estruturas Interderrames | 54 |
| Tabela 4.4 – Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Espessura de Solo | 57 |
| Tabela 5.1 – Produção de poços segundo a direção dos lineamentos estruturais | 72 |
| Tabela 5.2 – Fatores que influenciam na produtividade hídrica de aquíferos fraturados e seus pesos | 73 |
| Tabela 5.3 – Classes atribuídas ao fator Estruturas Interderrames | 73 |
| Tabela 5.4 – Classes atribuídas ao fator Distância do Lineamento | 74 |
| Tabela 5.5 – Classes atribuídas ao fator Vazão | 74 |
| Tabela 5.6 – Classes atribuídas ao fator Capacidade Específica | 74 |
| Tabela 5.7 – Classes atribuídas ao fator Profundidade | 75 |
| Tabela 5.8 – Classes atribuídas ao fator Direção do Lineamento | 75 |
| Tabela 5.9 – Classes atribuídas ao fator Espessura de Solo | 75 |
| Tabela 5.10 – Classificação por índice de produtividade hídrica | 76 |
| Tabela 5.11 – Dados estatísticos dos fatores ambientais utilizados | 79 |
| Tabela 5.12 – Resultados da ANOVA gerada pela análise de RLM | 92 |
| Tabela 5.13 – Resultados da RLM para o modelo gerado | 93 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| ADC | Análise Discriminante Canônica |
| ANOVA | Análise de Variância |
| CF | Constituição Federal |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| IAC | Instituto Agronômico de Campinas |
| IAP | Instituto Ambiental do Paraná |
| IAPAR | Instituto Agronômico do Paraná |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IPAF | Índice de Produtividade de Aquíferos Fraturados |
| MANOVA | Análise Multivariada de Variância |
| MINEROPAR | Minerais do Paraná |
| PNRH | Política Nacional dos Recursos Hídricos |
| RLS | Regressão Linear Simples |
| RLM | Regressão Linear Múltipla |
| SANEPAR | Companhia de Saneamento do Paraná |
| SAG | Sistema Aquífero Guarani |
| SASG | Sistema Aquífero Serra Geral |
| SIG | Sistemas de Informação Geográfica |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS, FERRAMENTAS E SUAS APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO URBANO..... | 15 |
| 2.1 | Planejamento Urbano e Ambiental e os Recursos Hídricos..... | 15 |
| 2.2 | Utilização do SIG no Planejamento e Gestão das Águas no Meio Urbano | 18 |
| 2.3 | Armazenamento e Circulação da Água Subterrânea..... | 21 |
| 2.4 | Produtividade Hídrica de Aquíferos Fraturados: Fatores Determinantes | 23 |
| 2.4.1 | Fatores Exógenos | 23 |
| 2.4.2 | Fatores Endógenos | 25 |
| 2.5 | O Sistema Aquífero Serra Geral e sua Importância Regional..... | 27 |
| 2.6 | A Geoestatística Aplicada às Águas Subterrâneas | 29 |
| 3 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 34 |
| 3.1 | Clima | 35 |
| 3.2 | Geologia e Hidrogeologia | 35 |
| 3.3 | Geomorfologia..... | 36 |
| 3.4 | Pedologia..... | 38 |
| 3.5 | Hidrografia | 39 |
| 4 | FATORES GEOLÓGICOS E PEDOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM NA PRODUTIVIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG)..... | 41 |
| 4.1 | Resumo | 41 |
| 4.2 | Abstract | 41 |
| 4.3 | Introdução..... | 42 |
| 4.4 | Caracterização da Área de Estudo..... | 43 |
| 4.5 | Obtenção e Processamento de Dados | 45 |
| 4.6 | Análises de Correlação | 47 |
| 4.7 | Resultados e Discussão | 49 |
| 4.7.1 | Estatística Descritiva dos Dados | 49 |
| 4.7.2 | Influência das Estruturas Interderrames na Produtividade Hídrica..... | 50 |
| 4.7.3 | Influência da Espessura de Solo na Produtividade Hídrica..... | 56 |
| 4.8 | Conclusão | 61 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | ARTIGO B: PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE HÍDRICA EM AQUÍFEROS FRATURADOS: UMA APLICAÇÃO PARA O SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL..... | 63 |
| 5.1 | Resumo..... | 63 |
| 5.2 | Abstract | 64 |
| 5.3 | Introdução..... | 64 |
| 5.4 | Caracterização da área de estudo..... | 66 |
| | Índice de produtividade de aquíferos fraturados | 69 |
| 5.4.1 | Estruturas Interderrames (E) | 69 |
| 5.4.2 | Distância do Lineamento (D) | 69 |
| 5.4.3 | Vazão (V) | 70 |
| 5.4.4 | Capacidade Específica (C) | 71 |
| 5.4.5 | Profundidade do Poço (P)..... | 71 |
| 5.4.6 | Direção do Lineamento (L) | 71 |
| 5.4.7 | Espessura de Solo (S) | 72 |
| 5.4.8 | Cálculo do IPAF..... | 73 |
| 5.5 | Processamento de Dados e Geração dos Mapas de Classes..... | 76 |
| 5.6 | Validação do Modelo de Produtividade Hídrica | 78 |
| 5.7 | Resultados | 79 |
| 5.7.1 | Caracterização do SASG | 79 |
| 5.7.2 | Zoneamento da produtividade hídrica | 90 |
| 5.7.3 | Validação do Modelo de Produtividade Hídrica | 92 |
| 5.7.4 | Sugestão de zonas mais favoráveis à perfuração de poços tubulares..... | 94 |
| 5.8 | Conclusão | 95 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 99 |
| | ANEXOS | 107 |
| | ANEXO A – Comprovante de submissão do Artigo A..... | 108 |
| | ANEXO B – Comprovante de submissão do Artigo B | 109 |

1 INTRODUÇÃO

Mediante à sua multidisciplinaridade como ciência, a Geografia permeia entre diversos campos do saber. Dentre as áreas sociais, humanas, políticas e econômicas pertinentes ao estudo geográfico, a abordagem do presente trabalho é realizada pelo olhar da Geografia como ciência do meio físico, mais precisamente da hidrogeografia.

A hidrogeografia tem como objeto de estudo os recursos hídricos e tem como seu objetivo principal buscar compreender e explicar a ocorrência da água, sua distribuição geográfica e circulação, bem como a água enquanto elemento necessário à vida e largamente utilizado para os mais variados fins. Dentre os diversos aspectos dos recursos hídricos abordados pela hidrogeografia podem ser citados o estudo do ciclo hidrológico, o funcionamento de bacias hidrográficas, as águas superficiais e subterrâneas – seus regimes de fluxo e armazenamento – e as diversas inter-relações e interferências entre os sistemas hídricos e a sociedade.

O viés atual voltado à sustentabilidade dos recursos hídricos é recente na realidade brasileira, pois até o advento da Constituição Federal de 1988 a água era vista como um bem inesgotável. As águas eram consideradas como um bem privado pelo Código de Águas de 1934, legislação vigente na época, o que veio a causar seu uso excessivo e indiscriminado. Este fato, aliado à intensa urbanização da sociedade e o despreparo das cidades brasileiras, acarretou graves problemas no meio urbano, principalmente aos recursos hídricos.

O gerenciamento de recursos hídricos apresenta diversas interfaces com o planejamento urbano, já que a água é um elemento fundamental a ser considerado na gestão urbana e regional devido ao seu potencial de induzir ou dificultar o desenvolvimento social e econômico. Além disto, promover a qualidade e quantidade da água em níveis adequados é imprescindível e estas só serão garantidas por meio do correto gerenciamento dos recursos hídricos, das bacias hidrográficas e municípios.

Apesar dos esforços para alcançar o desenvolvimento das cidades de forma planejada, aliando o aspecto ambiental no planejamento urbano, é fato que o crescimento desordenado das cidades ainda é amplamente visualizado nos municípios brasileiros, visto que muitas vezes a forma na qual o planejamento é desenvolvido não se adequa a realidade local, fazendo com que muitos planos não sejam efetivamente implementados, mantendo e, por vezes, agravando os impactos sociais e ambientais. Estes impactos podem ser observados com grande destaque sobre os recursos hídricos, determinando a sua quantidade e disponibilidade, muitas vezes prejudicadas, no meio urbano.

A pressão sobre os mananciais superficiais – tanto em termos de qualidade quanto de quantidade – devido à expansão desordenada das cidades, bem como o crescimento populacional vêm implicando um aumento na demanda de recursos hídricos subterrâneos. Entretanto, a escolha dos melhores locais para a perfuração de poços tubulares profundos para captação de água subterrânea é ainda um dos maiores desafios da hidrogeologia, principalmente quando os aquíferos a serem explorados são do tipo fraturado, objeto de estudo da presente pesquisa.

Considerando este fato, faz-se necessário que sejam realizados estudos para uma melhor compreensão dos sistemas aquíferos fraturados e que sejam desenvolvidos métodos que auxiliem no mapeamento de áreas mais produtivas, a fim de que isto auxilie na locação de poços tubulares, contribua para a melhoria da gestão de oferta de água nos municípios e reduza dispêndios financeiros com a perfuração de poços improdutivos.

Diante desta realidade, foi definido como recorte espacial deste trabalho as bacias hidrográficas nas cidades de Londrina, Cambé e Ibiporã, municípios estes que vêm apresentando um rápido crescimento e que são situados hidrogeologicamente sobre um aquífero do tipo fraturado, representado pelo Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Estas bacias foram selecionadas por ter a característica de serem predominantemente urbanas e possuir um grande número de perfurações de poços que exploram água do SASG. Assim, podem estar sujeitas às pressões e impactos ambientais e sociais que são comuns em áreas densamente ocupadas e intensamente urbanizadas.

Desta forma, diversas questões nortearam o desenvolvimento desta pesquisa, uma de cunho central e outras secundárias que podem vir a contribuir de forma significativa para a melhor gestão de recursos hídricos e planejamento urbano. Como questão central busca-se responder: de que forma o mapeamento de áreas mais produtivas de águas subterrâneas podem contribuir para o planejamento urbano e ordenamento territorial de uma região? As demais questões que necessitam de respostas são: É possível adaptar um método já existente para realizar esse mapeamento? Quais fatores ambientais mais significativos na produtividade aquífera podem ser utilizados no método? Quais medidas podem ser tomadas para que o mapa de produtividade auxilie no zoneamento urbano?

Para responder a essas questões, os caminhos metodológicos a percorrer são variados, porém foram definidos de acordo com os objetivos da pesquisa. Inicialmente foi realizada a pesquisa bibliográfica, que resultou no capítulo “Recursos hídricos subterrâneos, ferramentas e suas aplicações no planejamento urbano”, um referencial teórico, para situar e esclarecer o leitor quanto aos assuntos pertinentes do trabalho. Em seguida são apresentados dois artigos científicos.

O primeiro artigo (A), intitulado “Fatores geológicos e pedológicos que influenciam na produtividade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)”, tem por objetivo principal buscar compreender como alguns fatores ambientais podem influenciar a produtividade hídrica do SASG ou de aquíferos fraturados, avaliando neste caso as estruturas interderrames – fraturas, vesículas e amígdalas – e a espessura de solo, presentes no perfil geológico dos poços. A intenção com este primeiro artigo é que o mesmo proporcione uma fundamentação teórica para o segundo artigo (B), pois as conclusões contidas no artigo A serão utilizadas no método do artigo B.

No artigo B, intitulado “Proposta de método para a avaliação da produtividade hídrica de aquíferos fraturados: uma aplicação para o Sistema Aquífero Serra Geral” o objetivo principal que se apresenta é propor um método de avaliação da produtividade hídrica em aquíferos do tipo fraturado utilizando diversos fatores ambientais considerados determinantes para a produção de água subterrânea. A finalidade deste artigo é de que o mesmo sirva como uma ferramenta de planejamento urbano e ambiental para um domínio de bacias hidrográficas urbanas de Londrina, Cambé e Ibiporã, Paraná.

Espera-se, portanto, que os resultados desta pesquisa sirvam como subsídio à melhor compreensão e à gestão de recursos hídricos subterrâneos, não só para o SASG, mas para qualquer sistema aquífero do tipo fraturado, em que o armazenamento e circulação da água estejam condicionados às estruturas do embasamento rochoso. Além disto, pretende-se que este estudo auxilie no ordenamento do uso e ocupação do solo urbano em relação às áreas de maior produtividade hídrica, melhorando a eficiência do uso dos recursos hídricos nos municípios selecionados.

2 RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS, FERRAMENTAS E SUAS APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO URBANO

2.1 PLANEJAMENTO URBANO E AMBIENTAL E OS RECURSOS HÍDRICOS

Uma das principais questões sociais vividas no Brasil do século XX foi a rápida e intensa urbanização da sociedade (BRASIL, 2002). O deslocamento do campo para as cidades por conta do êxodo rural, a mecanização das lavouras e má qualidade de vida foram as principais causas do aumento da população urbana em um curto período de tempo (SANTIN; CORTE, 2010). Este processo, segundo Tucci (2008), ocorreu principalmente nas regiões metropolitanas, onde a taxa de crescimento do seu núcleo é pequena enquanto que a periferia (cidades circunvizinhas), ao contrário, apresenta uma alta taxa.

Segundo Santin e Corte (2010), o despreparo das cidades brasileiras – que tiveram um processo de urbanização precoce e desestruturado – para com a acelerada urbanização, acarretou graves problemas no meio urbano, provocando uma séria desorganização social. Além disto, Tucci (2008) também aponta que os efeitos desse processo foram sentidos sobre todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos, ou seja, no abastecimento de água, transporte e tratamento de esgoto cloacal e pluvial.

Além dos impactos diretos sobre os recursos hídricos nas cidades, Tucci (1999) destaca que o desenvolvimento urbano também foi e é responsável por sérios problemas no ciclo hidrológico, visto que a cobertura vegetal das bacias urbanizadas é alterada por pavimentos impermeáveis, gerando alterações como a redução da infiltração do solo, aumento do escoamento superficial e da sua velocidade. O autor aponta ainda que com a redução da infiltração pode ainda ocorrer uma diminuição do nível d'água dos aquíferos, o que reduz o escoamento subterrâneo e consequentemente a descarga hídrica na rede de drenagem. A substituição da cobertura natural das bacias também pode reduzir a evapotranspiração das folhagens e do solo.

O agravamento destes problemas urbanos se deu a partir do final da década de 60 principalmente devido à ausência de legislações e políticas públicas de infraestrutura das cidades que atuassem na regulamentação da matéria urbanística, demonstrando que para evitar prejuízos sociais e promover o desenvolvimento urbano era necessário estabelecer um planejamento ambiental (SANTIN; CORTE, 2010).

Em meio à crise ambiental, social e à falta de normas e políticas para enfrentar os problemas decorrentes da urbanização e ao surgimento de novos modelos inspirados na ideia de desenvolvimento sustentável, é promulgada no Brasil a Constituição Federal (CF) em 1988, que representou um marco no país, demonstrando um grande avanço da legislação brasileira nas questões de meio ambiente e planejamento urbano.

A CF, em seu art. 225 demonstra como a preocupação com a questão ambiental se fazia presente no cenário nacional, afirmando que “todos tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (BRASIL, 1988). De acordo com Heinkes (2009), bem como Rebouças (2003) a CF ainda modificou a realidade de ter a água como um bem privado, afirmando que a mesma representa um bem público, comum e limitado, deixando claro que o direito de uso estava acima do direito de propriedade.

Como uma diretriz para o planejamento ambiental e principalmente ao avanço da gestão dos recursos hídricos, surge a Lei Federal nº 9.433/97 denominada Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que possui como seus instrumentos: os planos diretores de recursos hídricos; o enquadramento dos corpos d'água em classes; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo seu uso; a compensação a municípios e, por fim, o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A implementação destes instrumentos de gestão que disciplinam os usos da água é um meio pelo qual a gestão de recursos hídricos pode influenciar na gestão urbana e regional, visto que estes podem compatibilizá-los com o uso e ocupação do solo nas bacias (BRAGA; CARVALHO, 2003). A fim de promover um planejamento e gestão dos recursos hídricos mais integrados, foi ainda definido como um dos fundamentos da PNRH a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento.

A bacia hidrográfica foi assim definida visto que é sobre este recorte espacial que as ações antrópicas e as degradações decorrentes refletem seu efeito (SHUSSEL; NETO, 2015). Braga e Carvalho (2003) afirmam, porém, que há algumas limitações para a adoção da bacia hidrográfica como recorte físico-territorial no gerenciamento de recursos hídricos. Os autores apontam que, em algumas vezes, o recorte precisa ser modificado ou complementado, por exemplo, por aquíferos, regiões administrativas, territórios municipais ou outros.

Ainda que tenham sido alcançados avanços da questão ambiental relacionada aos recursos hídricos graças à CF e à promulgação da PNRH, era preciso estabelecer políticas que articulassem o planejamento ambiental e o planejamento urbano. Diante desta perspectiva, a CF de 1988 também dedicou um capítulo específico de seu conteúdo ao planejamento urbano, nos seus artigos 182 e 183, instituindo a Política Urbana no país.

Para regulamentar os artigos 182 e 183 da CF é promulgada a Lei 10.257 de 10 de julho de 2001, o chamado Estatuto da Cidade. Na presente lei são estabelecidas normas que regulam o uso da propriedade urbana, a favor do bem coletivo, segurança, bem-estar dos cidadãos e do equilíbrio ambiental. Neste sentido, o Estatuto da Cidade é uma política pública que surgiu para expressar definitivamente a relação estrita entre o planejamento ambiental e a importância deste último na organização do espaço urbano.

Santin e Corte (2010) afirmam, porém, que o Estatuto da Cidade, por ser uma lei federal e de caráter geral, precisa de um regramento local para ser executado, destacando o Plano Diretor como este mecanismo, definido pela CF como um instrumento básico da Política Urbana. Os autores defendem que o plano diretor é capaz de fazer a articulação entre o uso e ocupação do solo com a gestão de recursos hídricos, por meio de um planejamento participativo, para promover um desenvolvimento local socialmente justo, ambientalmente equilibrado e economicamente viável no meio urbano.

No contexto das cidades, Tucci (2008) apresenta que os recursos hídricos urbanos ou águas urbanas envolvem as quatro vertentes do saneamento: o sistema de abastecimento de água, o sistema de esgoto sanitário, a drenagem de águas pluviais e a gestão de resíduos sólidos. O abastecimento é realizado pelos mananciais urbanos, ou seja, as fontes de água disponíveis e adequadas em quantidade e qualidade, para o consumo da população, compreendidos pelas águas superficiais e subterrâneas. Estes mananciais, de acordo com Tucci (1999), são afetados de duas maneiras distintas, pois há um aumento da demanda de água com qualidade, enquanto que também há a degradação dos mananciais, que são contaminados por resíduos sólidos e líquidos.

Ainda que exista um grande alcance na cobertura de abastecimento hídrico nos centros urbanos, ou seja, que a quantidade de água necessária seja fornecida, a qualidade da mesma pode ficar comprometida se não forem realizadas medidas de controle à poluição, fazendo com que a tendência nestes locais seja uma redução da qualidade da água, o que inviabiliza os mananciais – causando uma escassez relativa – e exige que sejam procuradas novas fontes para captação em locais cada vez mais distantes, encarecendo o processo de abastecimento.

Com vistas ao uso mais eficiente da água, bem como do equilíbrio entre ofertas e demandas dentro do ambiente urbano, Tucci (2008) destaca que o gerenciamento das ações pode ser definido de acordo com a relação de dependência da água por meio da bacia hidrográfica ou jurisdição administrativa do município. O autor afirma que a gestão dos recursos hídricos é realizada atualmente por meio da bacia hidrográfica, enquanto que ao município ou região metropolitana cabe a gestão do uso e ocupação do solo. Evidencia-se a necessidade de integração das políticas públicas setoriais, inclusive ambiental, visando estabelecer um conjunto de ações e diretrizes voltadas ao adequado uso do solo e dos recursos hídricos, para assim construir e manter a qualidade de vida urbana (HONDA et al., 2015).

Para o planejamento e controle dos mananciais urbanos, Tucci (1999) apresenta diversos itens que se fazem necessários, dentre eles:

- A seleção de mananciais potenciais, ou seja, bacias ou aquíferos inseridos em bacias;
- A avaliação da disponibilidade hídrica, onde os mananciais são quantificados quanto ao atendimento das demandas atuais e futuras da comunidade;
- A ocupação da bacia e seus potenciais poluentes e suas cargas atuais e futuras;
- A definição de um programa para controlar o uso do espaço, visando a preservação da bacia hidrográfica onde está inserido o manancial;
- Desenvolvimento de um projeto de aproveitamento de água, bem como de um sistema de monitoramento da qualidade e quantidade da água;
- Elaboração de legislação municipal para promover a preservação do manancial selecionado;
- Realizar um controle da ocupação do espaço da bacia.

Diante disto, é possível observar que a presente pesquisa, que visa a avaliação da disponibilidade/produtividade hídrica, é apenas um dos diversos itens necessários ao planejamento e controle dos mananciais urbanos, mas que pode contribuir de forma relevante para a execução dos demais itens, visando alcançar a eficiência nos planejamentos de recursos hídricos municipais.

2.2 UTILIZAÇÃO DO SIG NO PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ÁGUAS NO MEIO URBANO

Muitos foram os avanços alcançados no planejamento urbano e ambiental relativo aos recursos hídricos no Brasil. Este fato se deu graças às legislações até então aqui apresentadas, principalmente a PNRH, chamada Lei das Águas. Entretanto, ainda são necessários avanços, especialmente quando a questão do desenvolvimento e da eficiência dos planos diretores e de gerenciamento de recursos hídricos é levantada.

Ávila et al. (1999) afirmam que são diversos os métodos e ferramentas que têm sido desenvolvidos e utilizados para que se consiga um planejamento e gestão eficiente dos recursos hídricos, destacando que mapear e localizar as águas superficiais e subterrâneas, bem como identificar nos corpos hídricos a quantidade e qualidade da água utilizando um meio cartográfico são fundamentais para gerenciar os corpos hídricos de forma mais adequada. Os autores elucidam ainda que o desenvolvimento tecnológico da informática e o monitoramento remoto aplicado à cartografia levou ao surgimento de técnicas de geoprocessamento, formando um conjunto de ferramentas bastante eficaz na gestão dos recursos naturais.

O termo geoprocessamento, segundo Moura (2005), é utilizado no sentido de que é realizado o processamento de dados georreferenciados, trazendo assim uma nova compreensão do espaço e ganho de conhecimento e informação. Neste sentido, a autora destaca que o geoprocessamento engloba três grandes técnicas: o processamento digital de imagens, a cartografia digital e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os SIG, como defendem Pinheiro et al. (2009), são ambientes de inteligência que permitem a coleta, armazenamento, recuperação, transformação e visualização de dados georreferenciados de diversas esferas de aplicação, fornecendo assim o suporte de forma lógica à gestão e ao processo de tomada de decisão.

Moura (2005) também observa uma grande difusão dos SIG na prática de planejamento, visto que estes permitem realizar uma definição e visualização física, juntamente com análises quantitativas e qualitativas dos componentes socioeconômicos, de forma que são atribuídos pesos às características do meio a partir de uma escala pré-estabelecida de valores. Portanto, os SIG se tornaram um poderoso instrumento de planejamento urbano, já que são capazes de realizar a integração de informações diversas, como geologia, geomorfologia, pedologia, demografia, movimentos sociais, urbanismo, saneamento, ecologia entre outras, promovendo assim um retrato mais fidedigno, amplo e completo da complexidade do ambiente urbano (MOURA, 2005; PINHEIRO et al. 2009).

Esta integração de dados, como cita Silva e Zaidan (2009) torna possível o aproveitamento racional de recursos, considerando as potencialidades e limitações de cada território, além da combinação desses potenciais com outras características da área para um estudo mais refinado. Portanto, o SIG tem se comportado como um instrumento articulador do processo de integração entre o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos (PINHEIRO et al., 2009).

Além da utilização do SIG no planejamento e gestão dos recursos hídricos superficiais, é importante destacar que, com a crescente utilização das águas subterrâneas para os mais diversos fins (abastecimento, indústria e agricultura), os SIG também têm se tornado uma importante ferramenta para a descoberta de áreas favoráveis à prospecção destas águas.

Isto tem ocorrido porque fazer a locação de pontos para a correta perfuração de poços d'água, principalmente em rochas do tipo ígneas ou metamórficas – que dão origem aos chamados aquíferos fraturados – tem retornado muitos insucessos, devido à perfuração de poços secos e à tentativa de encontrar poços mais produtivos (FREITAS, 2000). Diante deste fato, é possível observar a importância de serem desenvolvidos métodos para o mapeamento de áreas mais favoráveis a prospecção de águas subterrâneas neste tipo de aquífero.

Portanto, os SIG podem auxiliar os estudos das águas subterrâneas neste sentido, visto que, como cita Moura (2005), os referidos sistemas buscam trabalhar com relações espaciais ou lógicas, tendendo a evoluir de uma ação descritiva para uma prognóstica que, além de serem capazes de descrever elementos ou fatos, podem traçar cenários e realizar simulações de fenômenos, baseando-se em tendências ou condições pré-estabelecidas.

De acordo com Freitas (2000), a principal abordagem utilizada atualmente para apoiar o planejamento e gestão das águas de aquíferos fraturados é o mapeamento de zonas fraturadas, os chamados lineamentos estruturais, em que para a sua identificação são utilizados mapas topográficos, imagens de satélite e fotos aéreas que, quando integrados com outras bases cartográficas e juntamente com a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, permitem a visualização destas estruturas das rochas. Entretanto, o autor aponta que estudos que envolvem a correlação entre os lineamentos estruturais e os dados de produtividade de poços demonstram uma ambiguidade entre estas variáveis, o que aponta que o estudo de áreas mais favoráveis à prospecção de águas subterrâneas nos aquíferos fraturados não dependem apenas do estudo dos lineamentos e sim envolvem outros fatores ambientais.

Este pressuposto está contido em uma das lógicas do pensamento em geoprocessamento citado por Silva (2001). O autor destaca que uma pesquisa ambiental desenvolvida utilizando geoprocessamento parte dos pressupostos de que todo fenômeno é passível de ser localizado, ter extensão determinável, está sendo alterado constantemente e possui relacionamentos, portanto não é possível registrá-lo de maneira isolada.

Neste sentido, considerando a problemática em relação à água subterrânea, Freitas (2000) aponta que é preciso que sejam mapeadas com melhor precisão as áreas que apresentam mais potencial para a ocorrência das águas subterrâneas integrando diversos planos de informação, o que pode ser desenvolvido pela tecnologia dos ambientes SIG, que permitem manipular as funções representantes dos processos naturais.

Além disto, Pinheiro et al. (2009) afirmam que quando o assunto em questão são os recursos hídricos, a maioria das informações que são utilizadas para apoiar a gestão são georreferenciadas, o que significa que estas podem ser visualizadas por meio de mapas, pois estas informações estão relacionadas à sua localização geográfica. Os autores ainda elucidam que o SIG facilita a superposição de mapas, o que permite elaborar um mapa síntese, integrando todas as informações e temas, reunindo assim as diversas características de uma área.

2.3 ARMAZENAMENTO E CIRCULAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Iritani e Ezaki (2012) apontam que as águas subterrâneas circulam entre os vazios do solo e rochas, chamados poros e, ao infiltrar-se no solo, passam inicialmente pela zona não saturada ou zona vadosa – em que parte dos poros é preenchida por água – e que o excedente de água, ao continuar seu movimento descendente em direção às camadas inferiores, preenche completamente os poros formando a zona saturada.

A circulação da água subterrânea entre os poros de solos e rochas, conferem aos mesmos uma propriedade denominada porosidade primária, que ocorre geralmente em rochas do tipo sedimentar, originando aquíferos porosos ou granulares. Entretanto, Costa e Silva (2000) afirmam que existe ainda a porosidade secundária, em que a circulação da água ocorre através das fraturas das rochas, formando os aquíferos fissurais ou fraturados, bem como pode circular por entre cavidades de dissolução de rochas carbonáticas, formando aquíferos cársticos.

Segundo Cabral (2000), a irregularidade de poros e canais por meio dos quais a água subterrânea deve passar pode tornar complexo o estudo do fluxo da mesma, quando analisado em uma escala microscópica. O mesmo autor afirma que o fluxo de fluídos através de meios porosos é um processo mecânico, formado pelas componentes de energia cinética, potencial gravitacional e pressão. Considerando que a direção de fluxo de um fluido deve ocorrer das regiões onde a energia mecânica por unidade de massa de fluido – o chamado potencial hidráulico – é mais alta, para regiões em que a mesma é mais baixa, e que as velocidades de fluxo de um fluido em um meio poroso é muito baixa, o termo da energia cinética pode ser quase sempre desprezado (FREEZE; CHERRY, 1979).

Neste sentido, o potencial hidráulico da água subterrânea é formado pela carga hidráulica do ponto multiplicada pela aceleração da gravidade, em que a carga hidráulica apresenta como uma de suas componentes a elevação (altitude ou cota do ponto). Portanto, o fluxo de água subterrânea sempre ocorre do ponto de maior altitude para o de menor altitude, devido ao potencial hidráulico (CABRAL, 2000).

Ao estudar o fluxo de água subterrânea pela abordagem de Darcy, Freeze e Cherry (1979) apontam que o meio poroso (grãos de areia ou fragmentos de rocha) passa a ser substituído por um “continuum” representativo. Costa e Silva (2000) explicam que um meio hidraulicamente contínuo possui a característica da inexistência de interrupções das características hidrodinâmicas em toda e qualquer direção, portanto não apresenta descontinuidades, visto que as descontinuidades do maciço rochoso são geradas por juntas de estratificação, de xistosidade, de clivagem, diaclases (ruptura da rocha sem deslocamento de blocos), paráclases (ruptura com deslocamento de um dos blocos), entre outras.

Os autores ainda apresentam outras duas importantes características dos sistemas aquíferos: a homogeneidade e isotropia, que são relacionadas à condutividade hidráulica, visto que se um material é considerado homogêneo, a condutividade hidráulica não varia de um ponto a outro deste material, enquanto que para ser considerado isotrópico, a condutividade hidráulica não pode variar, qualquer que seja a direção considerada (COSTA; SILVA, 2000). Entretanto, os valores de condutividade hidráulica podem geralmente apresentar variações em uma ou ambas as características, fazendo com que a formação geológica seja heterogênea e anisotrópica.

Freeze e Cherry (1979) explicam que existem muitos tipos de configurações com características heterogêneas, com destaque para aquelas com heterogeneidade em camadas, em que cada camada individual tem um valor de condutividade homogênea, mas que, ao considerar todo o sistema, o mesmo se caracteriza como heterogêneo. Destacam também como heterogêneas as formações que possuem heterogeneidade devido à descontinuidade causada pela presença de falhas, bastante comum em aquíferos fraturados, formados por rochas ígneas ou metamórficas.

Nos domínios destes tipos de rochas, segundo Costa e Silva (2000), a matriz rochosa possui a inexistência ou presença reduzida de espaços intergranulares, o que faz com que a água seja armazenada e circule por entre fraturas, falhas, juntas e até mesmo em vesículas – formadas por bolhas de ar oriundas do processo de resfriamento do magma. Os mesmos autores apontam que os aquíferos fraturados, por apresentarem descontinuidades, não possuem parâmetros hidrodinâmicos constantes, fazendo com que a sua homogeneidade seja precária, que apresentem forte anisotropia e que os parâmetros variem muito de um ponto a outro e, neste sentido, a porosidade é uma função das fraturas, apresentando valores elevados em uma zona muito fraturada e baixos em zonas pouco fraturadas.

2.4 PRODUTIVIDADE HÍDRICA DE AQUÍFEROS FRATURADOS: FATORES DETERMINANTES

O armazenamento e a ocorrência da circulação de água subterrânea em meios fraturados, como anteriormente apresentados, determinam a produtividade hídrica neste tipo de aquífero e, para que ocorra este armazenamento e circulação, podem ser pontuados diversos fatores que atuam no aspecto da produtividade. Costa e Silva (2000) destacam que estes fatores podem ser separados em dois grupos: fatores exógenos, que atuam na superfície externa da crosta e fatores endógenos, que atuam no seu interior.

2.4.1 Fatores Exógenos

Com relação à influência do clima na produtividade hídrica, Costa (1986) e Reginato et al. (2012) apontam que este possui relação direta com o volume de água que infiltra e circula no aquífero, bem como com a posição do nível estático, que pode ser elevado em períodos de chuvas intensas, onde há tendência de haver maior recarga aquífera, ou sofrer rebaixamento em períodos de estiagem. Entretanto, os autores explicam que apenas o clima não determina maior vazão dos poços, visto que é necessário a existência das estruturas que armazenam a água, fazendo com que a influência deste fator na quantidade de água seja apenas moderada.

O relevo, também destacado como um fator atuante na produtividade aquífera, de acordo com Reginato et al. (2012) apresenta influência direta na circulação da água, que acaba por acompanhar as inclinações naturais da superfície. Além disto, os autores afirmam que normalmente os altos topográficos, que apresentam baixa declividade e maior espessura de solo, correspondem a zonas de recarga, enquanto que áreas mais baixas ou com quebras de relevo se caracterizam como zonas de descarga.

Neste sentido, áreas de elevada declividade em topos de elevações, são consideradas a pior situação morfológica para a perfuração de poços, enquanto que áreas de baixa declividade se caracterizam como o melhor local sua para locação (COSTA; SILVA, 2000). De acordo com Freitas (2001), isto ocorre, pois, áreas que apresentam maior declividade possuem menor tempo de residência da água da chuva, o que favorece o escoamento superficial e reduz a infiltração e consequentemente a recarga. Viana e Celligoi (2002) apontam que a vegetação é importante para a recarga aquífera devido à maior precipitação e maior permeabilidade da superfície, pois a retirada da vegetação e impermeabilização (principalmente em áreas urbanas) causam diminuição da infiltração da água no solo.

