

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**MAPEAMENTO DE NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU
(SAB) EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL EM ÁGUAS DE SANTA
BÁRBARA/SP DURANTE O ANO HIDROLÓGICO 2014/15**

LUCAS VITURI SANTAROSA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem)

**BOTUCATU – SP
Agosto - 2016**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**MAPEAMENTO DE NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU
(SAB) EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL EM ÁGUAS DE SANTA
BÁRBARA/SP DURANTE O ANO HIDROLÓGICO 2014/15**

LUCAS VITURI SANTAROSA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem)

**BOTUCATU – SP
Agosto - 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S233m Santarosa, Lucas Vituri, 1987-
Mapeamento de níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental em Águas de Santa Bárbara/SP durante o ano hidrológico 2014/15 / Lucas Vituri Santarosa. - Botucatu : [s.n.], 2016
x, 104 f. : fots. color., ils.color., graf. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas - Modelos matemáticos. 2. Aquíferos - Sustentabilidade. 3. Proteção ambiental. 4. Geoestatística. 5. Ciclo hidrológico. I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MAPEAMENTO DE NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU (SAB) EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL EM ÁGUAS DE SANTA BÁRBARA/SP DURANTE O ANO HIDROLÓGICO 2014/15

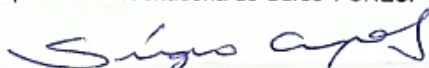
AUTOR: LUCAS VITURI SANTAROSA

ORIENTADOR: RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
Depto de Coordenadoria de Curso / UNESP - Câmpus de Ourinhos



Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof.ª. Dra. ANA PAULA BARBOSA
Depto de Engenharia Civil / FATEP de Piracicaba

Botucatu, 10 de agosto de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço

À minha família pelo incentivo a prosseguir na carreira acadêmica, em especial a minha esposa Juliana Boza por acreditar no meu trabalho e ser compreensiva.

Ao professor Rodrigo Lilla Manzione pela confiança e oportunidade concedida.

Aos colegas que contribuíram diretamente para efetivação da proposta, Anderson Safre, Jakson José Ferreira, Vitor Fidelis M. Gonçalves, Lucas Machado e Thiago Ramires.

Ao Instituto Florestal de São Paulo e seus funcionários dedicados a Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB).

Aos colegas e professores do GEPAG (Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas) pelo conhecimento compartilhado.

À Unesp pela estrutura e suporte fornecido.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento concedido que viabilizou esta pesquisa, através do processo nº 2015/05171-3.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS -----	VI
LISTA DE TABELAS -----	VIII
LISTA DE GRÁFICOS -----	IX
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS -----	X
RESUMO -----	1
SUMMARY -----	2
1. INTRODUÇÃO -----	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA -----	7
2.1. Águas subterrâneas: propriedades, componentes hidráulicos e dinâmicas dos aquíferos livres -----	7
2.1.1. Variáveis geográficas associadas as dinâmicas de aquíferos livres -----	11
2.2. Gestão das águas subterrâneas -----	13
2.2.1. Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) -----	16
2.3. Análise espacial das águas subterrâneas -----	17
2.3.1. Geoestatística -----	19
2.3.2. Estimadores geoestatísticos -----	20
2.3.2.1. Krigagem -----	20
2.3.2.2. Cokrigagem -----	21
2.3.3. Geoestatística aplicada ao estudo das águas subterrâneas -----	22
3. MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS -----	25
3.1. Caracterização da área de estudo -----	25
3.2. Monitoramento do Nível Freático -----	30
3.3. Coleta de dados e amostras -----	33
3.4. Análise Geoestatística -----	39
3.5. Cálculo do volume de água recuperado -----	41
3.6. Análise Hidrológica -----	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	43
4.1. Interpolação das Variáveis Auxiliares -----	43
4.1.1. Estatística descritiva das variáveis físico-hídricas do solo -----	43
4.1.2. Análise variográfica -----	46
4.1.3. Validação cruzada -----	48

4.1.4.	Mapeamento das variáveis auxiliares-----	49
4.2.	Interpolação do nível freático -----	51
4.2.1.	Análise exploratória-----	51
4.2.2.	Análise variográfica-----	53
4.2.3.	Validação Cruzada -----	57
4.2.4.	Mapas do Nível Freático -----	62
4.2.5.	Análise comparativa do conjunto amostral -----	70
4.3.	Volume de água recuperado -----	78
4.4.	Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) -----	81
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS -----	90
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	92
	APÊNDICE 1 -----	100
	APÊNDICE 2 -----	103
	APÊNDICE 3 -----	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ocorrência das águas subterrâneas.....	8
Figura 2. Interação da água superficial com a água subterrânea.....	11
Figura 3. Localização da EEcSB e da Floresta Estadual na Área do Município de Águas de Santa Bárbara – SP	26
Figura 4. Formações Geológicas na região da EEcSB	27
Figura 5. Mapa pedológico da região da EEcSB.....	28
Figura 6. Rede de drenagem da EEcSB.....	29
Figura 7. Distribuição dos poços de monitoramento na EEcSB.....	31
Figura 8. Localização dos pontos de coletas de dados	34
Figura 9. FALKER SoloTrack PLG530	35
Figura 10. TDR Delta-T Devices, modelo ThetaProbe ML2x	36
Figura 11. Mapa da altimetria das bacias hidrográficas da EEcSB com dados da missão SRTM.	38
Figura 12. Mapa da altimetria das bacias hidrográficas da EEcSB com dados das cartas topográficas do IBGE.	39
Figura 13. Variograma da UM	47
Figura 14. Variograma da RP	47
Figura 15. Variograma da K.....	47
Figura 16. Variograma da ARE.....	47
Figura 17. Variograma da ARG	47
Figura 18. Mapas das variáveis auxiliares.....	50
Figura 19. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 10/10/2014	63
Figura 20. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 21/11/2014	64
Figura 21. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 30/01/2015	65
Figura 22. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 05/05/2015	66
Figura 23. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 28/08/2015	67
Figura 24. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 16/10/2015	68
Figura 25. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 03/12/2015	69
Figura 26. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 28/08/2015 utilizando 32 poços.....	75

Figura 27. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 16/10/2015 utilizando 32 poços.....	76
Figura 28. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 03/12/2015 utilizando 32 poços.....	77
Figura 29. Mapas do nível freático para R1 e R2 utilizados no cálculo do volume de água explorável	79
Figura 30. Mapa potenciométrico da EEcSB para o dia 21/11/2014 e fluxos subterrâneos predominantes.....	82
Figura 31. Mapa potenciométrico da EEcSB para o dia 03/12/2015 e fluxos subterrâneos predominantes.....	83
Figura 32. Comparação entre os níveis potenciométricos da medição do dia 21/11/2014 e 03/12/2015.....	84
Figura 33. Perfil em três dimensões do relevo, da espessura de arenito e dos fluxos no sentido sudoeste-nordeste.	85
Figura 34. Perfil em três dimensões do relevo, da espessura de arenito e dos fluxos no sentido sudeste-noroeste.	86
Figura 35. Secções escolhidas para elaboração dos perfis longitudinais	87
Figura 36. Perfil longitudinal A-B.....	88
Figura 37. Perfil longitudinal C-D.....	88
Figura 38. Perfil longitudinal E-F.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação dos poços de monitoramento com a respectiva localização e profundidade (m).	32
Tabela 2. Coeficiente empírico de Hazen (FETTER, 2001)	37
Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis auxiliares mensuradas.	44
Tabela 4. Coeficiente de determinação (R^2) calculado para as variáveis auxiliares.....	46
Tabela 5. Parâmetros variográficos das variáveis auxiliares	47
Tabela 6. Validação cruzada para a interpolação das variáveis auxiliares	48
Tabela 7. Estatística descritiva dos níveis freáticos mensurados	51
Tabela 8. Coeficiente de determinação (R^2) calculado entre o nível freático e a variável auxiliar	52
Tabela 9. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 10/10/2014.....	53
Tabela 10. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 21/11/2014.....	54
Tabela 11. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 30/01/2015.....	54
Tabela 12. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 05/05/2015.....	55
Tabela 13. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 28/08/2015.....	55
Tabela 14. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 16/10/2015	56
Tabela 15. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 03/12/2015.....	57
Tabela 16. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 10/10/2014.....	58
Tabela 17. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 21/11/2014.....	58
Tabela 18. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 30/01/2015.....	59
Tabela 19. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 05/05/2015.....	59
Tabela 20. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 28/08/2015.....	60
Tabela 21. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 16/10/2015.....	61
Tabela 22. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 03/12/2015.....	61
Tabela 23. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 28/08/2015, utilizando 32 poços.....	71
Tabela 24. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 16/10/2015, utilizando 32 poços.....	72
Tabela 25. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 03/12/2015, utilizando 32 poços.....	72
Tabela 26. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 28/08/2015, utilizando 32 poços.....	73
Tabela 27. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 16/10/2015, utilizando 32 poços.....	74
Tabela 28. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 03/12/2015, utilizando 32 poços.....	74
Tabela 29. Volume de água recuperado em R1 e R2	79
Tabela 30. Volumes armazenados no aquífero nos períodos R1 e R2	80
Tabela 31. Volume de água necessário para abastecimento dos municípios próximos a EECSB.....	80
Tabela 32. Simulação de volume captado (m^3) e meses de abastecimento supridos	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Valor médio do nível freático no período analisado e os episódios de precipitação.....	33
Gráfico 2. Representação da distribuição do diâmetro efetivo em relação a porcentagem de solo para as amostras de solo.....	37
Gráfico 3. Valor médio da RP	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALT	Altimetria da carta topográfica
ANA	Agência Nacional de Águas
ARE	Porcentagem de Areia
ARG	Porcentagem de Argila
ASE	Média do desvio padrão (<i>Average Standard Error</i>)
CBH	Conselho de Bacias Hidrográficas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais
EEcSB	Estação Ecológica de Santa Bárbara
ESDA	<i>Exploratory Spatial Data Analysis Graphs</i>
IBDF	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Condutividade Hidráulica
MAR	Manejo de Recarga Artificial
MDT	Modelo Digital do Terreno
MHC	Modelo Hidrológico Conceitual
MS	Média padronizada (<i>Mean Standardized</i>)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
R ²	Coefficiente de determinação
RMS	Valor médio quadrático (<i>Root-Mean-Square</i>)
RMSS	Valor médio quadrático padronizado (<i>Root-Mean-Square Standardized</i>)
RP	Resistência do solo a penetração
SAB	Sistema Aquífero Bauru
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SINIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SRTM ¹	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SRTM ²	Altimetria do produto SRTM
TDR	<i>Time-domain reflectometer</i>
UGRHI-17	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - Médio Paranapanema
UM	Umidade do solo
USGS	<i>United States Geology Survey</i>

RESUMO

A estatística espacial aplicada a coleta de dados, análise e interpretação de fenômenos espaciais é uma ferramenta importante para gestão dos recursos hídricos, exigindo modelos matemáticos precisos e com capacidade de determinar as incertezas. Assim, as metodologias geoestatísticas apresentam-se como uma alternativa para análise de dados voltados ao monitoramento dos aquíferos coletados em redes geoespaciais, reduzindo os efeitos relacionados à amostragem e agregando sentido físico a análise. Este trabalho explorou o uso da geoestatística no mapeamento da dinâmica de níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB), comparando interpoladores como krigagem e cokrigagem, em condições de amostragem anisotópica. Foram utilizadas como variáveis auxiliares as propriedades físico-hídricas do solo e do relevo para o mapeamento dos níveis freáticos do ano hidrológico 2014/2015 e 2015/2016 a partir de 48 poços de monitoramento localizados nos domínios da Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB), município de Águas de Santa Bárbara/SP. Os objetivos foram verificar as oscilações do nível freático em uma área do SAB, estimar os volumes recuperados e reunir informações para formular um Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC). Os resultados mostraram que a adoção das variáveis auxiliares, sobretudo dados topográficos e resistência do solo a penetração, são capazes de melhorar as estimativas espaciais, com visível redução da variância amostral, suavizando os erros nas previsões. Os volumes de água recuperados calculados a partir dos mapas do nível freático revelam a capacidade do uso de áreas como a EEcSB para o estoque de águas subterrâneas em curto prazo, capaz de suprir a demanda regional em períodos de escassez. Com a previsão da captação de 30% do volume de água recuperado na EEcSB estima-se o abastecimento da população dos municípios de Manduri, Cerqueira Cesar e Águas de Santa Bárbara por cerca de três meses. Com os dados ambientais reunidos foi formulado um MHC a partir da estimativa da dinâmica da água subterrânea. Os resultados apresentados são importantes no auxílio da gestão das águas subterrâneas com informações estratégicas para o uso sustentável de aquíferos a partir da direção de escoamento natural do aquífero e do comportamento da oscilação do nível freático em relação ao regime pluviométrico.

Palavras Chave: Monitoramento da água subterrânea; geoestatística; variáveis auxiliares, uso sustentável de aquíferos

MAPPING WATER TABLE DEPTHS OF BAURU AQUIFER SYSTEM (BAS) IN A ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA AT ÁGUAS DE SANTA BARBARA/SP - BRAZIL DURING THE 2014/2015 HYDROLOGICAL YEAR. Botucatu, 2016. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LUCAS VITURI SANTAROSA

Adviser: RODRIGO LILLA MANZIONE

SUMMARY

The spatial statistics applied to data collection, analysis and interpretation of spatial phenomena has become essential for management of water resources, requiring accurate mathematical models and the ability to determine the uncertainties. Therefore, geostatistics presented as an important tool for data analysis aimed at monitoring of aquifer collected in geospatial networks, reducing the effects related at data collection and merging physical sense in the analyses. This study explored the use of geostatistics in mapping the dynamic of Bauru Aquifer System (BAS), comparing interpolators as kriging and cokriging in anisotropic sampling conditions. Were used as auxiliary variables the physical and hydraulic of the soil and the topography for the mapping of water table deep of the hydrological year 2014/2015 and 2015/2016 onwards of 48 monitoring wells located in the Ecological Station of Santa Barbara (EEcSB) domain, in Águas de Santa Barbara, Sao Paulo, Brazil. The objectives were to verify the fluctuations of water table in an area the BAS, estimate the recovered water volumes and gather information for the formulation of the Hydrological Conceptual Model (HCM). The results showed that the using of the auxiliary variables, mainly topographic data and soil resistance penetration, are able to improve the spatial predictions, with notable reductions at sampling variance and decreasing errors in the predictions. The water volumes recovered calculated from the water table maps allowed to infer about the ability of the use at areas as the EEcSB for the groundwater storage in short term, able to supply the regional demand in periods of scarcity. With the forecast of 30% uptake of the water volume recovered in EEcSB estimated to supply the population of the municipalities of Manduri, Cerqueira Cesar and Águas de Santa Barbara for approximately three months. With the collected environmental data allowed, the design of a HCM was formulated from the dynamics estimates of

groundwater. The results are important supporting groundwater management with strategic information for sustainable use of aquifers.

Key words: groundwater monitoring; geostatistics; ancillary information; sustainable use of aquifers

1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica do ano hidrológico 2013/2014 que afetou a região sudeste (COELHO et al., 2015), trouxe à tona um quadro preocupante em relação a gestão dos recursos hídricos, sobretudo em muitos municípios do Estado de São Paulo. A capacidade de gestão dos recursos hídricos tornou-se pauta importante nas agendas governamentais, revelando problemas que envolvem a limitação da capacidade de exploração dos recursos hídricos superficiais para atender a demanda da sociedade.

As alterações no padrão climatológico da região, o uso indiscriminado dos recursos hídricos e a falta de proteção dos mananciais quanto a ocupação da terra e poluição têm direcionado a atenção para as águas subterrâneas, tanto no sentido quantitativo como no qualitativo.

Diante deste fato, ressalta-se a necessidade de realizar estudos que proporcionem o entendimento das dinâmicas das águas subterrâneas, afim de que sejam utilizadas de forma estratégica, capaz de evitar ou minimizar os impactos causados pela exploração ou poluição. Para que a manutenção e o progresso de nossa sociedade não representem o declínio simultâneo do ambiente, igualmente dependente das reservas hídricas para manutenção de muitas funções ecológicas.

Para atingir esta meta, a modelagem espacial dos recursos hídricos subterrâneos apresenta-se como uma poderosa ferramenta, capaz de explicar a complexidade de fatores naturais e antropogênicos que governam e interferem nas movimentações e nos estoques das águas subterrâneas. Estudos desta magnitude são

adequados na interpretação das dinâmicas dos aquíferos ao reunir informações que expliquem as variações nos níveis, a direção e velocidade do fluxo, a origem da água, entre outros. (ANDERSON; WOESSNER, 1992; KRESIC; MIKSZEWSKI, 2012).

A utilização da geoestatística permite a modelagem da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais (SOARES, 2006). Os modelos geoestatísticos, apesar de complexos e rigorosos metodologicamente, vem sendo amplamente utilizados pela capacidade de prever uma variável com precisão e calculando as incertezas na predição (KITANIDIS, 1997; YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

A geoestatística é um instrumento importante para o monitoramento dos aquíferos, capaz de reduzir os efeitos relacionados à coleta de dados (KITANIDIS, 1997) (custos, tempo, barreiras naturais, etc.) e proporcionar análises espaciais e temporais com sentido físico, capazes de auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Partindo-se da hipótese de que a integração de diferentes fontes de informação é capaz de ajudar a interpretação da dinâmica de sistemas aquíferos dentro de um modelo de predição espacial, o objetivo desse trabalho foi estudar a dinâmica do Sistema Aquífero Bauru (SAB) na Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) a partir da espacialização de dados de monitoramento dos níveis freáticos utilizando técnicas geoestatísticas. Especificamente buscou-se:

- Reunir informações para formação de um banco de dados de monitoramento dos níveis freáticos da área de estudo durante o período de interesse, verificando o comportamento dos níveis freáticos após a estiagem de 2013/2014;
- Verificar a eficácia das propriedades físico-hídricas do solo (granulometria, condutividade hidráulica, umidade e resistência a penetração) e a altimetria utilizados como variável auxiliar na interpolação do nível freático;
- Testar diferentes métodos de interpolação geoestatística com o intuito de buscar formas de estimar o nível freático com maior precisão diante da baixa densidade de poços de monitoramento;
- Entender e caracterizar a dinâmica hidrológica do SAB na área de estudo a partir dos dados de monitoramento do nível freático associados as variáveis auxiliares, formulando um Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) e;
- Estimar o volume de água recuperado no período.

O SAB é uma das reservas hídricas mais importantes do Estado de São Paulo, pois ocupa a maior parte da região oeste do território e é responsável por abastecer diversos municípios. Na região do Médio Paranapanema (UGRHI-17), a utilização do SAB visa suprir 75% da demanda socioeconômica (FIESP, 2005), região onde encontra-se a EECSB. Os levantamentos realizados neste estudo fornecerão ferramentas fundamentais para gestão dos recursos hídricos na região, com capacidade de responder de forma rápida e precisa para evitar crises que afetem diretamente a sociedade e esteja pautada no uso sustentável dos recursos hídricos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Águas subterrâneas: propriedades, componentes hidráulicos e dinâmicas dos aquíferos livres

O ciclo hidrológico é responsável pelo intercâmbio da água nos diferentes ambientes do planeta a partir da introdução da energia solar como força motriz. A água subterrânea corresponde a uma parcela deste ciclo, aquela que se acumula nos ambientes subterrâneos dos continentes formando reservas de água doce responsáveis por inúmeras funções naturais.

A hidrologia das águas subterrâneas pode ser entendida como ciência que tem como objeto de estudo a ocorrência, distribuição e movimento da água abaixo da superfície da terra (TODD; MAYS, 2005). A ocorrência de água no subsolo (Figura 1) pode ser caracterizada pela existência das zonas de aeração (não saturada) e de saturação. A primeira ocupada parcialmente por água e ar e a segunda completamente preenchida por água.

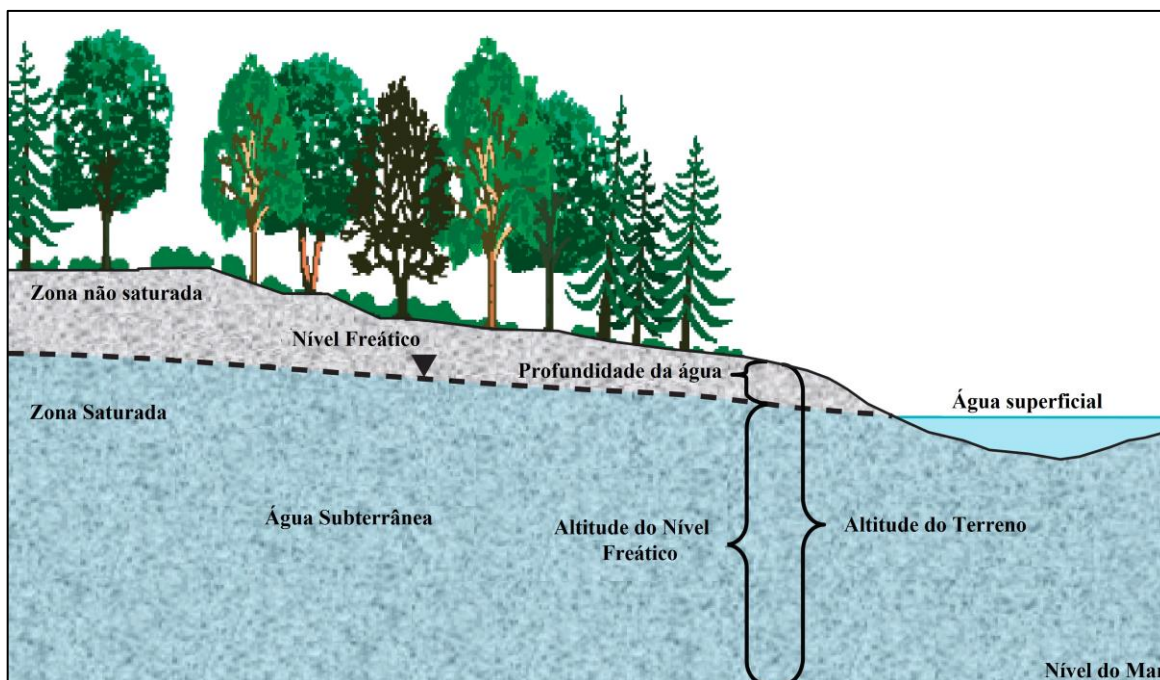


Figura 1. Ocorrência das águas subterrâneas
Fonte: Snyder (2008)

A zona de aeração pode ser dividida em três partes: zona de água do solo, referente a área de concentração de raízes; zona intermediária; e zona de capilaridade, região em que ocorre ascensão de água devido a tensão superficial nos espaços porosos (TOOD; MAYS, 2005). A zona saturada ocorre abaixo do nível freático em solos ou estratos geológicos (FREEZE; CHERRY, 1979). Assim, denominam-se aquíferos, as unidades geológicas constituídas por rochas ou sedimentos suficientemente permeáveis (MANZIONE, 2015).

Em um aquífero do tipo livre, o limite superior é determinado pelo nível freático cuja definição técnica é a superfície imaginária na qual a pressão é atmosférica (SNYDER, 2008). Estes aquíferos são constituídos de formações rochosas totalmente aflorantes, com recarga direta em toda extensão da formação (MANZIONE, 2015).

As águas subterrâneas estão sujeitas as grandezas físicas que governam o movimento dos fluídos, determinando o fluxo subterrâneo, a infiltração, transporte de contaminantes, etc. (MANZIONE, 2015). As dinâmicas e volumes de água podem ser caracterizadas, entre outras propriedades, pela porosidade, condutividade hidráulica e carga hidráulica.

O destaque destas variáveis e dinâmicas deve-se ao fato da interpretação dos resultados deste estudo estar pautado nestas propriedades para estabelecer suposições em relação a dinâmica hídrica na EECSB em relação aos dados coletados e formulação de um Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC).

A porosidade é uma das propriedades fundamentais do meio saturado. Definida como espaço intergranular ou vazios do solo ou das rochas (FETTER, 2001; TOOD; MAYS, 2005), a porosidade do aquífero determina o montante de água armazenada e sua velocidade de movimentação, influenciando diretamente na condutividade hidráulica e, conseqüentemente, nas características de permeabilidade e transmissividade.

O diâmetro dos sedimentos condiciona o diâmetro dos poros. Deste modo, a permeabilidade é mensurada pela relação entre o diâmetro médio das partículas e a disposição do material (FREEZE; CHERRY, 1979). Esta característica está diretamente relacionada com a produção e armazenamento específico de um aquífero, limitando o montante a ser explorado ou as taxas de rebaixamento (FETTER, 2001; TOOD; MAYS, 2005).

Dependendo da predominância granular de materiais mais grosseiros ou mais finos, a porosidade efetiva pode ser maior ou menor determinando a dinâmica no aquífero, pois representa o volume total de água disponível para movimentação pela força gravitacional em relação a massa de sólidos.

A condutividade hidráulica representa a capacidade de um meio poroso para transmitir água através dos espaços vazios (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012). A condutividade hidráulica associada a espessura saturada de um aquífero determina sua capacidade de transmissividade.

A carga hidráulica é definida por Cabral (2008) como uma energia mecânica composta pelas energias cinética, potencial gravitacional e de pressão. Ela determina a direção do fluxo da água subterrânea (FREEZE; CHERRY, 1979). O movimento segue o gradiente hidráulico de áreas com maior carga hidráulica para áreas com menor carga hidráulica, esta diferença é chamada de gradiente hidráulico.

Segundo a Lei de Darcy, a vazão (Q) em um meio poroso é calculada a partir da condutividade hidráulica (K), a área da seção transversal (A) e o gradiente hidráulico, obtido pela diferença das cargas hidráulicas (h_2-h_1) dividida pelo comprimento da seção (FETTER, 2001; CABRAL, 2000):

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

As medições da carga hidráulica podem ser realizadas com a utilização de piezômetros. A elevação do nível freático pode ser usada para inferir a direção da água possibilitando diversas interpretações para a tomada de decisões. Segundo Snyder (2008) os mapas do nível freático podem ser utilizados para caracterizar a direção de fluxo subterrâneo. Entretanto, o autor alerta que este fluxo é também tridimensional e os mapas só conseguem explicar melhor o fluxo horizontal apresentando restrições em relação ao fluxo vertical, exigindo cautela na interpretação.

Ao determinar a carga hidráulica é possível inferir a movimentação do fluxo subterrâneo e interpretar a dinâmica entre as águas superficiais-subterrâneas. Os valores do nível freático (ou potenciométrico) formam linhas equipotenciais, os fluxos movimentam-se perpendicularmente a estas linhas, formando redes de fluxo. Através destas redes é possível identificar zonas de recarga, de transito e de descarga, bem como os divisores de água subterrânea; determinar a velocidade aparente do fluxo; e selecionar locais mais adequados para extração de água ou regiões com suscetibilidade a poluição (MANZIONE, 2015).

Em aquíferos livres a carga hidráulica do nível freático é igual a altitude do nível da água (FREEZE; CHERRY, 1979; SNYDER, 2008), portanto, o relevo pode ser um fator determinante na movimentação das águas subterrâneas. Via de regra as áreas de recarga estão em áreas mais elevada e as áreas mais baixas de descarga natural (WINTER, 1998), onde formam-se as nascentes, devido a manifestação do lençol freático. Está ocorrência é uma das relações entre águas superficiais-subterrâneas mais importantes, capaz de manter os níveis dos rios devido as descargas dos aquíferos.

Outras dinâmicas evidenciadas pela posição do nível freático em relação ao corpo hídrico superficial determina outras trocas entre os aquíferos e as águas superficiais, em regiões úmidas os rios são abastecidos pelos aquíferos, portanto, o nível freático corresponde ao nível da água superficial. Em outras situações o nível freático pode estar mais profundo que o curso superficial, recebendo água do rio. Existe ainda a possibilidade da água excedente nos rios, proveniente de períodos úmidos, alimente os

aquíferos pela área da várzea inundada do rio, servindo posteriormente como reserva hídrica em período de escassez que mantem o fluxo de base do rio (WINTER, 1998).

A Figura 2 ilustra a interação da água superficial com a água subterrânea destacando áreas de recarga e áreas de descarga marcada pela interação da água subterrâneas com o fluxo superficial, nível freático e os fluxos subterrâneos representados pelas setas azuis, destacando ainda a interação entre os aquíferos confinados e livres e a ação de um poço de bombeamento no fluxo local.

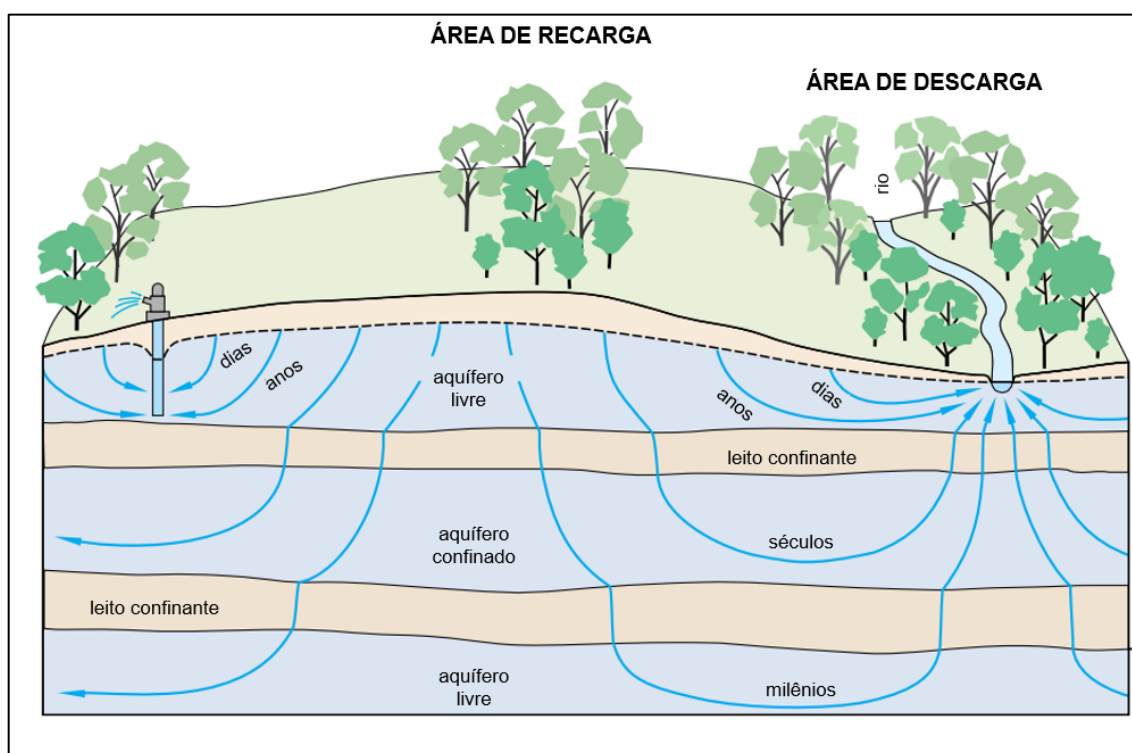


Figura 2. Interação da água superficial com a água subterrânea
Fonte: Manzione (2015) adaptado de Winter (1998)

2.1.1. Variáveis geográficas associadas as dinâmicas de aquíferos livres

Considerar os aspectos da paisagem para o entendimento de variáveis ambientais é extremamente importante, sobretudo quando se trata um levantamento sobre um fenômeno realizado em uma perspectiva espacial. Nessa abordagem o fenômeno de interesse pode sofrer interferência de diversos fatores e apresentar grande variabilidade espacial, necessitando de informações complementares para seu entendimento.

O estudo da água subterrânea é um exemplo, pois pode apresentar oscilações devido a interferências da variabilidade de aspectos do solo, da geologia, corpos hídricos superficiais, cobertura da terra e do relevo (PETERSON et al., 2011).

Fatores como a granulometria do solo, compactação do solo, o conteúdo de umidade superficial, e a influência do relevo podem ser usados para interpretação do regime hídrico subterrâneo em uma bacia hidrográfica.

O solo presente em determinado local é resultado da interação de diferentes fatores ambientais gerando diferentes características capazes de influenciar processos naturais. Por exemplo, a granulometria de um solo pode ditar o comportamento da água em relação a textura predominante. As texturas mais grosseiras proporcionam maior aeração e movimentação da água, pois nelas predominam a formação de macroporos. Por outro lado, o solo com textura mais fina apresenta restrições para circulação do ar e da água, por apresentar mais microporos (BRADY; WEIL, 2013)

O diâmetro das partículas predominantes em um solo é considerado fundamental na determinação da condutividade hidráulica devido à dificuldade em mensurar precisamente a porosidade do solo. Deste modo, diferentes métodos que levam em consideração o diâmetro efetivo das partículas do solo para calcular a condutividade hidráulica foram desenvolvidos, como os métodos de A. Hazen e R. G. Shepherd (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012).

O efeito da compactação de solos tem implicação direta na capacidade de infiltração e, conseqüentemente, na recarga do aquífero. Isso ocorre por que o arranjo das partículas do solo determina o tempo que a água leva para atingir a zona saturada pela maior ou menor obstrução física do solo (KLEIN et al., 1998). De acordo com Reichert et al. (2007) a compactação do solo aumenta sua resistência e afeta diretamente a porosidade, reduzindo a quantidade de ar e água, o teor de umidade e a condutividade hidráulica do solo.

A umidade do solo pode ser controlada pela posição do nível freático que, segundo Chen e Hu (2004), pode ser considerada como um fator limitante para as dinâmicas naturais regionais, tal como a topografia e a vegetação. Segundo Anderson e Burt (1990 apud BELDRING et al., 1999), as condições de umidade do solo estão estreitamente relacionadas com as condições das águas subterrâneas. Entre os eventos de precipitação o solo terá um valor máximo para um estado de equilíbrio hidrostático, determinado pelas características físicas do solo e pela profundidade do nível

freático. Se o nível freático estiver próximo da superfície e fornecer umidade para o perfil, em um episódio de chuva o volume de água infiltrada será menor que em uma situação que o nível freático esteja mais profundo.

De acordo com Ritter et al. (2005), a capacidade de infiltração depende diretamente da espessura do regolito ou do solo, da textura do solo, estrutura do solo, da vegetação e da condição de umidade. A taxa de infiltração depende da absorção de água pelo solo, do estoque de água nos poros e da capacidade de transmissão descendente da água.

Seguindo pressuposto de que o nível freático em aquíferos livres é uma réplica moderada da superfície do terreno, entende-se que a topografia pode ser utilizada para guiar e restringir o mapeamento do nível freático, podendo ser utilizado para melhorar a exatidão e dar sentido físico as superfícies mapeadas. (DESBARATS et al., 2002).

Segundo Kresic e Mikszewski (2012) regionalmente a direção natural da água subterrânea pode ser relacionada com a superfície topográfica. Assim como na superfície, o fluxo subterrâneo de água segue o gradiente hidráulico do ponto mais alto do relevo para o mais baixo, de montante para jusante. Esta interação é mais comum para aquíferos livres que para aquíferos confinados ou cársticos.

Cada um destes fatores geográficos pode ser determinante para entendimento do comportamento das águas subterrâneas, principalmente em aquíferos livres. A correlação espacial entre elas pode ser fundamental para contornar a baixa amostragem em poços de monitoramento devido entraves encontrados em campo ou questões de cunho operacional, facilitando o mapeamento do nível freático fundamental para gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

2.2. Gestão das águas subterrâneas

Entende-se como gestão dos recursos hídricos o conjunto de ações com a finalidade de regular o uso, o controle e a proteção deste recurso seguindo as legislações e normas pertinentes (MANZIONE, 2015).

Em relação as águas subterrâneas, a gestão é considerada incipiente, pois este recurso apresenta importância secundária nos planos de gestão dos recursos hídricos, servindo muitas vezes de complemento para a oferta quando o uso das

águas superficiais é restringido por escassez natural e/ou poluição ou para suprir a demanda crescente (HIRATA et al., 2010).

Este fato é evidenciado na Lei Federal 9.433 de 1997 que institui a política nacional dos recursos hídricos. A lei não detalha muitas questões em relação aos recursos hídricos subterrâneos, delegando as especificidades para Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e da Agência Nacional de Águas (ANA).

O Estado de São Paulo se destaca com a Lei 6.134 de 1988 que dispõe sobre a preservação dos depósitos de águas subterrâneas, regulamentada pelo Decreto 32.955 de 1991. E tem progredido muito nas políticas voltadas para os recursos hídricos através da formação de Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) a partir da década de 1990.

Apesar de alguns avanços, muitas alterações nas legislações das últimas décadas provocaram muitas polêmicas e dificultaram a utilização das águas subterrâneas afastando os interessados em seguir o caminho correto de cumprir com os tramites burocráticos para o melhor uso dos recursos hídricos subterrâneos. Isto acaba abrindo margem para a ilegalidade e o desinteresse em relação a um volume de água extremamente importante para atender as atuais demandas da sociedade.

Rebouças (2008) aponta que “(...) muita atenção tem sido dada às águas que fluem visíveis pelos rios, enquanto os recursos subterrâneos (aquíferos) têm sido amplamente ignorados, apesar dos grandes volumes de água estocados, em geral, de qualidade adequada ao consumo humano”.

Os recursos hídricos subterrâneos são fundamentais para conservar as dinâmicas do sistema hidrológico (HIRATA et al., 2010) ou para cumprir as diversas funções que lhe foram atribuídas (REBOUÇAS, 2008), exigindo recursos e esforços para garantir o conhecimento detalhado e assegurar que seu uso, que muitas vezes é feito de maneira contínua, respeite as oscilações sazonais de recarga, as características de cada região (clima, geologia, entre outros) e o comportamento natural dos aquíferos para não afetar os estoques e a qualidade da água.

O monitoramento da água subterrânea é um importante instrumento para avaliação do estado de um aquífero, auxiliando nas decisões relativas à exploração, desenvolvimento e gerenciamento das águas subterrâneas (MESTRINHO, 2008), pois as

respostas em tempo hábil e com políticas racionais de exploração exigem o conhecimento da dinâmica de um aquífero (MANOEL FILHO, 2008).