Neste sentido, o solo, mais precisamente a sua espessura, pode ser considerado segundo Costa e Silva (2000) como um fator que exerce influência para a produtividade aquífera, fator este que está intimamente relacionado ao clima e ao intemperismo, visto que em regiões de clima úmido há predomínio do intemperismo químico, que alcança maiores profundidades devido à decomposição de minerais instáveis da rocha, resultando em solos mais profundos, ao contrário do intemperismo físico, que atua pela desintegração de partículas minerais a pequenas profundidades, originando solos rasos. Os autores ainda destacam que uma espessura considerável de solo atua como uma fonte de captação da água precipitada, reduz perdas por escoamento superficial e minimiza o processo de evaporação, alimentando as rochas fraturadas subjacentes (COSTA; SILVA, 2000).

A hidrografia, identificada como um fator que exerce moderada influência tanto para a produtividade quanto para a qualidade hídrica, pode ser determinante quando a drenagem superficial coincide com as fraturas presentes no embasamento rochoso, situação chamada de riacho-fenda, que pode proporcionar maior infiltração e armazenamento de água em aquíferos fraturados (CORIOLANO et al., 2000).

2.4.2 Fatores Endógenos

Quanto aos fatores endógenos, estudos sobre a constituição litológica de rochas no Brasil revelam, de acordo com Costa e Silva (2000), que os micaxistos são as rochas que proporcionam as melhores vazões, depois os gnaisses, migmatitos e granitos. Os autores relevam que esta relação tipo de rocha x vazão não é aleatória, pois, o fraturamento é mais intenso em rochas que apresentam uma orientação planar (planos de xistosidade, de clivagem, etc).

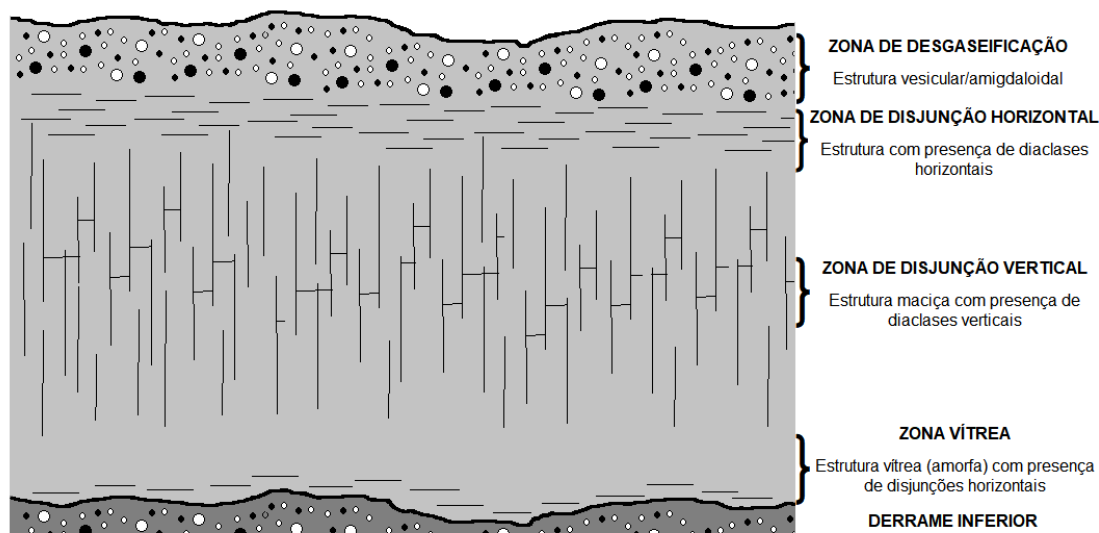
Como destacado em itens anteriores, o fator de maior relevância para a determinação da produtividade em aquíferos fraturados são as estruturas das rochas. As estruturas mais favoráveis à infiltração e armazenamento de água são as falhas, fraturas, juntas e planos de xistosidade e clivagem. A favorabilidade hídrica, de acordo com os tipos de falhas (ou paráclases), é maior na falha do tipo normal – originada por esforços tracionais – devido à sua maior abertura e às diaclases de origem tracional, como fraturas transversais e longitudinais por alívio de pressão (COSTA; SILVA, 2000)

Quanto às estruturas que se apresentam desfavoráveis à infiltração, condução e armazenamento de água, de acordo com Costa e Silva (2000) podem ser citadas falhas transcorrentes e fraturas longitudinais originadas por rupturas de cisalhamento, devido às suas reduzidas aberturas, que podem até mesmo ser regeladas, bem como juntas de resfriamento, geradas na consolidação do magma, que são geralmente quase soldadas.

Além das fraturas por paráclase, diaclase e juntas, os aquíferos fraturados que possuem como embasamento rochoso os basaltos – geralmente formados por diferentes derrames consecutivos – apresentam ainda estruturas consideradas determinantes para o armazenamento e circulação da água subterrânea: vesículas. Segundo Fraga (1986) bem como Celligoi (1993), a geoestrutura de cada derrame (Figura 2.1) é composta por estruturas de fluxo e resfriamento de lava bem definidas e que podem ser identificadas por uma diferença textural, sendo elas:

- **Zona vítrea:** é o produto da desvitrificação da matéria amorfa. Representa a porção inferior do derrame, formada por uma camada argilosa e com espessura de alguns metros. Apresentam diaclases horizontais como consequência do rápido resfriamento quando em contato com o embasamento.
- **Zona de disjunção horizontal:** apresenta diaclasamentos horizontais com espaçamento de poucos centímetros, fazendo com que a água circule horizontalmente, o que não representa uma circulação muito efetiva. São produtos da contração magmática ou corridas laminares de lava.
- **Zona de disjunção vertical:** possui diaclases predominantemente verticais, resultantes do resfriamento lento da lava. A percolação de água pelas diaclases verticais alimenta as diaclases horizontais subjacentes. Nesta zona, a alteração do basalto é reduzida, a rocha é maciça e representa o trecho mais resistente à perfuração.
- **Zona de desgaseificação:** ocorre no topo do derrame, onde os gases presentes na lava ficam aprisionados abaixo de placas já consolidadas que entraram primeiramente em contato com a superfície, formando assim um complexo de aspecto esponjoso que apresenta vacúolos (vesículas e/ou amígdalas) milimétricas ou até centimétricas. A permeabilidade nesta zona depende da disposição espacial dos vacúolos e, quando interconectadas com as fraturas, aumentam consideravelmente a produtividade hídrica.

Figura 2.1 - Estruturação de um derrame basáltico



Fonte: Adaptado de Celligoi (1993)

2.5 O SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL E SUA IMPORTÂNCIA REGIONAL

As cidades da região norte do Estado do Paraná apresentam um importante setor agrícola e relevante setor industrial para o centro Sul do Brasil. Seu crescente desenvolvimento exige quantidades cada vez maiores de recursos hídricos para desempenhar as mais diversas atividades. Frente a este cenário é também crescente a utilização das águas subterrâneas, principalmente pelo fato de a qualidade das águas superficiais ser mais sujeita os efeitos da poluição (CELLIGOI; BRITO, 1999). Isto já é uma realidade nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã, que estão localizadas sobre o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), que por sua vez está sobreposto ao Sistema Aquífero Guarani (SAG).

A base geológica do SASG é pertencente ao Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral que, segundo Celligoi e Duarte (1990) bem como Rosa Filho et al. (2006), é constituída por uma série de derrames vulcânicos basálticos de extensão lateral e continuidade vertical que se sobrepõem, em que cada derrame possui espessuras que variam de 5 a 25 metros. A estrutura dos derrames, conforme ocorrido o movimento, resfriamento e conteúdo dos gases de lava, originou camadas caracterizadas por uma zona basal, uma zona intermediária e uma zona de topo vesicular ou amigdaloidal (ROSA FILHO et al., 2006).

A Formação Serra Geral, por suas características litológicas, não confere ao SASG uma importante porosidade e permeabilidade primárias, o que pode não permitir um significativo armazenamento de volumes de água. Devido a este fato, Rebouças (1978) explica que o armazenamento e a circulação da água só ocorrem devido às descontinuidades da rocha, originando um meio comumente heterogêneo e anisotrópico. A complexidade das feições litológicas e estruturais por meio das quais há a circulação de água, faz com que a condutividade hidráulica seja muito variável e até difícil de ser avaliada, explicando a forte heterogeneidade e anisotropia do SASG (ROSA FILHO et al, 2006).

Neste sentido, Athayde et al. (2012) citam que a importância estratégica do SASG é proporcional à dificuldade de exploração que o mesmo apresenta, quando consideradas as vazões dos poços tubulares, que podem não ser muito elevadas. Os autores explicam que devido à heterogeneidade e anisotropia e a condição de a circulação de água estar concentrada nas fraturas, foram observados casos em que dois poços tubulares separados por uma distância inferior a 10m, apresentaram capacidades específicas diferentes, o que aumenta o risco de perfurações de poços improdutivos neste aquífero caso não sejam realizados estudos dos aspectos geológicos, estruturais e hidrogeológicos.

Apesar das dificuldades exploratórias, o SASG apresenta atualmente o maior número de poços outorgados do Paraná (ATHAYDE, 2013). Responsável pelo abastecimento público de 300 municípios inseridos no estado, o volume de água explotado nesta unidade aquífera contribuiu com 61% de toda água subterrânea captada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) no ano de 2010, o que representa um abastecimento potencial de cerca de 1.129.000 habitantes.

Além de assegurar a quantidade de água disponível, Rosa Filho et al. (2006) destacam a qualidade das águas subterrâneas do SASG, apresentando que a sua tipologia é preferencialmente classificada como bicarbonatada cálcica, com baixos teores de sólidos totais, o que caracteriza uma boa qualidade hídrica. Por estas razões, o SASG é a principal fonte de água subterrânea utilizada para abastecimento das cidades da região Sul do país (BITTENCOURT et al., 2003).

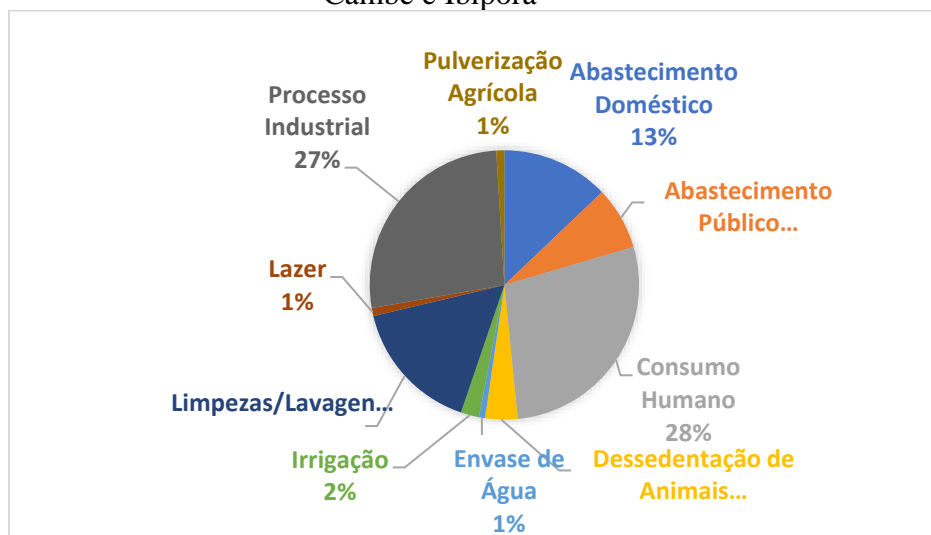
Nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã, o abastecimento público de água é assegurado em todas as regiões urbanas do município pelas concessionárias de água e, quanto às vilas rurais, o abastecimento é realizado por meio de sistemas próprios (poços), que são operados pelas próprias comunidades (LONDRINA, 2010). Os poços particulares podem ainda ser utilizados para abastecimento de indústrias, hotéis, hospitais, irrigação agrícola em períodos de estiagem e também em condomínios residenciais (ATHAYDE, 2013). No município de Londrina, o abastecimento público provém de diversas fontes hídricas, sendo elas de rios, ribeirões, do SASG ou SAG.

Entretanto, apesar de ser assegurada a quantidade, a qualidade do sistema não é garantida principalmente pelo fato de as águas superficiais sofrerem maior interferência antrópica, bem como pela possibilidade de encontrar águas salobras ou com altas temperaturas provenientes do SAG (LONDRINA, 2010). Neste sentido, é possível observar a importância do SASG para a região de Londrina visto que, por ser um aquífero sobreposto ao SAG, possui maior facilidade de exploração, menor temperatura da água, bem como exige menores dispêndios financeiros com a perfuração de poços, já que não exige poços tão profundos quanto os poços que explotam o SAG.

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município de Londrina, o abastecimento público de água é composto por dois sistemas de produção: o sistema de mananciais superficiais, composto pelo rio Tibagi e pelo ribeirão Cafezal e, o sistema de mananciais subterrâneos, que compreendem 8 poços que explotam o SASG e 2 poços que retiram água do SAG (LONDRINA, 2015). Cabe ressaltar que além do abastecimento público, são cadastrados no Instituto das Águas do Paraná cerca de 539 poços

tubulares particulares nos três municípios, sendo que 517 deles exploram o SASG. As águas subterrâneas do SASG atualmente são utilizadas para diversas finalidades em Londrina, Cambé e Ibiporã, como pode ser observado no Gráfico 2.1.

Gráfico 2.1 – Finalidades de utilização das águas subterrâneas do SASG em Londrina, Cambé e Ibiporã



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018)

Do gráfico apresentado, é possível observar que a utilização do aquífero para desenvolvimento dos processos industriais na região é bastante significativo, porém ao observar a porcentagem de poços aos quais as águas são destinadas ao abastecimento doméstico, público e consumo humano de modo geral, estes assumem papel de destaque, somando 43% dos poços. Portanto, o SASG é fundamental como fonte de abastecimento humano e também para a manutenção da economia regional.

2.6 A GEOESTATÍSTICA APLICADA ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No decorrer dos últimos 40 anos, Landim (2006) afirma que muitas mudanças têm ocorrido no campo das geociências, principalmente na geologia, que ainda a pouco tempo atrás era considerada uma ciência qualitativa, ou seja, capaz de puramente descrever fenômenos geológicos, o que têm sido modificado para um enfoque quantitativo graças à introdução de modelos matemáticos na explicação de fenômenos, bem como ao acesso a computadores digitais. O mesmo autor aponta ainda que nas geociências, os dados para realização dos estudos são coletados a partir de um plano de amostragem com coordenadas geográficas definidas e que é muito frequente a apresentação dos resultados por meio da elaboração de mapas.

Normalmente, quando se trabalha com amostragem, esta sempre apresenta uma relação custo-benefício que varia com o tipo e quantidade de amostras, ou seja, quanto maior a quantidade de amostras a serem coletadas, mais recursos financeiros deverão ser empregados (STURARO, 2015), o que faz com que o número de amostras disponíveis muitas vezes seja reduzido e insuficiente, exigindo que seja feita a determinação de estimativas para uma melhor compreensão de um fenômeno natural.

Vasconcelos e Souza (2009) apontam que a utilização de técnicas de estimativa permite inferir grandezas de um fenômeno no espaço não amostrado a partir da informação existente das amostras já disponíveis. Além disso, Yamamoto e Landim (2013) citam que a estimativa de recursos que se baseia em amostras está sujeita a incertezas, sendo de extrema importância a avaliação destas incertezas. Todos estes aspectos são alguns dos problemas operacionais que podem ser superados por meio da geoestatística.

Na geoestatística, as variáveis são tratadas como regionalizadas, ou seja, as avaliações que são realizadas com estas variáveis devem considerar as relações espaciais existentes entre as amostras (ANDRIOTTI, 1988). Ainda de acordo com o autor, o termo “variável regionalizada” é assim denominado devido ao aspecto aleatório e estruturado dos dados: é aleatório devido a considerável variação entre si dos valores das medições e é estruturado no sentido de que os valores das amostras não são completamente independentes da sua localização geográfica.

Landim (2006) exemplifica estes aspectos para uma jazida mineral, afirmando que não é possível prever exatamente o teor de um minério em um determinado ponto da jazida (aspecto aleatório), porém é provável que sejam encontrados altos teores de minério próximo a locais onde foram coletadas amostras também com altos teores de minério (aspecto estruturado).

Surgida na geologia, a geoestatística tem se estendido para outras ciências, como a agricultura de precisão, pedologia, cartografia, climatologia, geologia ambiental, geotecnia, hidrogeologia, entre outros, fazendo com que até mesmo as versões mais atuais de softwares e SIG's apresentem em sua interface os métodos geoestatísticos e permitam a modelagem dos fenômenos ambientais (LANDIM, 2006).

No campo da hidrogeologia, muitas são as aplicações dos modelos hidrogeológicos desenvolvidos por métodos geoestatísticos. Os modelos hidrogeológicos podem ser desenvolvidos para representar matematicamente o fluxo de água subterrânea em um aquífero, o transporte e concentração de substâncias contaminantes, a elaboração de superfícies piezométricas, velocidades de fluxo, entre outros (VASCONCELOS; SOUSA, 2009).

Lisboa et al. (2016) aplicou os métodos geoestatísticos para o estudo de índices de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos à contaminação, para fazer um mapeamento destas informações num domínio espacial. Os mesmos autores explicam que estas geoinformações são de extrema importância, além do que os métodos funcionam como ferramentas de gestão visando a proteção das águas subterrâneas, porém estas informações não são regularmente distribuídas no espaço, levando à necessidade de utilizar modelos de interpolação para estimar os valores nas áreas não amostradas e contornar esta limitação.

Neste sentido, os procedimentos geoestatísticos permitem que sejam representados o comportamento de um conjunto de parâmetros hidrodinâmicos com posição geográfica – normalmente coletados de poços tubulares e sondagens geofísicas – por meio de procedimentos de interpolação, além de promoverem uma investigação das variações naturais dos parâmetros e suas possíveis correlações, gerando ao final informações e mapas de contorno com as estimativas destes parâmetros para o conhecimento da potencialidade e reservas aquíferas, bem como para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos (VASCONCELOS; SOUSA, 2009).

Atualmente, os mecanismos interpoladores podem ser amplamente aplicados à diversos dados hidrogeológicos, que se faz necessário devido à deficiência e escassez de pontos de amostragem, ou seja, pontos de monitoramento e coleta, funcionando como ferramenta para a obtenção de informações de forma indireta e tornando possível espacializar informações de forma concisa em uma determinada área (MACEDO et al.; 2014). Entretanto, para realizar esse procedimento, que possui uma natureza matemática, é necessário ajustar uma função de correlação espacial aos pontos não amostrados, baseando-se em valores dos pontos amostrados, para buscar compreender a aleatoriedade dos dados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) (LISBOA et al.; 2016).

O estudo das variáveis regionalizadas é constituído por duas ferramentas de extrema importância que compõem os métodos geoestatísticos, que são o semivariograma e a *krigagem* (LANDIM, 2006). O semivariograma, segundo Sturaro (2015) tem como ferramenta de análise a função semivariograma, que são aplicados para a observação da isotropia ou anisotropia do fenômeno em estudo. O autor define ainda que a função semivariograma representa a hipótese intrínseca e é utilizada para expressar a variabilidade espacial em uma certa direção. O semivariograma representa o gráfico das semivariâncias das diferenças dos valores experimentais situados a intervalos regulares.

O semivariograma é, portanto, uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância, que pode ser bastante variável conforme a direção considerada e, quando em posse do semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo a uma modelo teórico, ou seja, uma função matemática que pode definir os parâmetros do semivariograma e expressar a estrutura de dependência espacial da característica hidrogeológica (Melo et al., 2005); (LANDIM, 2006). Os modelos podem ser do tipo esférico, exponencial, gaussiano e potencial.

Esta etapa de modelagem da regionalização de uma propriedade ou característica hidrogeológica por meio da estimação do semivariograma experimental, como cita Vasconcelos e Sousa (2009), é considerado como pré-requisito para a realização da *krigagem*. De acordo com Yamamoto e Landim (2013) a *krigagem* se caracteriza como um processo geoestatístico que estima valores de variáveis distribuídas no espaço, com base em valores adjacentes quando estes são considerados interdependentes pela análise variográfica.

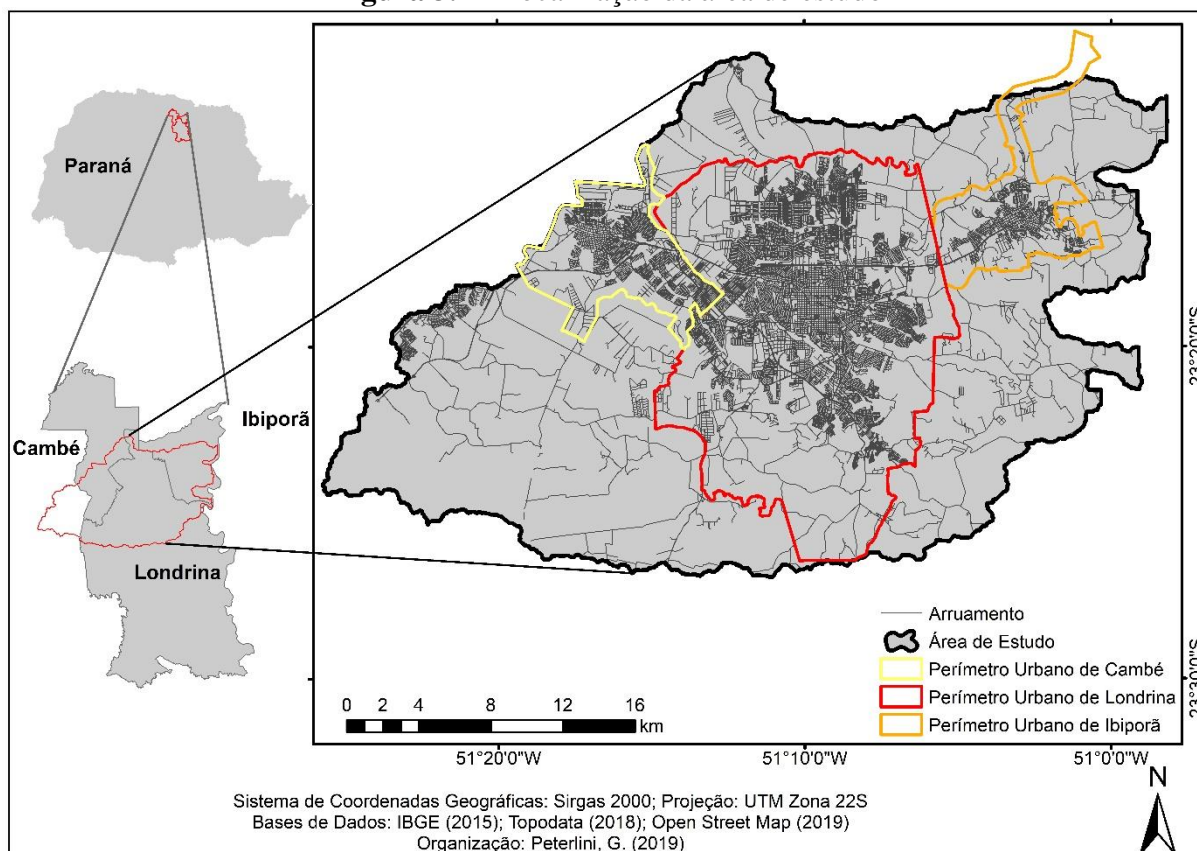
Na *krigagem*, como explica Camargo et al. (2004), o procedimento para a estimativa dos valores nos pontos não amostrados é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, porém os pesos a serem utilizados nos cálculos são determinados após a análise espacial baseada no semivariograma experimental. Além disto, de acordo com os autores, a *krigagem* é um procedimento que fornece estimativas não tendenciosas com uma variância mínima, ou seja, a diferença entre os valores estimados e observados deve ser nula para um mesmo ponto. Portanto, a *krigagem* procura minimizar, sem viés, o erro de estimação (STURARO, 2015).

A minimização do erro nos valores estimados, de acordo com Landim (2006), é o que distingue a *krigagem* dos demais algoritmos de estimativa. O autor destaca ainda que, dentre as técnicas de estimativa disponíveis na geoestatística, a mais comum a ser utilizada é a *krigagem* ordinária. Entretanto, apesar de ser o mais utilizado, este estimador apresenta um erro ($\varepsilon = V - V^*$, sendo V o valor real desconhecido no ponto), que tende a ser menor ou até mesmo zero se forem realizadas diversas estimativas, fazendo com que quanto mais o erro se aproxima de zero, maior a confiança do método estimador (LANDIM, 2006).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho compreende as bacias hidrográficas que estão, parte ou integralmente, inseridas nos perímetros urbanos dos municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã, localizada entre as coordenadas 23°11'07" e 23°26'58" de latitude sul e 51°25'47" e 50°58'10" de longitude oeste, como pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Localização da área de estudo



A área foi assim escolhida por apresentar uma grande quantidade de poços tubulares profundos, que são perfurados principalmente em áreas mais urbanizadas, onde se concentra maior quantidade populacional e grande número de indústrias. As características físicas da área são apresentadas a seguir.

3.1 CLIMA

O clima na área é característico dos municípios onde a mesma está inserida que, de acordo com a classificação de Koppen, é classificado como sendo do tipo subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com “temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida” (IAP, 2003). Além disto, a precipitação anual para os municípios de Cambé e Ibiporã encontram-se na faixa de 1400 – 1600 mm, enquanto que para o município de Londrina, os valores variam de 1600 – 1800 mm ao ano (IAPAR, 2019).

Neste sentido, a média histórica de pluviosidade no período de 1976 a 2010 para os municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã, segundo o Instituto das Águas do Paraná (2019) foram de 1560,4 mm, 1609,5 mm e 1513,7 mm respectivamente, o que corrobora com a classificação pluviométrica apresentada.

3.2 GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A área de estudo possui como embasamento geológico a Bacia Sedimentar do Paraná, que possui 3 compartimentos geológicos principais: paleozoico, mesozoico e cenozoico. O mesozoico, por sua vez, é subdividido nos grupos Bauru e São Bento. Neste sentido, a área de estudo localiza-se no compartimento Mesozoico e suas rochas pertencem ao Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral, composta por rochas ígneas, provenientes de extensos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea. São rochas efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços, vesiculares, amigdalóides, afaníticos, cinzentos a pretos. (MINEROPAR, 2003).

Rebouças e Fraga (1988) explicam que os derrames da Formação Serra Geral se apresentam como uma série de unidades sobrepostas devido ao intenso vulcanismo ocorrido, originando um relevo de extensos platôs, que foram posteriormente dissecados por processos de intemperismo.

Além das rochas da Formação Serra Geral, podem existir ainda, conforme o Mineropar (2001) e a Prefeitura de Londrina (2010), intercalações de material sedimentar, como arenitos e siltitos, entre dois derrames consecutivos, bem como depósitos aluvionares restritos, formados por sedimentos inconsolidados oriundos da erosão e deposição litológicas, que foi condicionado às calhas de drenagem dos rios e planícies de inundação. Os autores citam ainda

que há também a presença de falhas e/ou fraturas, chamadas lineamentos estruturais, com sentidos predominantes NE-SW e NW-SE, enquanto Zalán et al. (1987) destacam ainda a existência de um grupo importante de lineamentos com orientação E-W.

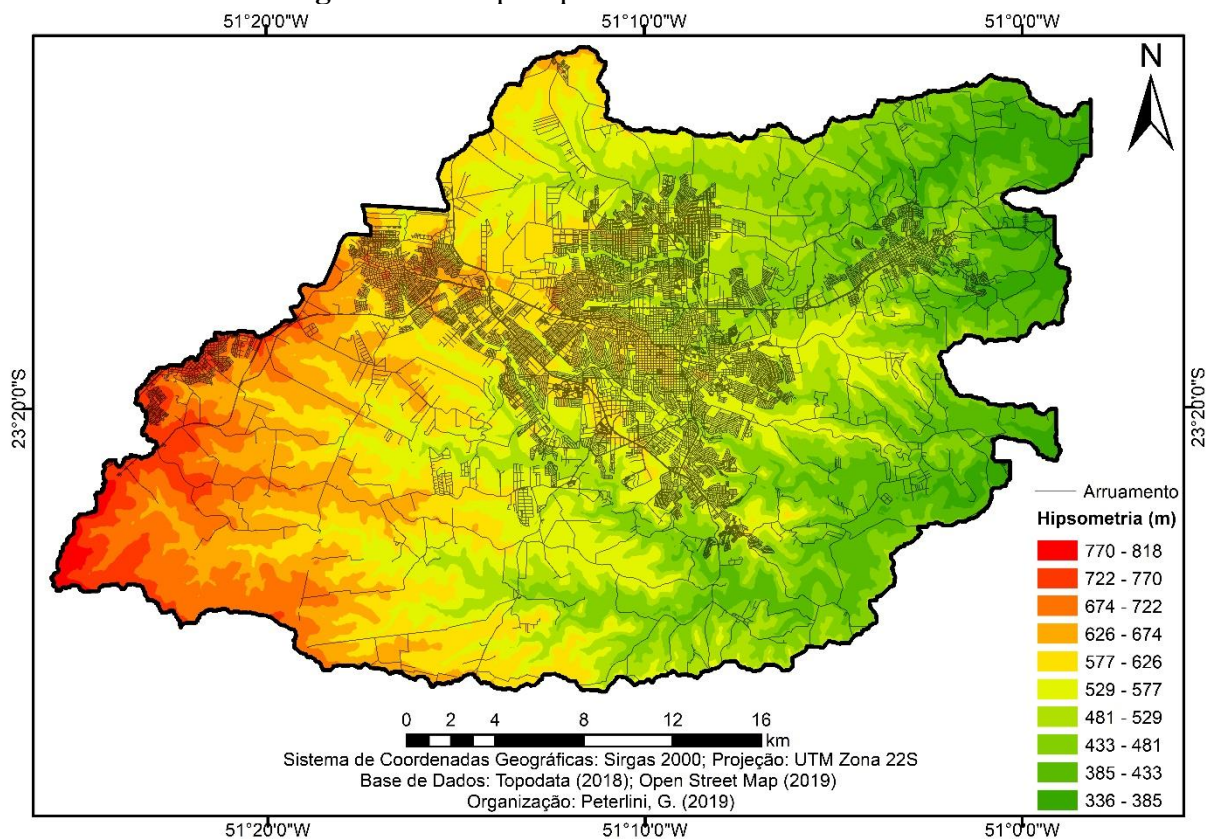
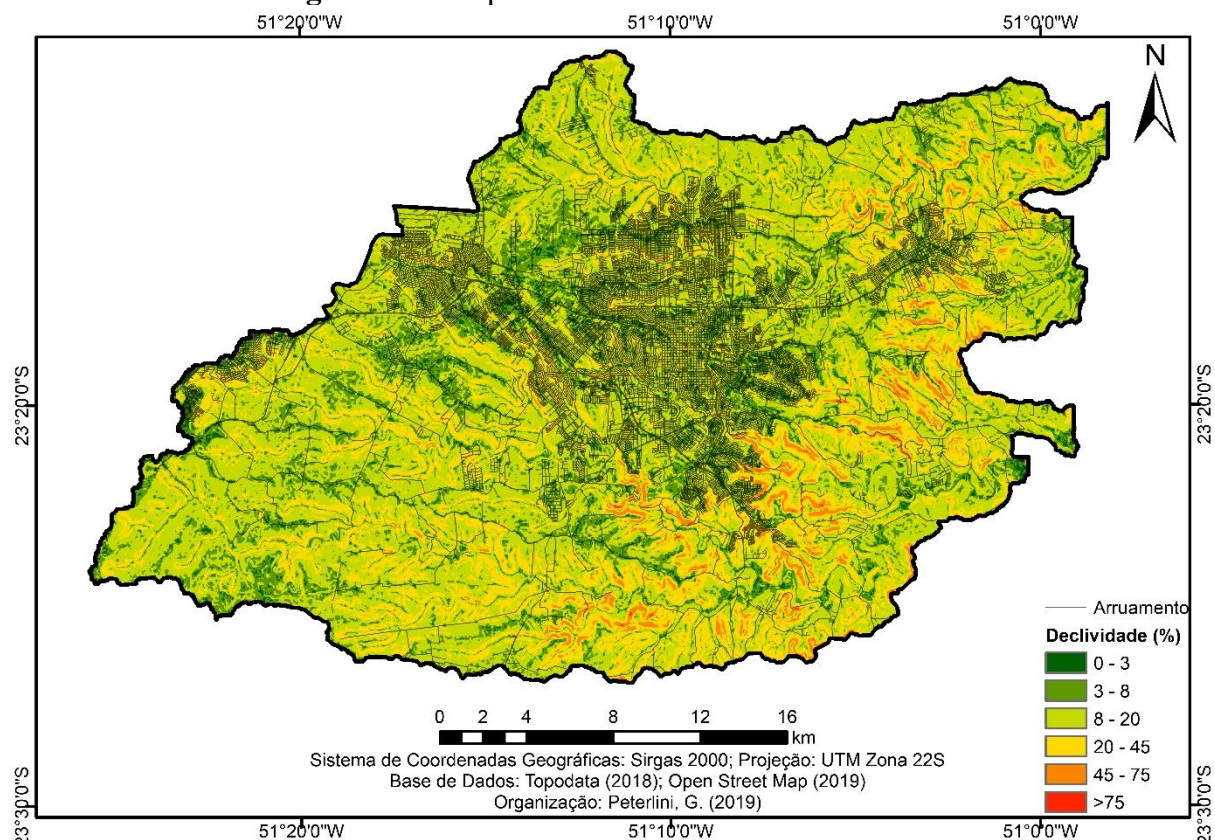
Estes lineamentos permitem o armazenamento e circulação da água subterrânea nas rochas desta região, constituindo uma importante unidade hidrogeológica, o SASG, que teve sua hidrogeologia e importância regional detalhadamente descrita no capítulo 2. O sentido principal do fluxo subterrâneo segue a inclinação do relevo, de oeste para leste, em direção às calhas do rio Tibagi.