Através do monitoramento e posteriormente pela análise dos dados coletados, pode-se entender melhor o comportamento dos aquíferos. Tendo em vista as diferentes funções das águas subterrâneas (social, ambiental ou mesmo econômica), um programa que seja eficiente de monitoramento deve envolver o controle da qualidade e quantidade, considerando as inter-relações existentes com as águas superficiais, condições climáticas e uso da terra. O planejamento adequado depende do máximo de informações possíveis, tais como a geometria e delimitação do aquífero; regime e direção do fluxo subterrâneo; áreas de recarga e descarga; caracterização da hidrodinâmica; vulnerabilidade do aquífero, entre outros (MESTRINHO, 2008).

Uma rede de monitoramento pode proporcionar qualidade e quantidade de dados necessários para tomada de decisões referentes ao estado do ambiente. Um sistema adequado de monitoramento dispõe de um entendimento representativo do estado de uma área monitorada, tornando-se a seleção de um número adequado de áreas de monitoramento e a distribuição espacial é um desafio para o estudo das águas subterrâneas (BAALOUSHA, 2010).

Uma maneira de tornar o monitoramento eficiente é através do uso de métodos estocásticos, capazes de reunir informações da vulnerabilidade do aquífero e da variação temporal e espacial do nível freático, permitindo a tomada de decisões estratégicas em relação ao uso da terra e o plano de manejo dos recursos hídricos (KNOTTERS; BIERKENS, 2001). Para equilibrar interesses econômicos e ambientais, é importante conhecer a dinâmica do lençol freático em relação ao uso e ocupação das terras (VON ASMUTH; KNOTTERS, 2004).

Isso pode ser realizado por meio de medidas de níveis freáticos, que fornecem informações sobre a dinâmica do aquífero. O monitoramento da água disponível em um aquífero possibilita diagnosticar o atual estado do aquífero para tomar medidas em relação a modificações causadas por efeitos naturais e/ou antrópicos, além de permitir ampliação consciente do uso.

Segundo Hirata et al. (2010), a exploração de águas subterrâneas no Brasil ainda é muito pequena diante da potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos, atendendo em torno de 30 a 40% da população nacional. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) o Estado de São Paulo apresenta 462 municípios abastecidos total ou

parcialmente com águas subterrâneas, sendo que 308 dependem totalmente dos recursos hídricos subterrâneos (ANA, 2007).

É importante que levantamentos sobre os sistemas aquíferos sejam realizados contribuindo para o plano de gestão de recursos hídricos. Para isso é fundamental a reunião de um conjunto de dados capaz de explicar as dinâmicas de um aquífero e que forneça as informações básicas para sua exploração sustentável e seja capaz de promover sua proteção.

Uma das dificuldades da gestão das águas subterrâneas e determinar uma unidade espacial para estudo das águas subterrâneas, devido a influência de diferentes fatores capazes de caracterizar os limites entre os aquíferos. Assim, a unidade espacial utilizada para compreensão da dinâmica das águas subterrâneas é a bacia hidrográfica (FREEZE; CHERRY, 1979; TODD; MAYS, 2005).

Mesmo esta unidade espacial sendo caracterizada pelo escoamento da água superficial é uma forma eficaz de realizar estudos das águas subterrâneas devido a inter-relação com o regime pluviométrico. As bacias podem ser interpretadas como sistemas que tem processos e características ambientais (geologia, por exemplo) únicas (RITTER et al., 2011). Além de ser a unidade espacial determinada pela Lei 9.433/97 como área para gestão dos recursos hídricos.

É nesta escala que conseguimos analisar especificamente o ciclo hidrológico e seu complexo sistema. É possível quantificar a água que se movimenta na superfície e no subsolo através do escoamento, da infiltração e da influência causada diretamente pela relação com as características do solo, formação rochosa e relevo e no processo de interceptação e transpiração promovido pelas plantas.

2.2.1. Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC)

A gestão das águas subterrâneas pode ser melhor conduzida pela reunião de um conjunto de dados espaciais capazes de permitir a construção de um Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC). O MHC é a descrição de vários fatores naturais e antrópicos que governam e contribuem para as dinâmicas da água subterrânea (KRESIC; MIKSZEWSKI, 2012).

Segundo Soares (2006, p. 20): “É através do conhecimento que se tem do fenômeno físico, que o modelo deve ser constantemente julgado como mais

indicado para caracterizar aquela realidade”. De acordo com Bredehoeft (2005), os modelos conceituais são importantes para simular as condições de como determinado sistema ou processos operam. Assim, pensado na complexidade que envolve a dinâmica das águas subterrâneas, é fundamental levantar informações do ambiente do modo mais completo possível para gerar informações capazes de entender o fenômeno e identificar as interferências causadas pelo homem.

É importante considerar que um modelo hidrogeológico contém diversas interpretações e provas de sua validade qualitativa e subjetiva alcançada por meio da aplicação de técnicas de investigação específicas, utilizadas para a construção de um modelo numérico que deve ser validado comparando os resultados obtidos pela modelagem em relação as observações em campo (BREDEHOEFT, 2005; VARGAS et al., 2005). A qualidade do MHC depende das informações recolhidas para a sua construção, via de regra, a coleta de dados está condicionada aos recursos financeiros disponíveis (VARGAS et al., 2012).

A modelagem hidrogeológica permite responder várias questões capazes de descrever a variabilidade espacial do sistema de fluxos e a evolução dos níveis freáticos no tempo e no espaço em situação de estresse hídrico (ANDERSON; WOESSNER, 1992). Para isso a interpolação de dados é uma das etapas mais importantes para construção de um MHC, processo pelo qual valores de uma variável de interesse são estimados matematicamente em locais não amostrados baseado em medições adjacentes (KRESIC; MIKSZEWSKI, 2012).

Deste modo, a aplicação dos métodos geoestatísticos apresentados neste estudo busca analisar diferentes variáveis ambientais para subsidiar o estudo das águas subterrâneas com o intuito de sistematizar uma metodologia quantitativa capaz de fornecer informações que poderão subsidiar a gestão dos recursos hídricos.

2.3. Análise espacial das águas subterrâneas

A análise espacial tem como objetivo mensurar propriedades e relações levando em conta a localização espacial de um fenômeno com intuito de entender sua dimensão e as interações no espaço (DRUCK, 2004).

O estudo espacial está diretamente relacionado com a ideia geral que na natureza as variáveis são contínuas em alguma escala (VIEIRA, 2000), ou seja,

existe dependência espacial entre os fenômenos espaciais até certa distância, sejam eles naturais ou antrópicos. Segundo o que Tobler (1970) chama de “primeira lei da geografia”, todos os fenômenos espaciais se relacionam, sendo que os que estão mais próximos apresentam maior relação que aqueles mais distantes¹.

De acordo com Druck (2004) os melhores modelos espaciais devem considerar a interdependência entre os valores mensurados. Fato que contribui para estimativa em espaços que não foram amostrados seja por impedimentos físicos, econômicos, disponibilidade de ferramentas ou qualquer outra razão, podem ser estimados por diversos processos matemáticos e computacionais (VIEIRA, 2000).

Assim, o geoprocessamento, representado pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tornou-se uma metodologia essencial de análise científica diante da necessidade de quantificar as características de um fenômeno espacial, proporcionando o crescimento de estudos capazes de desenvolver ou explorar o uso de modelos na inferência das grandezas dos fenômenos espaciais.

Neste panorama, os modelos geoestatísticos, apesar de complexos e rigorosos metodologicamente, vem sendo amplamente utilizados pela competência de prever “(...) uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas envolvidas” (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 19).

De acordo com Hengl (2009) a geoestatística faz parte do grupo de ciências que fornece soluções metodológicas para a análise espacial e temporal. Para Goovaerts (1997) a geoestatística é capaz de proporcionar um conjunto de ferramentas estatísticas para incorporação de coordenadas espaciais e temporais no processamento de dados.

Deste modo a geoestatística fornecesse ferramentas poderosas para o geoprocessamento, permitindo o estudo de fenômenos complexos com ótima acurácia nas predições.

¹ “(...) *everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.*” (TOBLER, 1970, p. 236).

2.3.1. Geoestatística

Modelagens estatísticas aplicadas, como os métodos dos quadrados mínimos e a estimação linear, foram objeto de estudo de Matheron e seus colaboradores na tentativa de adaptação destes métodos para resolver problemas que apresentavam variação espacial. Esta aproximação ficou conhecida como teoria das variáveis regionalizadas ou geoestatística (KITANIDIS, 1997).

Para Soares (2006) um dos problemas básicos a ser solucionado pela geoestatística foi tentar resolver por meio de uma metodologia probabilística a simplicidade dos métodos deterministas que não visam satisfazer o entendimento do fenômeno físicos de interesse, mas simplesmente têm por objetivo a interpolação espacial dos valores observados.

O formalismo para aplicação da geoestatística para Kitanidis (1997) deve seguir três etapas: (1) análise exploratória; (2) estimativa de parâmetros; (3) validação do modelo. A análise exploratória visa realizar cálculos estatísticos capazes de descrever características do conjunto amostral. Esta análise envolve medidas de dispersão e de tendência central, testes de normalidade dos dados, identificação de dados discrepantes (*outliers*), transformação dos dados, entre outros.

A estimativa de parâmetros refere-se ao ajuste do modelo teórico do variograma experimental em relação a correlação espacial da variável regionalizada (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Intuitivamente busca-se estimar os pesos das medições de forma objetiva refletindo a verdadeira estrutura de autocorrelação espacial. O variograma experimental consiste na variância finita de um conjunto de dados em uma distância pré-definida (*lag*) (HENGL, 2009).

O variograma é calculado pela média aritmética do quadrado das diferenças de pares de pontos separados por um vetor h .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Quando se utiliza a cokrigagem calcula-se o variograma cruzado, considerando Z_1 e Z_2 como funções aleatórias estacionárias:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z_1(x) - Z_1(x+h)][Z_2(x) - Z_2(x+h)] \quad (3)$$

Satisfeita a hipótese de estacionaridade² de segunda ordem, seleciona-se o modelo que melhor explica o fenômeno estudado sintetizando os principais padrões de continuidade espacial, é neste momento que são identificados o grau de dispersão e continuidade, anisotropias, etc. (SOARES, 2006). Parte-se então para a estimativa geoestatística realizadas pelos interpoladores baseados no semivariograma.

Soares (2006, p.20) afirma que “(...) se as funções aleatórias forem a base do modelo escolhido, este vai guiar (no sentido de condicionar) o processo de estimação ou simulação de valores da variável identificada como atributo em estudo, em zonas não amostradas”.

Por último, a validação do modelo, pode ser feita a partir da validação cruzada. Neste procedimento ignora-se o valor estimado em um dos pontos de mensuração e estima-se seu valor a partir dos valores restantes, o processo é repetido para todos os pontos. Com o conjunto de valores reais (mesurados) e os estimados obtidos para o conjunto de dados em estudo realiza-se algumas análises estatísticas com o intuito de aferir a qualidade do modelo utilizado (ANDRIOTTI, 2013; SOARES, 2006)

Por existir estas etapas no formalismo da análise geoestatística sua modelagem é considerada excelente e imparcial (não tendenciosa), tornando a análise espacial mais rica ao permitir a predição de valores em áreas não amostradas mesurando a qualidade da estimativa.

2.3.2. Estimadores geoestatísticos

2.3.2.1. Krigagem

O estimador linear geoestatístico, denominado krigagem, é um estimador ponderado capaz de prever os valores dos pesos pelas estimativas da estrutura espacial de acordo com a distribuição das variáveis (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

² A hipótese de estacionaridade pode ser definida como: “(...) a correlação entre duas variáveis aleatórias dependente somente da distância espacial que as separa e é independente da sua localização.” (SOARES, 2006, p. 19).

Segundo Yamamoto e Landim (2013, p.55):

Krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou no tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica. Pode ser comparado com os métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, mas a diferença fundamental é que somente a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associado ao valor estimado.

De forma a incorporar as incertezas associadas a uma estimativa e considerar a continuidade estrutural de um fenômeno em estudo, os métodos geoestatísticos realizam a inferência espacial de uma grandeza que não foi amostrada ($Z(x_o)$), em dada localização x_o , com base na combinação linear de valores medidos da mesma grandeza ($Z(x_\alpha)$) localizados em x_α (SOARES, 2006).

$$[Z(x_o)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) \quad (4)$$

Soares (2016) destaca que os ponderadores (λ_α) tem papel de refletir a menor ou maior proximidade da estrutura das amostras ($Z(x_\alpha)$) em relação ao ponto a ser estimado ($Z(x_o)$) e devem ter efeito desagregador de agrupamentos tendenciosos para evitar o enviesamento.

2.3.2.2. Cokrigagem

Por meio da cokrigagem pode-se estimar diferentes variáveis regionalizadas em conjunto com base na correlação espacial entre si. É uma extensão multivariada do método da krigagem, buscando obter para cada local amostrado um vetor de valores ao invés de um único valor (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A cokrigagem é utilizada para situações em que uma segunda variável com maior densidade amostral pode ser incorporada para estimar a variável principal. A variável secundária é incorporada ao modelo de estimação, considerando a existência de correlação entre as duas variáveis (GOOVAERTS, 1997; SOARES, 2006).

A variável principal $Z_1(x_i)$, conhecida em N_1 pontos amostrados e a variável secundária Z_2 amostrada em N_2 pontos. Assim, o ponto $Z_1(x_o)$ em um ponto não amostrado x_o pode ser descrito pela interação linear da variável principal e a variável secundária:

$$[Z(x_0)]_{ck}^* = \sum_{i=1}^{N_1} a_i Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{N_2} b_j Z_2(x_j) \quad (5)$$

Os pesos a_i e b_j distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e a correlação cruzada entre elas.

Para que o estimador seja ótimo, ele não pode ter tendência e deve apresentar variância mínima, não superestimando nem subestimando valores, sendo máxima a confiança nas estimativas (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Soares (2006) destaca que a utilização de uma variável auxiliar (secundária) só é vantajosa em relação a krigagem ordinária se apresentar maior amostragem em relação a variável principal.

A cokrigagem como a estimativa de uma variável regionalizada através de duas ou mais variáveis, com o objetivo de melhorar predições locais, leva em conta informações adicionais trazidas por uma variável diferente da que se deseja predizer. A utilização desse método deve ser feita quando o objetivo principal é a redução da variância de predição (UZUMAKI, 1994).

2.3.3. Geoestatística aplicada ao estudo das águas subterrâneas

Com a necessidade de realizar a modelagem dos recursos hídricos, principalmente aqueles que estão estocados nos ambientes subterrâneos, considerados estoques fundamentais para atender a demanda imposta pela sociedade e para manter muitas funções ecológicas. A geoestatística apresenta-se como um instrumento importante para o monitoramento das águas subterrâneas, reduzindo os efeitos relacionados à coleta de dados (KITANIDIS, 1997) (custos, tempo, barreiras naturais, etc.) e proporcionando análises espaciais e temporais com sentido físico, capazes de auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

A geoestatística vem sendo utilizada em diversas pesquisas relacionadas as águas subterrâneas. Uma breve busca nos principais periódicos que publicam artigo com esta temática revela o uso da geoestatística predominantemente em dois tipos de estudos das águas subterrâneas.

Os primeiros ligados a qualidade da água subterrânea, explorando questões ligadas a fontes poluidora, principais poluentes e sua distribuição espacial e a classificação da vulnerabilidade dos aquíferos. (ADHIKARY et al., 2010; ASSAF; SAADEH, 2009; BAALOUSHA, 2010; BARCA; PASSARELLA, 2008; CHEN et al., 2010; CINNIRELLA et al., 2005; COOPER; ISTOK, 1988a, 1988b; FOGG et al., 1999; GAUS et al., 2003; LISBÔA et al., 2016; NAS; BERKTAY, 2010; PEBESMA; DE KWAADSTENIET, 1997; SÁNCHEZ-MARTOS et al., 2001).

Outra linha de estudo, que contempla a proposta deste estudo, é a avaliação do nível freático. Ahmadi e Sedghamiz (2007) apontam que o uso da geoestatística como ferramenta para o monitoramento do nível freático é eficaz para análise da estrutura espacial e temporal da flutuação do nível freático que pode ser utilizada no planejamento do uso da água subterrânea, principalmente para realização do manejo eficiente em regiões ou períodos com baixa disponibilidade hídrica. Nesta linha de estudo podem ser citados os trabalhos de Abedian et al. (2013); Manzione et al. (2007, 2008, 2012a, 2015); Rocha et al., (2007); Theodossiou e Latinopoulos (2006); Varouchakis e Hristopulos (2013); Yang et al. (2008); Zhang et al. (2014).

Buscando atender essa proposta e fornecer estimativas com maior exatidão, muitos estudos utilizam uma variável auxiliar para compensar as restrições na coletada de dados, um entrave muito comum nos estudos espacial do nível freático devido a necessidade de um conjunto amostral grande.

A incorporação de uma variável auxiliar pode agregar sentido físico e ajudar a contornar limitações operacionais e financeiras nas pesquisas das águas subterrâneas com a estimativa espacial do nível freático. Via de regra são utilizados dados topográficos, uso e ocupação do solo, características do solo, entre outras variáveis que podem ser correlacionadas com a dinâmica das águas subterrâneas (BETTÚ; FERREIRA, 2005; DEMETRIO et al., 2006; DESBARATS et al., 2002; FORMAGGIO et al., 2009; MANZIONE et al., 2012b; PETERSON et al., 2011; ROCHA et al., 2009)

Em relação as comparações dos estimadores geoestatísticos realizados nestes estudos, Ahmad e Sedghamiz (2008) ao comparar o método da krigagem com a cokrigagem em um conjunto de dados para mapeamento do nível da água subterrânea, concluíram que a cokrigagem, utilizando como variáveis auxiliares diferentes respostas dos níveis freáticos em diferentes condições climáticas, oferece resultados mais precisos que os obtidos pela krigagem.

Os estudos consultados mostram que a aplicabilidade da geoestatística para estudos das águas subterrâneas tem sido amplamente explorada, revelando que é uma metodologia eficaz para realização de estudos com esta finalidade capaz de gerar dados espaciais e temporais com qualidade para serem utilizados na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

3. MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. Caracterização da área de estudo

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) está localizada à Rodovia SP 261 – km 58, latitude 24°48´ S e longitude 49°13´ O, no município de Águas de Santa Bárbara/SP (Figura 3). Foi regulamentada pelo Decreto 22.337 de 07 de junho de 1984 que instituiu sua formação com uma área de 4.371 hectares dentro dos limites da Floresta Estadual de Santa Bárbara, dos quais apresentam uma área 2.712 hectares de vegetação nativa (cerrado, brejos e mata de galeria) dividindo o espaço com o reflorestamento (pinus e eucalipto).

A criação da Floresta Estadual foi incentivada pela combinação de acontecimentos a partir da década de 1960: efetivação do Código Florestal de 1965; incentivos fiscais para práticas de reflorestamento em 1966; a Constituição Federal de 1967 e; a criação do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) (ROSA, 2006). Neste período o governo do Estado de São Paulo fez desapropriação de terras para criação da Floresta Estadual de Santa Bárbara pelo decreto nº 44.305 de 30 de dezembro de 1964.