3.3 GEOMORFOLOGIA

A unidade morfoestrutural na área, como citado anteriormente, é a Bacia Sedimentar do Paraná, que tem como embasamento rochas cristalinas pré-cambrianas. Após o fim da deposição da Formação Rio do Rastro, com a ocorrência de um ciclo erosivo no período Triássico Médio, formou-se o Grupo São Bento, inicialmente por sequências sedimentares das formações Pirambóia e Botucatu. Posteriormente, houve a ocorrência de intensos derrames de lavas basálticas sobre estes sedimentos, dando origem à Formação Serra Geral (MINEROPAR, 2001); (ARCHELA et al., 2003); (MINEROPAR, 2006).

Este grande derrame de rochas eruptivas básicas, de acordo com o Mineropar (2006), se apresenta como uma espécie de capeamento sobre sedimentos paleozoicos, constituindo assim o Terceiro Planalto Paranaense, que possui a característica de relevos planálticos, de inclinação oeste-noroeste. Situada na unidade morfoescultural do Terceiro Planalto Paranaense, a área de estudo tem como subunidades morfoesculturais os Planaltos de Londrina e Maringá. Apresenta um relevo com dissecação de média (no Planalto de Londrina) a baixa (no Planalto de Maringá), com topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V” (MINEROPAR, 2006).

As altitudes, como pode ser observado na Figura 3.2, variam de 336 a 818 metros, com áreas mais altas na porção oeste, que decrescem em direção à porção leste, onde existem as áreas de menor altitude que constituem as calhas de drenagem do Rio Tibagi. A declividade (Figura 3.3) varia por toda a área, porém há predomínio de declividades $\leq 12\%$ no centro e em direção à oeste da área, característica de um relevo suavemente ondulado, e $>12\%$ em toda a direção leste e sul, onde há predomínio de relevos ondulados a fortemente ondulados.

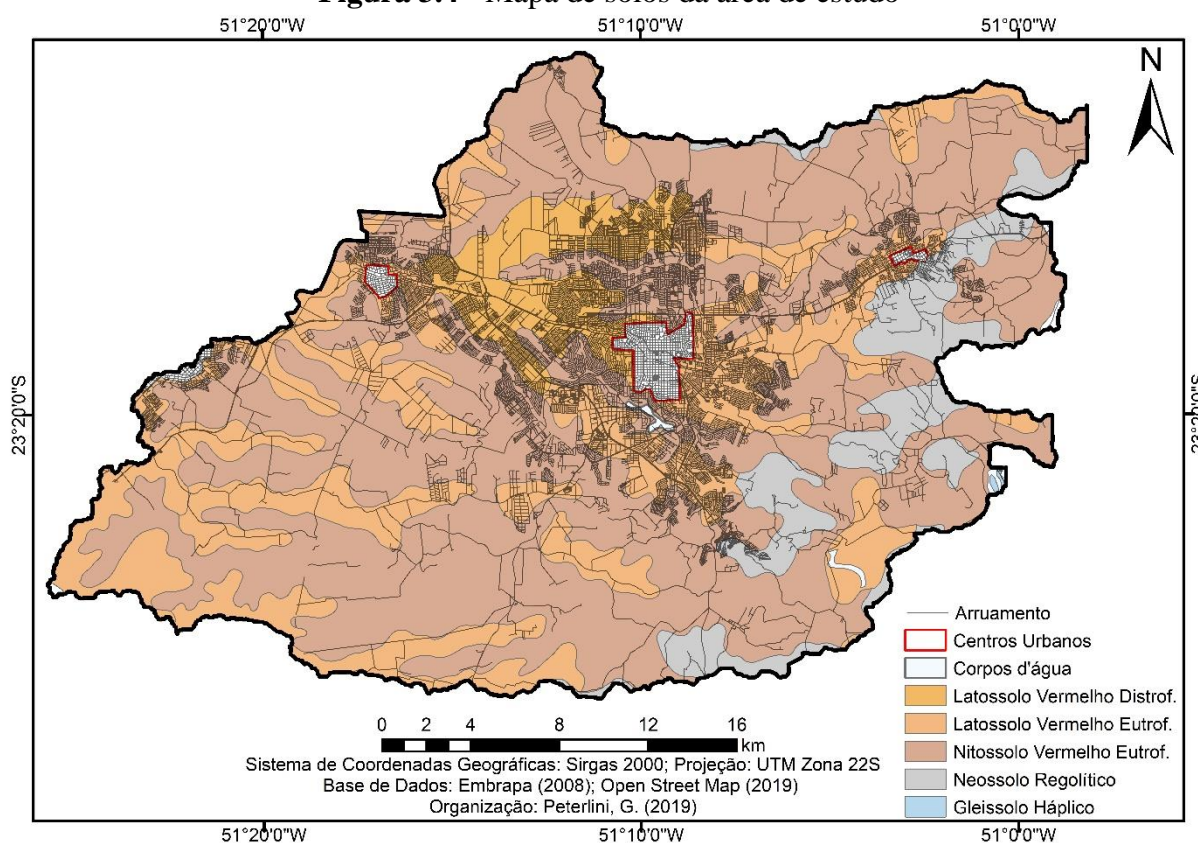
Figura 3.2 - Mapa hipsométrico da área de estudo**Figura 3.3 - Mapa de declividade da área de estudo**

3.4 PEDOLOGIA

Na área de estudo podem ser identificados cinco tipos de solo que podem ser visualizadas na Figura 3.4: Latossolo Vermelho Distroférico, Latossolo Vermelho Eutroférico, Nitossolo Vermelho Eutroférico, Neossolo Regolítico Eutrófico e Gleissolo Háplico.

Os Latossolos Vermelhos apresentam uma coloração vermelho-escura acentuada, originada por conta dos elevados teores de óxido de ferro. São solos argilosos, formados em ambientes nos quais o material de origem são rochas básicas, como os basaltos da formação Serra Geral na Bacia Sedimentar do Paraná. O perfil do solo apresenta grande homogeneidade, são profundos e possuem estrutura forte pequena granular, semelhante ao pó de café, portanto, podem ser porosos ou muito porosos, facilitando o desenvolvimento radicular de plantas a profundidades maiores (IBGE, 2007).

Figura 3.4 - Mapa de solos da área de estudo



O termo “distroférico” caracteriza solos com baixa fertilidade e altos teores de ferro, enquanto o “eutroférico” mantém os altos teores de ferro, porém possuem alta

fertilidade. De acordo com a Embrapa (2008), na região os Latossolos presentes se desenvolvem em áreas de relevo plano ou suave ondulado.

Já os Nitossolos Vermelhos Eutroféricos são fortemente desenvolvidos, apresentam textura argilosa, homogênea e pouca diferença de coloração entre os horizontes. Anteriormente denominados de Terra Roxa Estruturada, os Nitossolos também são derivados de rochas básicas. Sua estrutura é identificada em blocos, que pode ser mais facilmente observada no horizonte B nítico (IBGE, 2007); (IAC, 2014). Os Nitossolos na região desenvolveram-se sobre um relevo suave ondulado a ondulado.

Segundo a Embrapa (2008), os Neossolos Regolíticos Eutróficos presentes na área de estudo apresentam uma textura argilosa e pedregosa, apesar de os Neossolos possuírem textura arenosa. São solos pouco desenvolvidos, ou seja, rasos e não apresentam nenhum tipo de horizonte B diagnóstico. Desenvolvem-se em substratos de rochas eruptivas básicas, normalmente em relevos mais acidentados. O termo “eutrófico” caracteriza Neossolos com alta fertilidade.

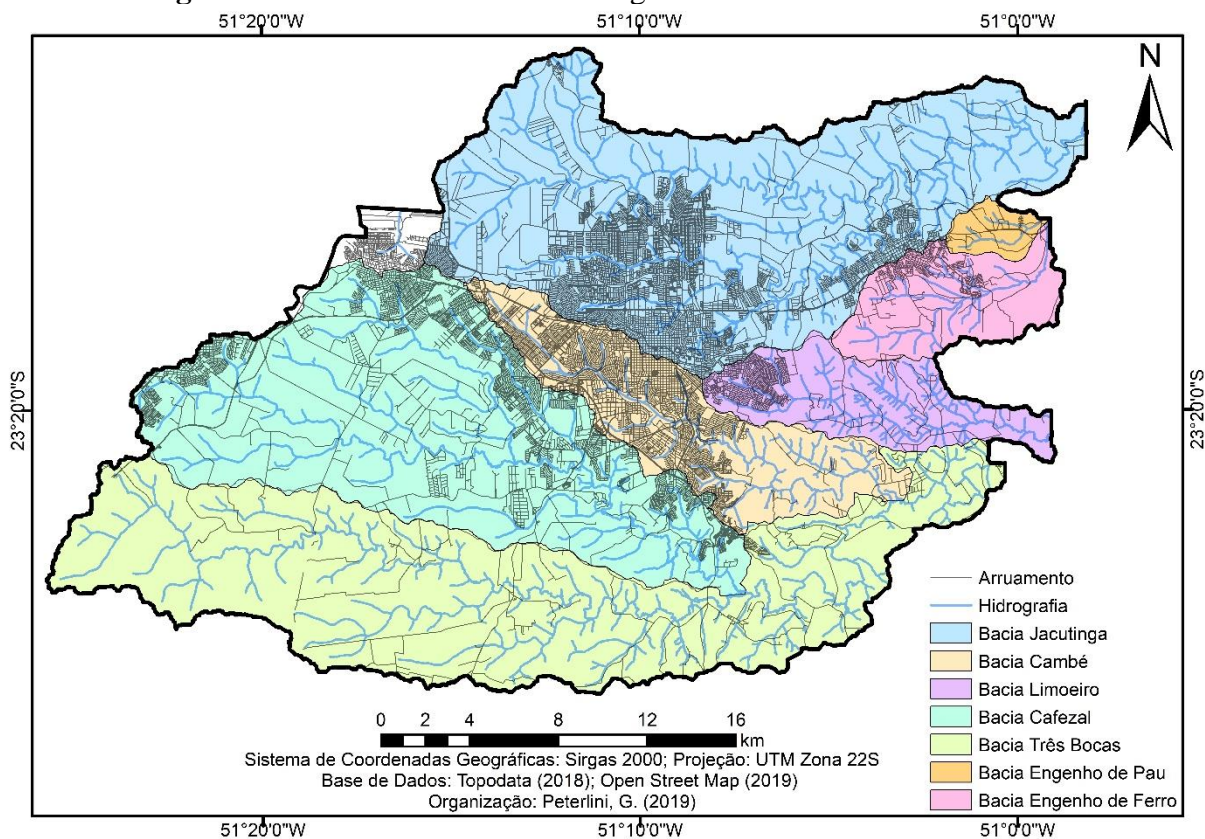
Por fim, os Gleissolos Háplicos ocupam uma parte muito pequena da área de estudo, localizando-se mais à Sudeste, na calha do Rio Tibagi. As regiões relativamente mais baixas do relevo e planícies aluviais são as áreas onde se desenvolvem este tipo de solo. São solos mal drenados, em que a água é lentamente removida e permanecem saturados por água a maior parte do ano (IBGE, 2007). De forma geral, os Gleissolos são formados por sedimentos recentes, apresentam cores cinzentas a pretas no horizonte superficial, são rasos e com médios a altos teores de carbono orgânico (SANTOS; ZARONI, 2019).

3.5 HIDROGRAFIA

A área de estudo compreende um conjunto de sete bacias hidrográficas predominantemente urbanas, localizadas na região de Londrina (Figura 3.5). As bacias que a constitui são: Bacia do Ribeirão Jacutinga, ao norte; Bacias dos Ribeirões Engenho de Pau, Engenho de Ferro e Limoeiro à leste; Bacia do Ribeirão Cambé na porção central; Bacia do Ribeirão Três Bocas, ao sul e Bacia do Ribeirão Cafezal à oeste.

A Bacia do Ribeirão Jacutinga é responsável pelo abastecimento do município de Ibiporã. Com exceção dos ribeirões Cafezal e Cambé, que possuem sua foz no Ribeirão Três Bocas, todas as demais bacias deságuam no Rio Tibagi, que se constitui na principal fonte de abastecimento superficial dos municípios de Cambé e Londrina, seguido pelo Ribeirão Cafezal.

Figura 3.5 - Domínio de bacias hidrográficas urbanas da área de estudo



4 FATORES GEOLÓGICOS E PEDOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM NA PRODUTIVIDADE DO SISTEMA AQUIFERO SERRA GERAL (SASG)

4.1 RESUMO

O aumento do uso dos recursos hídricos subterrâneos se contrasta com a deficiência no conhecimento do potencial dos aquíferos fraturados e dos fatores ambientais que contribuem para uma melhor produtividade aquífera. Considerados fatores influentes na produtividade hídrica, as Estruturas Interderrames (E) – fraturas, vesículas e amígdalas – e a Espessura de Solo (S) foram analisadas neste trabalho com o objetivo de avaliar sua influência sobre a vazão (Q) e capacidade específica (*c*) de poços que explotam o SASG no norte do Paraná. Foram obtidos dados de evolução da perfuração e S de 60 perfis de poços, calculando-se a porcentagem de E presente nos perfis geológicos e observando o valor de S. Para avaliar a influência do tipo de E, foram criados três grupos de poços e comparados os dados de Q e *c*, enquanto que para avaliar se a quantidade de E e S influenciam na produtividade aplicou-se a análises de Correlação Linear de Pearson, Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC). Os resultados mostram que o único grupo que apresentou correlação moderada ($r = 0,51$) com Q foi o grupo que apresentavam os três tipos de estruturas no perfil (vesículas, amígdalas e fraturas). A S apresentou uma correlação baixa com Q ($r = 0,37$) e muito baixa com *c* ($r = -0,18$). A MANOVA e ADC confirmaram que a única variável que sofre influência da quantidade de E e S é Q. Além disto, foi possível observar que a quantidade de E é diretamente proporcional à Q, enquanto S é inversamente proporcional. Foi possível concluir que E e S exercem influência sobre a produtividade aquífera bem como identificar que E exerce maior influência que S.

Palavras-chave: Produtividade Aquífera. Aquíferos Fraturados. Estruturas Interderrames. Espessura de Solo. Estatística Multivariada.

4.2 ABSTRACT

The increase of underground water resources contrasts with the lack of knowledge about fractured aquifers potential and environmental factors that contribute to a better aquifer productivity. Acknowledged as influence factors on water productivity, Inter-flow Structures (E) – fractures, vesicles and amygdules- and Soil Thickness (S) were analyzed in the paper aiming the objective of evaluating their influence over flow rate (Q) and specific capacity (*c*) of wells that are in the SASG, on the north region of Paraná. Information was obtained on evolution of drilling and S of 60 well profiles by calculation the percentage of E shown on the geological profiles and noticing the S values. In order to evaluate the influence of the E type, three well groups were created and the data of Q and *c* were compared, as to evaluate if the amount of E and S have a role on the productivity it was used Pearson's Linear Correlation, Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) and Canonical Discriminant Analysis (CDA). The results show that the only group which presented a medium correlation ($r = 0,51$) with Q was the one who showed all three types of structures on the profile (vesicules, amygdules and fractures). The S showed a small correlation with Q ($r = 0,37$) and very small correlation with *c* ($r = -0,18$). MANOVA and CDA confirmed that the only variable that suffers influence of the values of E and S is Q. In addition, it was possible to observe that the amount of E is directly proportional to Q, while S inversely proportional. It was possible to conclude that E and S play a role on aquifer productivity as well as identify that E has a bigger influence than S.

Keywords: Aquifer Productivity. Fractured Aquifer. Inter-flow Structures. Soil Thickness. Multivariate Statistics

4.3 INTRODUÇÃO

O aumento populacional e a poluição das águas superficiais têm levado a um consequente aumento na demanda por recursos hídricos subterrâneos, isto porque, de acordo com Abreu et al. (2016), as águas subterrâneas são consideradas fontes seguras de água durante períodos de estiagem, além de apresentarem menor vulnerabilidade à contaminação e possuírem excelente qualidade, muitas vezes sem necessidade de tratamentos.

Este aumento de demanda já ocorre na região de Londrina, Cambé e Ibiporã, municípios localizados no norte do estado do Paraná, que apresentam uma grande quantidade de poços tubulares profundos. A água subterrânea nestes municípios é amplamente utilizada para os mais diversos fins, principalmente no abastecimento da população e no desempenho das atividades industriais. Entretanto, apesar da sua importância para o desenvolvimento socioeconômico regional, o aumento do uso dos recursos hídricos subterrâneos se contrasta com a deficiência existente no conhecimento do potencial hídrico dos reservatórios (ZOBY, 2008); (ROQUES et al., 2016); (ABREU et al., 2016).

Os poços presentes na região, em sua maioria, exploram o SASG, o qual se constitui um aquífero do tipo fraturado, em que a porosidade e permeabilidade primária do embasamento rochoso é baixa, fazendo com que a circulação e armazenamento da água ocorra devido às descontinuidades físicas da rocha (falhas e/ou fraturas que se interconectam entre si e com estruturas vesiculares/amigdaloidais) dando origem a um sistema aquífero heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, de difícil avaliação e exploração, onde as propriedades hidráulicas podem resultar em sistemas altamente variáveis e de baixa produtividade (REBOUÇAS, 1978); (ROSA FILHO et al., 2006); (ATHAYDE, 2012); (ROQUES et al., 2016).

Neste sentido, os temas de maior interesse na exploração dos aquíferos são a disponibilidade hídrica subterrânea e a produtividade de poços (ZOBY, 2008). Quando se trata de aquíferos fraturados, Holand e Witthüser (2011) bem como Abreu et al. (2016) apontam que estes apresentam diferenças importantes de outros tipos de aquíferos, exigindo que se tenham conhecimentos adequados e se empreguem técnicas específicas para um gerenciamento eficiente deste recurso hídrico, destacando ainda que um dos maiores desafios da hidrogeologia de meios fraturados é a compreensão e conhecimento dos fatores que controlam a ocorrência e a produtividade hídrica.

São muitos os autores que buscam identificar qual(is) os fator(es) ambientais que exercem maior influência sobre a produtividade hídrica em meios fraturados (COSTA, 1986); (COSTA; SILVA, 2000), (CORIOLANO, 2000); (HOLAND; WITTHÜSER, 2011); (REGINATO et al., 2012). Os principais fatores citados compreendem fatores externos e internos à crosta, dentre eles o clima, topografia, tipo de rocha, presença de estruturas tectônicas (lineamentos estruturais) e estruturas interderrames (fraturas de resfriamento e alívio de pressão, bem como vesículas e amígdalas), espessura de solo, vegetação e hidrografia.

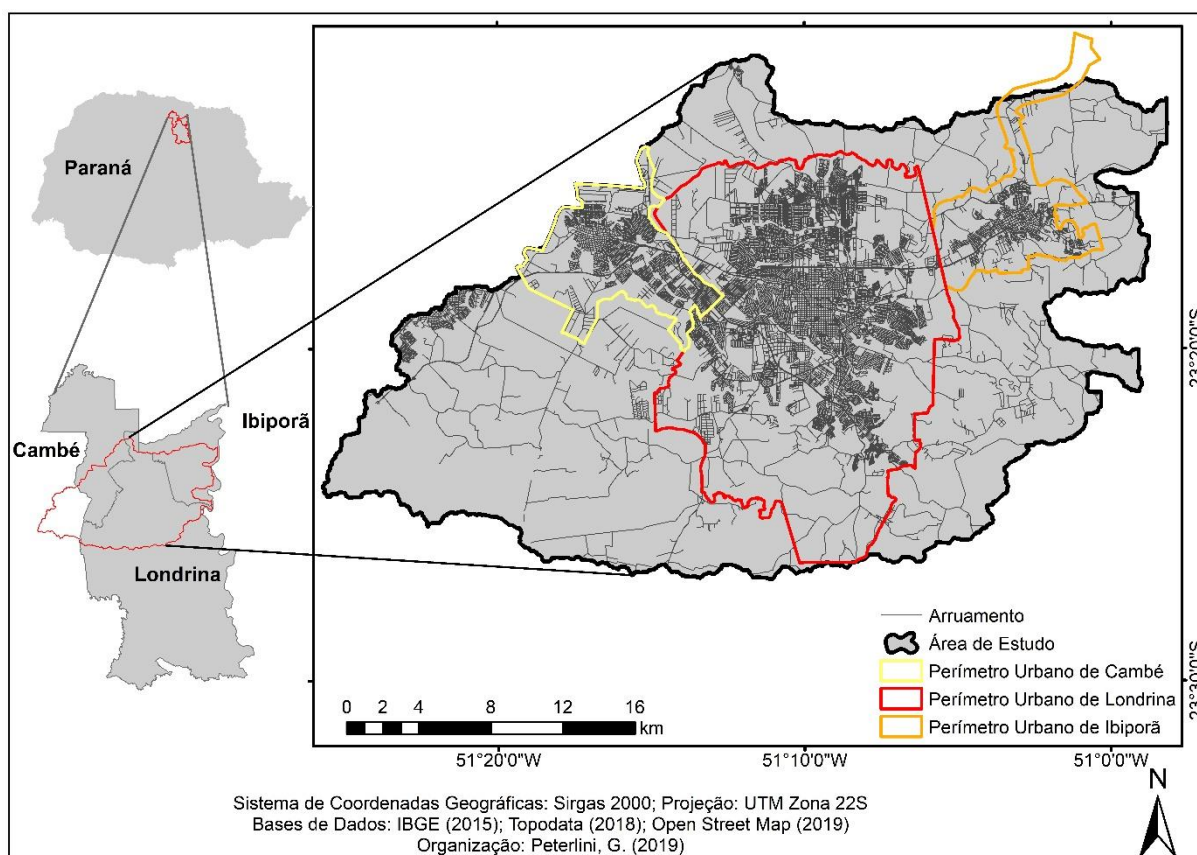
Além disto, trabalhos como o de Celligoi e Duarte (1997) e Peterlini (2017) demonstram a influência que alguns destes fatores exercem sobre a produtividade hídrica do SASG para a região de Londrina. Contudo, fatores importantes como a quantidade e tipo de estruturas interderrames e espessura de solo, considerados por Costa e Silva (2000) como de elevada influência para a produtividade hídrica, ainda não foram avaliados.

Considerando estes fatos, o objetivo do presente trabalho é analisar a influência que as estruturas interderrames e a espessura de solo exercem sobre a vazão e capacidade específica de poços tubulares que exploram o SASG nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã, para melhor compreender a contribuição destes fatores para o aumento da produtividade hídrica do aquífero, a fim de que isto auxilie o desenvolvimento de métodos de predição de áreas de maior produtividade hídrica na região.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho compreende as bacias hidrográficas que estão, parte ou integralmente, inseridas nos perímetros urbanos dos municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã, localizada entre as coordenadas 23°11'07" e 23°26'58" de latitude sul e 51°25'47" e 50°58'10" de longitude oeste, como pode ser observado na Figura 4.1. A área foi assim escolhida por apresentar uma grande quantidade de poços tubulares profundos, que são perfurados principalmente em áreas mais urbanizadas, onde se concentra maior quantidade populacional e grande número de indústrias.

Figura 4.1 - Localização da Área de Estudo



O clima na área é classificado, de acordo com a classificação de Koppen, como subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com “temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida” (IAP, 2003). Além disto, a precipitação anual para os municípios de Cambé e Ibiporã encontram-se na faixa de 1400 – 1600 mm, enquanto que para o município de Londrina, os valores variam de 1600 – 1800 mm ao ano (IAPAR, 2019).

A área de estudo localiza-se no compartimento Mesozoico da Bacia Sedimentar do Paraná e suas rochas pertencem ao Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral, composta por rochas ígneas, provenientes de uma série de extensos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea. São rochas efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços, vesiculares, amigdalóides, afaníticos, cinzentos a pretos (REBOUÇAS; FRAGA, 1988); (MINEROPAR, 2003). Há também a presença de falhas e/ou fraturas, chamadas lineamentos estruturais, com sentidos predominantes NE-SW e NW-SE, além da

existência de um grupo importante de lineamentos com orientação E-W (ZÁLAN et al. (1987); (MINEROPAR, 2001); (LONDRINA, 2010).

Estes lineamentos permitem o armazenamento e circulação da água subterrânea nas rochas desta região, constituindo uma importante unidade hidrogeológica do tipo fraturada, o SASG. Além disto, a estrutura dos derrames, conforme ocorrido o movimento, resfriamento e conteúdo dos gases de lava, originou camadas caracterizadas por uma zona basal, uma zona intermediária e uma zona de topo vesicular ou amigdaloidal (ROSA FILHO et al., 2006). Existem ainda, segundo dados do Instituto das Águas do Paraná, cerca de 230 poços tubulares que exploram o SASG na área de estudo.

Quanto à geomorfologia, a unidade morfoestrutural é a Bacia Sedimentar do Paraná, enquanto que a unidade morfoescultural é a do Terceiro Planalto Paranaense. Os Planaltos de Londrina e Maringá são as subunidades morfoesculturais observadas, apresentando um relevo com dissecação de média (no Planalto de Londrina) a baixa (no Planalto de Maringá), com topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em V (MINEROPAR, 2001); (ARCHELA et al., 2003); (MINEROPAR, 2006). As altitudes variam de 337 a 817 metros, com áreas mais altas na porção oeste, que decrescem em direção à porção leste. Há predomínio de declividades $\leq 12\%$ no centro e em direção à oeste da área, característica de um relevo suavemente ondulado, e $>12\%$ em toda a direção leste e sul, onde há predomínio de relevos ondulados a fortemente ondulados.

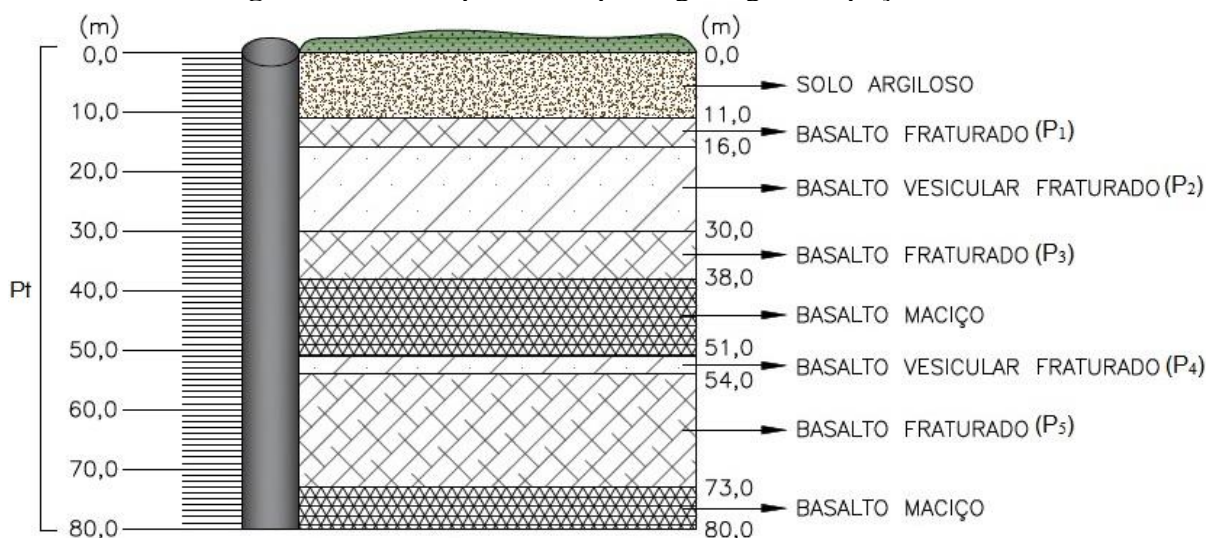
Nas áreas de relevo plano ou suave ondulado, se desenvolveram Latossolos Vermelhos que podem ser eutroféricos ou distroféricos. São solos argilosos, homogêneos, profundos, porosos ou muito porosos (IBGE, 2007); (EMBRAPA, 2008). Já as regiões de relevo suave ondulado a ondulado apresentam Nitossolos Vermelhos Eutroféricos que são fortemente desenvolvidos, possuem textura argilosa, homogênea e pouca diferença de coloração entre os horizontes (IBGE, 2007); (IAC, 2014).

Nas áreas de relevos mais acidentados encontram-se os Neossolos Regolíticos Eutróficos, que apresentam uma textura argilosa, são rasos e pedregosos (EMBRAPA, 2008) e, junto à calha do rio Tibagi, áreas mais baixas e de planícies aluviais, desenvolveram-se os Gleissolos Háplicos, que de forma geral, são formados por sedimentos recentes, apresentam cores cinzentas a pretas no horizonte superficial, são rasos e com médios a altos teores de carbono orgânico (SANTOS; ZARONI, 2019).

4.5 OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Para avaliação da quantidade de estruturas do embasamento rochoso, bem como das espessuras de solo, foram obtidos junto ao Instituto das Águas do Paraná os dados de 60 poços tubulares presentes na área. Foram observados os perfis geológicos de cada poço, que indicam os intervalos de perfuração e características pedológicas e geológicas locais, como a espessura de solo e a presença de vesículas, amígdalas e fraturas no basalto. Na Figura 4.2 está representado um exemplo do perfil geológico de um poço tubular.

Figura 4.2 - Exemplo de um perfil geológico de poço tubular



Fonte: a própria autora

Neste sentido, para o estudo das estruturas, foi feita a somatória das espessuras de rocha que apresentavam vesículas, amígdalas e fraturas (P_i , onde $i = 1, 2, \dots, n$) e posteriormente, considerando a profundidade total do poço (P_t), foi calculada a porcentagem de estruturas ($\%e$) presentes no perfil utilizando a equação 4.1:

$$\%e = \frac{(\sum P_i) \cdot 100}{P_t} \quad 4.1$$

Quanto à espessura de solo, na descrição do perfil geológico já consta esta exata informação, evitando a necessidade de cálculos.

Foram obtidos ainda dados de vazão (Q), nível estático (NE) e nível dinâmico (ND) dos poços, para posterior cálculo da capacidade específica. A capacidade específica pode ser considerada, segundo Neves (2005) e Celligoi (1993), como o parâmetro que melhor representa a produtividade de poços tubulares. De acordo com o CPRM (1998), para o cálculo da capacidade específica (c) inicialmente deve-se calcular os valores de rebaixamento (s) dos poços, definido como a diferença entre nível dinâmico e estático ($NE - ND$) e, posteriormente, calcula-se a razão entre a vazão (Q) e o rebaixamento (Equação 4.2).

$$c = \frac{Q}{s} \quad 4.2$$

4.6 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO

De posse dos dados de estruturas, espessura de solo, vazão e capacidade específica, foi realizada a estatística descritiva destes parâmetros e, posteriormente, realizadas análises de correlação. O grau de correlação linear simples existente entre duas variáveis pode ser obtido por meio do coeficiente linear de Pearson (r), que pode variar de -1 a 1. Quando os valores de r se aproximam destes valores máximos, isso indica que a correlação linear é forte, enquanto que quando se aproximam de zero, a correlação é fraca ou mesmo nula. Gouvêa e Wendland (2011) explicam que quando a correlação é positiva, os valores mais altos de uma das variáveis estão associados aos valores mais altos da outra variável e, quando a correlação é negativa, os valores mais altos de uma variável estão relacionados aos valores mais baixos da outra variável.

Para auxiliar na compreensão de como o tipo de estrutura influencia a produtividade aquífera, foram criados três grupos de poços em que, o primeiro grupo apresentava poços que possuíam apenas estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal (EVA), o segundo grupo era formado por poços que apresentavam apenas estruturas do tipo fraturas (EF) e o terceiro grupo era composto por todos os poços que apresentavam estruturas vesicular/amigdaloidal e fraturas em um mesmo perfil geológico (EVAF). Para cada poço foram obtidos os valores de vazão e capacidade específicas e calculadas a média, mediana e o coeficiente r . Quanto à espessura de solo, não foi necessária sua separação por grupos.

Para avaliar como a quantidade de estruturas interderrames e a espessura de solo influenciam na vazão e capacidade específica dos poços – que é dependente da vazão, bem como dos níveis estático e dinâmico – foram aplicadas técnicas estatísticas de análise multivariada de dados, visto que, somente técnicas de estatística multivariada permitem que seja observado o comportamento conjunto das variáveis e que se determine a influência ou importância de cada uma, enquanto as demais estão presentes (CORRAR et al., 2012).

Desta forma, foi aplicada a Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e a Análise Discriminante Canônica (ADC). A MANOVA, segundo Hair et al. (2009) bem como Corrar et al. (2012), é uma técnica de análise de dependência que mede as diferenças entre duas ou mais variáveis dependentes métricas, quando estas podem ser separadas por um conjunto de variáveis categóricas (grupos), sendo estas últimas consideradas como variáveis independentes.

Segundo Hair et al. (2009), a MANOVA busca identificar diferenças existentes entre grupos em múltiplas variáveis simultaneamente, ou seja, cada grupo (variável independente) é observado em duas ou mais variáveis dependentes.

Além disto, a MANOVA pode ser uma técnica útil quando se manipula uma ou mais variáveis independentes para determinar o seu efeito sobre as variáveis dependentes, já que ela tem o objetivo de analisar a relação de dependência representada pelas diferenças do conjunto de medidas dependentes ao longo de uma série de grupos (HAIR et al., 2009). Neste sentido, a MANOVA foi aplicada para observar a relação de dependência existente entre a vazão e a capacidade específica dos poços (variáveis dependentes) com o aumento da quantidade de estruturas interderrames e da espessura de solo (variáveis independentes).