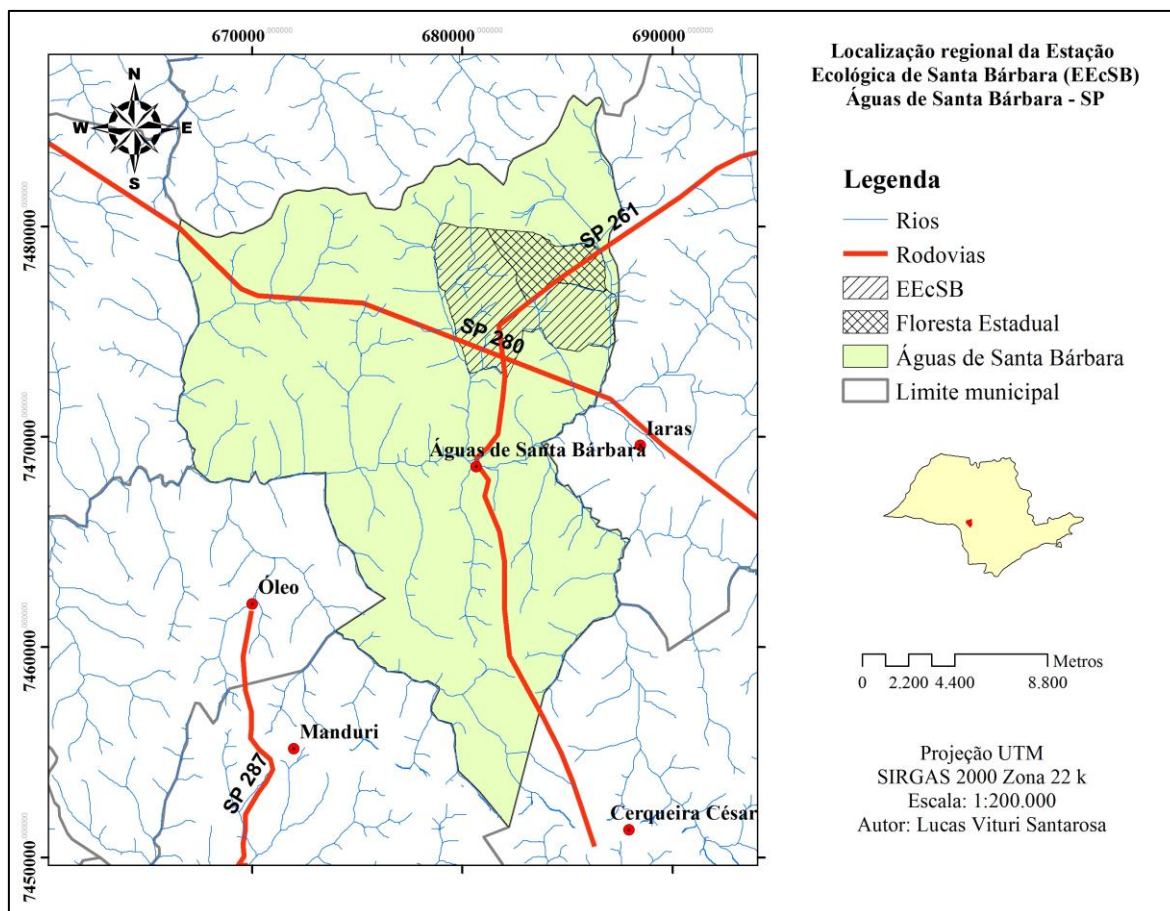


Figura 3. Localização da EEcSB e da Floresta Estadual na Área do Município de Águas de Santa Bárbara – SP

Segundo informações que constam no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo elaborado por Ross e Moroz (1996), a EEcSB encontra-se localizado na Bacia Sedimentar do Paraná (morfeestrutura) e no Planalto Ocidental Paulista (morfoescultura), com formas de relevo predominantemente de colinas amplas e baixas, com altimetria em torno de 300 a 600 metros, e declividade variando entre 10 a 20%.

As formações geológicas na região (Figura 4) são os arenitos da Formação Adamantina e da Formação Marília, pertencentes ao Grupo Bauru, com predomínio da formação Adamantina na EEcSB (MELO; DURIGAN, 2011; CPRM, 2006).

Segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981) a formação Adamantina é caracterizada como depósitos fluviais com predominância de arenitos finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltito arenosos e argilosos, ocorrendo em bancos maciços. Estratificação plano paralela e cruzada

de pequeno e médio porte. A Formação Marília apresenta arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações subordinadas à siltitos, argilitos e arenitos muito finos com estratificação plano paralela e frequentes níveis rudáceos e presença comum de nódulos carbonáticos.

Existe ainda a ocorrência da formação Serra Geral de origem ígnea, extrusiva, formada por derrames de lavas basálticas, originando rochas de granulação muito fina, coloração cinza a preta.

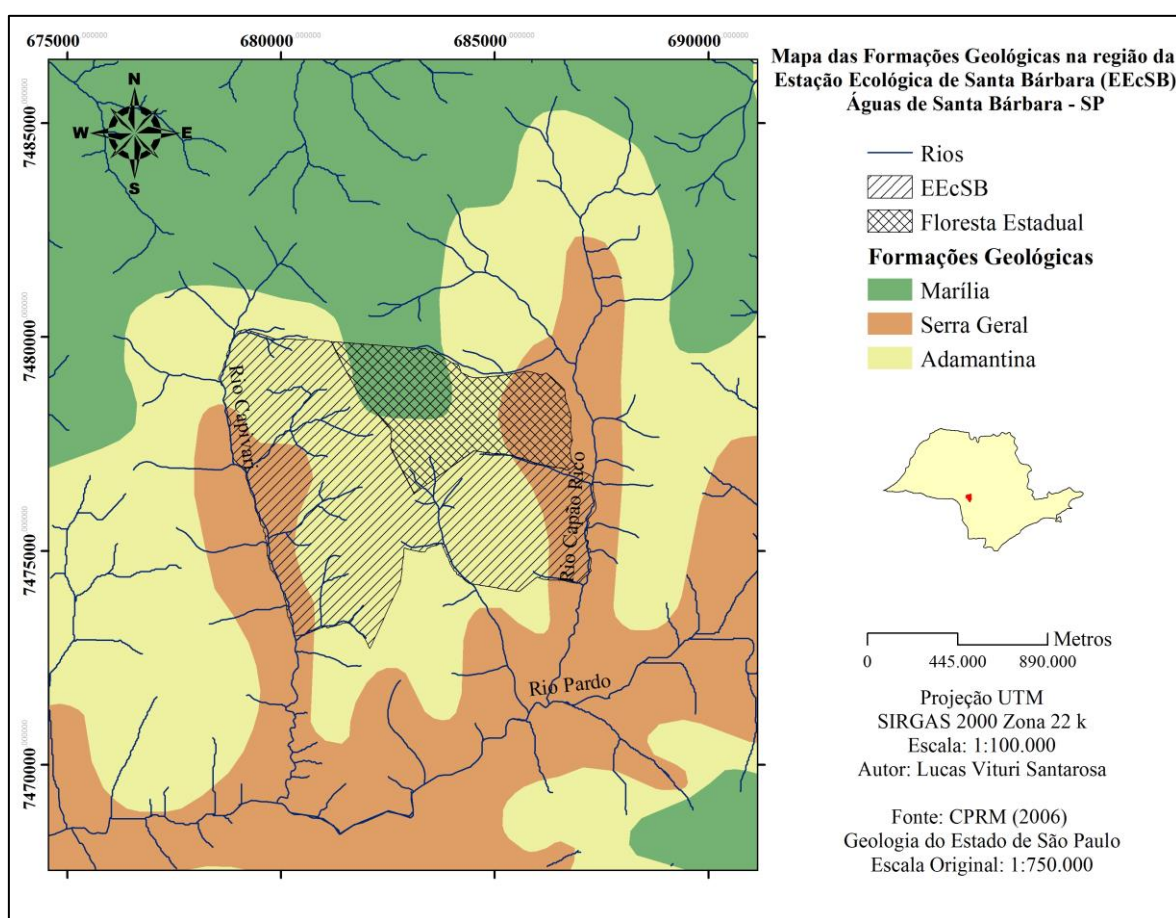


Figura 4. Formações Geológicas na região da EEcSB

As formas de relevo combinada a formações rochosas predominantes, possibilita a ocorrência de Latossolos Vermelhos (LV56) e Argissolos Vermelhos-Amarelo e Vermelho (PVA10) eutróficos e distroféricos com textura arenosa/média e Nitossolos (NV1) eutróficos com textura argilosa (OLIVEIRA et al., 1999) na região da EEcSB (Figura 5).

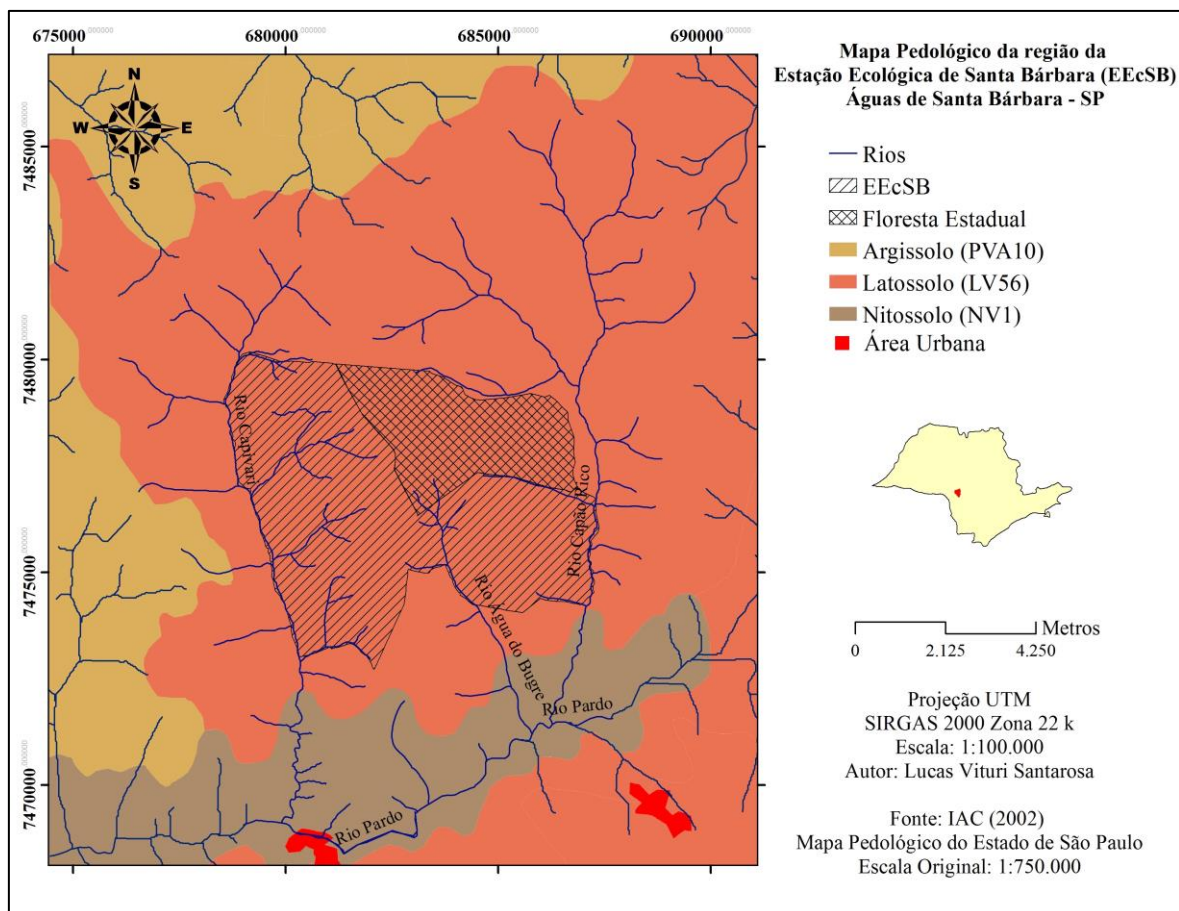


Figura 5. Mapa pedológico da região da EEcSB

O solo predominante nos domínios da EEcSB é o Latossolo Vermelho (LV56). Os Latossolos, segundo Embrapa (2006), são solos formados por material mineral apresentando o horizonte diagnóstico B latossólico em estágio de evolução muito avançada o que resulta em intensa intemperização de minerais primário e secundários. São, em geral, solos com boas propriedades físicas, situados, na maioria dos casos, em relevo favorável ao uso de máquinas agrícolas. São solos de excepcional porosidade total e, conseqüentemente, de boa drenagem interna, na EEcSB apresenta textura média a arenosa devido ao embasamento rochoso.

Argissolos são caracterizados pelo horizonte diagnóstico B textural (Bt) de argila de atividade baixa. Esta classe de solo, essencialmente mineral, apresenta incremento de teor de argila no horizonte B em relação a camada superior muitas vezes arenosa. São solos com profundidade variável, com drenagem irregular e cores avermelhadas e amareladas.

Os Nitossolos são identificados pela presença do horizonte B nítico, textura argilosa ou muito argilosa (com concentração de 350g/kg a partir do horizonte A), argila de baixa atividade e de caráter alítico. É um solo bem estruturado com cerosidade presente na superfície dos agregados, profundo, bem drenados e de coloração avermelhada.

O clima característico, segundo a classificação de Koeppen, é quente de inverno seco, com temperatura de 16°C no mês mais frio e 23°C no mês mais quente (Cwa) (CEPAGRI, 2016).

Toda a área faz parte da unidade hidrográfica do Rio Pardo, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema, Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17). Os maiores corpos de água em contato com a Estação Ecológica são o rio Capivari e o rio Capão Bonito (HONDA; NIZOLI, 2005). Ambos os rios nascem fora da Unidade de Conservação e a margeiam, sendo que o rio Capivari é o limite a oeste e o rio Capão Rico, a leste. Dentro da EEcSB e da Floresta Estadual encontram-se os principais rios contribuintes do Capão Rico e do Capivari, são eles: Divisa, Guarantã, Santana, Boi, Lavapé, Passarinho e Bugre (Figura 6).

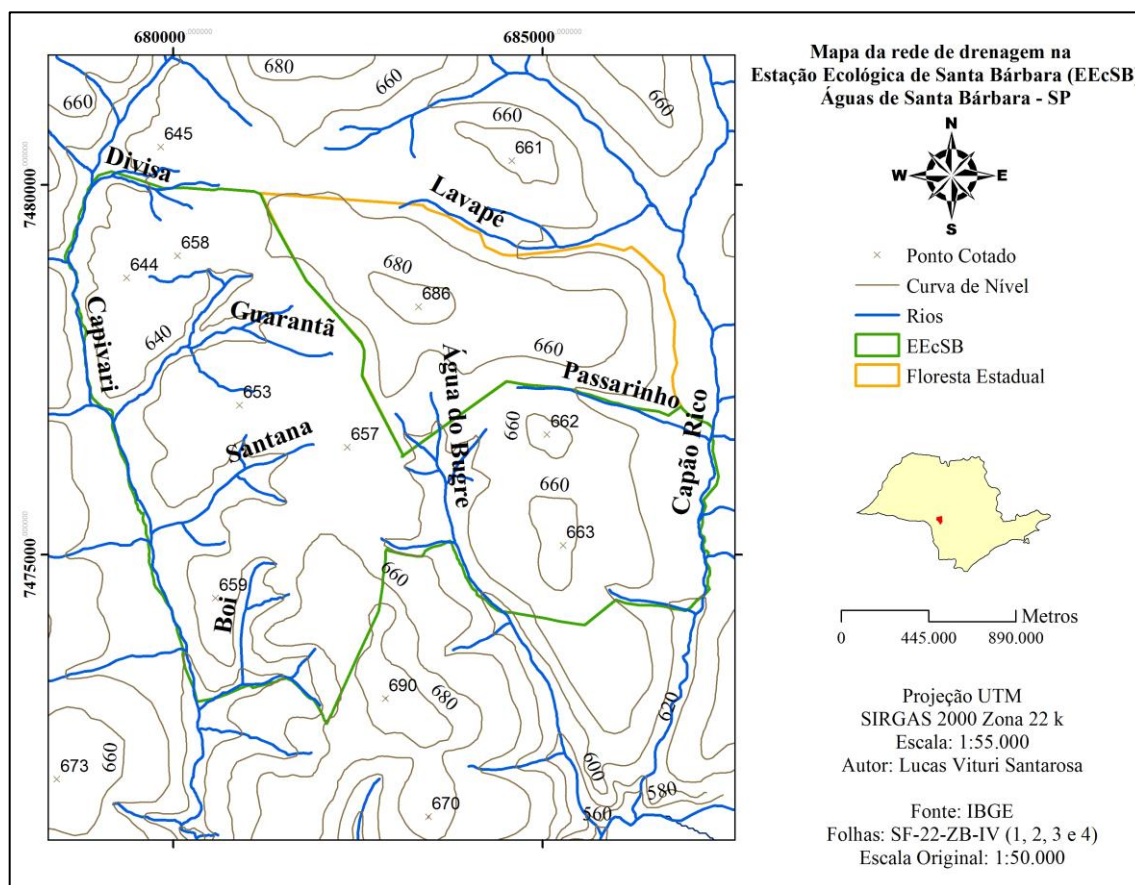


Figura 6. Rede de drenagem da EEcSB.

A EECsB localiza-se sobre o Sistema Aquífero Bauru (SAB), um sistema aquífero sedimentar de extensão regional que ocupa a maior parte da região oeste do território do Estado de São Paulo, com uma área aproximada de 96 mil km² (IRITANI; EZAKI, 2008). O SAB representa uma das reservas hídricas mais importantes do Estado, servindo como fonte de abastecimento público para muitos municípios. Na região do Médio Paranapanema (UGRHI-17) o SAB é utilizado para suprir 75% da sua demanda socioeconômica (FIESP, 2005).

De acordo com Silva et al. (2005), o SAB é formado pelos aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e Caiuá, e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho. Na EECsB, o aquífero Adamantina é predominante, considerado livre a semiconfinado e contínuo apresentando um comportamento hidráulico bastante heterogêneo e anisotrópico, mesmo em localidades relativamente próximas, devido a variações das concentrações de argila nos arenitos (SILVA, 2003)

As características gerais do SAB apresentam porosidade efetiva de 5% a 15%; transmissividade de 10 a 300 m²/dia; permeabilidade de 0,1 a 3 m/dia; capacidade específica entre 0,02 m³/h/m a 4,9 m³/h/m; condutividade hidráulica de 0,02 a 3,66 m/dia e; vazão média explorável em torno de 80m³/h (DAEE, 2005).

3.2. Monitoramento do Nível Freático

A análise realizada neste trabalho foi concentrada nas áreas das bacias do Guarantã, Santana, Boi, Passarinho e Bugre, onde localizam-se os piezômetros instalados utilizados no monitoramento do nível freático. Foram utilizados dados de 49 poços de monitoramento como medições de 05 de setembro de 2014 a 03 de dezembro de 2015. De setembro de 2014 até agosto de 2015 os dados foram coletados em 33 poços e, com a perfuração de novos poços em agosto de 2015, foram adicionados 16 poços a malha de monitoramento.

Estes poços de monitoramento fazem parte da infraestrutura de pesquisa instalada na EECsB por ocasião do projeto de auxílio regular a pesquisa intitulado “*Monitoramento de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru em área de conservação em Águas de Santa Bárbara, SP*” financiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Processo: 2014/04524-7). A Figura 7 apresenta a disposição dos poços na área de estudo.

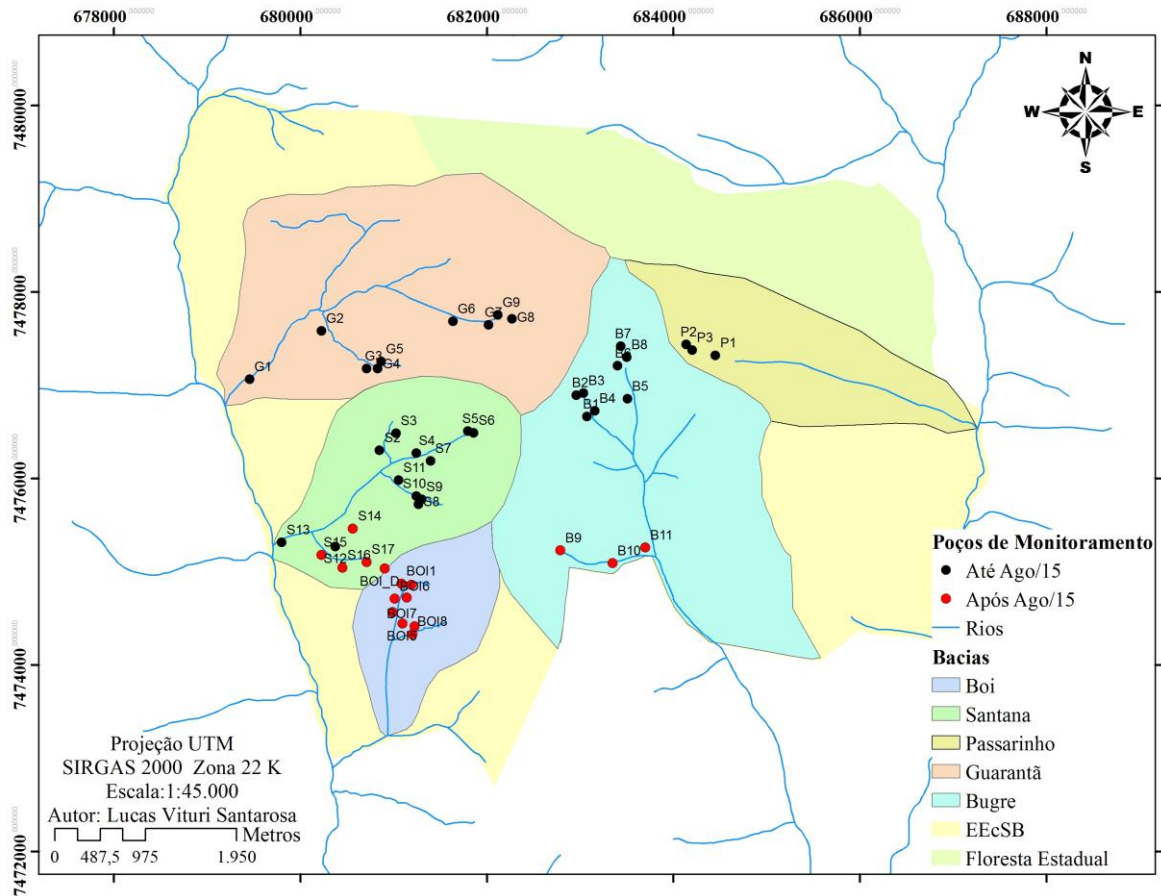


Figura 7. Distribuição dos poços de monitoramento na EECB

As profundidades dos poços de monitoramento da EECB variam de 2,94 a 7,68 metros, a Tabela 1 apresenta estes valores e as coordenadas de cada poço. Esta profundidade equivale ao nível mais profundo da água nos poços, perfurados nos períodos de estiagem.

Tabela 1. Identificação dos poços de monitoramento com a respectiva localização e profundidade (m).

Bacia do Santana				Bacia do Guarantã				Bacia do Bugre			
Poço	Long.	Lat.	Prof. (m)	Poço	Long.	Lat.	Prof. (m)	Poço	Long.	Lat.	Prof. (m)
S1	-49,2373	-22,8120	4,02	G1	-49,2517	-22,8046	4,42	B1	-49,2163	-22,8077	4,42
S2	-49,2379	-22,8111	6,12	G2	-49,2442	-22,7997	3,62	B2	-49,2175	-22,8055	2,94
S3	-49,2362	-22,8095	7,68	G3	-49,2392	-22,8033	4,51	B3	-49,2167	-22,8055	3,18
S4	-49,2341	-22,8114	4,44	G4	-49,2385	-22,8034	4,49	B4	-49,2155	-22,8071	3,10
S5	-49,2287	-22,8092	3,94	G5	-49,2379	-22,8026	4,85	B5	-49,2122	-22,8056	3,08
S6	-49,2282	-22,8094	4,47	G6	-49,2304	-22,7986	4,46	B6	-49,2132	-22,8027	4,70
S7	-49,2326	-22,8121	2,99	G7	-49,2267	-22,7989	4,49	B7	-49,2129	-22,8007	4,92
S8	-49,2338	-22,8160	3,76	G8	-49,2243	-22,7983	4,51	B8	-49,2123	-22,8019	4,40
S9	-49,2336	-22,8158	3,97	G9	49,2260	-22,7976	4,55	B9	-49,2189	-22,8207	5,46
S10	-49,234	-22,8155	4,30	Bacia do Boi				B10	-49,2101	-22,8203	5,04
S11	-49,2358	-22,8141	4,58	BOI1	-49,2357	-22,8240	5,07	B11	-49,2189	-22,8207	5,46
S12	-49,1455	-22,4923	6,55	BOI2	-49,2359	-22,8257	3,53	Bacia do Passarinho			
S13	-49,1488	-22,4921	5,00	BOI3	-49,2345	-22,8242	4,91	P1	-49,203	-22,8016	4,20
S14	-49,2406	-22,8187	7,60	BOI4	-49,2349	-22,8254	4,45	P2	-49,2061	-22,8006	5,89
S15	-49,2438	-22,8213	5,22	BOI5	-49,2353	-22,8279	4,50	P3	-49,2054	-22,8011	4,95
S16	-49,2416	-22,8225	6,71	BOI6	-49,236	-22,8257	5,09				
S17	-49,2391	-22,8220	6,34	BOI7	-49,2342	-22,8286	4,50				
				BOI8	-49,2343	-22,8289	4,80				
				BOI9	-49,2356	-22,8240	6,78				

O Gráfico 1 apresenta a média dos níveis freáticos e a precipitação no período analisado. É possível fazer observações dos diferentes momentos da oscilação do nível freático em relação aos episódios de chuva e a sazonalidade climática.

Este gráfico foi utilizado para determinação das datas de medição do nível escolhidas para serem mapeadas. Foram selecionadas 7 datas entre as 29 medições dos níveis realizadas no decorrer do ano hidrológico 2014/15 e no começo do ano hidrológico 2015/16. Esses mapeamentos levaram em conta a data de início das chuvas de cada ano hidrológico e as oscilações do nível freático, destacando períodos com nível freático mais baixos e mais elevados para realizar a estimativa do volume de água utilizável.

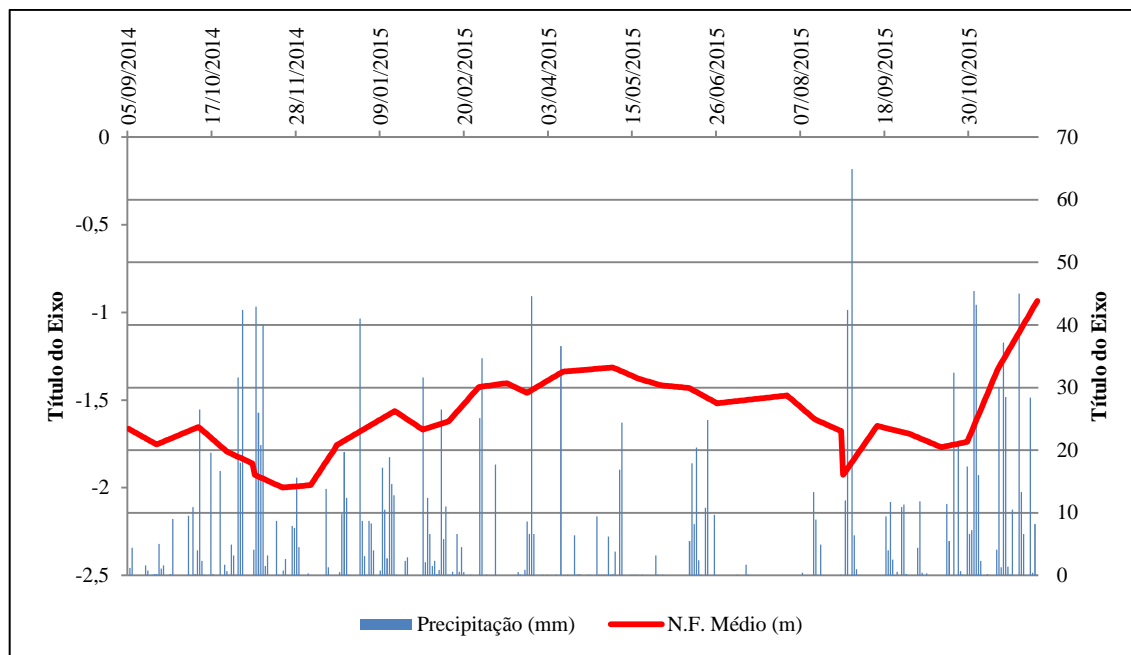


Gráfico 1. Valor médio do nível freático no período analisado e os episódios de precipitação

3.3. Coleta de dados e amostras

A coleta de dados em campo foi realizada em dois trabalhos de campo realizados no final de novembro e início de dezembro de 2015. Durante os trabalhos de campo foram coletadas amostras de solo e realizadas medições da resistência do solo a penetração e da umidade do solo. As amostras foram distribuídas no entorno das bacias de interesse buscando coletar dados desde a jusante até a montante de cada bacia.

As amostras de solo foram coletadas segundo Santos et al. (2005) com o auxílio de um trado, a partir de 50 cm de profundidade. Estas coletas foram realizadas nas proximidades dos poços e nos mesmo pontos em que a resistência do solo a penetração e umidade foram coletadas, totalizado 113 amostras conforme é apresentado na Figura 8. É importante mencionar que a irregularidade na malha de coleta de dados deve-se ao acesso em algumas áreas das bacias, a circulação ficou restrita as condições dos carregadores e estradas.

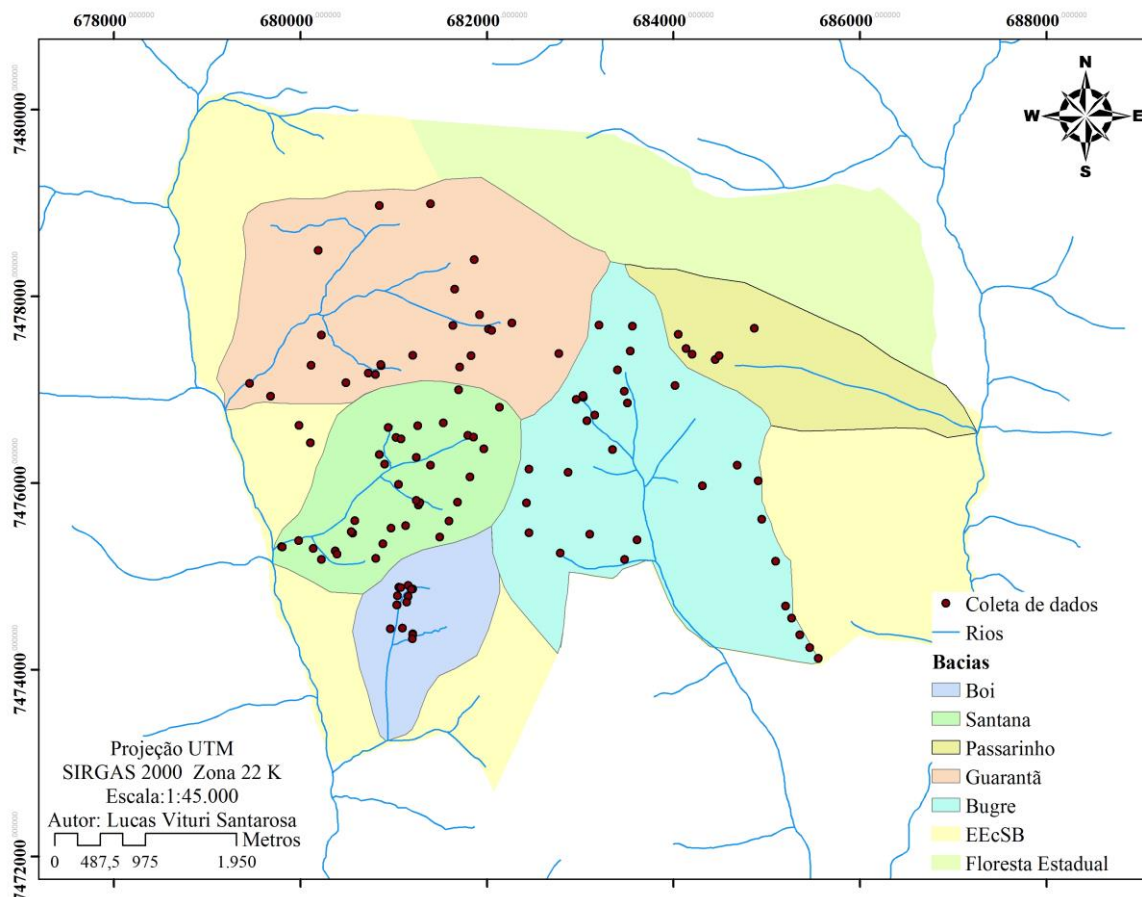


Figura 8. Localização dos pontos de coletas de dados

Após a coleta de dados em campo os dados e amostras foram encaminhados para a análise laboratorial. As amostras de solo foram encaminhadas para no laboratório de Geologia, Pedologia e Geomorfologia da UNESP, campus experimental de Ourinhos/SP, para realização da análise granulométrica segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Para medir a resistência do solo a penetração foi utilizado um aparelho eletrônico de medida da compactação do solo da marca FALKER, modelo SoloTrack PLG5300 (Figura 9).



Figura 9. FALKER SoloTrack PLG530

Fonte: Falker Automação Agrícola³

Este aparelho permite a detecção rápida e precisa de camadas compactadas, através de uma medição eletrônica da força de resistência à penetração dada em Quilopascal (kPa) em profundidade, apresentando os resultado em forma de perfil de compactação para até 60 cm. Em cada ponto foram realizadas três medições para utilização do valor médio mensurado e possibilitar a exclusão de medições alteradas por alguma interferência local (raízes, galhos enterrados, cascalho, entre outros), totalizando 210 valores, convertidos em 70 valores representativos dos pontos de medição

A umidade do solo foi medida com a utilização da reflectometria no domínio do tempo (*TDR-Time-domain reflectometer*) utilizando um medidor de umidade da marca Delta-T Devices, modelo ThetaProbe ML2x (Figura 10). O medidor de umidade foi configurado para realização da leitura em solos minerais, foi utilizada uma curva de retenção presente na memória do aparelho para mensurar os valores percentuais

³ Disponível em: <<http://www.falker.com.br/images/produtos/solotrack-2.jpg>>

do volume de água no solo. Para esta medição também foram realizadas três medições por ponto utilizando-se a média encontrada dos valores, alcançando o mesmo número de amostras da resistência do solo a penetração.



Figura 10. TDR Delta-T Devices, modelo ThetaProbe ML2x
Fonte: Delta-T Devices⁴

Os valores de condutividade hidráulica foram determinados pela adaptação do método de Hazen (FETTER, 2001), calculada a partir da granulometria do solo obtida pelo método da Embrapa (1997). O método de Hazen consiste em estimar a condutividade hidráulica a partir do diâmetro efetivo das partículas do solo:

$$K = C(d_{10})^2 \quad (6)$$

Onde, K é condutividade hidráulica em (cm/s), d_{10} é o diâmetro efetivo das partículas, que representa o diâmetro de 10% da massa das menores partículas presentes na amostra, e C é um coeficiente baseado constatação empírica da distribuição dos diâmetros das partículas, chamado de coeficiente empírico de Hazen (Tabela 2).

⁴ Disponível em:

<http://www.bizearch.com/products/Soil_Moisture_Meter_HH2_Display_Type_10136426.htm>

Tabela 2. Coeficiente empirico de Hazen (FETTER, 2001)

Areia muito fina mal selecionada	40 - 80
Areia fina	40 - 80
Areia média bem selecionada	80 - 120
Areia Grossa mal seleciona	80 - 120
Areia Grossa bem selecionada	120 - 150

Os valores do diâmetro efetivo foram obtidos pela porcentagem da massa de solo passante nas peneiras utilizadas no fracionamento da areia em relação ao diâmetro das partículas. A intersecção dos 10% da massa passante em relação a diâmetro das partículas definiu os valores diâmetro efetivo (d_{10}) encontrado em cada uma das amostras utilizados no cálculo da condutividade hidráulica, como poder ser observado no Gráfico 2.

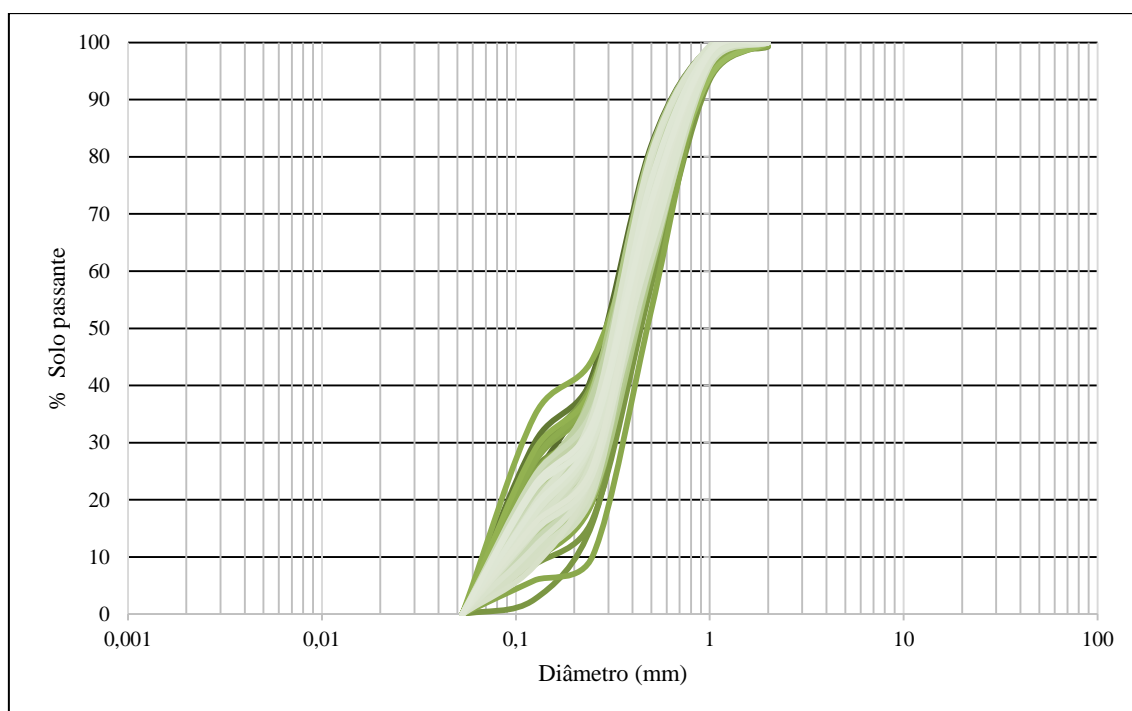


Gráfico 2. Representação da distribuição do diâmetro efetivo em relação a porcentagem de solo para as amostras de solo

Os resultados da análise granulométrica e dados mensurados foram organizados em Tabelas, apresentados nos Apêndices 1, 2 e 3.