Para observar qual a variável causou a maior diferença entre os grupos e que, conseqüentemente, apresenta dependência, foram observados os valores de:

- Nível de significância (p): associado ao teste estatístico das diferenças entre dois ou mais grupos, em que são comumente adotados valores de $p < 0,05$, que levam à rejeição da hipótese nula e aceitação da hipótese alternativa de que as médias das populações não são iguais (HAIR et al., 2009)
- Critério de máxima verossimilhança (Lambda Wilks): utilizado para testar a hipótese nula da MANOVA. Varia de 0 (a diferença entre os grupos é máxima) a 1 (a diferença entre os grupos é mínima ou mesmo nula);
- Estatística F: é a razão entre a estimativa de variância entre grupos e a estimativa de variância dentro de grupos. Também é utilizada para rejeitar a hipótese nula de que as médias dos grupos são iguais. Portanto, grandes valores de F indicam que há diferenças entre os grupos (HAIR et al.; 2009)

Já a ADC, como explica Corrar et al. (2012) é definida como uma técnica estatística multivariada que auxilia na identificação de quais variáveis conseguem diferenciar cada grupo que foi definido *a priori* e quantas destas variáveis analisadas são necessárias para que se obtenha uma melhor classificação dos dados, fazendo com que a ADC funcione como uma maneira de se confirmarem os achados da MANOVA. Portanto, segundo os autores, o principal objetivo da ADC é entender as diferenças existentes entre os grupos para prever a qual classe ou grupo um indivíduo ou objeto pertence.

Desta forma, utilizou-se da ADC para identificar como as variáveis indicadoras de produtividade hídrica influenciam na segregação dos grupos definidos, bem como observar como os dados se comportam de acordo com a classificação da quantidade de estruturas interderrames e espessura de solo (grupos) estabelecidas *a priori*. Para tanto, foi plotado o

gráfico de dispersão dos scores canônicos gerados pelas funções discriminantes e observada a separação dos grupos.

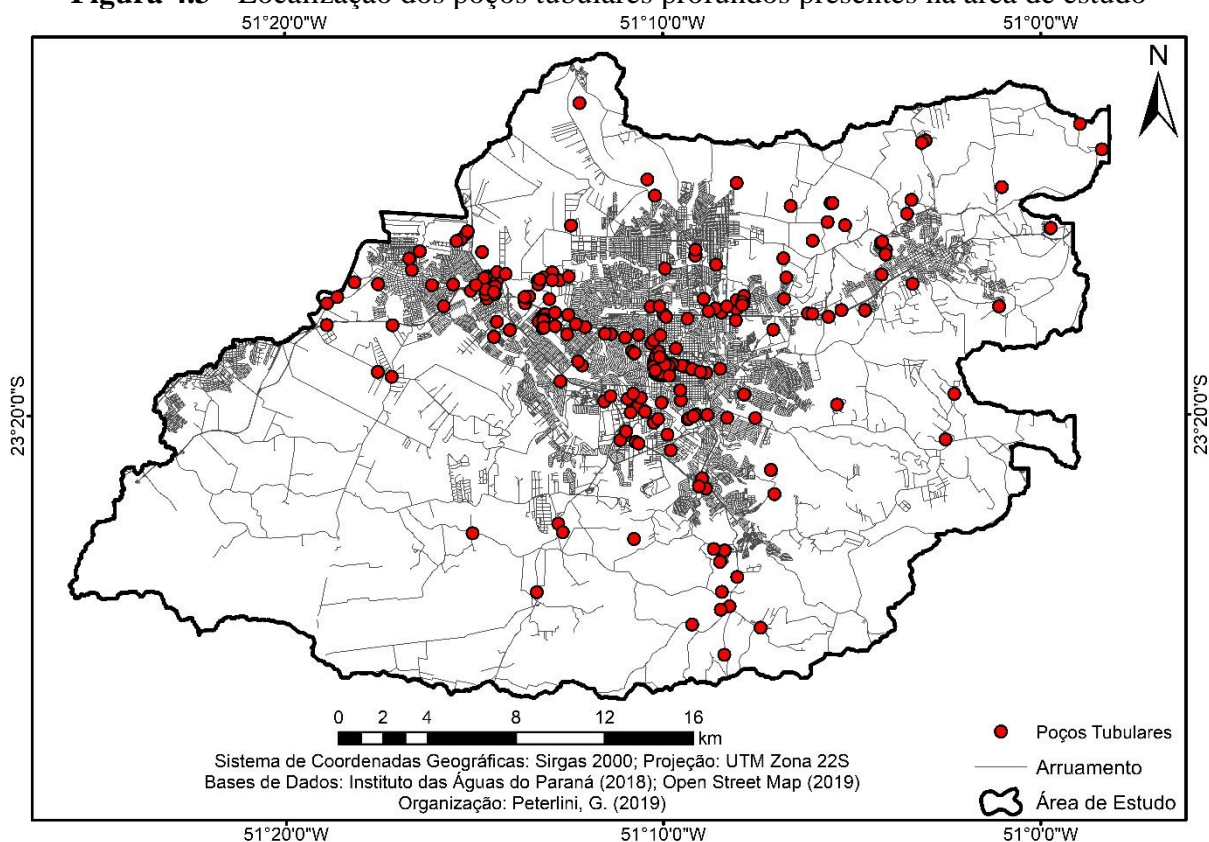
Os dados de estruturas foram então divididos em 5 grupos de acordo com a sua quantidade em porcentagem: 0% a 5%, 5% a 10%, 10% a 30%, 30% a 50% e >50%, a fim de que fosse testada a hipótese de que há diferenças significativas entre os grupos, indicando que quanto maior a quantidade de estruturas, maior a produtividade. Quanto a espessura de solo, esta também foi dividida em 5 grupos, sendo eles: 0 a 6 m, 6 a 12 m, 12 a 18 m, 18 a 24 m e >24 m para observar se a produtividade hídrica é diretamente proporcional ao aumento da espessura de solo.

4.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.7.1 Estatística Descritiva dos Dados

De acordo com os dados obtidos junto ao Instituto das Águas do Paraná, estão presentes na área de estudo cerca de 230 (Figura 4.3).

Figura 4.3 - Localização dos poços tubulares profundos presentes na área de estudo



Entretanto, apenas 60 poços puderam ser utilizados, visto que a grande maioria não possuía informações de litologia, vazão ou níveis estático e dinâmico, o que

impossibilita o cálculo da capacidade específica, quantidade de estruturas e espessura de solo. Neste sentido, após a obtenção dos dados mencionados, foram obtidos os resultados da análise estatística descritiva, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Estatística Descritiva dos dados de poços utilizados

| | Estruturas (%) | Espessura de Solo (m) | Vazão (m³/h) | Capacidade Específica (m³/h.m) |
|----------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|---|
| Mínimo | 1,8 | 0 | 2,0 | 0,027 |
| Máximo | 79,3 | 36,0 | 178,0 | 20,4 |
| Média | 31,8 | 11,4 | 22,6 | 1,9 |
| Mediana | 24,1 | 11,0 | 9,3 | 0,6 |
| Desvio Padrão | 22,4 | 7,5 | 31,9 | 3,2 |

Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

Por meio dos resultados apresentados é possível observar que a porcentagem de estruturas varia de 1,8 a 79,3%, com valor médio em torno de 31,8%, mediana de 24,1% e desvio padrão de 22,4%. Estes valores indicam que a quantidade de estruturas para a área de estudo é média e pode colaborar de forma significativa com a produtividade hídrica.

Quando observados os valores de vazão, estes apresentam uma grande variação, visto que possuem um valor mínimo de 2,0 m³/h e máximo de 178,0 m³/h, com uma média de 22,6 m³/h e mediana de 9,3 m³/h. Esta grande diferença entre a média e a mediana, bem como o alto desvio padrão (31,9 m³/h), indicam que as vazões são, em sua maioria baixas, o que pode ser observado também pelos valores de média (1,9 m³/h.m) e mediana (0,6 m³/h.m) de capacidade específica.

Já a espessura de solo apresentou valores que variam de 0 m a 36 m de profundidade, com média de 11,5 m e mediana de 11,0 m, o que demonstra solos profundos, característica dos solos que são encontrados na região, que compreendem principalmente Latossolos e Nitossolos. Estes tipos de solos possuem grandes profundidades graças ao clima úmido, onde há predomínio do intemperismo químico.

4.7.2 Influência das Estruturas Interderrames na Produtividade Hídrica

Após separação dos grupos de estruturas e seus respectivos valores de vazão e capacidade específica, foram calculadas a média e mediana destas duas últimas para os três grupos e posteriormente calculado o coeficiente de correlação r , apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Correlação existente entre o tipo de estrutura interderrame e a produtividade hídrica

| | EVA n = 19 | | EF n = 9 | | EVAF n = 32 | |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | Q (m ³ /h) | c (m ³ /h.m) | Q (m ³ /h) | c (m ³ /h.m) | Q (m ³ /h) | c (m ³ /h.m) |
| Mínimo | 2,0 | 0,027 | 2,4 | 0,056 | 3,0 | 0,054 |
| Máximo | 110,0 | 8,27 | 28,0 | 3,67 | 178,0 | 20,40 |
| Média | 15,18 | 1,24 | 9,86 | 0,83 | 30,7 | 2,58 |
| Mediana | 5,0 | 0,31 | 8,5 | 0,42 | 15,25 | 1,51 |
| Variância | 701,07 | 5,03 | 74,56 | 1,27 | 1370,74 | 15,09 |
| Desvio Padrão | 26,47 | 2,24 | 8,63 | 1,12 | 37,02 | 3,88 |
| Coefficiente <i>r</i> | -0,12 | -0,16 | -0,15 | -0,16 | 0,51 | -0,14 |

n = número de poços pertencentes ao respectivo grupo

Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

Como pode ser observado na Tabela 4.2, os valores mínimos de vazão foram semelhantes para todos os grupos, enquanto que os valores de máximo apresentaram maior diferença, com destaque para o valor máximo de vazão (178,0 m³/h) e capacidade específica (20,4 m³/h.m) do grupo EVAF. Este grupo também apresentou uma média de vazão (30,7 m³/h) e capacidade específica (2,58 m³/h.m) cerca de duas vezes maior que o grupo EVA (Q = 15,18 m³/h; c = 1,24 m³/h.m) e três vezes maior que o grupo EF (Q = 9,86 m³/h; c = 0,83 m³/h.m).

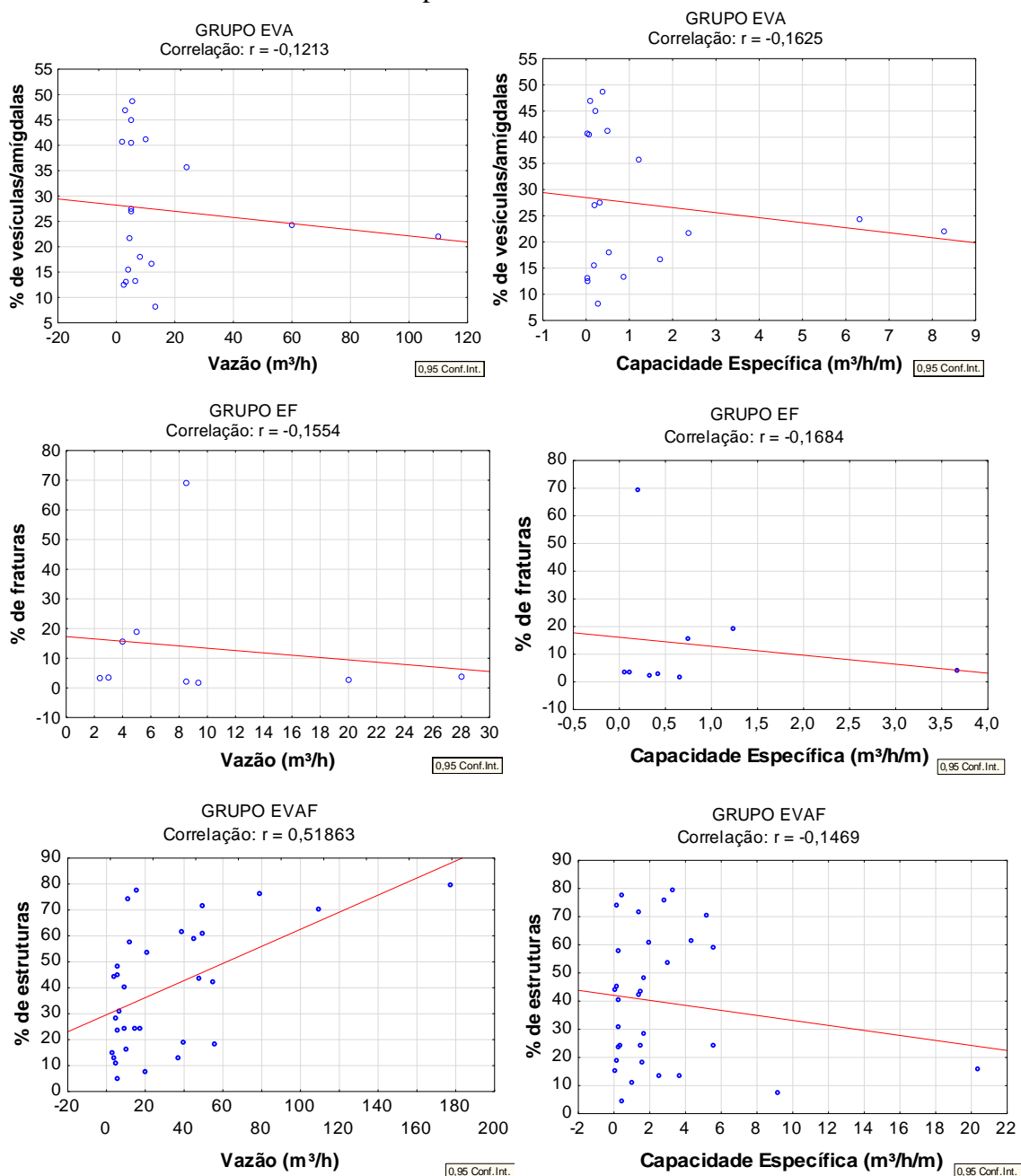
Quanto aos valores medianos de vazão, pode-se observar que, com exceção do grupo EF, este valor se mostrou cerca de três vezes inferior à média no grupo EVA (5,0 m³/h) e duas vezes inferior à média no grupo EVAF (15,25 m³/h). Esta diferença, principalmente no grupo EVA, pode ter ocorrido devido à grande maioria dos poços pertencentes a este grupo apresentarem vazões e capacidades específicas baixas (Q < 10 m³/h; c < 1 m³/h.m), enquanto que poucos poços possuem vazões e capacidades específicas excepcionais, elevando o valor da média. Os altos valores de variância e desvio padrão para este grupo corroboram com este fato.

Já os valores do grupo EF, apesar de apresentarem médias menores que os demais grupos, apresentaram mediana de vazão (8,5 m³/h) e capacidade específica (0,42 m³/h.m) maiores que o grupo EVA, além de possuírem os valores mais baixos de variância e desvio padrão, o que indica que os poços deste grupo possuem valores de produtividade mais semelhantes entre si. Isto pode representar que as estruturas do tipo fraturas podem contribuir de forma mais significativa para a produtividade hídrica dos poços se comparado às estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal.

Entretanto, ao observar os gráficos de dispersão gerados para cada grupo de estruturas (Figura 4.4) e os valores de correlação linear, fica evidenciado que a correlação da

quantidade de estruturas com a vazão e capacidade específica dos poços é praticamente desprezível para os grupos EVA ($r_Q = -0,12$; $r_c = -0,16$) e EF ($r_Q = -0,15$ e $r_c = -0,16$), ou seja, quando as estruturas são analisadas isoladamente, as mesmas não contribuem significativamente para o aumento da produtividade hídrica dos poços.

Figura 4.4 - Gráficos de dispersão dos grupos de estruturas com os indicadores de produtividade hídrica



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). Organização: a própria autora

Além disto, os gráficos de dispersão e os valores de r para estes grupos demonstram que a correlação é negativa, ou seja, quanto maior a quantidade de

vesículas/amígdalas ou fraturas no perfil geológico, menor é a vazão e capacidade específica do poço. Este fato pode ser explicado principalmente porque quando há apenas estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal, a água não consegue circular pelo perfil geológico de forma efetiva e alcançar estas estruturas, visto que não há presença de fraturas verticais, responsáveis por fazer a interconexão com as estruturas vesiculares.

Portanto, a água que fica armazenada nestas estruturas, além de não possuir volume elevado, não circula, fazendo com que ocorram os chamados “bolsões de água”, ou seja, no momento em que são encontrados os bolsões na perfuração do poço, a vazão bombeada pode ser considerada suficiente, porém, com o passar dos dias, além de não apresentar estabilização, a mesma pode ter considerável redução ou até mesmo se esgotar, levando a prejuízos financeiros na exploração aquífera, visto que aquela não representava a vazão efetiva do poço.

A correlação muito baixa, observada também entre o grupo EF e a produtividade hídrica, pode ter apresentado estes resultados porque as fraturas consideradas na análise compreendem, em sua maioria, fraturas de cisalhamento ou até mesmo juntas de resfriamento, ou seja, fraturas que ocorreram devido à consolidação do magma na superfície e que, de acordo com Costa e Silva (2000) são praticamente soldadas, já que não apresentam aberturas consideráveis por não terem sido geradas por movimentos tracionais, representando assim estruturas desfavoráveis à infiltração, armazenamento e circulação da água subterrânea.

O único grupo que apresentou um valor de correlação significativo, ou seja, uma correlação moderada entre a quantidade de estruturas e a vazão, foi o grupo EVAF, com valor de $r = 0,51$. A correlação positiva indica que, ao analisar as estruturas de forma conjunta, ou seja, com a presença de estruturas vesiculares/amigdaloidais e fraturas, o aumento da quantidade destas estruturas contribui de forma significativa para o aumento da vazão dos poços. Contudo, o valor de correlação para a capacidade específica foi desprezível ($r = -0,14$), o que demonstra que a esta pode não ser influenciada pelo tipo de estrutura interderrame.

Como a capacidade específica é calculada a partir da vazão, foi então realizada a MANOVA e ADC para observar se, quando analisadas conjuntamente, a vazão e a capacidade específica apresentavam alguma relação de dependência com a quantidade de estruturas interderrames, independentemente do tipo de estrutura. Para tanto, foram incluídos na análise todos os 60 poços. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3. Considerando conjuntamente os dados de quantidade de estruturas, vazão e capacidade específica, a MANOVA detectou diferença significativa entre os grupos analisados ($F = 2,53$; $p < 0,0144$).

Tabela 4.3 - Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Estruturas Interderrames

| Nº de variáveis no modelo: 2; Agrupamento: Estruturas (5 grupos) | | | | | | |
|--|---------------|----------------|------|-------|-----------------|-----------------|
| Lambda Wilks': 0,70890; F (8,108) = 2,5340 p < 0,0144 | | | | | | |
| n = 60 | Lambda Wilks' | Lambda Parcial | F | p | Eixo Canônico 1 | Eixo Canônico 2 |
| Vazão | 0,90 | 0,78 | 3,62 | 0,011 | -1,03 | 0,19 |
| Capacidade Específica | 0,78 | 0,90 | 1,46 | 0,22 | 0,13 | -1,04 |

n = número de poços utilizados na análise

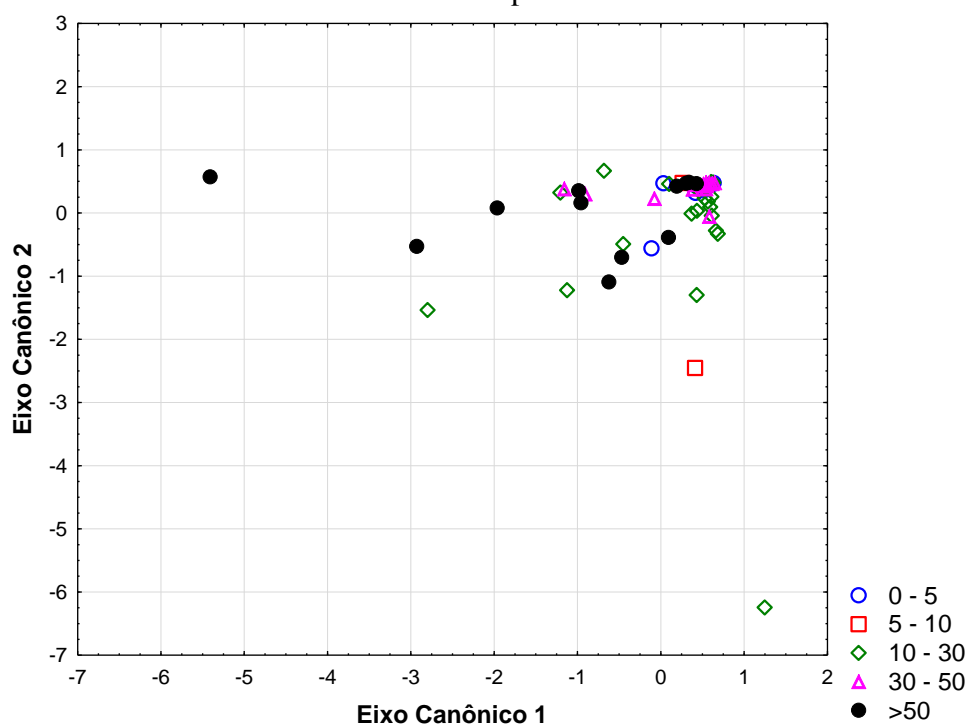
Fonte: a própria autora

Com os dados da MANOVA foi possível confirmar a hipótese de que a quantidade de estruturas exerce uma influência sobre a produtividade hídrica pois, ainda que sutil (Lambda Wilks = 0,70; quanto mais próximo a 1, menor a diferença entre grupos), houve uma segregação nos grupos definidos a priori. Entretanto, a única variável que se mostrou significativa para a segregação destes grupos foi a vazão, com um valor de Lambda Wilks = 0,90, F = 3,62 e p = 0,011. A capacidade específica não contribuiu significativamente para a diferenciação entre os grupos, visto que o seu valor de p foi superior a 0,05, o que corrobora com os resultados encontrados nas análises de correlação.

A partir dos resultados da MANOVA foi possível aplicar a ADC para observar como a variável de produtividade analisada – mais precisamente a vazão – influenciou o distanciamento dos grupos de quantidade de estruturas estabelecidos. Os coeficientes das variáveis que mais explicam os eixos canônicos 1 e 2 originados da ADC estão apresentados na Tabela 4.3, enquanto que o gráfico de dispersão dos valores canônicos está apresentado na Figura 4.5.

Como pode ser observado na Tabela 4.3, a vazão (que tem score negativo no eixo canônico 1) explica o comportamento dos grupos no sentido negativo do eixo canônico 1 (E1). Por outro lado, a capacidade específica (com score positivo) explica o sentido positivo do E1. O fato de a vazão possuir o maior score no E1 demonstra que ela é a variável que é mais influenciada pelas estruturas interderrames.

Figura 4.5 - Análise Discriminante Canônica entre os grupos de quantidade de espessura e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica



Ao observar o gráfico de dispersão, constata-se que o grupo com maior quantidade de estruturas (Grupo 5, > 50%) apresenta um maior distanciamento dos demais grupos, seguido pelo grupo 3 (10 a 30%), bem como do grupo 4 (30 a 50%), o que indica que quanto maior é a quantidade de estruturas interterrâneas, maior é vazão que o poço pode apresentar. Os grupos 1 (0 a 5%) e 2 (5 a 10%) ainda que tenham menor quantidade de poços, se apresentaram pouco segregados pela ADC e mais concentrados do lado positivo do E1, o que corrobora com a afirmação de que vazão é diretamente proporcional à quantidade de estruturas interterrâneas.

Quanto à capacidade específica, fica evidenciado pelo gráfico de dispersão que não houve segregação dos grupos no sentido positivo do E1, visto que os poços se apresentaram concentrados neste lado do eixo, resultado que já era esperado se considerado os valores encontrados pela MANOVA. Portanto, a capacidade específica não é influenciada pela quantidade de estruturas interterrâneas.

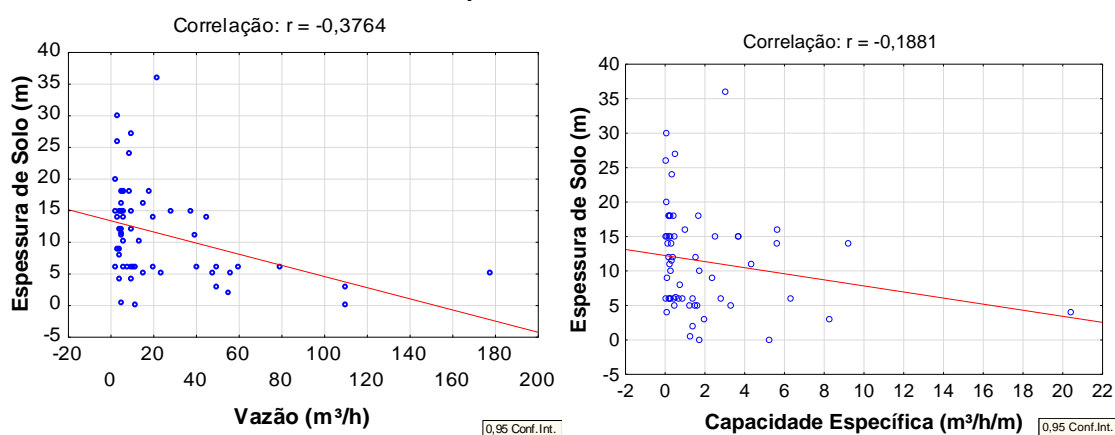
O fato de apenas uma das variáveis indicadoras de produtividade hídrica (vazão) ter sido influenciada pela quantidade de estruturas, contrariando a hipótese de que a capacidade específica também seria influenciada, pode ser explicada pelo fato de que muitas vezes os testes de vazão realizados durante a perfuração do poço não medem a vazão máxima

que pode ser explotada – que é obtida por meio de testes de aquífero – mas sim a vazão de operação do poço, que é obtida por testes de produção, o que pode subestimar os valores de vazão, influenciando a capacidade específica. Apesar disto, a vazão obtida por meios destes testes pode ser um bom indicativo das características do sistema aquífero.

4.7.3 Influência da Espessura de Solo na Produtividade Hídrica

Após estatística descritiva dos dados dos 60 poços presentes na área, foram determinados os coeficientes de correlação linear entre as variáveis indicadoras de produtividade e a espessura de solo e, posteriormente, gerados os gráficos de dispersão, apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Gráficos de dispersão dos dados de Espessura de Solo com os indicadores de produtividade hídrica



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

Como pode-se observar nos gráficos de dispersão, os poços concentram-se, em sua maioria, nos baixos valores de vazão e capacidade específica e variam muito quanto à espessura de solo. Isto faz com que a linha de tendência assuma um ângulo de inclinação menor, com sentido negativo, indicando que quanto maior a espessura de solo, menor é a vazão e capacidade específica dos poços. Contudo, esta relação, de acordo com o coeficiente r calculado, é considerada baixa para a vazão (-0,37) e muito baixa para a capacidade específica (-0,18).

Holland e Witthüser (2011) também avaliaram a influência que a espessura do manto de intemperismo exerce sobre a produtividade hídrica, analisando mais precisamente a vazão, utilizando gráficos de dispersão e correlação linear e não encontraram correlação entre

estas variáveis. Além disto, Douagui et al. (2019) buscaram avaliar a correlação entre a espessura de solo e a capacidade específica e não encontraram um valor de r significativo.

Estes resultados, são contrários ao que apontam Costa e Silva (2000), que afirmam que uma espessura considerável de solo exerce importante influência na produtividade hídrica, pois atua como uma fonte de captação da água precipitada, reduz perdas por escoamento superficial e minimiza o processo de evaporação, alimentando as rochas fraturadas subjacentes. Entretanto, em solos que apresentam uma grande espessura, o tempo no qual a água leva para percolar e atingir as fraturas das rochas também é maior, fazendo com que a recarga aquífera aconteça mais lentamente. Além disto, a água precipitada pode ficar retida nas camadas mais superficiais do solo, dificultando a recarga das fraturas.

Souza e Campos (2001), ao analisar o papel dos regolitos na recarga de aquíferos fissurais no Distrito Federal, apontam que apenas 14% da água precipitada consegue alcançar a zona saturada do solo naquela região, isso porque maior parte do volume precipitado inicialmente pode escoar como fluxo de base e abastecer os cursos d'água, para posteriormente infiltrar para a zona saturada do aquífero fraturado, fazendo com que apenas uma pequena porção dessa quantidade alcance as fraturas.

Assim como foi realizado para analisar a dependência entre a produtividade hídrica e as estruturas interderames, foi também aplicada a MANOVA e ADC para avaliar como a produtividade hídrica é influenciada pela espessura do solo, a fim de verificar se ambas as variáveis são significativas na segregação dos grupos definidos a priori ou se apenas a vazão apresenta significância estatística, assim como encontrado nos gráficos de dispersão. Os resultados da MANOVA e ADC para a espessura de solo são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Espessura de Solo

| Nº de variáveis no modelo: 2; Agrupamento: Espessura (5 grupos) | | | | | | |
|---|---------------|----------------|------|-------|-----------------|-----------------|
| Lambda Wilks': 0,75103; F (8,108) = 2,0778 p < 0,0441 | | | | | | |
| n = 60 | Lambda Wilks' | Lambda Parcial | F | p | Eixo Canônico 1 | Eixo Canônico 2 |
| Vazão | 0,94 | 0,79 | 3,51 | 0,012 | -0,95 | 0,39 |
| Capacidade Específica | 0,76 | 0,98 | 0,22 | 0,924 | -0,14 | -1,02 |

n = número de poços utilizados na análise

Fonte: a própria autora

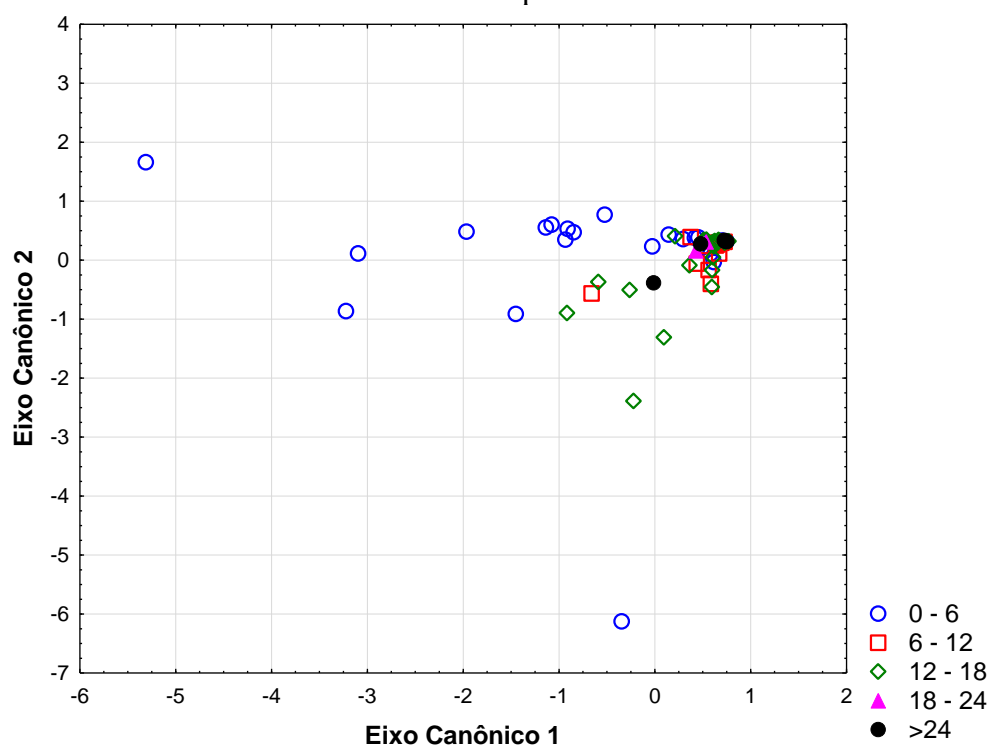
Por meio da MANOVA foi possível constatar que há diferenças significativas entre os grupos analisados ($F = 2,07$; $p < 0,044$), confirmando a hipótese de que a produtividade hídrica é influenciada pela espessura de solo. Com os dados apresentados pode-se observar que, assim como na análise multivariada feita para as estruturas interderrames, a segregação dos grupos de espessura de solo também não se mostrou muito expressiva, visto que o valor de Lambda Wilks (0,75) se encontra mais próximo a 1, segregação ainda menor do que a encontrada para a variável estruturas interderrames. Isto indica que as estruturas possuem maior influência na produtividade hídrica do que a espessura de solo.

A variável que se mostrou significativa para a segregação destes grupos foi novamente a vazão, com um valor de Lambda Wilks = 0,94, $F = 3,51$ e $p = 0,012$, enquanto que a capacidade específica não contribuiu significativamente para a diferenciação entre os grupos de espessura de solo, visto que o valor de p foi superior ao limite de significância. Neste sentido, a MANOVA confirma os resultados encontrados nas análises de correlação linear.

Aplicando a ADC (Figura 4.7), é possível observar o comportamento das variáveis dependentes (vazão e capacidade específica) em relação ao aumento da espessura de solo e analisar o distanciamento dos grupos estabelecidos. Os coeficientes das variáveis que mais explicam os eixos canônicos 1 e 2 estão apresentados na Tabela 4.4.

Os valores dos coeficientes para o E1, por apresentarem um valor negativo, explicam melhor o sentido negativo do eixo 1 no gráfico de dispersão, com destaque para o valor da vazão (-0,95), que apresentou maior score, indicando que os grupos de espessura de solo são mais segregados por esta variável, seguida pela capacidade específica (-0,14). Entretanto, diferentemente dos resultados encontrados na ADC para as estruturas interderrames e das análises de correlação linear, a ADC demonstra que ambas as variáveis são influenciadas pela espessura de solo, e não apenas a vazão. Estes resultados podem ter sido diferentes devido à ADC considerar conjuntamente os dados de vazão e capacidade específica, e não analisá-los de forma isolada, como feito na Correlação Linear de Pearson.