Além das variáveis físicas do solo, foram utilizadas como variáveis auxiliares os dados de altimetria obtidos a partir de MDT gerados pelos produtos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) através do site do *United States Geology Survey* (USGS) com resolução espacial de 30 metros (Figura 11) e das Cartas Topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com escala de 1:50.000 (Figura 12).

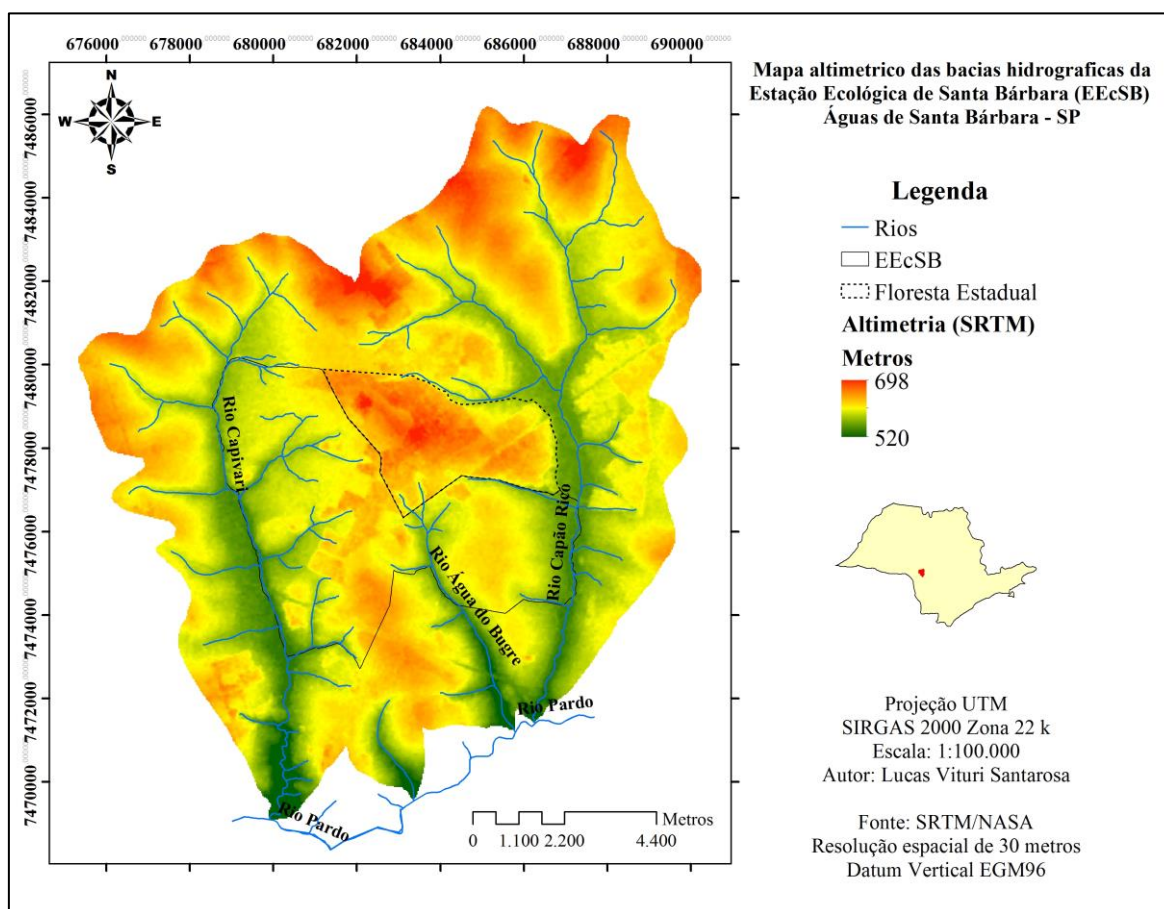


Figura 11. Mapa da altimetria das bacias hidrográficas da EEcSB com dados da missão SRTM.

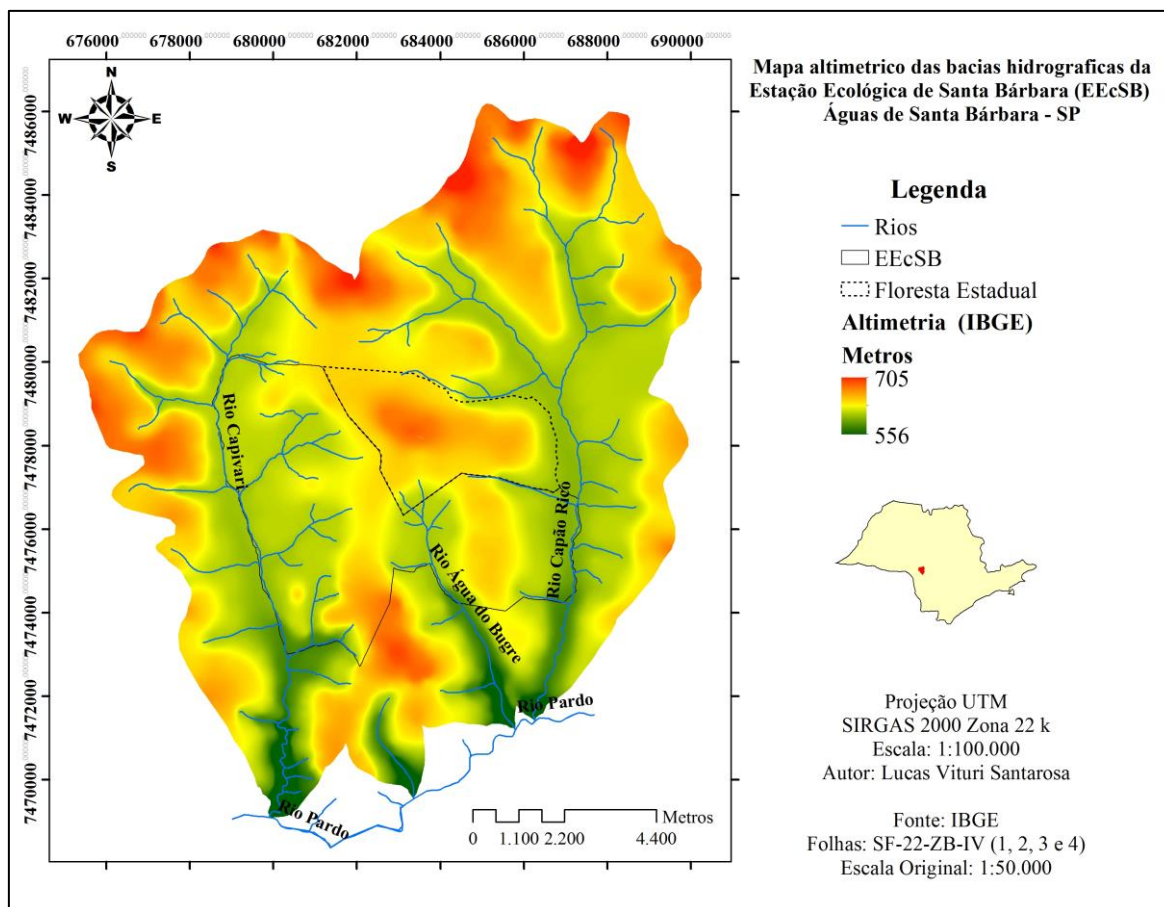


Figura 12. Mapa da altimetria das bacias hidrográficas da EEcSB com dados das cartas topográficas do IBGE.

3.4. Análise Geoestatística

Tanto as variáveis do solo como os níveis freáticos foram interpolados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS 10.3, utilizando a ferramenta *Geostatistical Analyst*.

A análise geoestatística foi utilizada neste trabalho para interpolação do nível freáticos e das variáveis auxiliares. Os interpoladores selecionados foram a krigagem ordinária e a cokrigagem. A cokrigagem foi realizada a partir da sua equação básica, mas a aplicação da variável auxiliar passou pelo processo de interpolação via krigagem ordinária antes de ser utilizada tornando os dados mais estáveis para interpolação como proposto por Hengl et al. (2004).

Os dados passaram pela análise exploratória de dados espaciais (ESDA - Exploratory Spatial Data Analysis Graphs) conforme descrito em Johnston et al.

(2001) e Krivoruchko e Krause (2012). A ESDA foi utilizada para verificar os dados pela estatística descritiva avaliando a distribuição e as medidas de tendência central, a variabilidade espacial, a estacionaridade, a existência de tendência e a covariância pela ferramenta *Geostatistical Analyst*. Segundo Andriotti (1988) este processo passa por uma classificação detalhada para qualificar a distribuição dos dados e testar as condições exigidas para aplicar o formalismo próprio da geoestatística.

Em seguida os dados passaram por análise variográfica (ajuste de semivariogramas) para realização da interpolação com os algoritmos de krigagem ordinária para casos univariados e da cokrigagem para casos multivariados, utilizando os dados das características físico-hídricas do solo e do relevo como variáveis auxiliares.

Foi realizada a análise dos variogramas, verificando o aumento ou diminuição da variância amostral em cada situação, determinando os melhores ajustes a partir desses valores, buscando as menores variâncias ($C - C_0$) a partir da inclusão de novas variáveis no modelo de predição espacial.

Os mapas foram avaliados pela técnica de validação cruzada (VIEIRA, 2000; SOARES, 2006; ANDRIOTTI, 2013). O método retira cada um dos valores mensurados (amostra) e em seguida é feita a predição do valor a partir dos valores circundantes. Este procedimento permite verificar a eficácia do modelo de predição, avaliando a relação dos valores mensurados e dos valores preditos por medidas estatísticas.

A partir dos parâmetros calculados para validação cruzada pela ferramenta *Geostatistical Analyst*, considera-se como melhor estimativa aquela que apresenta uma média padronizada (MS - *Mean Standardized*) próxima de zero, o menor valor médio quadrático (RMS - *Root-Mean-Square*) possível, a média do desvio padrão (ASE - *Average Standard Error*) próxima da média padronizada e o valor médio quadrático padronizado (RMSS - *Root-Mean-Square Standardized*) próximo de 1. O RMSS fornece uma medida da acurácia dos valores interpolados, que quando abaixo de 1 está subestimando e quando acima está superestimando os valores interpolados (JOHNSTON et al., 2001). Além desses parâmetros o coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para verificar o grau de dependência entre os valores mensurados e preditos no processo de validação cruzada e também entre as variáveis auxiliares e sua relação com o nível freático.

3.5. Cálculo do volume de água recuperado

Uma das aplicações do mapeamento do nível freático é a realização do cálculo do volume recuperado, realizada por álgebra de mapas com base nas superfícies resultantes da interpolação do nível freático. Para isso foi utilizada a Equação 6, adaptada de (MANZIONE et al., 2007):

$$VR = (NF_f - NF_i) \cdot A \cdot \eta_e \quad (7)$$

Onde, o volume de recarga (VR) de cada recuperação é calculado pela variação do nível freático em metros obtido pela diferença do nível inicial e final ($NF_f - NF_i$) no período, multiplicado pelo valor da área de cada pixel em metros quadrados (A) e pelo valor de porosidade efetiva (η_e).

Foi utilizado o valor de porosidade efetiva de 10% que representa um valor médio da porosidade efetiva do SAB (entre 5% e 15%) (DAEE, 2005) e se aproxima do limite inferior da porosidade efetiva para solos Quartzarênicos com variação entre 12 e 18% (MANZIONE et al., 2007). Esse valor adotado levou em conta a generalização dos dados considerando a camada de solo e de rocha, o valor da porosidade efetiva não pode ser tão baixo para simular apenas a condição da rocha e nem tão elevado que simule apenas a condição de porosidade efetiva do solo.

3.6. Análise Hidrológica

Os dados reunidos foram analisados para formulação de um Modelo Hidrológico Conceitual (MHC) da área de estudo. Nesta análise, foi feito o mapeamento das curvas potenciométricas, obtidas pela diferença entre o nível freático e a altimetria, e dos fluxos subterrâneos, estimados a partir dos valores dos níveis freáticos e da utilização dos mapas topográficos e de condutividade hidráulica.

Para isso foi utilizado o pacote *Groundwater* do SIG ArcGIS 10.3.. O pacote apresenta quatro ferramentas: (1) *Darcy Flow* calcula o volume residual para o regime de fluxo constante; (2) *Darcy Velocity* calcula o vetor de velocidade para cada célula segundo a Lei de Darcy; (3) *Particle Track* simula a trajetória de uma partícula

baseado nos dados gerados pela ferramenta *Darcy Velocity* e; (4) *Porous Puff* que faz a simulação da dispersão bidimensional de um poluente no meio poroso (GIMENES et al., 2012; ESRI, 2016). Foram utilizadas para estimar a direção dos fluxos subterrâneos as ferramentas *Darcy Velocity* e *Particle Track*.

A união de alguns dados de poços da Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) presentes na região da EECsB foram utilizados para estimar a espessura da camada saturada utilizado no cálculo de vetores de velocidade e para gerar um modelo de visualização da área de estudo em três dimensões, apresentando a espessura média da camada de arenito, gerada no software ArcScene do SIG ArcGIS 10.3..

Para complementar esta análise foram gerados perfis longitudinais simulando as camadas e os fluxos subterrâneos baseado na interpretação dos dados coletados, uma vez que os mapas do nível freático podem ser utilizados para caracterizar a direção de fluxo subterrâneo com capacidade de explicar melhor o fluxo horizontal apresentando restrições em relação ao fluxo vertical (SNYDER, 2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Interpolação das Variáveis Auxiliares

Os valores mensurados de cada variável auxiliar estão tabelados nos Apêndice 1, 2 e 3. Estes valores foram interpolados para realização da análise espacial de todos os resultados, formular o Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) e para inserir os dados como variáveis auxiliares na interpolação dos níveis freáticos, por serem mais estáveis que os valores pontuais.

4.1.1. Estatística descritiva das variáveis físico-hídricas do solo

A Tabela 3 apresenta a análise exploratória dos valores mensurados, organizando as medidas de tendência central e de dispersão.

Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis auxiliares mensuradas.

Medidas Estatísticas	RP (kPa)	ARE (%)	ARG (%)	K (cm/s)	UM (%)
Nº de Amostras	64	113	113	110	70
Mínimo	876,00	73,70	3,80	0,0032	5,60
Máximo	2250,30	94,20	24,20	0,0111	24,50
Média	1487,40	84,40	14,18	0,0057	11,50
Mediana	1462,70	84,60	14,00	0,0054	11,23
Desvio Padrão	322,80	4,40	4,48	0,0016	3,39
Curtose	2,62	2,64	2,66	3,74	2,92
Assimetria	0,43	-0,09	-0,01	0,84	-0,20
Transformação Logarítmica	Sim	Não	Não	Sim	Sim

RP: Resistência a penetração; ARE: porcentagem de areia; ARG: porcentagem de argila; K: condutividade hidráulica; UM: umidade do solo.

Os dados de condutividade hidráulica (K), umidade do solo (UM) e a resistência a penetração (RP) necessitaram de transformação logarítmica. A transformação foi realizada para ajustar os valores mensurados o mais próximo de uma distribuição normal, adequando os valores da curtose e assimetria, que devem ser respectivamente próximo de 3 e 0. Mesmo assim, o conjunto da K não apresentou valor da curtose adequado. Outra medida que confirma a qualidade amostral é a proximidade dos valores da média e da mediana, atendido por todos os conjuntos de dados.

Os valores da granulometria, representados pelo percentual de areia (ARE) e argila (ARG) contida nas amostras, mostrou que a textura do solo é predominantemente arenosa, com porcentagem de areia de 73% a 94%. O fracionamento da areia (Apêndice 1) revelou a predominância de areia de granulometria média e fina.

Este resultado permite inferir uma aproximação das características granulométricas identificadas como solo da classe dos Neossolos Quartzarênicos, segundo nível categórico dos Neossolos. Segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2006) os Neossolos Quartzarênicos são caracterizados pela textura predominante de areia ou areia franca e ausência de minerais primário. Entretanto, é importante salientar que esta constatação necessita de uma análise mais aprofundada para confirmar esta caracterização, um mapeamento detalhado da área de estudo com uma escala espacial compatível é fundamental, pois a escala do mapa do estadual não é suficiente para uma interpretação sensata dos tipos de solo na região.

A RP apresentou valores entre 876 e 2.250 kPa (Gráfico 3). Os valores máximos não excederam o nível de compactação baixa determinado pela fabricante

do equipamento utilizado para as medições, provavelmente devido as condições de umidade nos dias das medições e da textura do solo.

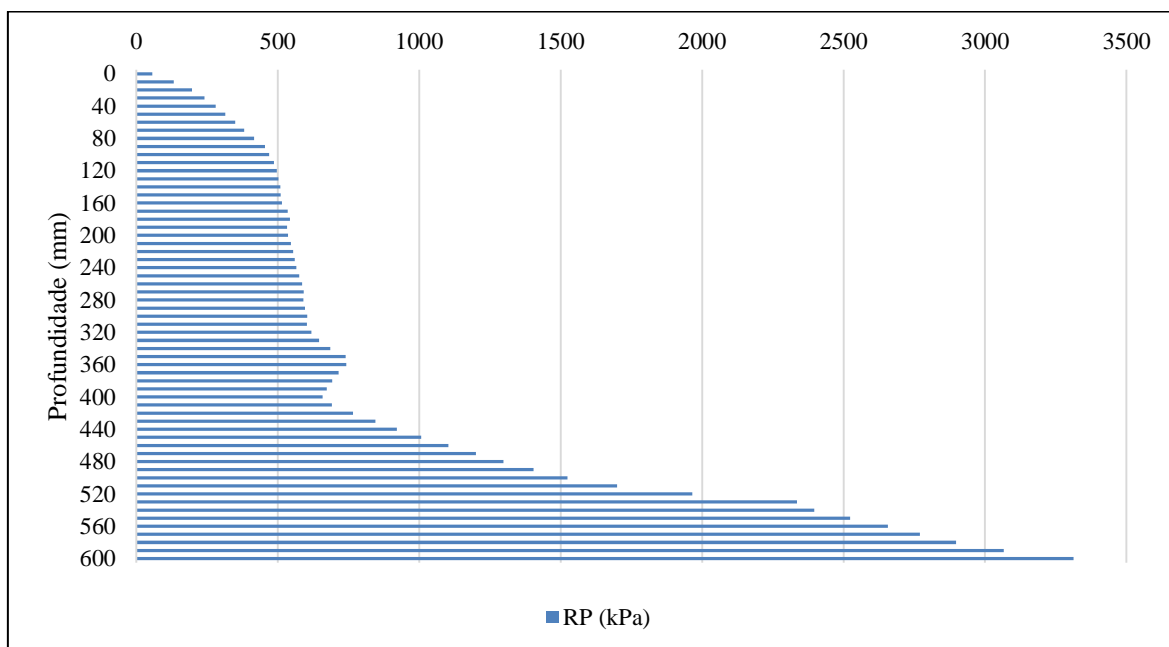


Gráfico 3. Valor médio da RP

A K do solo calculada apresentou valores médio de 0,005 cm/s, ou 5×10^{-5} m/s, correspondente aos valores de condutividade hidráulica encontrado para Neossolos Quartzarênicos conforme descrito por Fiori et al. (2010), que encontrou valores de condutividade hidráulica entre 10^{-4} e 10^{-7} m/s em superfície e 10^{-5} e 10^{-9} m/s em profundidade, realizando medidas da condutividade hidráulica com a utilização do método dos anéis concêntricos.