Figura 4.7 - Análise Discriminante Canônica entre os grupos de espessura de solo e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica



Fonte: a própria autora

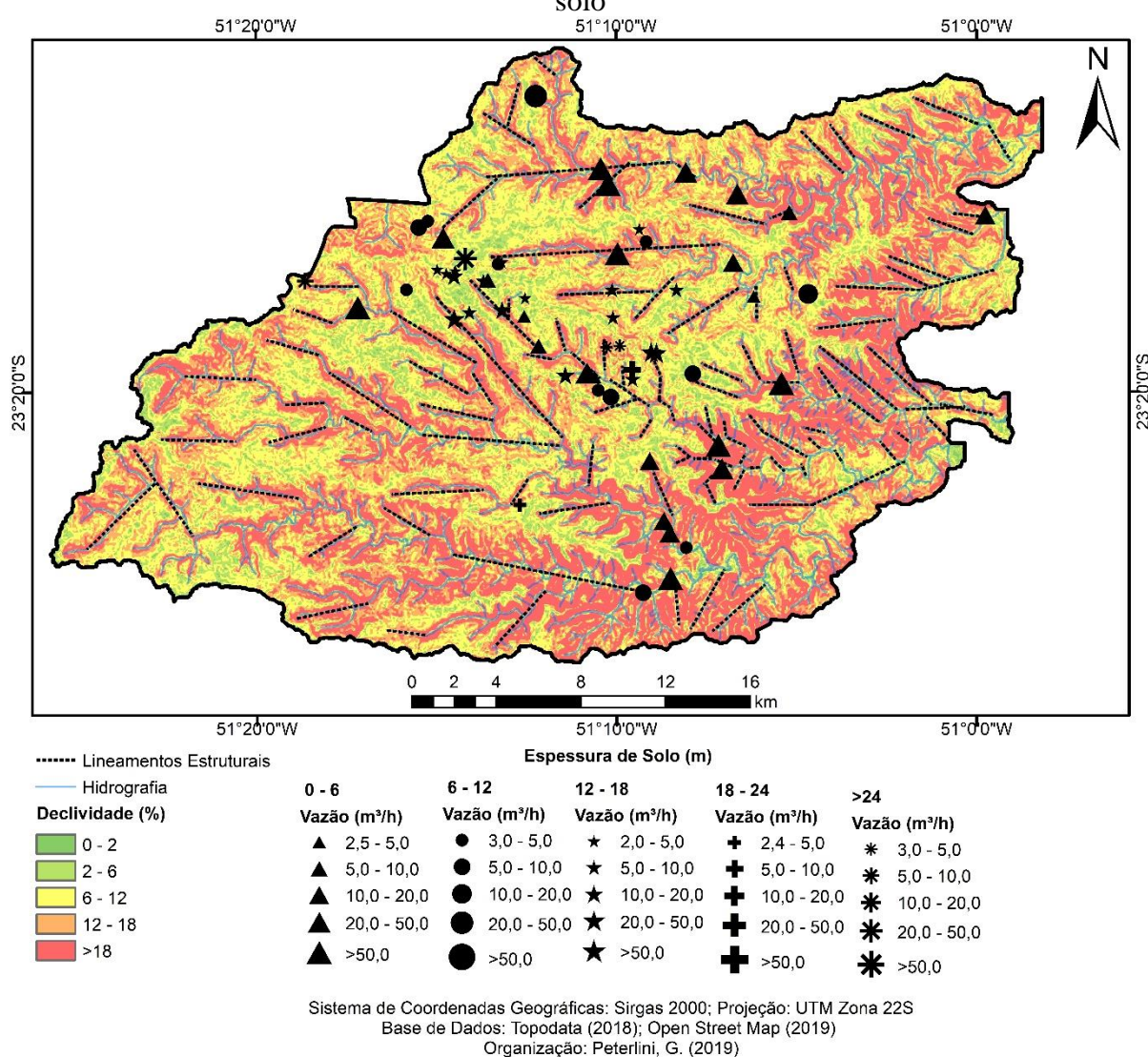
Ao observar o gráfico de dispersão (Figura 4.7), constata-se que o grupo com menor quantidade de estruturas (Grupo 1, 0 – 6 metros) apresenta um maior distanciamento dos demais grupos, seguido pelo grupo 3 (12 a 18 metros). O grupo 2 (espessura de 6 a 12 metros) apesar de a maioria dos poços estarem localizados nos valores positivos do E1, apresentou um distanciamento maior que os grupos 4 (18 a 24 metros) e 5 (>24 metros). Estes resultados sugerem que quanto menor é a espessura de solo, maior é produtividade hídrica do poço.

Assim como na ADC para as estruturas interderrames, os grupos 4 (18 a 24 m) e 5 (>24 m) se apresentaram pouco segregados e concentrados do lado positivo do E1, sugerindo desta forma que maiores espessuras de solo são inversamente proporcionais à produtividade hídrica. Contudo, ainda que a capacidade específica tenha apresentado um coeficiente negativo, o mesmo apresentou um valor quase sete vezes menor que a vazão, demonstrando que a capacidade específica não sofre tanta influência da espessura de solo quanto a vazão.

Baixas espessuras de solo geralmente estão relacionadas a altas declividades do relevo, visto que em altas declividades o escoamento superficial é maior, o que leva à maior erosão do solo e menor tempo de residência da água no local, reduzindo o tempo de ação do intemperismo químico. Na região da área de estudo observa-se, por meio do mapa de

declividade apresentado na Figura 4.8 que as áreas de maiores declividades estão localizadas próximas à rede de drenagem, principalmente às drenagens localizadas na calha do rio Tibagi, à leste. Além disto, é possível observar ainda que os poços também localizam-se, em sua maioria, próximos às drenagens, principalmente os poços com menores espessuras de solo (0 a 6 m e 6 a 12 m).

Figura 4.8 - Localização dos poços no mapa de declividade de acordo com a espessura de solo



Em regiões mais distantes às drenagens, o solo normalmente possui maior profundidade e progressivamente vai reduzindo a sua espessura em direção aos rios. Como em aquíferos do tipo fraturado ocorre o fenômeno chamado riacho-fenda, em que as drenagens coincidem com os lineamentos estruturais, as regiões próximas a estes lineamentos podem apresentar maior fraturamento (CORIOLANO, 2000). Este fraturamento, de origem tectônica

e não mais por resfriamento do magma, possibilita maior armazenamento de água, visto que as fraturas possuem maior comprimento e abertura, aumentando a produtividade hídrica no local.

4.8 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi avaliada a influência que as estruturas das rochas e a espessura de solo exercem sobre a vazão e capacidade específica de poços tubulares que exploram o SASG nos municípios da região de Londrina.

Com base nos resultados obtidos pela análise de correlação linear, foi constatado que o método apresentou resultados satisfatórios em relação ao tipo de estrutura interderrame e à vazão dos poços, mostrando que as estruturas de forma isolada – apenas vesículas/amígdalas ou fraturas – não contribuem significativamente para o aumento da vazão, mas sim quando há presença de ambas as estruturas.

A MANOVA e ADC também apresentaram resultados satisfatórios, condizentes com a análise de correlação linear, indicando que apenas a vazão é influenciada pelas estruturas interderrames, apesar de estas considerarem conjuntamente os dados de estruturas, vazão e capacidade específica. Neste sentido, a MANOVA e ADC atuaram de forma complementar e confirmatória da análise de correlação linear. Além disto, estas análises permitiram observar que o aumento da vazão é diretamente proporcional à quantidade de estruturas presentes no perfil geológico do poço, ou seja, quanto maior a quantidade de estruturas interderrames, maior a vazão que um poço poderá fornecer.

Em relação à espessura de solo, a análise de correlação linear e a MANOVA constataram a influência exercida pela espessura sobre a vazão dos poços. Contudo, estas análises não foram suficientes para constatar a relação de dependência existente entre a espessura de solo e a capacidade específica, que pôde ser observada apenas pela ADC. Ainda que tenha sido observada uma influência sobre a capacidade específica, o valor do coeficiente canônico desta variável, se comparado ao coeficiente da vazão, demonstra que a mesma sofre uma pequena influência, quase desprezível, se comparada à vazão.

Este estudo permitiu constatar que estes fatores podem ter uma contribuição muito fraca a moderada no aumento da produtividade hídrica do SASG. Neste sentido, deve-se salientar que a produtividade hídrica pode ser influenciada por diversos outros fatores ambientais e que, considerando a dificuldade exploratória dos aquíferos fraturados, principalmente o SASG – que apresenta forte heterogeneidade, anisotropia e descontinuidade – torna-se necessário o desenvolvimento de métodos que auxiliem na predição de áreas de maior

produtividade hídrica, tendo o presente trabalho um papel fundamental nas pesquisas futuras que têm como objeto de estudo os aquíferos fraturados.

Por fim, destaca-se que uma melhor compreensão do funcionamento do SASG pode auxiliar a gestão de recursos hídricos subterrâneos da região de Londrina, contribuindo para o uso mais eficiente das águas e melhorando a disponibilidade hídrica, tanto em quantidade quanto em qualidade, para fins de abastecimento humano.

5 ARTIGO B: PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE HÍDRICA EM AQUÍFEROS FRATURADOS: UMA APLICAÇÃO PARA O SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL

5.1 RESUMO

Devido à pouca compreensão dos sistemas aquíferos fraturados, a escolha dos melhores locais para a instalação de poços produtivos nestes aquíferos é um desafio da hidrogeologia. O presente trabalho tem como objetivo criar e aplicar um método para avaliar a produtividade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no norte do Paraná. Foram definidos fatores ambientais que exercem influência na produtividade aquífera e atribuídos pesos, que variaram de 1 a 5, bem como faixas e classes que variaram de 1 a 10. Utilizando dados de poços e de lineamentos estruturais identificados na área, foram elaborados mapas de estimativas utilizando o método da *krigagem* ordinária. Os mapas foram então multiplicados pelos pesos e classes atribuídos anteriormente, gerando o mapa de produtividade hídrica (IPAF). Foi também aplicada a Regressão Linear Múltipla (RLM) para validar os pesos atribuídos e obter a equação da produtividade hídrica do SASG. O mapa IPAF indica que maior parte da área de estudo (58%) possui baixa produtividade hídrica, seguida pela média produtividade (27,7%). As demais classes representaram baixas porcentagens da área. A RLM demonstrou que os pesos atribuídos foram em sua maioria corretos, com exceção do peso do fator Capacidade Específica que poderia ser menor. Apesar disto, o modelo gerado foi considerado representativo ($p < 0,05$; $R^2 = 0,85$). Foi possível ainda sugerir áreas mais favoráveis à locação de poços tubulares na área de estudo. Por fim, o método proposto e o mapa IPAF são considerados inovadoras e importantes ferramentas de planejamento urbano e ambiental, visando a melhor gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Produtividade Aquífera. Fatores Ambientais Determinantes. Proposta Metodológica. Modelagem Hidrogeológica. Águas Subterrâneas.

5.2 ABSTRACT

Due to the lack of understanding on fractured aquifers, choosing the better places to set up productive wells on these aquifers is a challenge to hydrogeology. This paper aims as an objective create and apply a method to evaluate the water productivity of the Serra Geral Aquifer System (SASG) in the north of Paraná. It was defined environmental factors that have influence on aquifer productivity and assigned values that vary between 1 and 5, as well as ranges and classes that range between 1 and 10. By using both wells data and structural lineaments identified on the area, estimative maps were elaborated using the *kriging* method. These maps were then multiplied by the values and classes assigned before, generating the map of water productivity (IPAF). Linear Multiple Regression (LMR) was also applied to validate the values assigned and obtain the SASG's hydric productivity equation. The IPAF map shows that the majority of the study area (58%) has a low hydric productivity, followed by the average productivity (27,7%). The other classes represented low percentages of area. The LMR demonstrated that the values assigned were mostly correct, with the exception of the Specific Capacity that could be lower. Nevertheless, the generated model was considered representative ($p < 0,05$; $R^2 = 0,85$). It was also possible to suggest more propitious areas for renting tubular wells to study. Lastly, the proposed method and the IPAF map are considered innovative and important tools of urban and environmental planning, aiming the better management of water resources.

Keywords: Aquifer Productivity. Determining Environmental Factors. Methodological Proposal. Hydrogeological Modelling. Groundwater.

5.3 INTRODUÇÃO

A intensificação no uso de recursos hídricos, principalmente superficiais, causada pelo crescimento populacional e econômico, gera impactos não somente na quantidade hídrica a ser utilizada, mas também na sua qualidade, levando à chamada escassez relativa e, como alternativa à elevação da demanda no consumo de água, vem crescendo de igual modo a utilização das águas subterrâneas (BORGES et al., 2017); (KHOSRAVI et al.; 2018).

Devido a este fato, a preocupação com a compreensão do funcionamento dos variados sistemas aquíferos e sua preservação têm conduzido à diversos estudos, principalmente no que tange os aspectos de qualidade da água e vulnerabilidade à contaminação, auxiliando o desenvolvimento de métodos que identifiquem as fragilidades aquíferas. O método DRASTIC, desenvolvido por Aller et al. (1987) é um dos métodos mais utilizados para avaliar a vulnerabilidade aquífera à contaminação (KHOSRAVI et al. 2018).

O DRASTIC é um índice que avalia a vulnerabilidade à contaminação em qualquer cenário hidrogeológico, utilizando características físicas intrínsecas de uma área. A vantagem no uso de índices de vulnerabilidade intrínseca refere-se ao mapeamento dessas informações num domínio espacial (LISBOA et al., 2016). O método é composto por um

sistema de ranking numérico utilizando os fatores Profundidade do nível d'água (D), Recarga (R), Aquífero (A), Solo (S), Topografia (T), Impacto na zona vadosa (I) e Condutividade hidráulica (C), atribuindo pesos, faixas e classes aos mesmos com o objetivo de determinar a importância relativa de cada fator ambiental para a vulnerabilidade aquífera (ALLER et al., 1987).

Apesar de os estudos sobre a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas utilizando o método DRASTIC ou suas adaptações serem amplamente abordados nas pesquisas atuais, como por exemplo nos trabalhos de Santos et al. (2006), Melo Júnior (2008), Lisboa et al. (2016), Borges et al. (2017), Pacheco et al. (2018) e entre outros, são poucos os trabalhos que abordam métodos para avaliar a produtividade hídrica subterrânea, principalmente em aquíferos do tipo fraturado, em que a porosidade e permeabilidade primárias da rocha são extremamente baixas, fazendo com que a água seja armazenada e circule apenas por entre as fraturas e estruturas presentes no embasamento rochoso (REBOUÇAS, 1978); (ATHAYDE, 2012); (ROQUES et al., 2016).

Esta característica dos aquíferos fraturados torna a exploração deste tipo de sistema um dos maiores desafios da hidrogeologia, visto que suas propriedades hidráulicas se apresentam muito variáveis, originando aquíferos extremamente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, o que pode causar dificuldades, prejuízos e frustrações na perfuração de poços improdutivos ou mesmo secos e levar à menor eficiência da gestão dos recursos hídricos (FREITAS, 2000); (DOUAGUI et al., 2019). Torna-se necessário, portanto, que sejam mapeadas com melhor precisão as áreas que apresentam maior potencial para a ocorrência das águas subterrâneas integrando diversos fatores ambientais, assim como o método DRASTIC (FREITAS, 2000).

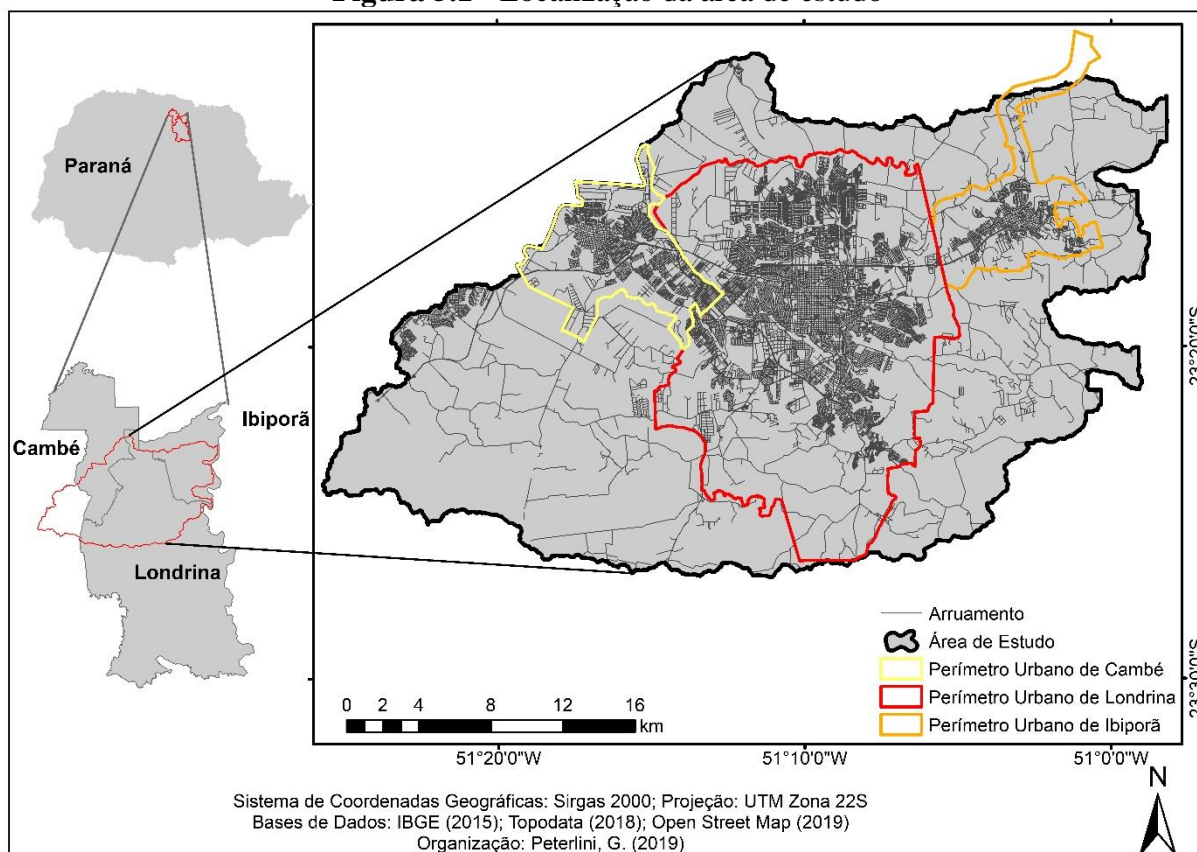
Como uma proposta metodológica baseada no método DRASTIC, o Índice de Produtividade de Aquíferos Fraturados (IPAF), desenvolvido e apresentado no presente trabalho, consiste em um modelo que tem como finalidade avaliar, não mais a vulnerabilidade, mas sim a produtividade hídrica em aquíferos do tipo fraturado. No método IPAF os fatores ambientais determinantes foram modificados para assim identificar quais deles mais contribuem para uma maior produção de água neste tipo de ambiente hidrogeológico.

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo criar e aplicar o método IPAF para avaliar a produtividade hídrica de um sistema aquífero fraturado em um conjunto de bacias hidrográficas predominantemente urbanas em Londrina, Cambé e Ibiporã/PR, a fim de que isto sirva como uma ferramenta de planejamento urbano e ambiental para a região, auxiliando na futura locação de poços e fornecendo subsídios para o uso e ocupação do solo urbano.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho compreende as bacias hidrográficas que estão, parte ou integralmente, inseridas nos perímetros urbanos dos municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã, localizada entre as coordenadas $23^{\circ}11'07''$ e $23^{\circ}26'58''$ de latitude sul e $51^{\circ}25'47''$ e $50^{\circ}58'10''$ de longitude oeste, como pode ser observado na Figura 5.1. A área foi assim escolhida por apresentar uma grande quantidade de poços tubulares profundos, que são perfurados principalmente em áreas mais urbanizadas, onde se concentra maior quantidade populacional e grande número de indústrias.

Figura 5.1 - Localização da área de estudo

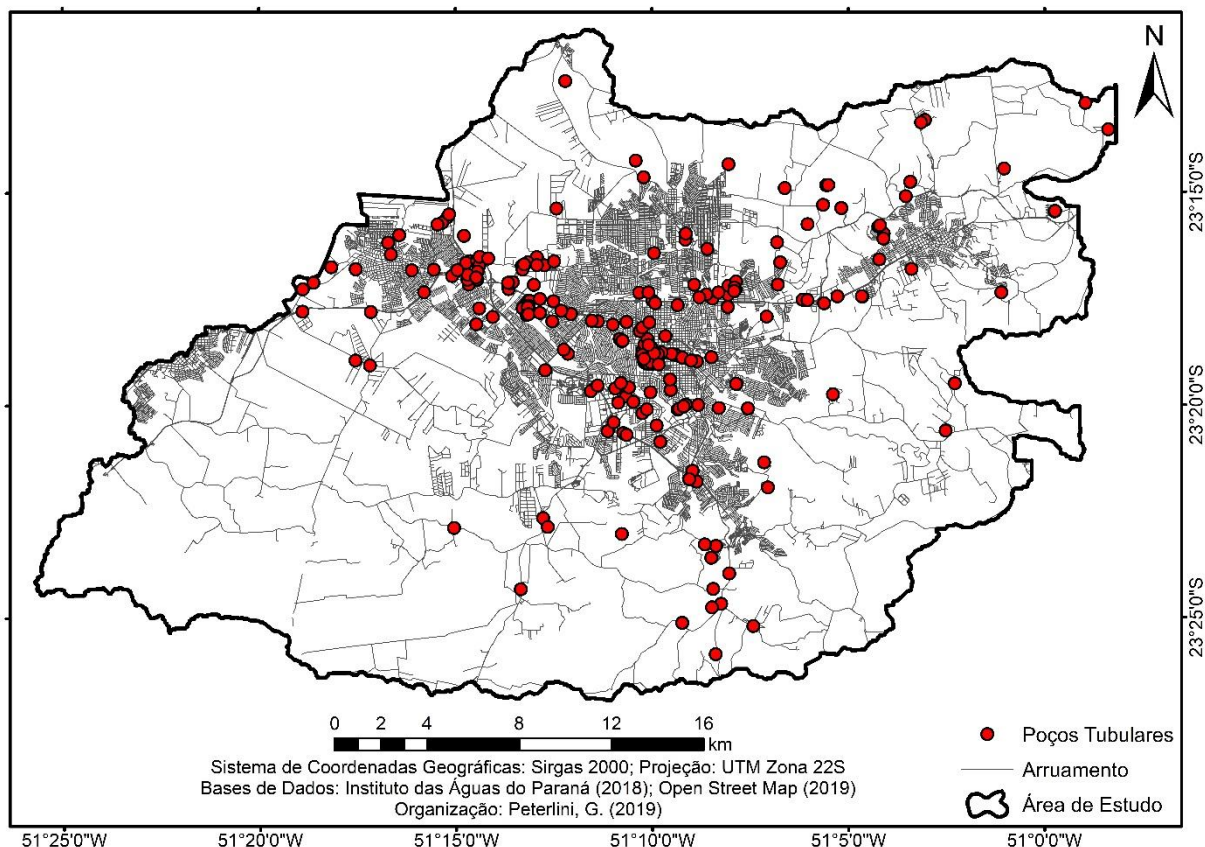


O clima na área é classificado, de acordo com a classificação de Koppen, como subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com “temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida” (IAP, 2003). Além disto, a precipitação anual para os municípios de Cambé e Ibiporã encontram-se na faixa de 1400 – 1600 mm, enquanto que para o município de Londrina, os valores variam de 1600 – 1800 mm ao ano (IAPAR, 2019).

A área de estudo localiza-se no compartimento Mesozoico da Bacia Sedimentar do Paraná e suas rochas pertencem ao Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral, composta por rochas ígneas, provenientes de uma série de extensos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea. São rochas efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços, vesiculares, amigdalóides, afaníticos, cinzentos a pretos (REBOUÇAS; FRAGA, 1988); (MINEROPAR, 2003). Há também a presença de falhas e/ou fraturas, chamadas lineamentos estruturais, com sentidos predominantes NE-SW e NW-SE, além da existência de um grupo importante de lineamentos com orientação E-W (ZÁLAN et al. (1987); (MINEROPAR, 2001); (LONDRINA, 2010).

Estes lineamentos permitem o armazenamento e circulação da água subterrânea nas rochas desta região, constituindo uma importante unidade hidrogeológica do tipo fraturada, o SASG. Além disto, a estrutura dos derrames, conforme ocorrido o movimento, resfriamento e conteúdo dos gases de lava, originou camadas caracterizadas por uma zona basal, uma zona intermediária e uma zona de topo vesicular ou amigdaloidal (ROSA FILHO et al., 2006). Existem ainda, segundo dados do Instituto das Águas do Paraná, cerca de 230 poços tubulares que exploram o SASG na área de estudo (Figura 5.2).

Figura 5.2 - Localização dos poços tubulares presentes na área de estudo



Quanto à geomorfologia, a unidade morfoestrutural é a Bacia Sedimentar do Paraná, enquanto que a unidade morfoescultural é a do Terceiro Planalto Paranaense. Os Planaltos de Londrina e Maringá são as subunidades morfoesculturais observadas, apresentando um relevo com dissecação de média (no Planalto de Londrina) a baixa (no Planalto de Maringá), com topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em V (MINEROPAR, 2001); (ARCHELA et al., 2003); (MINEROPAR, 2006). As altitudes variam de 337 a 817 metros, com áreas mais altas na porção oeste, que decrescem em direção à porção leste. Há predomínio de declividades $\leq 12\%$ no centro e em direção à oeste da área, característica de um relevo suavemente ondulado, e $>12\%$ em toda a direção leste e sul, onde há predomínio de relevos ondulados a fortemente ondulados.

Nas áreas de relevo plano ou suave ondulado, se desenvolveram Latossolos Vermelhos que podem ser eutroféricos ou distroféricos. São solos argilosos, homogêneos, profundos, porosos ou muito porosos (IBGE, 2007); (EMBRAPA, 2008). Já as regiões de relevo suave ondulado a ondulado apresentam Nitossolos Vermelhos Eutroféricos que são fortemente desenvolvidos, possuem textura argilosa, homogênea e pouca diferença de coloração entre os horizontes (IBGE, 2007); (IAC, 2014).

Nas áreas de relevos mais acidentados encontram-se os Neossolos Regolíticos Eutróficos, que apresentam uma textura argilosa, são rasos e pedregosos (EMBRAPA, 2008) e, junto à calha do rio Tibagi, áreas mais baixas e de planícies aluviais, desenvolveram-se os Gleissolos Hápicos, que de forma geral, são formados por sedimentos recentes, apresentam cores cinzentas a pretas no horizonte superficial, são rasos e com médios a altos teores de carbono orgânico (SANTOS; ZARONI, 2019).

ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DE AQUÍFEROS FRATURADOS

Por meio de revisão a trabalhos já realizados e dos resultados obtidos no artigo A, foram definidos os fatores que mais podem contribuir para a produtividade hídrica em aquíferos fraturados, destacados nos itens a seguir.

5.4.1 Estruturas Interderrames (E)

Devido ao SASG ser formado por rochas basálticas e pelo armazenamento e circulação da água subterrânea estar condicionado às estruturas presentes na rocha, como falhas, fraturas, vesículas e amígdalas, esta se constitui em um fator que influencia na produtividade aquífera, de acordo com os resultados obtidos no artigo A. Assim, para avaliar esta influência foi determinada a quantidade em porcentagem de basalto fraturado, vesicular e amigdalóide presente em cada poço tubular, a partir de informações litológicas do perfil geológico dos poços disponibilizadas pelo Instituto das Águas do Paraná.

A porcentagem de cada poço foi determinada analisando as estruturas presentes em conjunto, ou seja, em uma mesma informação de quantidade de estruturas de um poço podem estar incluídas fraturas, vesículas e amígdalas. No entanto, alguns poços não apresentavam as três estruturas, onde a rocha era apenas fraturada, ou apenas vesículo-amigdaloidal.

5.4.2 Distância do Lineamento (D)

Diversos são os trabalhos que comprovam a influência que a distância das fraturas causadas por tectonismo, chamadas lineamentos estruturais, exercem na produtividade hídrica de poços que exploram sistemas aquíferos fraturados (CELLIGOI; DUARTE, 1997); (MADRUCCI et al., 2003); (PETERLINI, 2017); (HOLLAND; WITTHUSER, 2011). De

acordo com estes trabalhos, os poços mais próximos a lineamentos estruturais podem apresentar maior produtividade, visto que quanto maior a proximidade das fraturas, maior o fraturamento das rochas e, assim, se tornam mais favoráveis à infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

Para considerar a influência que os lineamentos estruturais exercem sobre a produtividade dos poços, foram identificados os lineamentos estruturais existentes na área de estudo por meio da observação de feições retilíneas do relevo aplicando a técnica de relevo sombreado em imagens SRTM, utilizada por Peterlini (2017). Estudos estatísticos desenvolvidos pela autora sobre o SASG na região de Londrina constataram que os lineamentos estruturais exercem maior influência sobre a produtividade de poços principalmente em distâncias de até 400 m (PETERLINI, 2017).

5.4.3 Vazão (V)

De acordo com o CPRM (1998), a vazão (Q) é a medida do volume de água que sai do poço em determinado período e sua unidade é apresentada em metros cúbicos por hora (m^3/h). A vazão de um poço tubular é determinada por meio de testes de bombeamento, ou seja, a água é bombeada enquanto são feitos registros da evolução dos rebaixamentos da mesma no poço. (CPRM, 1998; FEITOSA; FILHO, 2000).

A vazão dos poços foi determinada como um fator importante para a avaliação da produtividade hídrica do aquífero visto que esta se configura como um indicador da quantidade de água que pode e já está sendo extraída naquele ponto. De acordo com pesquisas desenvolvidas por Celligoi e Duarte (1997), Viana e Celligoi (2002) e Peterlini (2017) foi observado que maioria dos poços localizados na região de Londrina apresentam vazões inferiores a $<10 \text{ m}^3/\text{h}$, enquanto que vazões excepcionais ($>50 \text{ m}^3/\text{h}$) foram observadas em um baixo número de poços.

5.4.4 Capacidade Específica (C)

A capacidade específica de um poço pode ser definida como a razão entre a vazão que é retirada durante um bombeamento e o rebaixamento provocado no nível d'água do poço, dada em m³/h.m (NEVES, 2004). A capacidade específica pode ser considerada, de acordo com Neves (2005), bem como Celligoi (1993), como o parâmetro que melhor representa a produtividade de poços tubulares.

De acordo com o CPRM (1998), para o cálculo da capacidade específica (c) inicialmente deve-se calcular os valores de rebaixamento (s) dos poços, definido como a diferença entre nível dinâmico e estático ($NE - ND$) e, posteriormente, calculada a razão entre a vazão (Q) e o rebaixamento (Equação 5.1).

$$c = \frac{Q}{s} \quad 5.1$$

Neste sentido foram calculados todos os valores de capacidade específica para os poços presentes na área de estudo. Pesquisas desenvolvidas por Celligoi (1993) e Peterlini (2017) demonstram que a capacidade específica de poços localizados em Londrina possui uma distribuição de valores exponencial, o que significa que maior número de poços apresenta um valor de capacidade específica menor (geralmente <1 m³/h.m), e baixa quantidade de poços com capacidades específicas superiores a 10 m³/h.m.

5.4.5 Profundidade do Poço (P)

A profundidade do poço é um fator importante para auxiliar no estudo da produtividade hídrica, pois ela pode estar correlacionada à vazão do poço. Estudos realizados por Freitas et al. (2001), Neves (2005), Abreu et al. (2016) e Peterlini (2017) demonstram a correlação existente entre estes parâmetros hidrodinâmicos, visto que observaram uma redução da vazão com o aumento da profundidade do poço. Os autores concluíram que isto pode ser explicado pela pressão litostática que rochas subjacentes exercem, provocando uma redução na quantidade de fraturas em maior profundidade, bem como reduz a abertura das fraturas existentes, o que causa diminuição da permeabilidade das rochas. Os dados de profundidade, assim como os dados de vazão dos poços, foram disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná.

5.4.6 Direção do Lineamento (L)

A direção das fraturas das rochas (lineamentos) se caracteriza como um fator relevante na avaliação da produtividade de aquíferos já que, segundo Neves (2002), muitos são os trabalhos que foram desenvolvidos buscando vincular a produção de poços com sua posição em relação aos lineamentos estruturais. A autora destaca algumas pesquisas, além da própria, que correlacionam não só a distância do lineamento *versus* produtividade hídrica, mas também a direção destes lineamentos, comprovando a sua influência.

Além disto, Celligoi e Duarte (1997), em sua pesquisa desenvolvida em poços que exploram o SASG na região de Londrina, descreve para a área a presença de 4 famílias de juntas predominantes: N-S, N45°W, N50°E e N83°E, considerando esta última como tendo direção EW. Dentre estas direções, o autor comprova por meio de dados de produção dos poços (vazão e capacidade específica), que os poços localizados próximo aos lineamentos estruturais com direção EW apresentam maiores vazões e capacidades específicas, seguidas pelas direções NE e NW, respectivamente. Os valores de produção dos poços de acordo com as direções dos lineamentos encontrados por Celligoi (1993) são apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Produção de poços segundo a direção dos lineamentos estruturais

| Direção | Vazão (m³/h) | | | Capacidade Específica (m³/h.m) | | |
|---------|-----------------|-------|------|--------------------------------------|------|------|
| | mín | máx | méd | mín | máx | méd |
| NW | 3,9 | 48,5 | 33,5 | 0,07 | 3,32 | 1,63 |
| NE | 15,5 | 50,0 | 31,2 | 0,47 | 3,25 | 1,45 |
| EW | 50,0 | 140,0 | 49,1 | 1,21 | 8,8 | 2,93 |

Fonte: Celligoi (1993)

5.4.7 Espessura de Solo (S)

Dependente do clima e do intemperismo para ser formado, o solo é um fator relevante para a produtividade hídrica. Em climas úmidos – onde predominam o intemperismo químico – os solos são geralmente mais profundos do que aqueles formados em regiões de clima seco, onde o intemperismo físico é mais atuante.

Como a área de estudo possui clima considerado úmido, os solos da região possuem a característica de serem mais profundos. Costa e Silva (2000) afirmam que uma maior espessura de solo possibilita maior captação da água precipitada, menores perdas por escoamento superficial e menor evaporação da água. Entretanto, os estudos realizados no artigo A para a mesma área de estudo do presente artigo, indicam que uma menor espessura de solo está relacionada com uma maior vazão dos poços na região.

Para a obtenção dos dados de espessura de solo, foram analisados os perfis geológicos dos poços, disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná.

5.4.8 Cálculo do IPAF

A partir dos conhecimentos apresentados anteriormente, foram atribuídos os pesos aos fatores ambientais, destacados na Tabela 5.2. Os pesos variam de 1 a 5, em que quanto maior a influência e importância do fator, maior é o seu peso.

Tabela 5.2 - Fatores que influenciam na produtividade hídrica de aquíferos fraturados e seus pesos

| Fator | Peso | Nome |
|--------------------------|-------------|----------------|
| Estruturas Interderrames | 2 | E _p |
| Distância do Lineamento | 5 | D _p |
| Vazão | 3 | V _p |
| Capacidade Específica | 4 | C _p |
| Profundidade | 1 | P _p |
| Direção do Lineamento | 3 | L _p |
| Espessura de Solo | 1 | S _p |

Fonte: a própria autora

Após a identificação dos fatores e atribuição dos pesos, foram definidas as faixas de valores para cada fator e as classes – que variam de 1 a 10 também segundo sua importância. Para o fator Estruturas Interderrames (E), após estudos realizados no artigo A, foi considerado que quanto maior é quantidade de estruturas, maior é a produtividade hídrica. Portanto, foram estabelecidas as faixas e classes demonstradas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Classes atribuídas ao fator Estruturas Interderrames

| Faixas (%) | Classe (E_c) |
|-------------------|-------------------------------|
| 0 – 5 | 2 |
| 5 – 10 | 4 |
| 10 – 30 | 6 |
| 30 – 50 | 8 |
| > 50 | 10 |

Fonte: a própria autora

Considerando a distância de maior influência dos lineamentos estruturais sobre os poços apresentada no item 5.4.2 e, sabendo que quanto menor a distância poço *versus* lineamento, maior é a produtividade hídrica, foram estabelecidas as faixas e classes para o fator D apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Classes atribuídas ao fator Distância do Lineamento

| Faixas (m) | Classe (D_c) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 0 – 100 | 10 |
| 100 – 200 | 8 |
| 200 – 300 | 6 |
| 300 – 400 | 4 |
| > 400 | 2 |

Fonte: a própria autora

Em relação ao fator Vazão (V), como esta se configura em um indicador direto de produção de água, considerou-se para a determinação das faixas e classes que quanto maior a vazão, maior é a produtividade aquífera no local. As faixas de valores e as classes foram definidas conforme é apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Classes atribuídas ao fator Vazão

| Faixas (m³/h) | Classe (V_c) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 – 5 | 1 |
| 5 – 10 | 3 |
| 10 – 20 | 5 |
| 20 – 50 | 7 |
| > 50 | 10 |

Fonte: a própria autora

Quanto ao fator Capacidade Específica (C), assim como a vazão, este pode ser considerado um indicador direto de produtividade. Levando em conta este fato, foi considerado que quanto maior é a capacidade específica, maior é a produtividade. Seus valores de faixas e classes estabelecidos são demonstrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Classes atribuídas ao fator Capacidade Específica

| Faixas (m³/h/m) | Classe (C_c) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 – 1 | 3 |
| 1 – 5 | 5 |
| 1 – 10 | 7 |
| > 10 | 10 |

Fonte: a própria autora

Para o fator Profundidade do Poço (P), as faixas e classes de valores (Tabela 5.7) foram estabelecidas considerando que quanto maior a profundidade do poço, menor a produtividade hídrica do mesmo.

Tabela 5.7 - Classes atribuídas ao fator Profundidade

| Faixas (m) | Classe (P_c) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 0 – 100 | 10 |
| 100 – 150 | 8 |
| 150 – 200 | 6 |
| > 200 | 2 |

Fonte: a própria autora

Os resultados de produtividade hídrica *versus* direção dos lineamentos estruturais encontrados por Celligoi (1993) foram utilizados para determinar as faixas e classes para o fator Direção do Lineamento (D) no modelo. Neste sentido, foram extraídos os azimutes dos lineamentos para que fosse determinada a faixa angular para cada direção observada. Estes valores estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Classes atribuídas ao fator Direção do Lineamento

| Direção | Faixa 1 (graus) | Faixa 2 (graus) | Classe (F_c) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| NS | 157,6 – 202,5 | 337,6 – 22,5 | 2 |
| NW | 112,6 – 157,5 | 292,6 – 337,5 | 4 |
| NE | 22,6 – 67,5 | 202,6 – 247,5 | 6 |
| EW | 67,6 – 112,5 | 247,6 – 292,5 | 10 |

Fonte: a própria autora

Por fim, para a determinação das faixas e classes do fator Espessura de Solo apresentadas na Tabela 5.9, foram considerados que quanto menor sua espessura, maior sua contribuição para a produtividade aquífera, de acordo com o artigo A.

Tabela 5.9 - Classes atribuídas ao fator Espessura de Solo

| Faixas (m) | Classe (S_c) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 0 – 6 | 10 |
| 6 – 12 | 8 |
| 12 – 18 | 6 |
| 18 – 24 | 4 |
| >24 | 2 |

Fonte: a própria autora

A partir dos valores de pesos (p), faixas e classes (c) apresentados, o IPAF foi calculado por meio da Equação 5.2. Considerando diferentes combinações de valores, o índice de produtividade pode variar de 45 a 190. A partir do valor IPAF calculado, a produtividade hídrica pode ser dividida segundo a Tabela 5.10 para a classificação do mapa de produtividade.

$$IPAF = Ep.Ec + Dp.Dc + Vp.Vc + Cp.Cc + Pp.Pc + Lp.Lc + Sp.Sc \quad 5.2$$

Em que:

IPAF = Índice de Produtividade de Aquíferos Fraturados;

Ep = Peso do fator Estruturas Interderrames;

Ec = Classe do fator Estruturas Interderrames;

Dp = Peso do fator Distância do Lineamento;

Dc = Classe do fator Distância do Lineamento;

Vp = Peso do fator Vazão;

Vc = Classe do fator Vazão;

Cp = Peso do fator Capacidade Específica;

Cc = Classe do fator Capacidade Específica;

Pp = Peso do fator Profundidade;

Pc = Classe do fator Profundidade;

Lp = Peso do fator Direção do Lineamento;

Lc = Classe do fator Direção do Lineamento;

Sp = Peso do fator Espessura de Solo;

Sc = Classe do fator Espessura de Solo;

Tabela 5.10 - Classificação por índice de produtividade hídrica

| Faixa | Produtividade |
|--------------|----------------------|
| 45 - 74 | Muito baixa |
| 74 - 103 | Baixa |
| 103 - 132 | Média |
| 132 - 161 | Alta |
| 161 - 190 | Muito alta |

Fonte: a própria autora

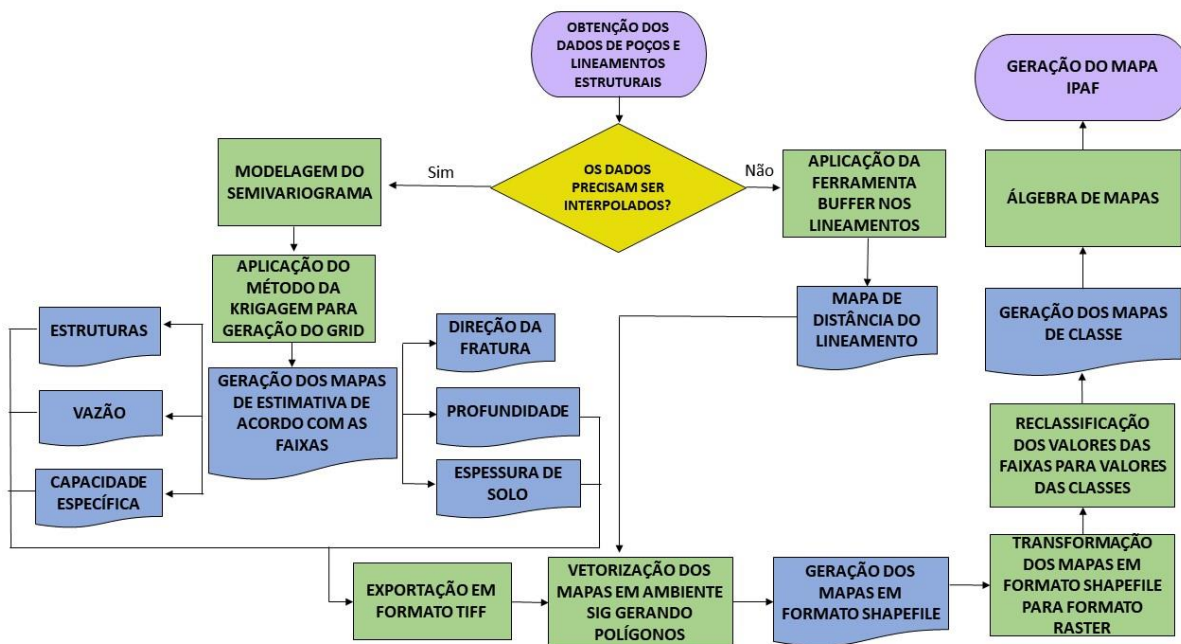
5.5 PROCESSAMENTO DE DADOS E GERAÇÃO DOS MAPAS DE CLASSES

A fim de que fossem utilizados o maior número de poços possível, cada fator contou com um número diferente de poços, visto que em muitos casos os mesmos poços que

possuíam dados de vazão, poderiam não apresentar dados de estruturas, espessura de solo, ou qualquer outro fator. Foi realizada ainda uma análise estatística descritiva dos fatores E, D, V, C, P e S, identificando valores de média, mediana, desvio padrão, máximos, mínimos, variância, assimetria, curtose e frequência. Para os dados do fator D, foram medidas as distâncias entre os poços e lineamentos estruturais existentes na área. Já para o fator L foram apenas calculados valores de mínimo, máximo e frequência, visto que as demais medidas podem não representar de forma efetiva os dados.

Como os valores dos dados dos poços são pontuais, foi necessário utilizar um método geoestatístico para estimar os valores dos fatores apresentados para a área de estudo, utilizando-se para tanto o método da *krigagem* ordinária. Foram modelados semivariogramas unidirecionais com tolerância de 90° para os fatores E, V, C, P, F e S, para a geração dos grids. Por meio dos grids, foram gerados mapas de contorno e os valores estimados foram então separados de acordo com os intervalos das faixas estabelecidas anteriormente. Para a geração do mapa do fator D, foram identificados os lineamentos estruturais e aplicada a ferramenta *buffer* aos mesmos para estabelecer as faixas de distância.

Após esta etapa, os mapas foram exportados em formato *tiff*. Em ambiente SIG, foi realizada a vetorização dos mesmos, para posterior geração dos produtos *raster*. A partir de então, foi realizada uma reclassificação, atribuindo às faixas os valores das classes (Ec, Dc, Vc, Cc, Pc, Lc, Sc). Por fim, utilizando a calculadora *raster*, foi feita a somatória dos mapas de classe multiplicados pelos respectivos pesos (Ep, Dp, Vp, Cp, Pp, Lp, Sp), aplicando a Equação 5.2. A partir da mesma foi gerado o mapa IPAF para a região em estudo. As etapas do processo de geração do mapa IPAF é apresentada no fluxograma da Figura 5.3.

Figura 5.3 - Etapas do processo de geração do mapa IPAF

Fonte: a própria autora

5.6 VALIDAÇÃO DO MODELO DE PRODUTIVIDADE HÍDRICA

A geração de um mapa de produtividade hídrica para o SASG nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã trata-se de um modelo, que indica quais são as zonas que podem apresentar maior produção de água subterrânea e, conseqüentemente, que são mais favoráveis à locação de poços tubulares na área estudada. Como todo modelo que busca a explicação de um fenômeno ambiental, é necessária a realização da etapa de validação do mesmo.

Neste sentido, para a validação do modelo gerado aplicou-se a análise Regressão Linear Múltipla (RLM) para verificar se os pesos atribuídos aos fatores estão corretos, bem como obter a equação matemática que representa a produtividade hídrica do SASG na área. Assim como a Regressão Linear Simples (RLS), a RLM busca expressar as relações existentes entre grandezas conhecidas e grandezas a serem determinadas, por meio de equações matemáticas. Esta equação é obtida por meio do ajuste de uma curva aos dados observados, da qual pode-se representar gráfica ou analiticamente a relação existente entre diversas variáveis (PIANA et al., 2009); (HAIR et al.; 2009).

Entretanto, na RLS a relação existente é obtida analisando apenas duas variáveis (uma dependente e outra independente), enquanto que a RLM é mais completa, pois envolve o estudo da correlação de mais de uma variável independente para a predição da

variável dependente (HAIR et al., 2009). Neste sentido, o modelo gerado pela RLM é representado pela equação 5.3.

$$y = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \dots + \beta_p.X_p + e \quad 5.3$$

Em que y corresponde ao valor previsto da variável dependente; β_i ($i = 0, 1, 2, \dots, p$) são os coeficientes de regressão a serem estimados; X_i ($i = 0, 1, 2, \dots, p$) são os valores das variáveis independentes e e é um componente de erro aleatório, visto que estes erros devem ser independentes e seguir uma distribuição normal, com média zero e variância desconhecida.

Como os dados do presente estudo eram provenientes de duas fontes diferentes (poços e lineamentos estruturais) e, considerando que o número de amostras era diferente para cada fator, foram selecionados 222 poços para serem utilizados no processo de validação. Utilizando mapas de estimativa dos fatores gerados pela krigagem e o mapa IPAF, foram coletadas informações de E, D, V, C, P, L, S (variáveis independentes) e produtividade hídrica (variável dependente) para cada poço e, posteriormente, realizada a RLM.

5.7 RESULTADOS

5.7.1 Caracterização do SASG

Foi realizada a análise estatística descritiva dos dados obtidos e posteriormente feita a modelagem dos semivariogramas para aplicação do método da *krigagem*. Na Tabela 5.11 são apresentadas as informações estatísticas dos fatores e o modelo de semivariograma utilizado para interpolar cada fator do método.

Tabela 5.11 - Dados estatísticos dos fatores ambientais utilizados

| | E | D | V | C | P | F | S |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mínimo | 1,8 | 2,0 | 0,7 | 0,007 | 10,0 | 1,0 | 0,0 |
| Máximo | 79,3 | 2660,3 | 178,0 | 20,4 | 374,0 | 359,0 | 36,0 |
| Média | 31,8 | 644,6 | 15,4 | 1,4 | 143,9 | NA | 11,4 |
| Mediana | 24,1 | 539,4 | 8,0 | 0,4 | 125,0 | NA | 11,0 |
| DV | 22,4 | 467,5 | 22,0 | 2,5 | 60,1 | NA | 7,4 |
| Variância | 500,9 | 218.601 | 482,0 | 6,4 | 3.611 | NA | 55,9 |
| Assimetria | 0,6 | 1,2 | 3,8 | 3,8 | 1,2 | NA | 0,9 |
| Curtose | -0,7 | 2,1 | 19,4 | 19,7 | 1,9 | NA | 1,1 |
| Semiv | Esférico | NA | Esférico | Esférico | Linear | Linear | Esférico |

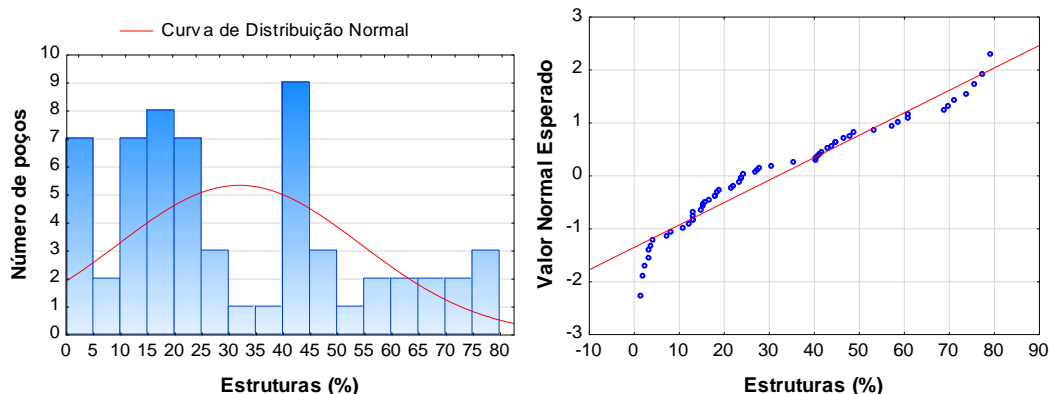
DV = Desvio Padrão; Semiv = Modelo de Semivariograma utilizado; NA = Não se aplica

Unidades dos fatores: E = %; D = m; V = m³/h; C = m³/h/m; P = m; F = graus; S = m

Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

A partir da estatística realizada para o fator Estruturas utilizando 60 poços, foi possível identificar que os valores variam de 1,8% a 79,3%. A média da porcentagem de estruturas para a área estudada foi de 31,8%, com mediana de 24,1%. A partir do histograma de frequência dos poços para o fator E (Figura 5.4) pode-se observar que maior quantidade de poços se concentra nos intervalos de 0 a 25%, com um pico ainda no intervalo de 40 a 45%, o que pode ter elevado o valor da média, fazendo com que a curva de distribuição apresente uma assimetria à direita devido ao valor positivo (0,6).

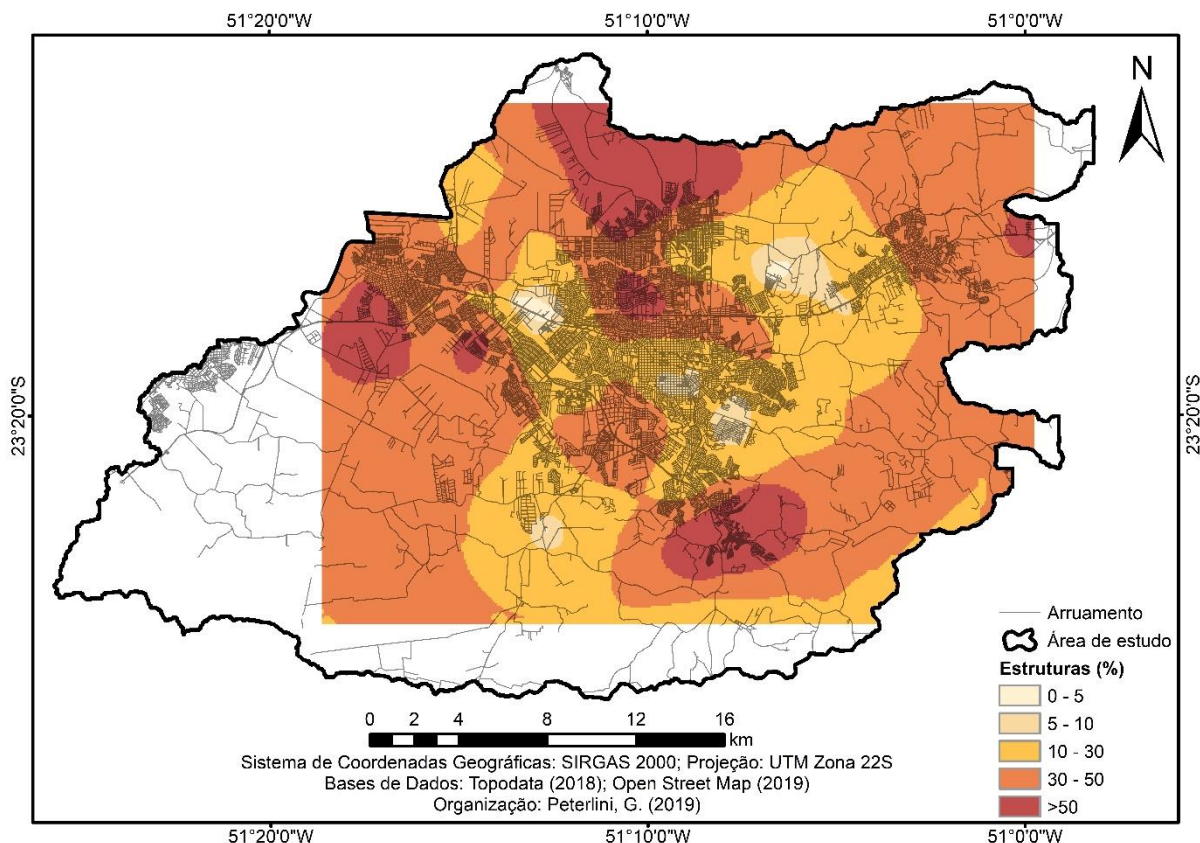
Figura 5.4 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de estruturas



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

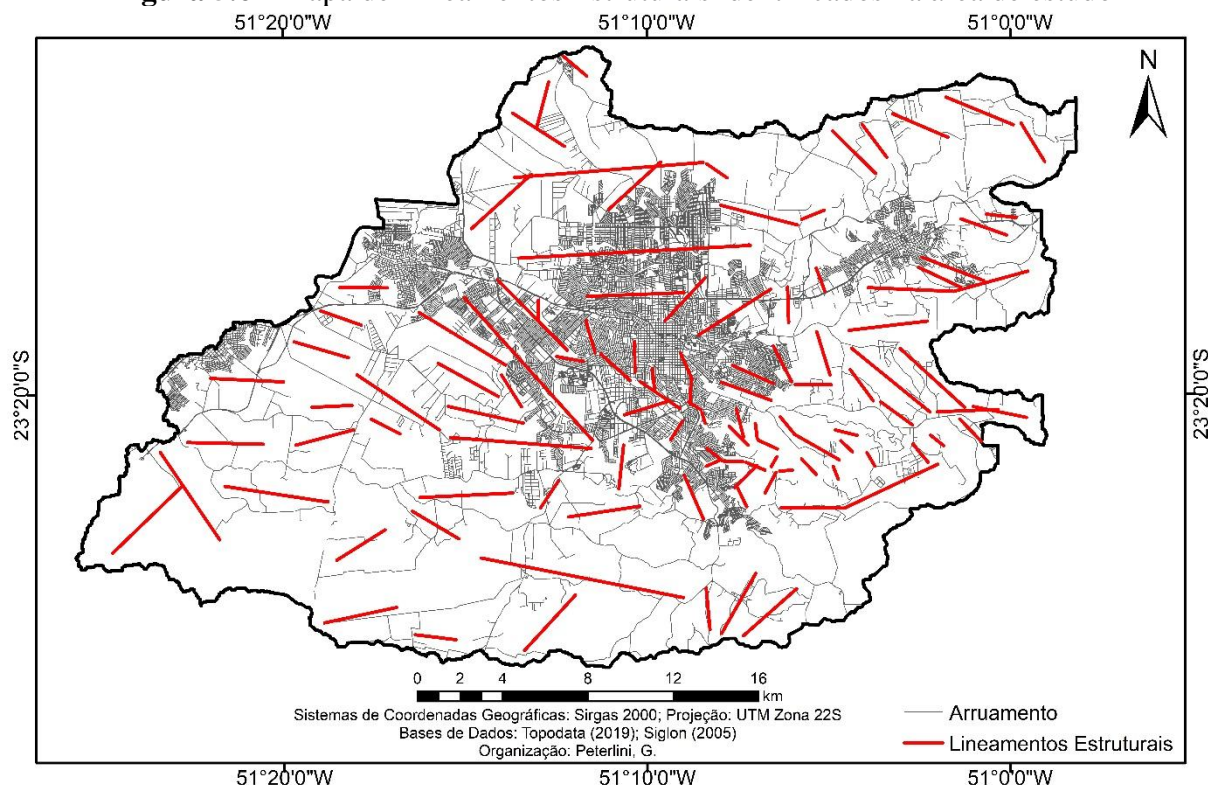
O mapa de contorno (Figura 5.5) com os valores de estimativa da quantidade de estruturas permite visualizar a distribuição destes valores para maior parte da área de estudo, em que cerca de 55% da área possui uma alta quantidade de estruturas, na faixa de valores de 30% a 50%. Destaca-se ainda o intervalo de 10% a 30%, estimados em cerca de 30,7% da área classificada, seguidas pelos intervalos >50% de estruturas (em 11,3% da área), 5% a 10% (em 2,6% da área) e 0 a 5% (em 0,3% da área), um comportamento esperado se observado o histograma de frequência dos poços. É importante destacar ainda que as áreas que apresentaram maior quantidade de estruturas foram à N, W e SE da área de estudo.

Figura 5.5 - Mapa de contorno estimado para o fator Estruturas Interderrames

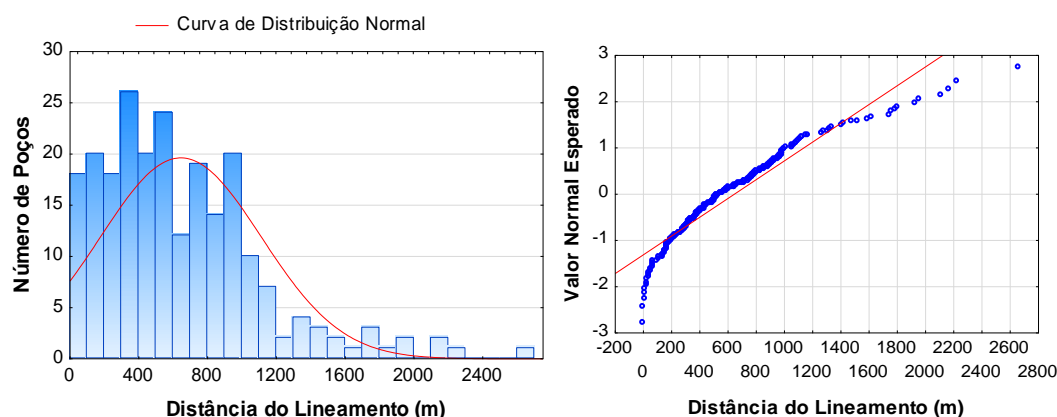


Com relação ao fator Distância da Fratura, foi inicialmente gerado o mapa de lineamentos estruturais (Figura 5.6), em que foi utilizada a metodologia aplicada por Peterlini (2017) para identificação dos lineamentos.

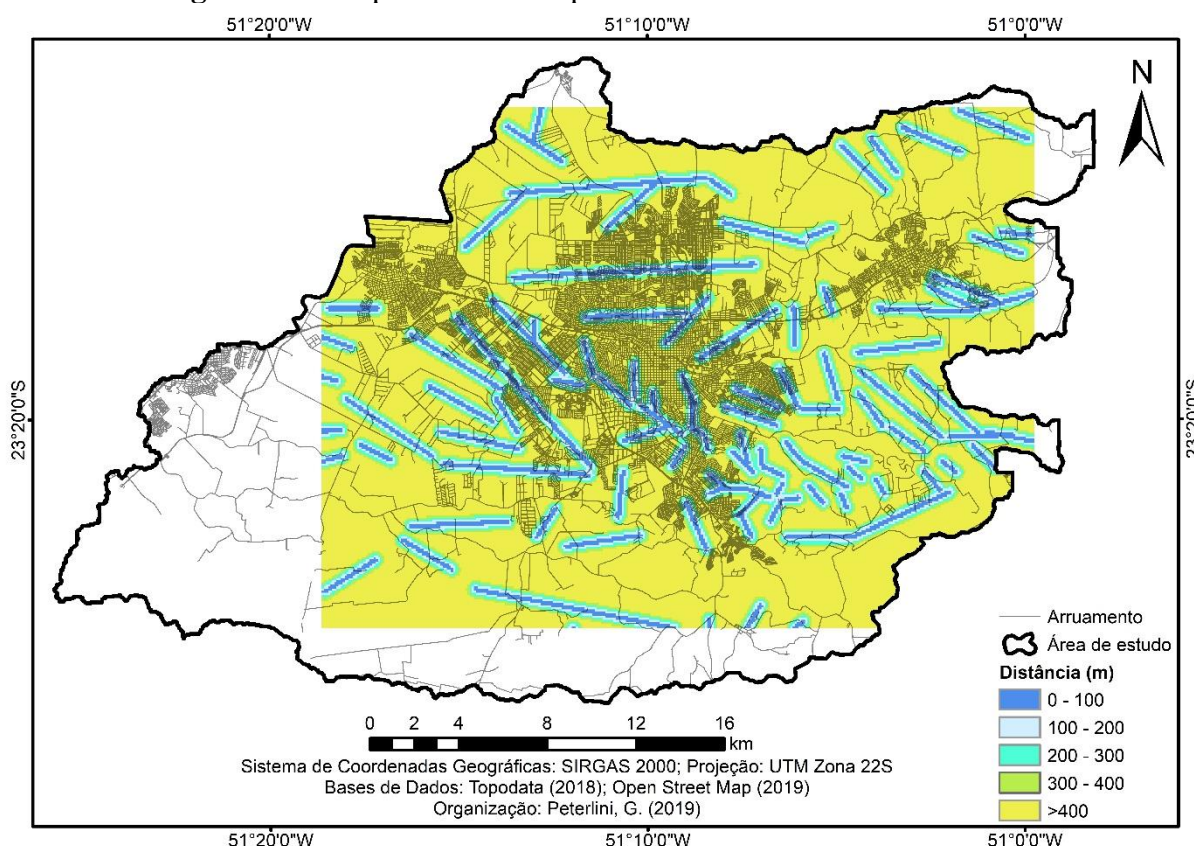
Realizando o cruzamento das informações de localização dos poços e dos lineamentos, foram observadas distâncias que variavam de 2,0 a 2260,3 m. A média (644,6 m) e a mediana (539,4 m) de distância para os poços perfurados demonstram que a maior parte dos poços possui uma localização distante dos lineamentos, até mesmo superior à distância de maior influência destas fraturas que, de acordo com Peterlini (2017) é de 400 m. Este fato pode indicar que muitas das perfurações de poços na área ainda são realizadas sem considerar critérios hidrogeológicos, o que pode acarretar baixos valores de vazão e capacidade específica.

Figura 5.6 - Mapa de Lineamentos Estruturais identificados na área de estudo

O histograma de frequência acumulada (Figura 5.7) permite observar que apenas 82 poços (35%) dos 230 analisados possuem distância < 400 m. Entretanto, o pico de maior frequência (26 poços) encontra-se no intervalo de 300 a 400 metros. Destaca-se ainda a baixa quantidade de poços a distâncias > 1000 m, o que faz com que a curva de distribuição para o fator distância tenha uma acentuada assimetria à direita (1,2). A partir do mapa apresentado para o fator Distância da Fratura (Figura 5.8) pode-se observar as distâncias estabelecidas por meio dos buffers.

Figura 5.7 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de distância do lineamento

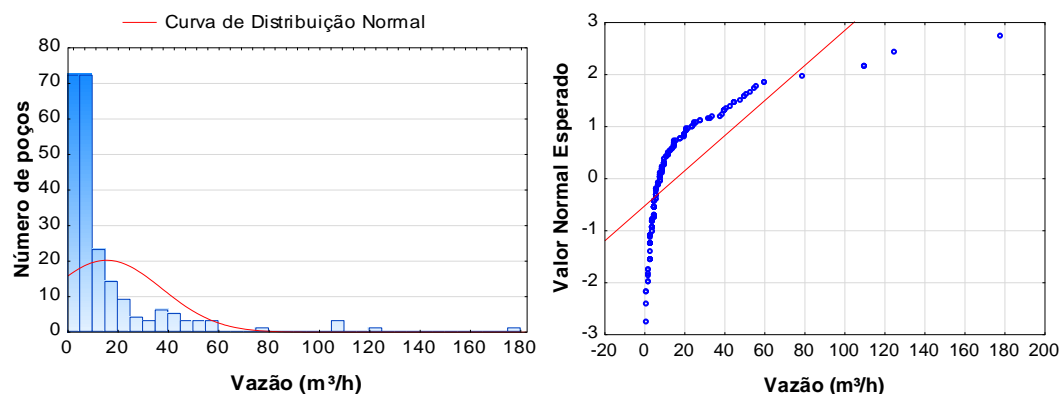
Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

Figura 5.8 - Mapa de contorno para o fator Distância do Lineamento

Para o fator Vazão, a análise estatística inicial dos dados demonstra que os valores variam de 0,72 a 178 m³/h, com uma média de 15,4 m³/h e mediana de 8 m³/h. O valor encontrado para a média é semelhante ao encontrado por Celligoi e Duarte (1997) em estudos realizados no SASG em Londrina. O alto valor do desvio padrão (22 m³/h) reflete a variabilidade dos dados que, neste caso, ocorre devido à forte heterogeneidade e anisotropia do SASG (LASTORIA et al., 2006); (ABREU et al., 2016).