Os valores de UM apresentaram valores entre 5% e 24%, com valor médio em torno de 11%. Estes valores relativamente baixos de umidade para as medições, mesmo durante um período regular de precipitação, fato que pode estar relacionado a macroporosidade, típica de solos arenosos, que drena mais rapidamente a água e a presença da vegetação nos locais de medição que pode ter gerado algum tipo de desvio nos valores devido as taxas de interceptação. Interferências relevantes também na medição da resistência do solo a penetração.

As correlações entre as variáveis não são facilmente identificadas, provavelmente pelas condições ambientais influentes em cada umas das características do solo e pelas variações em cada método de mensuração. Deste modo, foram realizados os

cálculos do coeficiente de determinação (R^2) entre todas as variáveis (Tabela 4) para verificar o grau de dependência entre elas.

Tabela 4. Coeficiente de determinação (R^2) calculado para as variáveis auxiliares

Variáveis	RP	UM	ARE	ARG	K
RP		0,28	0,58	0,38	0,25
UM			0,74	0,72	0,44
ARE				0,98	0,38
ARG					0,40
K					

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo.

Nota-se a melhor correlação em relação a granulometria (ARE e ARG) revelando a capacidade de cada uma destas variáveis explicar a outra, resultado ligado ao fato destes valores serem obtidos através do mesmo processo de análise. Já quando relacionamos a UM e a RP verifica-se uma correlação menor, que teoricamente não se aplica uma vez que são grandezas inversamente proporcionais e deveriam variar nas mesmas proporções, isto demonstra os efeitos dos métodos de mensuração de cada variável.

4.1.2. Análise variográfica

Os variogramas obtidos para as diferentes variáveis auxiliares são apresentados nas Figuras 13 a 17, os gráficos apresentam escala diferente e em escala decimal. Os parâmetros dos ajustes variográficos são apresentados na Tabela 5.

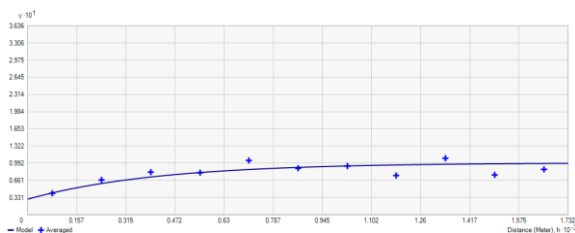


Figura 13. Variograma da UM

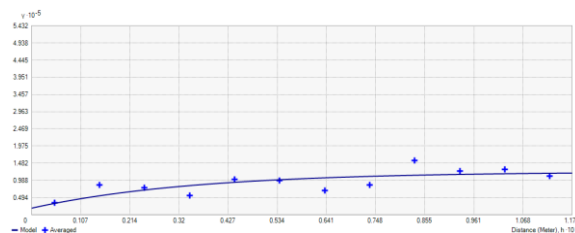


Figura 14. Variograma da RP

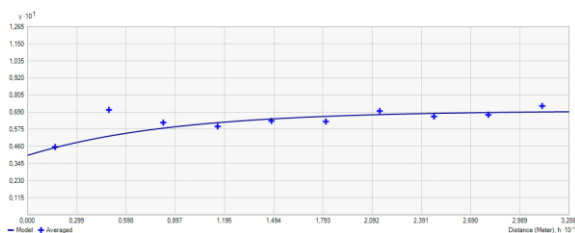


Figura 15. Variograma da K

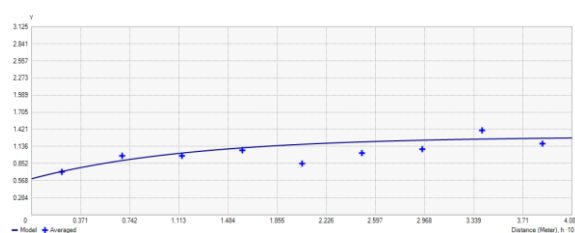


Figura 16. Variograma da ARE

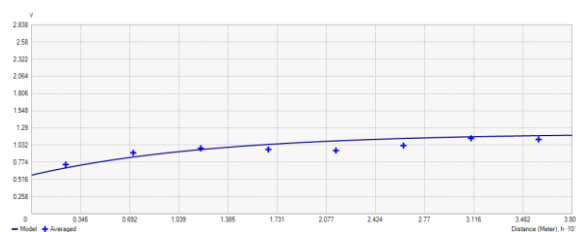


Figura 17. Variograma da ARG

Tabela 5. Parâmetros variográficos das variáveis auxiliares

Nº de Medições	Variável Auxiliar	Transformação Logarítmica	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
64	RP	Não	Exp.	1.068,0	19.000	123.672	12
113	ARE	Não	Exp.	3.627,3	0,6	1,3	9
113	ARG	Não	Exp.	3.808,6	0,58	1,21	8
110	K	Sim	Exp.	2.630,0	0,047	0,082	10
70	UM	Sim	Exp.	1.259,0	0,03	0,1	11

RP: Resistência a penetração; ARE: porcentagem de areia; ARG: porcentagem de argila; K: condutividade hidráulica; UM: umidade do solo; A₀: alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial.

A granulometria (ARE e ARG) e a K tiveram a mesma quantidade de medições, entretanto a K teve três medições excluídas. O mesmo aconteceu com a RP com seis medições retiradas do conjunto amostral que era igual ao da UM. Estas medições foram excluídas do conjunto amostral por ter um comportamento muito diferente dos demais o que influenciava nos parâmetros variográficos e, conseqüentemente, nos resultados finais da interpolação

O modelo ajustado para todos os dados foi o exponencial, a K e a UM necessitaram de transformação logarítmica dos dados para garantir o ajuste do modelo.

Observa-se no variogramas da granulometria do solo (ARE e ARG) e da K que a proporção do efeito pepita no variograma é alta, indicando a presença de erro associada as medições. Esta característica pode ser resultado da fraca dependência espacial entre as amostras, atribuída a estratégia de amostragem que não foi eficaz na captura da variação espacial. Portanto, a variação espacial dos fenômenos poder ser pequena ou ocorre em uma escala menor, necessitando de um conjunto amostral mais volumoso. Outra explicação para este comportamento do variograma pode estar associado a variações nos métodos de coleta de dados e análises.

4.1.3. Validação cruzada

A acurácia e qualidade do processo de interpolação foi analisado pela técnica de validação cruzada (Tabela 5). Os resultados mostram que as interpolações apresentaram resultados satisfatórios, atendendo os requisitos esperados para uma interpolação adequada. Apresentando MS próxima de zero, o menor RMS possível, a média do ASE próxima da média padronizada e o RMSS próximo de 1.

Tabela 6. Validação cruzada para a interpolação das variáveis auxiliares

Variável	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
Auxiliar					
RP	281,29	0,02	0,92	318,97	0,63
ARE	3,82	0,01	0,96	4,01	0,65
ARG	3,91	-0,01	1,00	3,96	0,57
K	0,0014	-0,03	1,16	0,0016	0,93
UM	3,20	-0,01	0,97	3,37	0,98

RP: Resistência a penetração; ARE: porcentagem de areia; ARG: porcentagem de argila; K: condutividade hidráulica; UM: umidade do solo; MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE: desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Destaca-se ainda a oscilação da RMSS na interpolação da K, que pode ter superestimado alguns dos valores medidos na predição. Um destaque positivo são os valores do R^2 que apresentaram bons resultados variando de 57% a 98% ao testar o modelo pela validação cruzada.

4.1.4. Mapeamento das variáveis auxiliares

Os mapas (Figuras 18) mostram os valores interpolados das mensurações realizadas de variáveis físico-hídricas do solo na área de estudo. A granulometria mostra a relação inversamente proporcional da ARE e ARG, a areia com maior concentração ao norte da área e menor concentração ao sul (bacias do Boi e do Bugre) e a argila com uma situação inversa.

Em relação a RP, existe uma área com os maiores valores na bacia do Boi e a montante da bacia do Santana, valores médios na bacia do Guarantã e os valores mais baixos predominantes a jusante da bacia do Santana e das bacias do Passarinho e do Bugre.

A maior RP, principalmente na bacia do Santana, pode estar associada ao uso e ocupação anterior a criação do da EECSB, destinada a usos agropecuários. Constatou-se *in loco* nestas áreas a presença de vegetação comum em pastagem competindo com espécies nativas do cerrado, levando a inferir que o uso anterior era destinado a criação de gado.

Os menores valores de K estão concentrados na bacia do Boi e parte da bacia do Santana, a montante das bacias do Bugre e do Guarantã e predomina na bacia do Passarinho. Estas áreas coincidem com a maior concentração de argila e com áreas de maior UM. Algumas áreas coincidem com a maior resistência do solo a penetração.

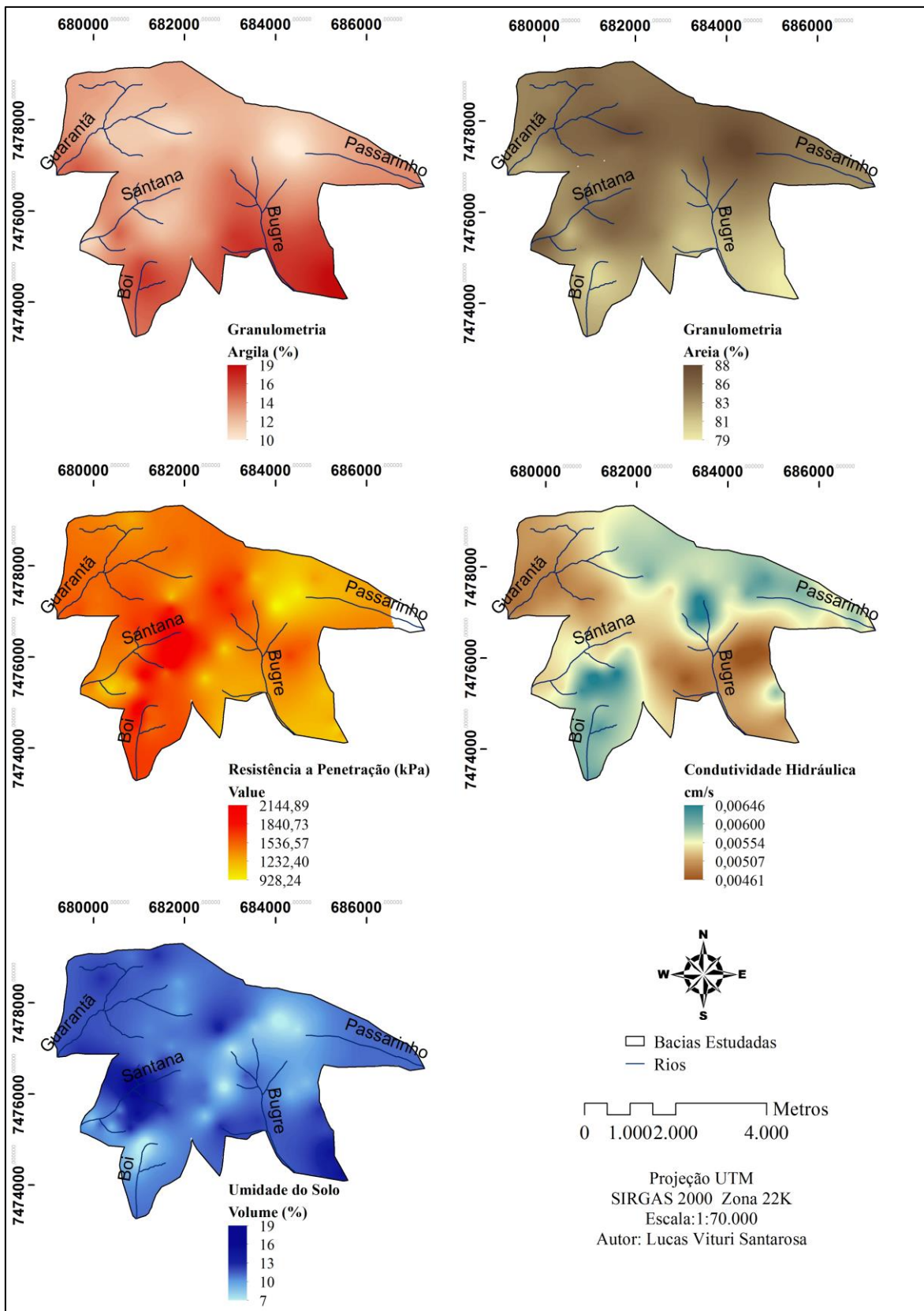


Figura 18. Mapas das variáveis auxiliares

4.2. Interpolação do nível freático

4.2.1. Análise exploratória

As medidas estatísticas das medições dos níveis dos poços (Tabela 7) permitem identificar o comportamento do conjunto amostral em relação a passagem do período mais seco para um mais úmido, apesar do inverno de 2015 ter apresentado ocorrências de precipitação acima da média.

Tabela 7. Estatística descritiva dos níveis freáticos mensurados

Medidas estatísticas	10/10/2014	21/11/2014	30/01/2015	05/05/2015	28/08/2015	16/10/2015	03/12/2015
Nº de Amostras	30	32	32	32	48	48	48
Mínimo	-4,85	-5,13	-4,83	-4,53	-6,02	-5,8	-4,14
Máximo	-0,29	-0,35	-0,22	-0,09	-0,20	-0,15	-0,10
Média	-1,65	-1,99	-1,6	-1,34	-1,94	-1,79	-0,96
Mediana	-1,46	-1,77	-1,41	-1,09	-1,63	-1,52	-0,70
Desvio Padrão	1,07	1,15	1,11	1,04	1,22	1,2	0,90
Curtose	4,50	3,50	3,80	4,30	4,40	4,40	5,50
Assimetria	-1,30	-1,00	-1,14	-1,30	-1,20	-1,20	-1,50

Unidade: metros (m)

Observa-se que os valores máximos e mínimo sofrem alteração correspondentes a oscilação da precipitação, nos períodos mais úmido os valores máximos e mínimos são menores e no período seco verifica-se o oposto.

O padrão de oscilação corresponde ao que é apresentado no Gráfico 1 (Item 4.2.), as medições dos dias 10 de outubro e de 21 de novembro de 2014 mostram a tendência de queda do nível freático resultantes da estiagem do ano hidrológico 2013/2014. Nas medições seguintes verifica-se a retomada do nível até a medição do dia 05 de maio de 2015, uma nova queda em agosto de 2015 e a retomada até o dia 03 de dezembro de 2015. A caracterização de medições em épocas mais secas e mais úmidas também é visível nos valores de média, mediana e desvio padrão.

Em relação à normalidade dos dados, observa-se que não apresentaram comportamento normal, os valores de assimetria e curtose divergem dos limites esperados, respectivamente 0 e 3.

A partir do dia 28 de agosto de 2015 houve uma queda brusca no valor mínimo (nível mais profundo), esta ruptura foi causada pelo do aumento do conjunto amostral com a perfuração de novos poços com profundidade do nível freático maior, portanto, o breve período de estiagem entre os meses de julho e agosto pouco contribuíram para a queda acentuada dos valores.

Este comportamento motivou a inclusão de valores das medições dos dias 16 de outubro e 03 de dezembro de 2015 por representarem um comportamento diferente do ano hidrológico anterior com os níveis freáticos sendo retomados devido a regularidade das chuvas, além de permitir a avaliação do comportamento dos resultados com incremento do conjunto amostral.

A análise prévia do comportamento da oscilação dos níveis dos poços fez com que o poço S1 fosse retirado do conjunto amostral por ter um comportamento muito diferente dos demais que acabava influenciando nos parâmetros variográficos e, conseqüentemente, nos resultados finais da interpolação.

Para utilizar uma variável auxiliar é importante que ela apresente correlação com a variável principal, deste modo foi calculado o valor do coeficiente de determinação entre o nível freático médio e as variáveis auxiliares utilizadas (Tabela 8).

Tabela 8. Coeficiente de determinação (R^2) calculado entre o nível freático e a variável auxiliar

Variável Auxiliar	R^2
ALT	0,66
SRTM	0,64
ARE	0,86
ARG	0,85
K	0,75
RP	0,45
UM	0,60

RP: Resistência a penetração; ARE: porcentagem de areia; ARG: porcentagem de argila; K: condutividade hidráulica; UM: umidade do solo

4.2.2. Análise variográfica

Os parâmetros variográficos dos valores do nível freático interpolados estão apresentados nas Tabelas 9 a 15. As Tabelas servem para a primeira verificação dos efeitos das variáveis auxiliares no ajuste do variograma. Busca-se verificar principalmente a variância nos dados calculada pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0), esperando que os valores da cokrigagem sejam menores que os encontrados com a aplicação da krigagem ordinária.

Na Tabela 9 apenas a cokrigagem com as variáveis auxiliares ALT e a K obtiveram resultados adequados, reduzindo a variância dos dados.

Tabela 9. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 10/10/2014

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A_0 (m)	C_0	C	Lags
30	KG	-	GAU	662,00	0,09	1,56	10
	COKG	ALT	EXP	2.465,10	0,08	1,48	9
	COKG	RP	CIR	1.721,40	0,10	1,59	12
	COKG	ARE	CIR	800,00	0,00	1,65	9
	COKG	ARG	CIR	843,64	0,00	1,62	10
	COKG	K	ESF	839,00	0,00	1,33	10
	COKG	UM	EXP	1.767,00	0,00	1,44	11
	COKG	SRTM	EXP	2.964,00	0,08	1,82	9

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A_0 : Alcance; C_0 : Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Na Tabela 10, apenas a SRTM obteve bom desempenho na redução da variância amostral. Tanto estes resultados como os da Tabela 9, podem ser atribuídos ao desvio padrão elevado causado pela diferença dos níveis medidos em um período mais seco que causou maior variância nos dados, uma vez que o nível mínimo nos poços é muito divergente em diferentes bacias, por exemplo, a bacia do Bugre apresenta os poços com nível mais superficiais enquanto a bacia do Santana os poços mais profundos.

Tabela 10. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 21/11/2014

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
32	KG	-	GAU	661,50	0,10	1,68	11
	COKG	ALT	EXP	2.771,40	0,00	1,92	10
	COKG	RP	EXP	2.983,90	0,00	2,01	12
	COKG	ARE	ESF	2.836,60	0,20	2,14	7
	COKG	ARG	GAU	794,00	0,12	1,95	9
	COKG	K	CIR	816,50	0,00	1,76	11
	COKG	UM	EXP	1.792,00	0,00	1,66	10
	COKG	SRTM	EXP	2.788,30	0,20	1,81	6

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Na Tabela 11 verifica-se que um número maior de variáveis auxiliares obteve melhores resultados, a ALT, UM e a granulometria (ARE e ARG), sendo que a granulometria apresentou melhorias muito pequenas na variância.