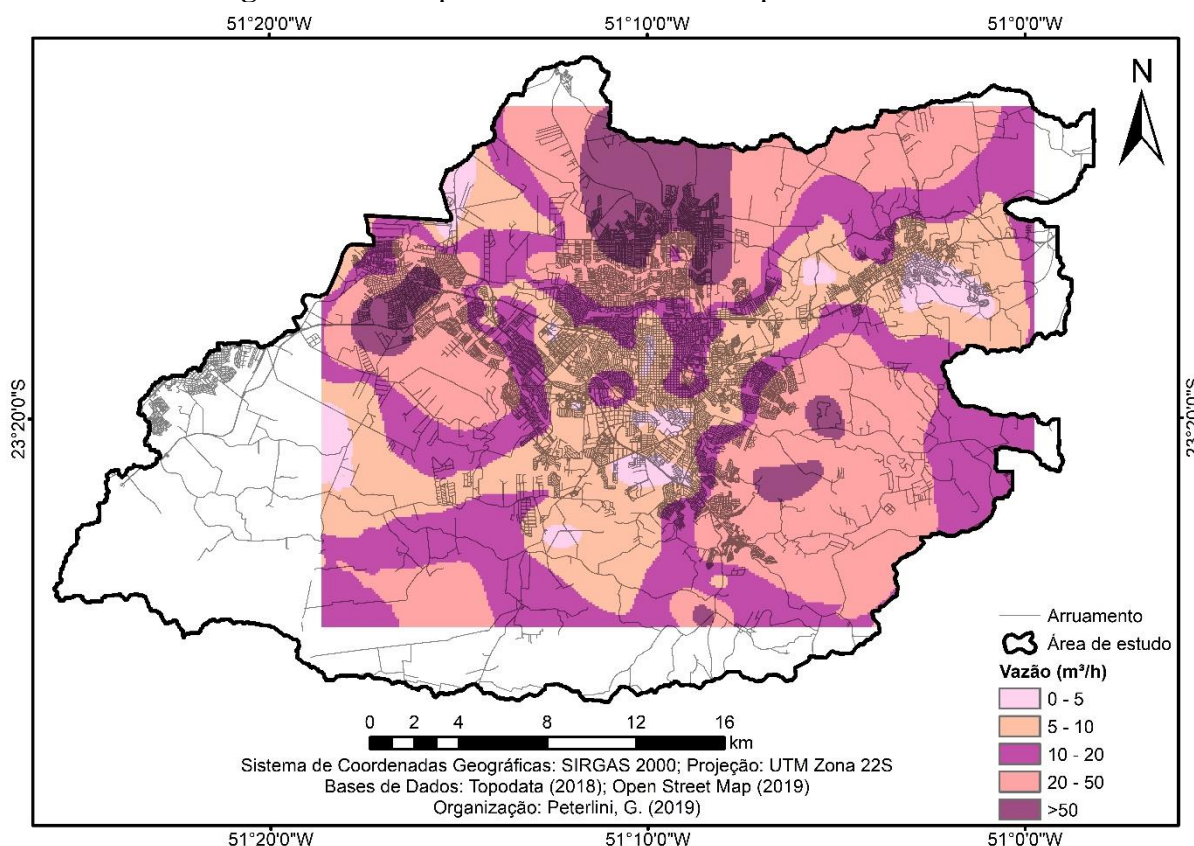
A distribuição dos valores de vazão pode ser observada no histograma da Figura 5.9, que demonstra que a grande maioria dos poços possui baixas vazões, visto que cerca de 144 poços (64,5%) dos 223 analisados estão concentrados entre o intervalo de 0 a 10 m³/h, enquanto que apenas 12 poços (5,4%) apresentam vazões excepcionais (>50 m³/h). Isto pode ser observado também pelo valor de assimetria (3,8), que indica que a distribuição de vazão é assimétrica à direita. A Figura 5.10 mostra o mapa de contorno para o fator V.

Figura 5.9 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de vazão



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

Figura 5.10 - Mapa de contorno estimado para o fator Vazão



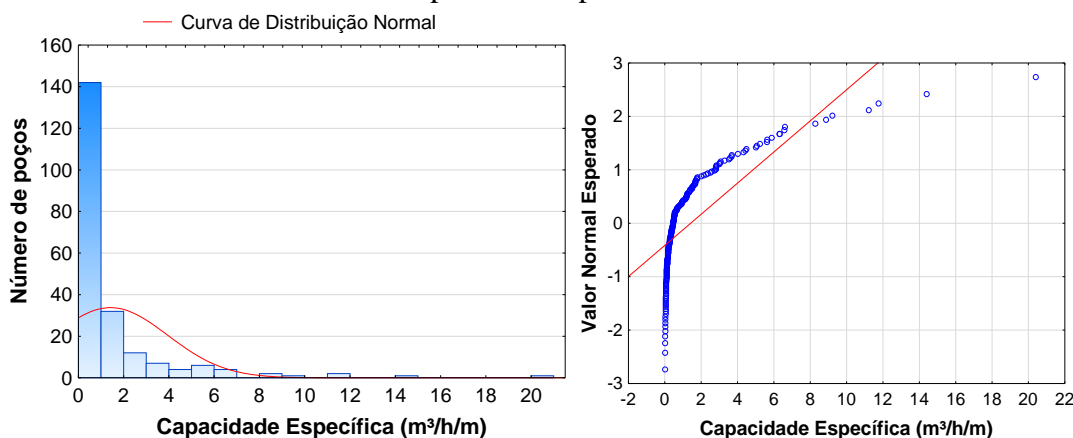
Por meio do mapa de contorno plotado a partir da *krigagem* para o fator vazão, estima-se que maior parte da área possua vazões de médias a altas, visto que 30,7% da área estimada foram classificados com vazões de 10 a 20 m^3/h e 32,7% foram classificados com vazões de 20 a 50 m^3/h . Entretanto, uma parte significativa da área (24,3%) foi classificada com baixas vazões, no intervalo de 5 a 10 m^3/h . Os menores valores de vazão, classificados de 0 a 5

m^3/h , representam cerca de 4,1% da área estimada e localizam-se nas porções central, NE e W da área de estudo, enquanto as vazões excepcionais (8,2% da área estimada) concentram-se nas regiões N, SE e NW.

Quanto aos valores de capacidade específica, estes variavam de $0,007 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ a $20,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Os valores de média ($1,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) e mediana ($0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) demonstram que a capacidade específica para a área de estudo é predominantemente baixa. Estes valores são semelhantes ao valor de $1,15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ encontrado por Celligoi e Duarte (1997) para o SASG na região de Londrina, bem como ao valor de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ apresentado por Athayde (2013) em poços do SASG no Paraná.

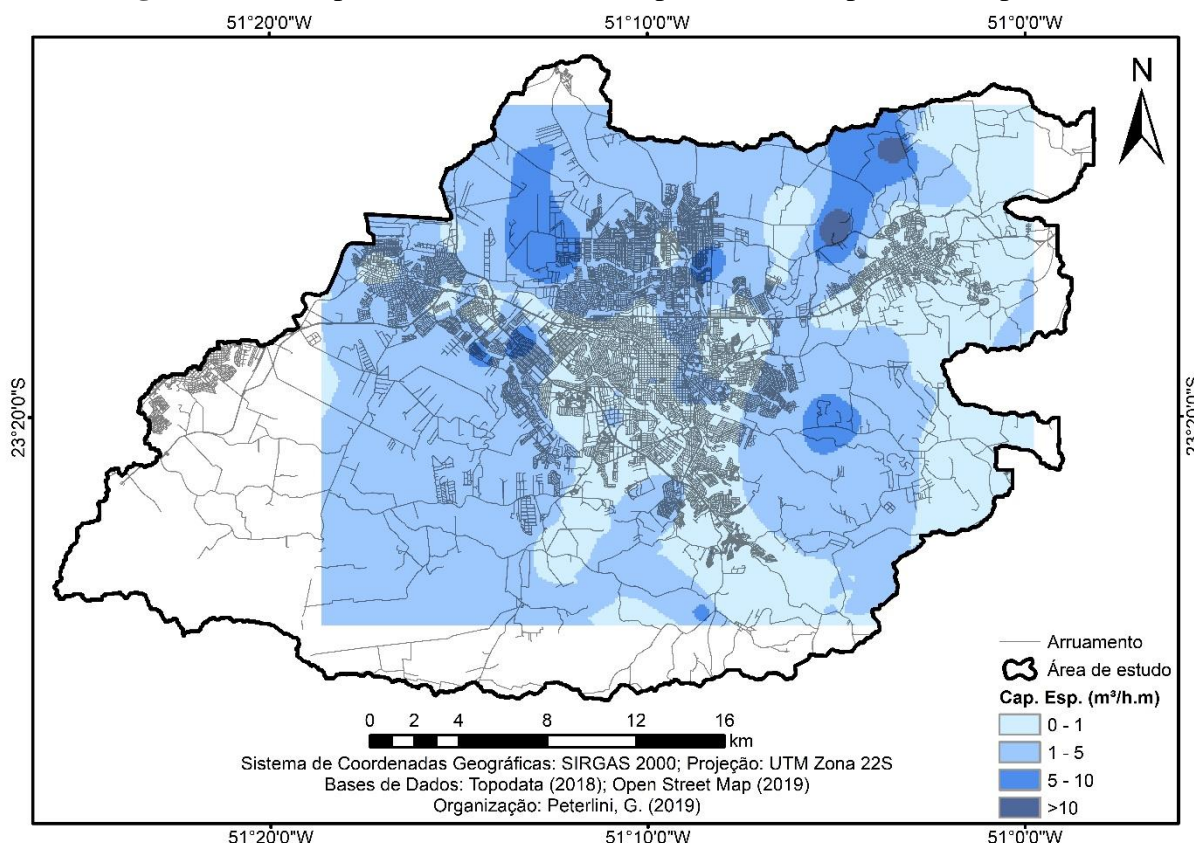
Do histograma de frequência (Figura 5.11) pode-se observar que dos 214 poços analisados, cerca de 142 (66,3%) possuem capacidade específica no intervalo de 0 a $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, 55 poços (25,7%) possuem capacidade específica de 1 a $5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, 13 poços (6,1%) se localizam no intervalo de 5 a $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e apenas 4 poços (1,9%) apresentam capacidade específica $>10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Além disto, o valor de assimetria (3,8), da curva de distribuição e o gráfico de probabilidade normal evidenciam este resultado, visto que os dados possuem uma distribuição assimétrica à direita, indicando que maior número de poços possui baixos valores de capacidade específica.

Figura 5.11 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de capacidade específica



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). **Organização:** a própria autora

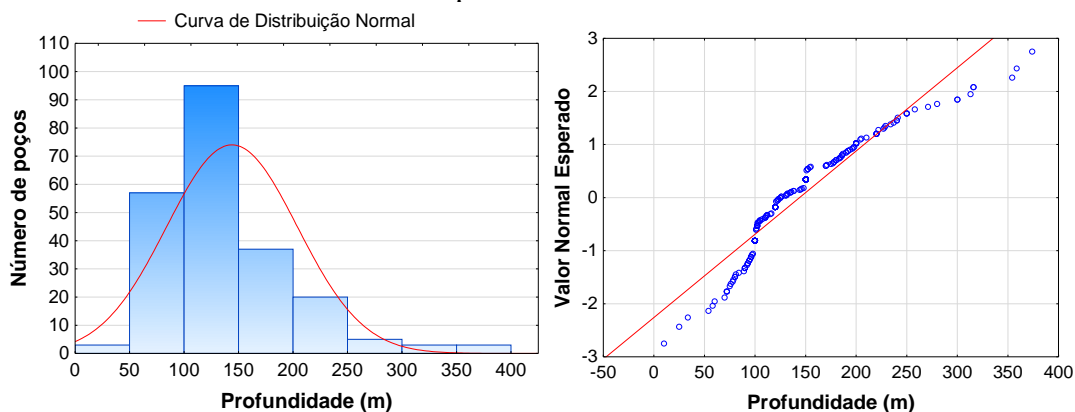
Estima-se que maior parte da área abrangida pela *krigagem*, ou seja, cerca de 60,1%, possua capacidade específica de 1 a $5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, como pode ser observado no mapa de contorno da Figura 5.12, seguida pela área classificada no intervalo de 0 a $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, que representa 33,4% da área. Os demais intervalos, de 5 a $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $>10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ representam 6% e 0,5% da área estimada, respectivamente.

Figura 5.12 - Mapa de contorno estimado para o fator Capacidade Específica

Em relação ao fator Profundidade, são apresentados os valores de mínimo (10 m) e de máximo (374 m) encontrados nos poços presentes na área de estudo. A média de profundidade dos poços estudados foi de 143,9 m, com mediana de 125 m, resultados também similares aos encontrados por Celligoi (1993) e Athayde (2013). Do histograma de frequência apresentado na Figura 5.13 pode-se observar que 60 poços possuem profundidade < 100 m, enquanto a maior parte dos poços (95) encontram-se no intervalo de 100 a 150 m. O restante dos poços se distribui em profundidades maiores de 150 a 200 m (37 poços) e > 200 m (31 poços). Por meio da Figura 5.13 pode-se ainda visualizar a assimetria dos dados (1,2), que indica uma distribuição assimétrica à direita.

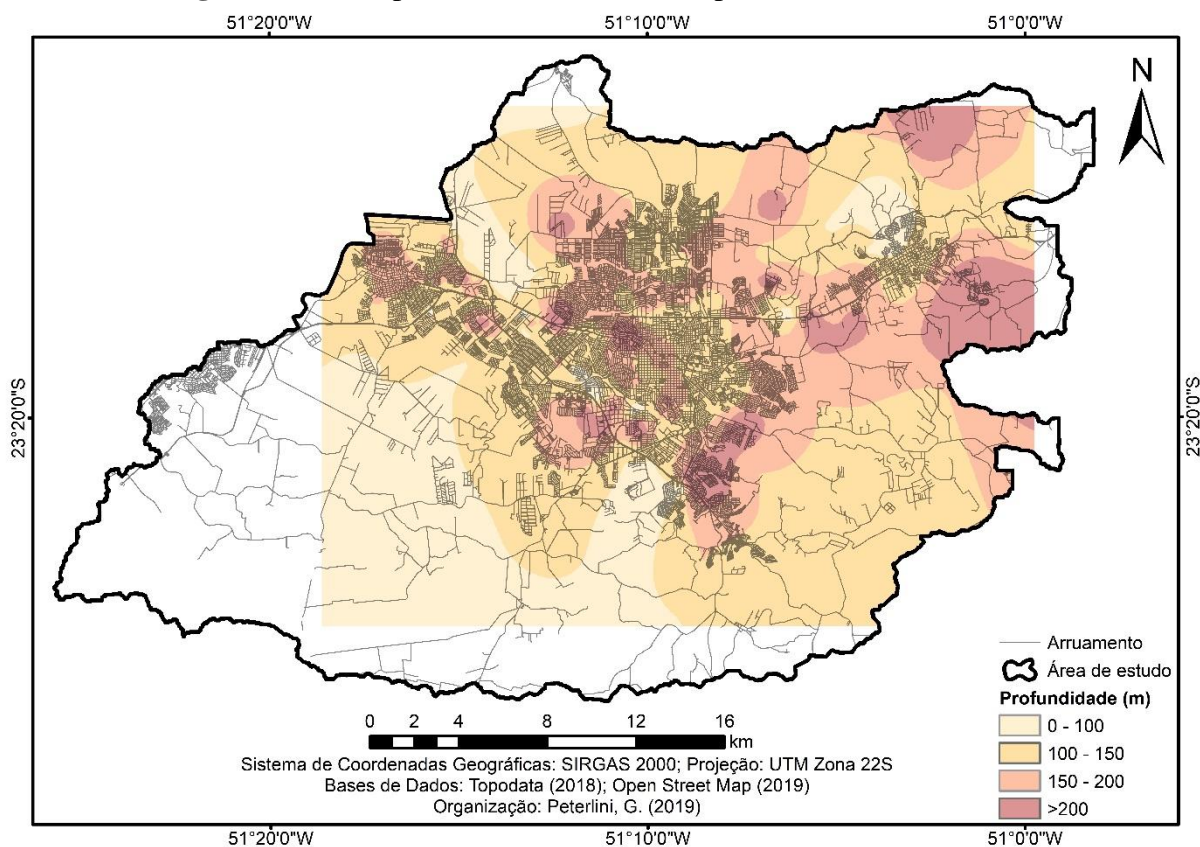
Considera-se que os dados se comportam desta maneira devido à profundidade do poço ser um fator bastante dependente das entradas de água presentes no perfil geológico e se estas entradas trarão uma vazão satisfatória. Freitas et al. (2001) apontam que a tendência é que a perfuração de um poço avance até que a vazão desejada seja alcançada. Portanto, os dados corroboram com o entendimento de que as melhores vazões se encontram no intervalo de 100 a 150 metros de profundidade. A Figura 5.14 mostra o mapa de contorno para o fator P.

Figura 5.13 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de profundidade



Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). Organização: a própria autora

Figura 5.14 - Mapa de contorno estimado para o fator Profundidade



Os dados de estimativa de profundidade dos poços podem ser visualizados no mapa de contorno de profundidade. Fica evidenciado pelo mapa de estimativa que maior parte da área possui profundidades de 100 a 150 metros (46,5%), seguidas pelos intervalos de 150 a 200 metros (24,3%), 0 a 100 metros (21,9%) e >200 metros (7,3%), o que corrobora com os dados de poços já existentes.

Em relação ao fator Direção do Lineamento, foi plotado o diagrama roseta de frequência de direção dos lineamentos (Figura 5.15) por meio dos dados azimutais. Foram identificados lineamentos com azimutes que variam de 1° a 359° . A Figura 5.16 mostra o mapa de contorno para o fator L.

Figura 5.15 - Diagrama roseta da frequência de direção dos lineamentos

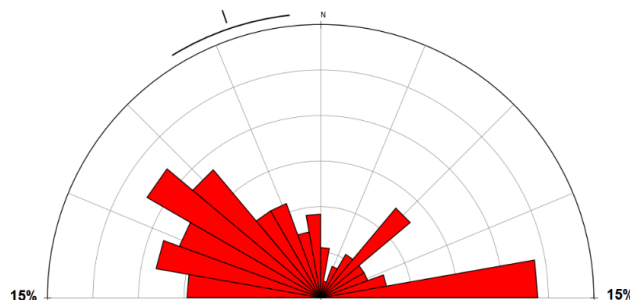
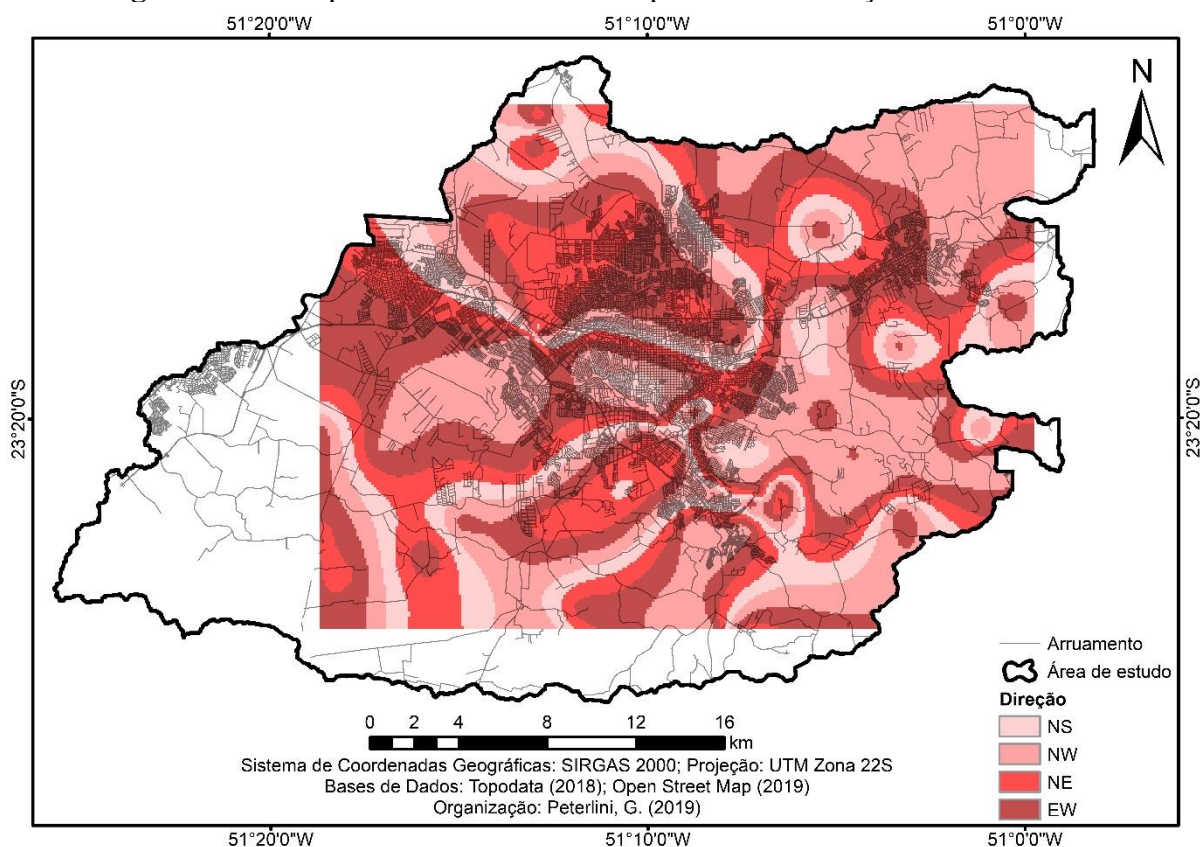


Figura 5.16 - Mapa de contorno estimado para o fator Direção do Lineamento



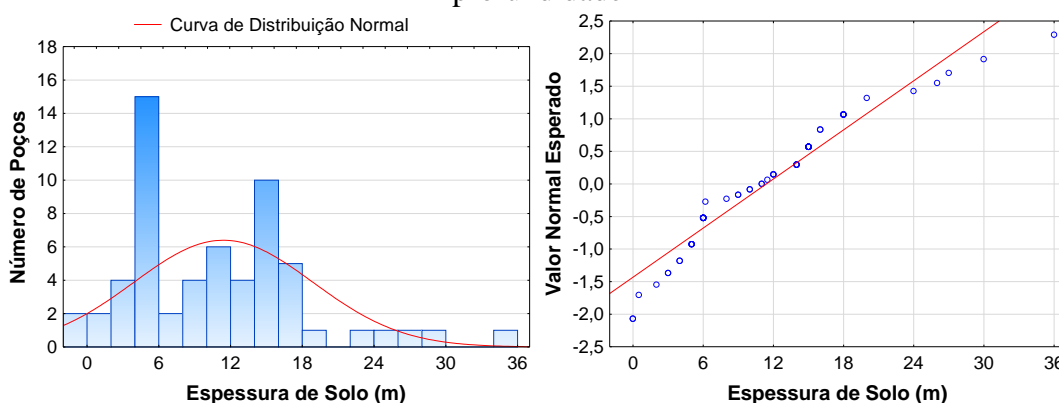
Do diagrama de roseta pode-se observar que a direção de maior frequência foi a EW, com uma frequência máxima de 11,9%, seguida pela direção NW. Entretanto, ao observar o mapa de contorno estimado para o fator L, pode-se observar que maior parte da área

foi estimada com a classe de direção NW, com 34,4%, seguida pelas direções EW (29,8%), NE (21%) e NS (14,8%).

Da análise estatística realizada para o fator Espessura de Solo pode-se observar que os valores de espessura variam de 0 a 36 metros, apresentando uma média de 11,4 m e mediana de 11,0 m e desvio padrão de 7,4 m, que indicam solos profundos. Valores encontrados por Celligoi (1993) para a região de Londrina indicam que a espessura varia de 2,5 a 40 metros de profundidade, com média de 20,6 m, enquanto que estudos realizados por meio de poços em solos do estado do Paraná apresentam valores de mínimo e máximo semelhantes, porém com uma mediana de 5 m e desvio padrão de 6,3 m (ATHAYDE, 2013).

Por meio do histograma de frequência de espessura de solo dos poços (Figura 5.17) é possível observar a distribuição destes valores, destacando que, dos 60 poços analisados, 23 poços (38,3%) apresentam espessuras de solo que variam de 0 a 6 metros, enquanto 12 poços (20%) possuem espessura de 6 a 12 metros. Uma grande quantidade de poços também se concentra no intervalo de 12 a 18 metros, somando 19 poços (31,7%), enquanto que os intervalos de 18 a 24 metros (2 poços) e >24 metros (4 poços) possuem o menor número de poços.

Figura 5.17 - Histograma de frequência e gráfico de probabilidade normal para os dados de profundidade

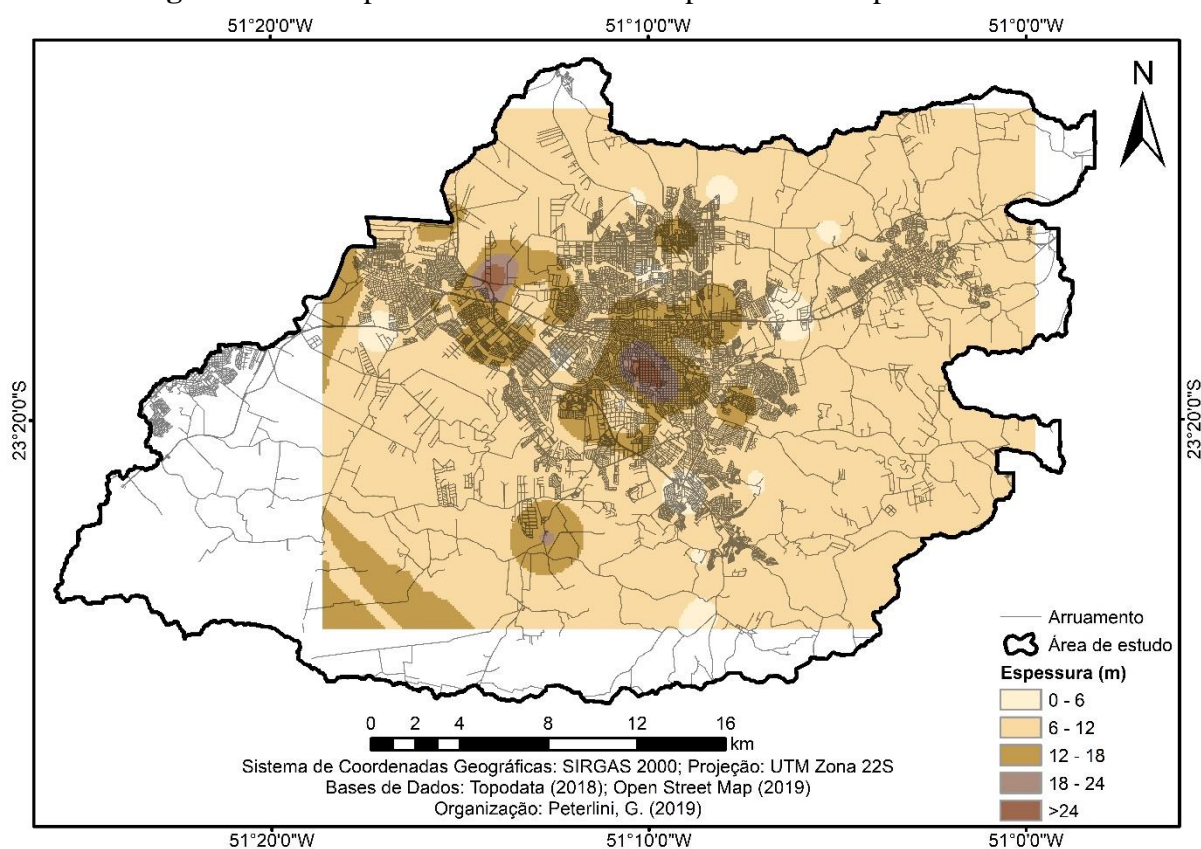


Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2018). Organização: a própria autora

O mapa de estimativa de espessura de solo (Figura 5.18) demonstra que maior parte da área estimada foi classificada no intervalo de 6 a 12 metros (83,6%), seguida pelo intervalo de 12 a 18 metros (12,2% da área estimada), o que demonstra que a área de estudo possui solos profundos. A grande profundidade de solo é característica dos solos presentes na região, que são predominantemente Latossolo Vermelho e Nitossolo Vermelho, solos estes fortemente desenvolvidos graças ao clima úmido, onde predomina o intemperismo químico. O intervalo de 0 a 6 metros de espessura de solo representa cerca de 10,8%, enquanto que os

intervalos de 18 a 24 metros e >24 metros foram estimados em apenas 1% e 0,4% da área, respectivamente

Figura 5.18 - Mapa de contorno estimado para o fator Espessura de Solo

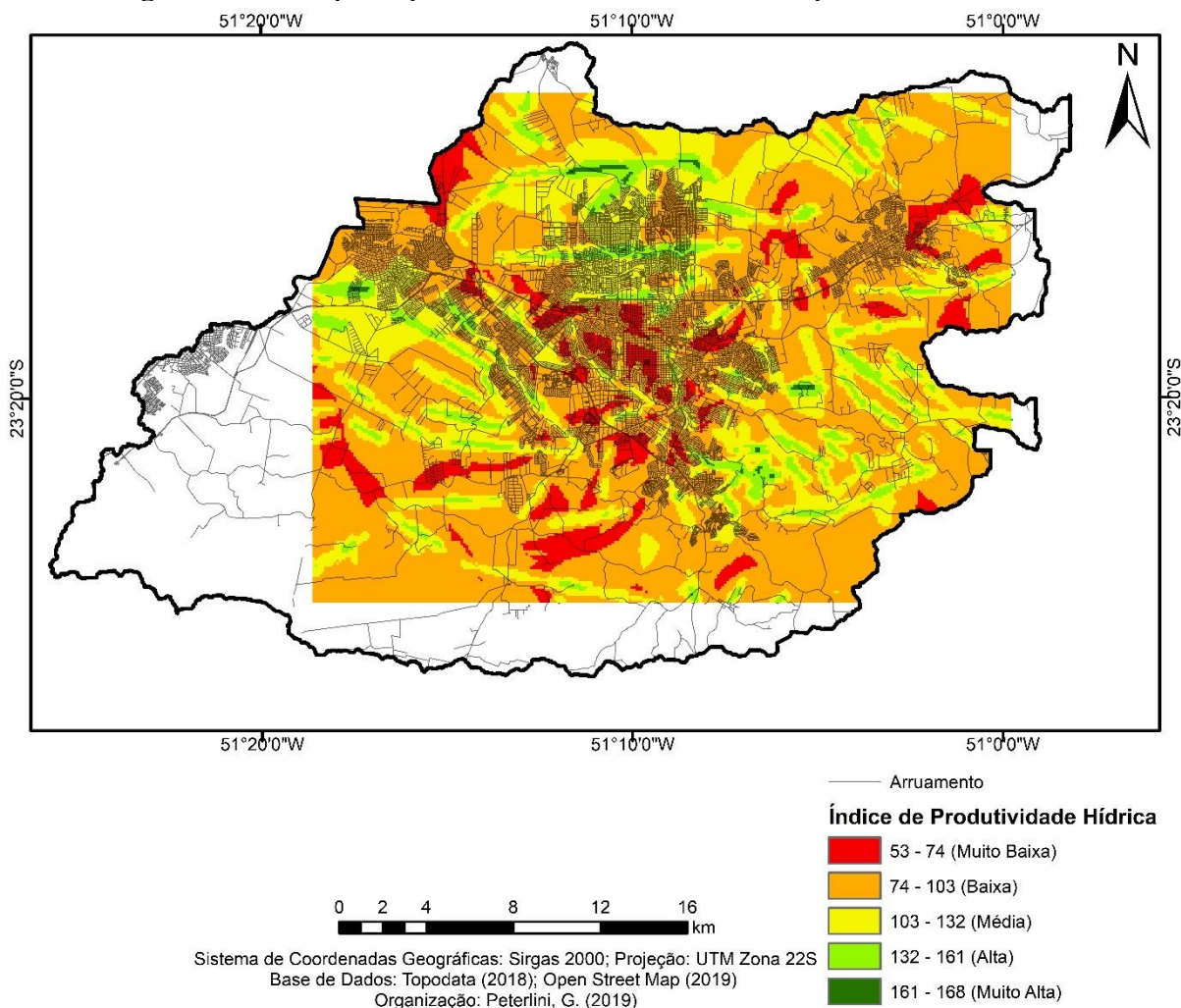


5.7.2 Zoneamento da produtividade hídrica

Após a geração dos mapas de estimativa e reclassificação das faixas de acordo com as classes, foi então aplicada a Equação 5.2 apresentada anteriormente, atribuindo os pesos aos fatores. O resultado foi a geração de um mapa que indica as zonas de maior produtividade hídrica para a área de estudo, apresentado na Figura 5.19.

Como pode ser observado no mapa, os valores IPAF para a área de estudo não variaram de 45 a 190, mas sim de 53 a 168. As zonas de muito baixa produtividade representam cerca de 8,1% da área estimada, enquanto que as zonas de baixa produtividade foram observadas em maior parte da área, representando cerca de 58%. Como segunda maior classe, foi observada a média produtividade, visto que corresponde a 27,7% da área. Por fim, as zonas de alta e muito alta produtividade são o equivalente a 5,9% e 0,3%, respectivamente.

Figura 5.19 - Mapa da produtividade hídrica do SASG para a área de estudo



É possível observar que o mapa IPAF apresenta diversas zonas retilíneas que possuem produtividade de média a muito alta. Estas zonas ficaram mais evidenciadas devido à presença dos lineamentos estruturais e ao peso atribuído para o fator D, tornando estas zonas as áreas de maior produtividade observadas no mapa. Além disto, é importante destacar que, apesar de pequenas, as zonas classificadas como muito produtivas foram observadas próximo aos lineamentos de direção EW, fazendo com que estas áreas sejam as mais favoráveis à locação de poços tubulares profundos, o que corrobora com os resultados obtidos por Celligoi (1993), que aponta ainda que as áreas próximas aos lineamentos nesta direção, aliadas à uma vegetação regular adjacente são as mais apropriadas para a locação e obtenção de um poço mais produtivo.

As zonas de média produtividade hídrica apresentam maior espalhamento, que partem dos arredores de um lineamento a outro, o que indica que quanto maior a densidade e proximidade entre lineamentos de uma área, maior a abrangência da zona de média produtividade, favorecendo a perfuração de poços com maiores vazões e capacidades

específicas nestes locais. Neste sentido, as maiores zonas de média produtividade localizam-se à N, NW e SE da área.

As zonas de muito baixa produtividade podem ser mais observadas na região central da área. Ao analisar os mapas de contorno de cada fator pode-se constatar que esta região possui, na maioria dos fatores utilizados, as piores situações de favorabilidade aquífera, levando ao resultado obtido no mapa IPAF. Em contrapartida, é grande a densidade de poços perfurados nesta área, principalmente devido à mesma ser localizada na região central do município de Londrina, onde há a presença de muitos condomínios residenciais que tem como fonte de abastecimento hídrico o SASG. Este fato, aliado à possibilidade de novas perfurações nesta área pode contribuir para uma redução do nível d'água do aquífero, agravando ainda mais o cenário de baixa produtividade na região central, com possibilidade de influenciar até mesmo a descarga hídrica na rede de drenagem.

5.7.3 Validação do Modelo de Produtividade Hídrica

Para verificar se os pesos atribuídos aos fatores ambientais estão corretos e validar o modelo de produtividade hídrica, foi aplicada a RLM aos dados. Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) são apresentados na Tabela 5.12. A parcela total da variabilidade presente na ANOVA pode ser dividida em duas partes: uma parte que se deve à regressão e outra que se deve à variação aleatória, mensurada através dos resíduos. Espera-se que, se há regressão, maior parte da parcela de variabilidade pertença à regressão e menor parte se deva aos resíduos.

Tabela 5.12 - Resultados da ANOVA gerada pela análise de RLM

| | GL | SQ | MQ | F | F de significação |
|-----------|-----|-----------|----------|--------|----------------------|
| Regressão | 7 | 98387,28 | 14055,33 | 173,41 | $1,58.10^{-84}$ |
| Resíduo | 214 | 17345,57 | 81,05 | | |
| Total | 221 | 115732,85 | | | |

GL = graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; MQ = Quadrado médio

Isto pode ser visto por meio do valor de SQ, que mostra que a parcela pertencente à regressão (98.387,28) é maior que a parcela dos resíduos (17.345,57), demonstrando que há regressão e que os fatores ambientais escolhidos podem ter alguma relação com a produtividade hídrica, o que permite prevê-la. Por meio do valor do teste F de significância global ($p = 1,58.10^{-84}$) pode-se verificar que pelo menos uma variável presente no

modelo está relacionada com a produtividade hídrica, pois o valor $p < 0,05$ indica que há significância estatística. Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados de significância para cada fator ambiental do modelo, a fim de verificar quais deles possuem relação com a produtividade hídrica, além de apresentar os coeficientes β , o que permite avaliar se os pesos atribuídos estão corretos.

Tabela 5.13 - Resultados da RLM para o modelo gerado

| | Coefficientes | Coefficientes Padronizados | Erro Padrão | Estatística T | p |
|------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| Interseção | 3,97 | - | 4,21 | 0,94 | 0,35 |
| E | 2,09 | 0,16 | 0,37 | 5,68 | $4,37 \cdot 10^{-8}$ |
| D | 4,29 | 0,48 | 0,24 | 17,60 | $1,78 \cdot 10^{-43}$ |
| V | 3,31 | 0,31 | 0,37 | 8,89 | $2,64 \cdot 10^{-16}$ |
| C | 4,33 | 0,24 | 0,59 | 7,39 | $3,32 \cdot 10^{-12}$ |
| P | 0,72 | 0,06 | 0,32 | 2,26 | 0,03 |
| L | 2,44 | 0,31 | 0,22 | 11,19 | $3,61 \cdot 10^{-23}$ |
| S | 1,12 | 0,11 | 0,29 | 3,88 | $1,4 \cdot 10^{-4}$ |

Fonte: a própria autora

Como pode ser observado pelos valores de p , todos os fatores ambientais apresentaram significância estatística, pois os valores foram muito inferiores a 0,05, o que indica que existe relação de cada fator utilizado com a produtividade hídrica. Neste sentido, substituindo os valores dos coeficientes e os fatores na Equação 5.3, a equação matemática que pode estimar a produtividade hídrica (PH) do SASG em um determinado local da área estudada é apresentada pela Equação 5.4.

$$PH = 3,97 + 2,09E + 4,29D + 3,31V + 4,33C + 0,72P + 2,44L + 1,12S \quad 5.4$$

Ao comparar a presente equação com a equação 5.2, utilizada para o cálculo do IPAF, pode-se observar grande semelhança nos valores dos pesos com os valores dos coeficientes. Entretanto, os valores dos coeficientes padronizados indicam que o fator C poderia ter recebido um peso menor que os fatores L e V, pois estes últimos têm maior influência na produtividade hídrica do que C. Apesar deste fato, os valores de correlação múltipla ($R = 0,92$), $R^2 = 0,85$ e R^2 ajustado = 0,85 retornados pela RLM indicam que o modelo explica 85% da variabilidade da variável dependente utilizando os fatores ambientais E, D, V, C, P, L e S, o que significa que o modelo é representativo do fenômeno da produtividade hídrica, porém podem existir outros fatores ambientais que interferem na produtividade do SASG e que podem

ser incluídos no modelo como, por exemplo, a declividade do terreno e a densidade de lineamentos estruturais, com o intuito de melhorar as estimativas.

5.7.4 Sugestão de zonas mais favoráveis à perfuração de poços tubulares

Considerando o rápido crescimento que os municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã têm apresentado nos últimos anos, é importante que sejam consideradas as zonas de produtividade aquífera no zoneamento urbano dos municípios, a fim de tornar o abastecimento hídrico mais eficiente. De forma geral, as zonas de maior produtividade são aquelas próximas a lineamentos estruturais – preferencialmente os de direção EW – ou seja, as regiões próximas às drenagens. Além disto, são destacados a seguir os bairros mais apropriados para serem locados poços mais produtivos e a localização dos mesmos por bacia hidrográfica (Figura 5.20) e município (itens a, b e c).

a) Município de Londrina

- Zona Norte: bairros localizados na Bacia do ribeirão Jacutinga, enumerados de 1 a 9, bem como suas regiões adjacentes ao norte;
- Zona Leste: bairros na Bacia do ribeirão Limoeiro, identificados de 10 a 14 e regiões adjacentes destes à leste;
- Zona Sul: bairros enumerados de 15 a 17, localizados na Bacia do ribeirão Cambé e as regiões mais próximas destes à leste.

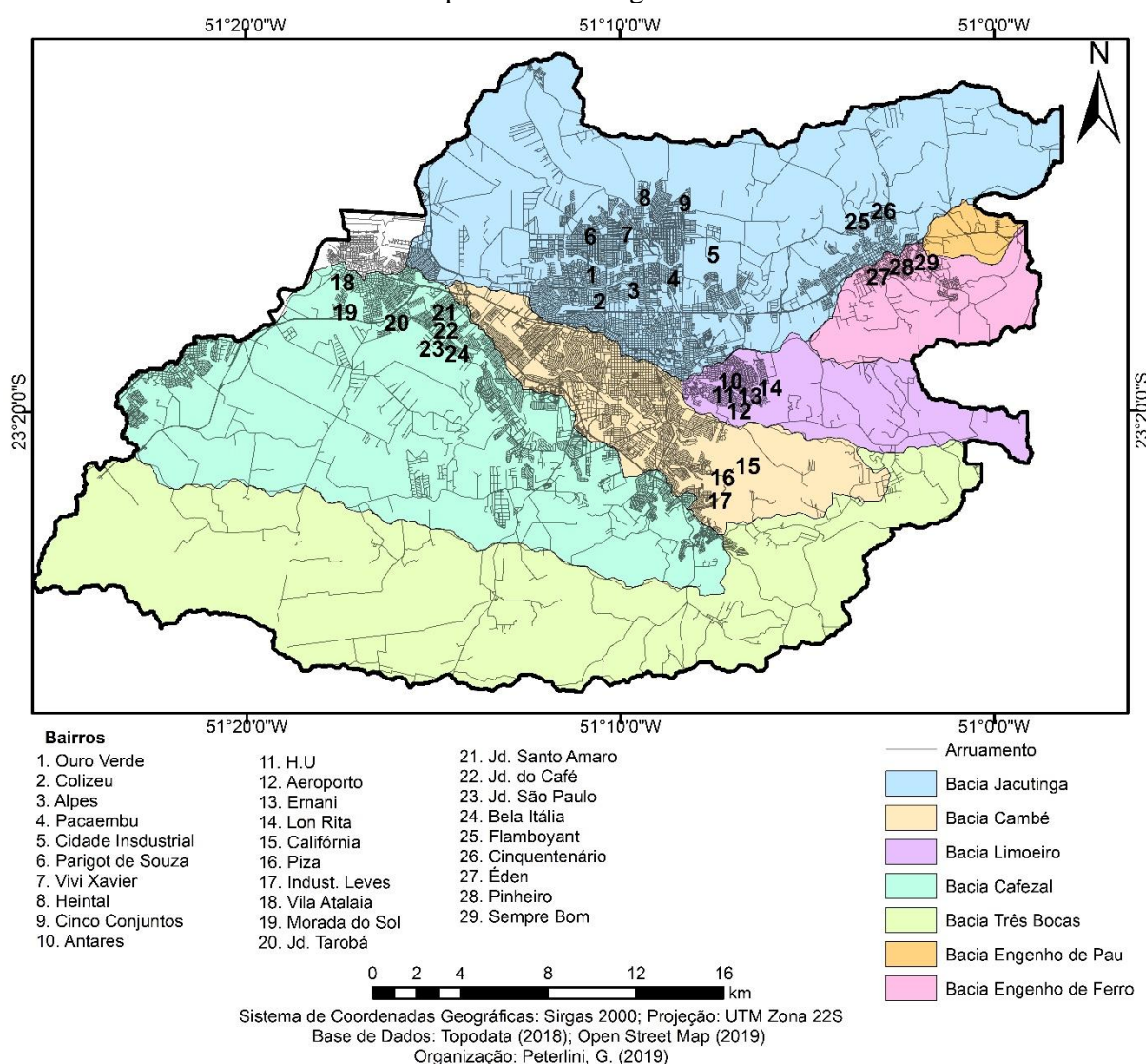
b) Município de Cambé:

- Áreas localizadas na bacia do ribeirão Cafezal, que incluem os bairros identificados com os números de 18 a 24, expandindo-se para as regiões circunvizinhas ao sul.

c) Município de Ibiporã:

- Bacia do ribeirão Jacutinga, ao norte dos bairros 25 e 26;
- Bacia do Engenho de Ferro, ao sul dos bairros 27 a 29;
- Bacia do Limoeiro, no extremo sul do município.

Figura 5.20 - Bairros que podem apresentar maior produtividade aquífera e sua localização por bacia hidrográfica



5.8 CONCLUSÃO

Devido à dificuldade exploratória de aquíferos fraturados como o SASG, o objetivo do presente trabalho foi propor um método para avaliar a produtividade aquífera neste tipo de ambiente hidrogeológico, buscando identificar e mapear, por meio de um conjunto de fatores ambientais, as zonas que podem apresentar poços mais produtivos.

Neste sentido, os fatores ambientais utilizados, a metodologia empregada no mapeamento destes fatores para maior parte da área de estudo, bem como os pesos atribuídos a cada um deles foram satisfatórios, visto que o mapa IPAF se mostra coerente com os mapas dos fatores utilizados e permite visualizar as zonas de maior produtividade aquífera. Além disto, por meio da análise RLM, foi possível observar a importância hierárquica – por peso – de cada fator utilizado no cálculo da produtividade hídrica. Foi possível concluir que a hierarquia dos

fatores – que antes da aplicação da análise era: $P < S < E < V < L < C < D$ – apresenta a seguinte ordem de importância: $P < S < E < C < V < L < D$.

Isto indica que o peso atribuído ao fator C poderia ter sido inferior aos pesos atribuídos aos fatores L e V, visto que estes últimos apresentaram um coeficiente β padronizado maior que o primeiro, indicando que a capacidade específica exerce menos influência que o esperado na produtividade. Apesar disto, o modelo e o mapa IPAF podem ser considerados representativos já que explicam 85% da variabilidade da produtividade hídrica para a área de estudo.

Até então inexistente, a metodologia proposta de avaliação da produtividade hídrica e o mapa IPAF podem ser consideradas inovadoras e importantes ferramentas de planejamento urbano e ambiental, pois podem ser utilizadas por órgãos gestores de recursos hídricos para a tomada de decisão dos melhores locais para perfuração de poços com vistas ao abastecimento público, bem como podem ser utilizadas no zoneamento urbano, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão da criação de novos bairros, principalmente industriais, ou até mesmo na definição de zonas de expansão urbana na área de estudo.

Além disto, o método pode ser adaptado para outras regiões que tenham como hidrogeologia local os aquíferos fraturados, desde que o pesquisador ou gestor responsável tenha o conhecimento de como se dá a influência da direção dos lineamentos na área a ser estudada, que pode variar de acordo com a geologia local.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve por finalidade principal gerar informações para aprimorar os conhecimentos sobre o funcionamento de sistemas aquíferos fraturados como o Sistema Aquífero Serra Geral, bem como propor um método para avaliar a produtividade hídrica nestes ambientes hidrogeológicos, a fim de fornecer subsídios à melhor gestão de recursos hídricos subterrâneos, ao planejamento urbano e ambiental e ao zoneamento urbano.

Considerando a problemática da escassez relativa dos recursos hídricos e que a questão da produtividade hídrica é um tema pouco abordado nos trabalhos atuais, que buscam avaliar principalmente a questão da qualidade das águas, a presente pesquisa torna-se fundamental para o uso mais eficiente dos mananciais urbanos existentes, principalmente os subterrâneos.

Com esta pesquisa foi possível comprovar que alguns fatores geológicos e pedológicos como as estruturas interderrames e a espessura de solo exercem uma influência, ainda que baixa, na produtividade hídrica de aquíferos fraturados. Foi possível constatar que as estruturas interderrames influenciam mais a produtividade do que a espessura de solo. Além disto, estas informações foram de extrema relevância para a atribuição dos pesos do método IPAF que, juntamente com outros fatores ambientais, permitiu mapear as zonas de maior produtividade hídrica subterrânea na área de estudo, bem como destacar a importância hierárquica de cada fator ambiental no fenômeno da produtividade.

Considerando estes fatos, é importante resgatar as questões norteadoras da pesquisa, apresentadas ainda na introdução do trabalho, a fim de respondê-las de forma mais evidente e completa. Como questão central destaca-se: de que forma o mapeamento de áreas mais produtivas de águas subterrâneas podem contribuir para o planejamento urbano e ordenamento territorial de uma região? A resposta para esta questão é a sugestão das zonas consideradas de alta e muito alta produtividade feita no artigo B, sugestão esta realizada considerando a bacia hidrográfica na qual as zonas estão inseridas, bem como o município e os bairros inseridos nestes dois primeiros.

A sugestão destas zonas foi realizada com vistas à perfuração de poços, principalmente por empresas responsáveis pelo abastecimento hídrico dos municípios, a fim de melhorar a disponibilidade hídrica e reduzir gastos com poços improdutivos, visto que estas empresas muitas vezes tem a opção de escolher o local de perfuração, o que pode não acontecer com condomínios residenciais e empresas privadas que já possuem terrenos em locais específicos do município.

Uma outra questão destacada inicialmente foi sobre a possibilidade de adaptar um método já existente para realizar o mapeamento das zonas mais produtivas. Com base nos resultados obtidos no artigo B pode-se afirmar que, mais que adaptar um método já existente – como é o caso do método DRASTIC utilizado para avaliar a vulnerabilidade à contaminação aquífera – foi possível propor um novo método para avaliar a produtividade hídrica, apenas baseando-se no DRASTIC, já que todos os fatores ambientais e pesos foram modificados, inclusive a finalidade de aplicação. Ainda não haviam sido propostos métodos para avaliação da produtividade hídrica de aquíferos fraturados, o que torna o método uma inovação.

Por fim, questionava-se as medidas que podem ser tomadas para que o mapa de produtividade auxilie no zoneamento urbano. Esta questão coloca em pauta o tema do retorno à sociedade em relação às pesquisas de pós-graduação. É fundamental que um resultado tão importante para uma melhor gestão de recursos hídricos subterrâneos como o mapa IPAF seja entregue aos gestores públicos, a fim de utilizá-lo juntamente com a sociedade para uma melhor alocação de poços tubulares. O mapa pode ser utilizado para determinar locais para criação de novos bairros, principalmente industriais e até mesmo ser utilizado para definição de novas zonas de expansão urbana.

Além disto, o mapa pode auxiliar a criação de políticas públicas que evitem a instalação de poços tubulares em locais de muito baixa produtividade, para evitar dispêndios financeiros e impactos ambientais como a redução do nível d'água de aquíferos e a diminuição da descarga hídrica nas redes de drenagem fluviais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. C.; CONICELLI, B. P.; PEÑARANDA, J. R. Avaliação da produtividade dos poços tubulares na sub-bacia do Juqueri-Cantareira/SP. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIX.*, 2016. Campinas. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2016.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA, 1987.
- ANDRIOTTI, J. L. S. Introdução à Geoestatística. **Estudos Tecnológicos-Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, v. 11, n.27, p. 5-81, 1988.
- ARCHELA, E.; FRANÇA, V.; CELLIGOI, A. Geologia, geomorfologia e disponibilidade hídrica subterrânea na bacia hidrográfica do Ribeirão Jacutinga. **Geografia (Londrina)**. v. 12, n. 2, p. 131-140. 2003.
- ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. V. M.; ROSA FILHO, E. F.; Compartimentação hidroestrutural e aptidões químicas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42 (Supl. 1): 167-185, 2012.
- ATHAYDE, G. B. **Compartimentação hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no estado do Paraná, Brasil**. 2013. 177 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental). Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2013.
- ÁVILA, C. J.C.P., ASSAD, E.D., Verdesio, J.J., EID, N.J., Soares, W. & FREITAS, M. A.V. Geoprocessamento da Informação Hidrológica, 1999. *In: Freitas, M.A.C. O estado das Águas no Brasil*. ANEEL/ SRH/ OMM. Brasília, 1999.
- BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; BUCHMANN FILHO, A. C. 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. **Águas Subterrâneas**. n. 17, p. 67-75, 2003.
- BRAGA, R.; CARVALHO, P. F. **Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional**. Rio Claro: Laboratório de Planejamento Municipal – Deplan – UNESP – IGCE, 2003.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF, 1988.
- BRASIL. **Estatuto da cidade**: guia para implementação pelos municípios e cidadãos. Lei n. 10.257, de 10 de julho de 2001, que estabelece diretrizes gerais da política urbana. 2ª ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2002.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8,001/90, que modificou a Lei nº 7.990/89. Brasília, DF, 1997.
- BORGES, B. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.

CABRAL, J. Movimento das Águas Subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2.ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. *In*: DRUCK, S. et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2019.

CELLIGOI, A. **Recursos hídricos subterrâneos da formação Serra Geral em Londrina – PR**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1993.

CELLIGOI, A.; BRITO, C. M. Utilização de critérios hidrogeológicos para captação de água subterrânea em Iguaçu, Estado do PR. **Geografia**, Londrina, v. 8, n. 1, p. 83-90, jan. / jun. 1999.

CELLIGOI, A.; DUARTE, U. Hidrogeologia da cidade de Londrina – PR. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, VI, 1990, Porto Alegre. **Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Porto Alegre: Águas Subterrâneas, 1990.

CELLIGOI, A.; DUARTE, U. Hidrogeologia da formação Serra Geral em Londrina – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**. n. 45, p. 117-132, 1997.

CORIOLOANO, A. C. F.; SÁ, E. F. J.; SILVA, C. C. N. Implicações da neotectônica no condicionamento estrutural de água subterrânea em terrenos cristalinos: exemplo do semi-árido do leste do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *In*: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, 2000. Fortaleza. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Águas Subterrâneas, 2000.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise Multivariada**: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. 1.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

COSTA, W. D. **Análise dos Fatores que Atuam no Aquífero Fissural: Área Piloto dos Estados da Paraíba e R. G. do Norte**. 1986. 233f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1986.

COSTA, W. D.; SILVA, A. B. Hidrogeologia de Meios Anisotrópicos. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2.ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Execução de testes de bombeamento em poços tubulares**: Manual prático de orientação. 1998. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/Testes_Bombeamento_Pocos_Tubulares.pdf. Acesso em: 15 jun. 2019.

DOUAGUI, A. G.; KOUADIO, S. K. A.; MANGOUA, J. O. M.; KOUASSI, A. K.; KOUAM, B. K.; SAVANÉ, I. Using specific capacity for assessing of the factors controlling

borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of N'Zi, Iffou and Moronou regions in the eastern area of côte d'Ivoire. **Groundwater for Sustainable Development**. v, 9, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Mapa de solos do estado do Paraná, 2008. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_wgs84. Acesso em: 26 abr. 2019.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FRAGA, C. G. **Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná**. 1986. 133 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1986.

FREITAS, M. A. Determinação do potencial hidrogeológico de rochas cristalinas através de técnicas de geoprocessamento. *In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER*, 1, 2000, Fortaleza. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Fortaleza: Águas Subterrâneas, 2000.

FREITAS, M. A. Geoprocessamento aplicado à prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas da região de Porto Alegre - RS. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS*, XII, 2001, Recife. **Anais do XII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. Recife: Águas Subterrâneas, 2001.

FREITAS, M. A.; ECKERT, R. M.; CAYE, B. R. **Captações de água subterrânea no oeste do estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM/SDMEPAGRI, 2001.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1979.

GOUVÊA, T. H.; WENDLAND, E. C. Influência de Características do Solo na Variação do Nível d'água em Região de Recarga do Aquífero Guarani. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 16, n. 1. p. 55 – 65, 2011.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HENKES, S. L. **Histórico legal e institucional dos recursos hídricos no Brasil**. 2003. Disponível em: <http://jus2.uol.com.br/doutrina/texto.asp?id=4146&p=1>. Acesso em: 30 set. 2018.

HOLLAND, M.; WITTHÜSER, K. T. Evaluation of geologic and geomorphologic influences on borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. **Hydrogeology Journal**. v. 19, p. 1065-1083, 2011.

HONDA, S. C. A. L.; VIEIRA, M. C.; ALBANO, M. P.; MARIA, Y. R. Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP). **Rev. Bras. Gestão Urbana**. v.7, n.1, p. 62-73, 2015.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. **Nitossolos**. 2014. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Nitossolos.pdf>> Acesso em: 26 abr. 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Médias Históricas em Estações do IAPAR**. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>. Acesso em 16 abr. 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Atlas Climático do Paraná**. 2019. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em: 16 abr. 2019.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Sistema de Informações Hidrológicas**, 2019. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-264.html>. Acesso em: 20 abr. 2019

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. **APA da Escarpa Devoniana**. 2003. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Planos_de_Manejo/APA_Escarpa_Devoniana/Mapas/2_mapa_climas.pdf. Acesso em: 16 abr. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA. 3ª ed. 2012. 104 p.

KHOSRAVI, K.; SARTAJ, M.; TSAI, F. T-C.; SINGH, V. P.; KAZAKIS, N.; MELESSE, M.; PRAKASH, I.; BUI, D. T.; PHAM, B. T. A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. **Science of The Total Environment**, v. 642, p. 1032-1049, 2018.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**. v. 2, n. 1. p. 19-33, 2006.

LASTORIA, G.; SINELLI, O.; KIANG, C. H.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A. C.; GASTMANS, D. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.1, p.139-150, 2006.

LISBOA, E. G.; CARVALHO, J. M. C. M.; MENDES, R. L. R. O uso da geoestatística na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos para compor o mapa de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n. 1, p. 188-199, 2016.

LONDRINA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Londrina/PR: Relatório de Diagnóstico da Situação do Saneamento**. 2010. Disponível em: http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/gabinete/PMSB/abastecimento_agua_03_10.pdf. Acesso em: 23 abr. 2019.

LONDRINA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Londrina/PR: Renovação do PMSB - 2015**. 2015. Disponível em: http://www.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/gabinete/PMSB/pmsb_completo_corrigido_2015.pdf. Acesso em: 23 abr. 2019.

MADRUCCI, V.; ARAÚJO, C. C.; TAIOLI, F. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 33. 33(2-Suplemento):43-52, junho de 2003.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**. n. 69, p. 25-37, 2005.

MELO JÚNIOR, H. R. Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XV., 2008, Natal. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Natal: Águas Subterrâneas, 2008.

MINERAIS DO PARANÁ – MINEROPAR. **Atlas geológico do estado do Paraná**. 2001. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2019.

MINERAIS DO PARANÁ – MINEROPAR. **Descrição das unidades litoestratigráficas: Folha de Londrina**. 2003. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geologia/PDF_Mapas_Geo_250000/Londrina.PDF. Acesso em: 22 abr. 2019.

MINERAIS DO PARANÁ – MINEROPAR. **Atlas geomorfológico do estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000**. Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas_geomorfologico.pdf. Acesso em 22 abr. 2019.

MOURA, A. C. M.; **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: Ed. da Autora. 2.ed. 2005, 294 p.

NEVES, M. A. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do Rio Jundiá (SP)**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro. 2005.

NEVES, M. A.; PEREIRA, S. Y.; MORALES, N. Comportamento do Aquífero Fissural na microbacia do Córrego da Cachoeira, município de Vinhedo (SP). *In*: CONGRESSO

BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XII, 2002, Florianópolis. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Florianópolis: Águas Subterrâneas, 2002.

NEVES, M. A. et al. Análise das informações disponíveis sobre poços tubulares profundos e seu uso no diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade dos aquíferos da bacia do Rio Jundiá (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIII, 2004, Cuiabá. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2004.

PACHECO, F. A. L.; MARTINS, L. M. O.; QUININHA, M.; OLIVEIRA, A. S.; FERNANDES, L. F. S. Modification to the DRASTIC framework to assess groundwater contaminant risk in rural mountainous catchments. **Journal of Hydrology**. v. 566, p. 175-191, 2018.

PETERLINI, G. **Mapeamento de lineamentos estruturais e sua influência na potencialidade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do Ribeirão Cambé em Londrina, PR**. 2017. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

PIANA, C. F. B; MACHADO, A. A.; SELAU, L. P. R. **Estatística Básica**: Versão preliminar. Pelotas: Instituto de Física e Matemática - UFPel, 2009.

PINHEIRO, M. R. C.; WERNECK, B. R.; OLIVEIRA, A. F.; MOTÉ, F.; MARÇAL, M. S.; SILVA, J. A. F.; FERREIRA, M. I. Geoprocessamento aplicado à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Macaé-RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOREAMENTO REMOTO, XIV, 2009, Natal. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009.

REBOUÇAS, A. C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978. Recife. **Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 6. Recife: SBG, 1978, p. 2963-2976.

REBOUÇAS, A. C. Proteção dos Recursos Hídricos. **Revista de Direito Ambiental**. ano 8, n. 32, p.33-67, 2003.

REBOUÇAS, A. C.; FRAGA, C. G. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. **Águas Subterrâneas**. n. 12, 1988.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre localizado no manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região Nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Ambi-Agua**. v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012

ROQUES, C.; BOUR, O.; AQUILINA, L.; DEWANDEL, B. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. **Hydrogeology Journal**. v. 24, p. 2157-2170, 2016.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. A Importância do Sistema Aquífero Serra Geral para a Cultura da Soja no Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 49-56, 2006.

SANTIN, J. R.; CORTE, T. D. Planejamento urbano e águas: o plano diretor e a gestão dos recursos hídricos. *In: ENCONTRO NACIONAL DO CONPEDI*, XIX, Fortaleza. 2010.

Anais do XIX Encontro Nacional do CONPEDI. Disponível em:

<http://www.publicadireito.com.br/conpedi/manaus/arquivos/anais/fortaleza/3163.pdf>. Acesso em: 22 set. 2018.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. Z. **Gleissolos**. Embrapa, 2019. Disponível em:

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_10_2212200611540.html. Acesso em: 30 abr. 2019.

SANTOS, M. M.; CHANG, M. R. C.; KIANG, C. H.; CELLIGOI, A. Avaliação da vulnerabilidade natural à poluição utilizando o índice DRASTIC em uma área selecionada na cidade de Londrina (PR). **Águas Subterrâneas**. v. 20, n. 1, p. 29-46, 2006.

SHUSSEL, Z.; NETO, P. N. Gestão por Bacias Hidrográficas: do Debate Teórico à Gestão Municipal. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVIII, n. 3, p. 137-152, 2015.

SILVA, J. X. **Geoprocessamento para análise ambiental**. Rio de Janeiro: Ed. do Autor. 2001, 227 p.

SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento e Análise Ambiental: Aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora Record, 2009.

SOUZA, M. T.; CAMPOS, J. E. G. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. **Rem, Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 191-198, 2001.

STURARO, J. R. **Apostila de Geoestatística Básica**. Universidade Estadual de São Paulo – Departamento de Geologia Aplicada (IGCE). 2015. Disponível em:

<http://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2019.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. *In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. 1ª ed. São Paulo: Escrituras, 1999.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos avançados**. v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

VASCONCELOS, S. M. S.; SOUZA, A. J. G. A abordagem geoestatística em estudos hidrogeológicos: um exemplo de aplicação. **Revista de Geologia**, Vol. 22, nº 1, 61-74, 2009.

VIANA, T. R.; CELLIGOI, A. Análise das reservas de águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, XII, 2002, Florianópolis. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2002.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. **Atas III Simp. Sul-Bras. De Geologia**. Curitiba, v.1, p. 441-474, 1987.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XV, 2008. Natal. Anais do **Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Natal: Águas Subterrâneas, 2008.

ANEXOS

ANEXO A
Comprovante de submissão do Artigo A

12/03/2020

Email – Giselly Peterlini – Outlook

[RCG] Agradecimento pela submissão

Paulo Cezar Mendes <sistemasjava@cti.ufu.br>

Qui, 12/03/2020 16:51

Para: Giselly Peterlini <gisellypeterlini@hotmail.com>

Giselly Peterlini,

Agradecemos a submissão do trabalho "Fatores geológicos e pedológicos que influenciam na produtividade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)" para a revista Caminhos de Geografia.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/authorDashboard/submission/53137>

Login: gisellypeterlini

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Paulo Cezar Mendes

ANEXO B

Comprovante de submissão do Artigo B

Elsevier Editorial System(tm) for Journal of
Hydrology or its open access mirror
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: PROPOSED METHOD FOR THE EVALUATION OF WATER PRODUCTIVITY IN
FRACTURED AQUIFERS: AN APPLICATION FOR THE SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM.

Article Type: Research paper

Keywords: Aquifer productivity; Methodological proposal;
Hydrogeological modelling; Groundwater.

Corresponding Author: Dr. André Celligoi, Doctor

Corresponding Author's Institution: Department of Geosciences, State
University of Londrina

First Author: Giselly Peterlini, Md

Order of Authors: Giselly Peterlini, Md; José Paulo P Pinese, Dr; André
Celligoi, Doctor

Abstract: Due to the poor understanding of fractured aquifer systems, the choice of the best locations for the installation of productive wells in these aquifers is a challenge for hydrogeology. The present work aims to propose and apply a method to evaluate the water productivity of the Serra Geral Aquifer System (SGAS) in northern Paraná. Environmental factors that influence the aquifer productivity were defined and weights were assigned, ranging from 1 to 5, as well as ranges and classes that varied from 1 to 10. Using data from wells and structural lineaments identified in the area, maps of estimates were prepared using the ordinary kriging method. The maps were then multiplied by the previously assigned weights and classes, generating the water productivity map (FAPI). Multiple Linear Regression (MLR) was applied to validate the assigned weights and obtain the SGAS water productivity equation. The FAPI map indicates that the majority of the study area (58%) has low water productivity, followed by medium productivity (27.7%). The other classes represented low percentages in the area. The MLR demonstrated that the weights assigned were mostly correct, with the exception of the weight of the Specific Capacity factor which could be lower. Despite this, the model generated was considered representative ($p < 0.05$; $R^2 = 0.85$). It was also possible to suggest areas more favorable to the location of tubular wells in the study area. Finally, the proposed method and the FAPI map are considered innovative and important tools for urban and environmental planning, aiming at better management of water resources.

Suggested Reviewers: Didier Gastmans PhD

Researcher, Environmental Studies Center, UNESP

gastmans@rc.unesp.br

He is developing researches in the following subjects:

hydrogeology, isotopic hydrology, hydrogeochemistry, contaminated sites and water resources management.

Hung K Chang Dr

Professor and researcher, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, UNESP chang@rc.unesp.br

Has experience in Geosciences, focusing on Regional Geology, acting on the following subjects: hidrogeology, aquifers, groundwater, Parana basin.

Luiz F Scheibe Dr

Professor and researcher, Department of Geosciences, UFSC

scheibe2@gmail.com

Coordinates, in Santa Catarina (Brazil) the Project Guarani/Serra Geral Aquifers Net (REDE GUARANI/SERRA GERAL) - www.rgsg.org.br.

Gustavo B Athayde Dr

Professor and researcher, Departamento de Geologia, UFPR

athayde@ufpr.br

He has experience in the field of geosciences, with an emphasis on hydrogeology, mainly on issues related to fractured aquifers, interactions between surface and groundwater, water resources management and hydrogeological cartography.

Kanak Moharir PhD

Researcher, Department of Geology, Sant Gadge Baba Amravati University

kanak.moharir1@gmail.com

Researcher in basaltic rocks aquifers