Tabela 11. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 30/01/2015

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
32	KG	-	ESF	923,14	0,00	1,76	12
	COKG	ALT	EXP	2.300,00	0,15	1,65	10
	COKG	RP	EXP	2.550,00	0,00	2,00	11
	COKG	ARE	ESF	941,80	0,00	1,70	11
	COKG	ARG	CIR	749,00	0,00	1,67	9
	COKG	K	CIR	862,00	0,00	1,84	12
	COKG	UM	EXP	1.755,00	0,00	1,54	8
	COKG	SRTM	EXP	2.723,00	0,00	1,82	6

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Na Tabela 12 a melhoria da variância ocorre com a utilização da RP, a K e UM como variáveis auxiliares. Verifica-se que houve alteração das variáveis com maiores influências sobre os resultados em relação a Tabela 11, provavelmente este comportamento tem ligação direta com a retomada do nível freático, pois o dia 05 de maio de 2015 registrou os maiores níveis pela primeira vez na série temporal analisada.

Tabela 12. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 05/5/2015

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
32	KG	-	GAU	660,00	0,08	1,57	10
	COKG	ALT	EXP	2.779,40	0,00	1,64	10
	COKG	RP	ESF	1.962,70	0,14	1,34	11
	COKG	ARE	ESF	961,00	0,00	1,62	12
	COKG	ARG	ESF	1.014,70	0,00	1,67	10
	COKG	K	ESF	735,00	0,00	1,40	10
	COKG	UM	EXP	1.700,00	0,00	1,36	12
	COKG	SRTM	EXP	2.372,00	0,05	1,60	12

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

A Tabela 13 representa a mudança abrupta no comportamento do conjunto amostral, causada simultaneamente pelo acréscimo de poços de monitoramento e pelo rebaixamento do nível causado pela estiagem do inverno. Cumpre ressaltar que o período seco esperado para 2015 apresentou boa distribuição das chuvas em relação ao comportamento normal do clima da região. As variáveis que favoreceram a redução da variância foram a RP, ARE, UM e a SRTM.

Tabela 13. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 28/08/2015

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
48	KG	-	GAU	804,50	0,07	2,39	12
	COKG	ALT,	EXP	3.333,60	0,00	2,35	12
	COKG	RP	CIR	1.751,00	0,10	2,30	8
	COKG	ARE	EXP	2.917,60	0,38	1,97	6
	COKG	ARG	GAU	850,00	0,07	2,47	11
	COKG	K	GAU	825,00	0,06	2,56	10
	COKG	UM	GAU	700,00	0,04	2,24	9
	COKG	SRTM	EXP	3.025,5	0,00	2,28	9

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Observa-se que o acréscimo no número de poços de monitoramento aumentou a variância de modo geral, proporcionando novo comportamento da correlação dos valores dos níveis e das variáveis auxiliares, trouxe mais incertezas nas estimativas do que melhorias.

Na Tabela 14 as variáveis auxiliares que apresentaram melhor desempenho foram a RP, ARE e SRTM.

Tabela 14: Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 16/10/2015

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
48	KG	-	GAU	784,40	0,10	2,21	12
	COKG	ALT	EXP	3.354,00	0,00	2,30	9
	COKG	RP	CIR	1.724,50	0,05	1,98	12
	COKG	ARE	EXP	2.917,60	0,40	1,84	6
	COKG	ARG	GAU	964,00	0,13	2,53	11
	COKG	K	GAU	792,00	0,10	2,21	12
	COKG	UM	GAU	950,00	0,13	2,40	12
	COKG	SRTM	EXP	3.044,00	0,08	2,14	9

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

A Tabela 15 apresenta baixa variância encontrada em todos os variogramas. Isto leva a inferir que a variância sofre interferência do desvio padrão, pois nesta mensuração o nível foi o mais alto registrado e os valores do nível dos poços não apresentaram grandes amplitudes entre os níveis mensurados. É notável que a maioria das variáveis auxiliares obtiveram bom desempenho, exceto para o uso da K, ARG e UM.

Tabela 15. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 03/12/2015

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
48	KG	-	GAU	799,70	0,13	1,31	12
	COKG	ALT	EXP	3.037,00	0,20	1,11	11
	COKG	RP	CIR	1.600,00	0,15	1,15	12
	COKG	ARE	EXP	2.990,00	0,35	1,03	6
	COKG	ARG	GAU	1.084,00	0,16	1,50	11
	COKG	K	GAU	850,00	0,13	1,44	10
	COKG	UM	GAU	869,00	0,15	1,34	12
	COKG	SRTM	EXP	3.553,10	0,20	1,15	10

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Com base na análise dos parâmetros variográficos foi possível verificar que em cada data de medição a combinação de variáveis auxiliares capazes de contribuir para redução da variância e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da interpolação do nível freático foi diferente. Com destaque para a RP, ALT, SRTM e UM que apresentaram bons resultados na maioria dos casos. As variáveis que menos contribuíram para melhoria da variância foram a ARG e K.

4.2.3. Validação Cruzada

A validação cruzada das interpolações das medições selecionadas para interpolação é apresentada nas Tabelas de 16 a 22. Para uma boa estimativa é fundamental a MS próxima de zero, o menor RMS possível, a média do ASE próxima da média padronizada e o RMSS próximo de 1. Foram consideradas determinantes para verificar a qualidade da interpolação do nível freático o ASE, o RMSS e o R².

Na Tabela 16, observa-se que, com exceção da granulometria (ARE e ARG), as variáveis contribuíram para redução do valor do ASE da predição, o mesmo pode-se dizer do RMSS, revelando que a granulometria não promoveu reduções nas distorções das estimativas. Em relação ao R² nota-se que os valores não destoam muito em relação aos valores calculados para a krigagem.

Tabela 16. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 10/10/2014

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,5900	-0,0191	0,7947	0,8292	0,69
COKG	ALT	0,6849	-0,0163	0,9410	0,7224	0,60
COKG	RP	0,7178	-0,0353	1,0727	0,6742	0,54
COKG	ARE	0,6059	-0,0263	0,7443	0,8608	0,68
COKG	ARG	0,6159	-0,0258	0,8147	0,8099	0,67
COKG	K	0,6426	0,0088	1,0694	0,7317	0,63
COKG	UM	0,6859	-0,0338	1,0635	0,6614	0,59
COKG	SRTM	0,7079	-0,0330	0,9706	0,7314	0,56

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE: desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

A Tabela 17, apresenta melhoria ASE das predições, com exceção da ARG que não apresentou um valor significativamente menor que o da krigagem. O RMSS foi adequado em todo os casos, apenas a RP apresentou a maior diferença, sobreestimando os valores na mesma proporção da subestimação da krigagem. O R² apresentou grande variação, apresentando maior certeza na predição com uso da ALT e da K.

Tabela 17. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 21/11/2014

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,8889	-0,0188	0,8564	0,9345	0,42
COKG	ALT	0,6482	-0,0218	0,9404	0,7015	0,67
COKG	RP	0,7968	-0,0215	1,0051	0,7297	0,39
COKG	ARE	0,8982	-0,0172	1,0755	0,7846	0,38
COKG	ARG	1,0551	-0,0730	0,9704	0,8983	0,30
COKG	K	0,7921	0,0165	1,1670	0,8171	0,52
COKG	UM	0,8762	-0,0315	1,0723	0,7484	0,42
COKG	SRTM	0,8793	-0,0386	1,0050	0,8171	0,41

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE: desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Na Tabela 18 o ASE apresentou bons resultados, porém, a granulometria (ARE e ARG) e a K apresentaram valores próximos ao da krigagem, a granulometria (ARE e ARG) novamente não foi eficaz na melhoria do RMSS e o R² não

obteve melhoria significativas, apenas pequenas melhorias com o uso da ALT, SRTM e RP.

Tabela 18. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 30/01/2015

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,8646	-0,0269	0,8507	0,9400	0,40
COKG	ALT	0,8393	-0,0185	1,0028	0,7942	0,42
COKG	RP	0,8142	-0,0262	1,0026	0,7769	0,45
COKG	ARE	0,8617	-0,0282	0,8693	0,9179	0,37
COKG	ARG	0,9201	-0,0229	0,9071	0,9372	0,34
COKG	K	0,9058	-0,0133	1,0453	0,8997	0,36
COKG	UM	0,8820	-0,0427	1,1056	0,7497	0,37
COKG	SRTM	0,8468	-0,0471	1,1621	0,7097	0,41

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

A Tabela 19 apresenta um comportamento diferente em relação ao ASE, pois a cokrigagem com o uso da ARE como variável auxiliar obteve desvio padrão pouco maior que a krigagem, assim como a ARG e a K contribuíram pouco para melhoria na estimativa, quanto ao RMSS os resultados das mesmas variáveis citadas se distanciaram do ideal e o R² só foi significativo com o uso da ALT e SRTM.

Tabela 19. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 05/05/2015

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,8720	-0,0079	0,8847	0,8994	0,33
COKG	ALT	0,7882	-0,0207	1,0899	0,6768	0,42
COKG	RP	0,8705	-0,0254	1,1762	0,6977	0,30
COKG	ARE	0,8664	-0,0150	0,8443	0,9007	0,33
COKG	ARG	0,8436	-0,0210	0,8810	0,8651	0,35
COKG	K	0,9194	0,0308	1,1558	0,8537	0,28
COKG	UM	0,8451	-0,0378	1,0661	0,7210	0,34
COKG	SRTM	0,8092	-0,0230	0,9989	0,7553	0,39

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Na Tabela 20, com a inserção de novos poços de monitoramento o comportamento dos valores observados para verificar a qualidade da predição se alterou. O ASE só apresentou melhorias com a ALT, SRTM e RP; o RMSS apresentou os piores resultados com o uso da ARE e UM e; o R^2 retornou valores menores da cokrigagem em relação a krigagem, exceto para o uso ALT, ARG e K, entretanto, verifica-se que o R^2 para esse conjunto amostral é melhor que os apresentados anteriormente.

Tabela 20. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 28/08/2015

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R^2
KG	-	0,7498	-0,0008	1,0545	0,8736	0,62
COKG	ALT	0,7450	-0,0021	1,0226	0,7278	0,63
COKG	RP	0,7869	-0,0133	1,0162	0,7798	0,58
COKG	ARE	0,8356	-0,0046	0,8644	0,9490	0,54
COKG	ARG	0,7215	0,0010	1,0480	0,8619	0,65
COKG	K	0,7451	0,0027	1,0584	0,8839	0,62
COKG	UM	0,8232	-0,0647	1,1666	0,8734	0,58
COKG	SRTM	0,7785	-0,0199	1,0361	0,7418	0,59

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R^2 : coeficiente de determinação.

Na Tabela 21, com relação a redução do ASE destacam-se os valores obtidos pela cokrigagem utilizando ALT, SRTM e RP com a maiores diferenças, as demais variáveis apresentaram um desvio menor que o da krigagem, com exceção da ARE. O resultado do RMSS sugere uma superestimação na maioria nas interpolações. O R^2 por sua vez não apresentou variação significativas, destacando a ALT, ARG, K e UM com alguma melhoria.

Tabela 21. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 16/10/2015

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,8344	0,0109	1,0645	0,8838	0,52
COKG	ALT	0,8033	0,0040	1,1102	0,7181	0,55
COKG	RP	0,8192	-0,0196	1,1813	0,6963	0,51
COKG	ARE	0,8732	-0,0037	0,9000	0,9486	0,47
COKG	ARG	0,8024	0,0074	1,0593	0,8498	0,55
COKG	K	0,8351	0,0449	1,1183	0,8393	0,52
COKG	UM	0,7677	-0,0252	1,0660	0,8252	0,58
COKG	SRTM	0,8320	-0,0158	1,0406	0,7791	0,52

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Por fim, a Tabela 22, que retrata os resultados da validação cruzada do período com o nível freático mais elevado, apresentou os menores ASE, os valores para o uso da ARE acima da krigagem e os valores da K e UM com pouca melhoria da variância. O RMSS com valores adequados, tendendo a passar do limite desejado em quase todas as predições, ficou mais próximo do ideal apenas com o uso da ALT, ARE e UM. O R² com valores muito mais baixos que os apresentados pelas predições anteriores, destacando-se a ALT, SRTM, ARE e a RP com resultados com valores menores que o da krigagem.

Tabela 22. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 03/12/2015

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,7437	0,0152	1,1009	0,7442	0,33
COKG	ALT	0,7353	-0,0031	1,0372	0,6994	0,32
COKG	RP	0,7383	-0,0120	1,1199	0,6643	0,32
COKG	ARE	0,7513	-0,0033	0,9553	0,7794	0,29
COKG	ARG	0,6913	0,0237	1,0876	0,7070	0,41
COKG	K	0,7474	0,0037	1,1236	0,7421	0,33
COKG	UM	0,6987	-0,0177	1,0258	0,7367	0,40
COKG	SRTM	0,7398	-0,0158	1,0711	0,6824	0,31

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Os valores analisados na validação cruzada mostraram que a maioria das variáveis apresentou bom desempenho na melhoria do desvio padrão das interpolações. Entretanto, a granulometria do solo (ARE e ARG) e a condutividade hidráulica (K) foram menos eficientes para melhoria da modelagem.

4.2.4. Mapas do Nível Freático

Após a verificação da interpolação os mapas foram gerados, são 8 mapas para cada data interpolada utilizando a krigagem e a cokrigagem com cada uma das variáveis utilizadas, totalizando 56 mapas do nível freático. Estes mapas são acompanhados dos mapas com o desvio padrão da predição (Figuras 19 a 25).

Os mapas de desvio padrão ajudam a verificar a eficiência da variável auxiliar adotada na interpolação ao extrapolar a predição para além do alcance do conjunto amostral. Possibilitando avaliar a predição quando a sua capacidade de gerar dados para um alcance maior que o gerado pela krigagem, potencializando a capacidade de planejamento e gestão do uso das águas subterrâneas.

As legendas de todos os mapas foram padronizadas para poder ser verificada a oscilação do nível freático nos diferentes momentos mensurados e para comparar o desvio padrão de cada um dos mapas apresentados.

A Figura 19 apresenta os mapas do nível freático acompanhados dos mapas de desvio padrão para o dia 10 de outubro de 2014. Os níveis mais profundos podem ser vistos na região oeste da área, na intersecção das bacias do Santana e do Guarantã e uma outra área na região oeste na divisa entre as bacias do Bugre e do Passarinho, correspondentes a regiões dos divisores de água. É visível também algumas áreas mais azuis próximas das nascentes das bacias do Bugre, Passarinho Guarantã e Santana revelando que as interpolações incorporaram o sentido físico das formas de relevo condicionando o escoamento como imaginado no MHC da área.

Quanto ao desvio padrão nota-se que a K, ARE e ARG foram menos eficientes na redução do desvio padrão e apresentam os maiores valores e menor alcance na predição. Já os resultados mais promissores foram encontrados com a utilização ALT, SRTM e UM como variáveis auxiliares. A RP apresenta os menores desvios nas áreas próximas dos pontos de medição e na medida que os dados se afastam dos pontos dos poços de monitoramento o desvio padrão sofre um aumento abrupto.

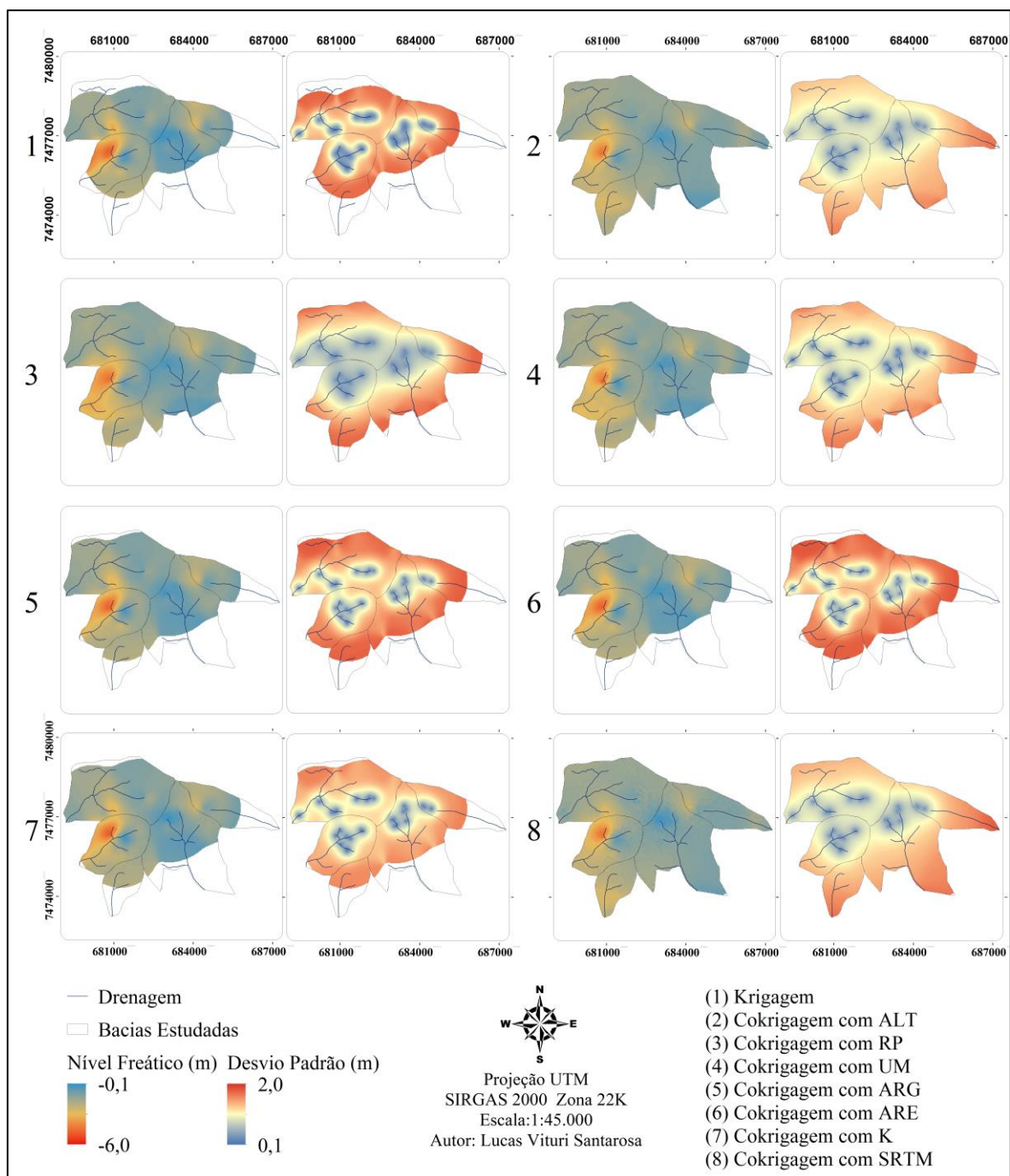


Figura 19. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 10/10/2014

Na Figura 20 nota-se que o desvio padrão é mais intenso em todos os casos, tendo melhores desempenhos com da ALT, SRTM, UM, ARE e RP como variáveis auxiliares. Estas últimas com ótimo desempenho na área mais próxima dos poços de monitoramento. Em relação ao nível freático verifica-se a predominância de níveis

abaixo de 3 m, esta foi a data que se registrou o menor nível dos poços no período analisado.

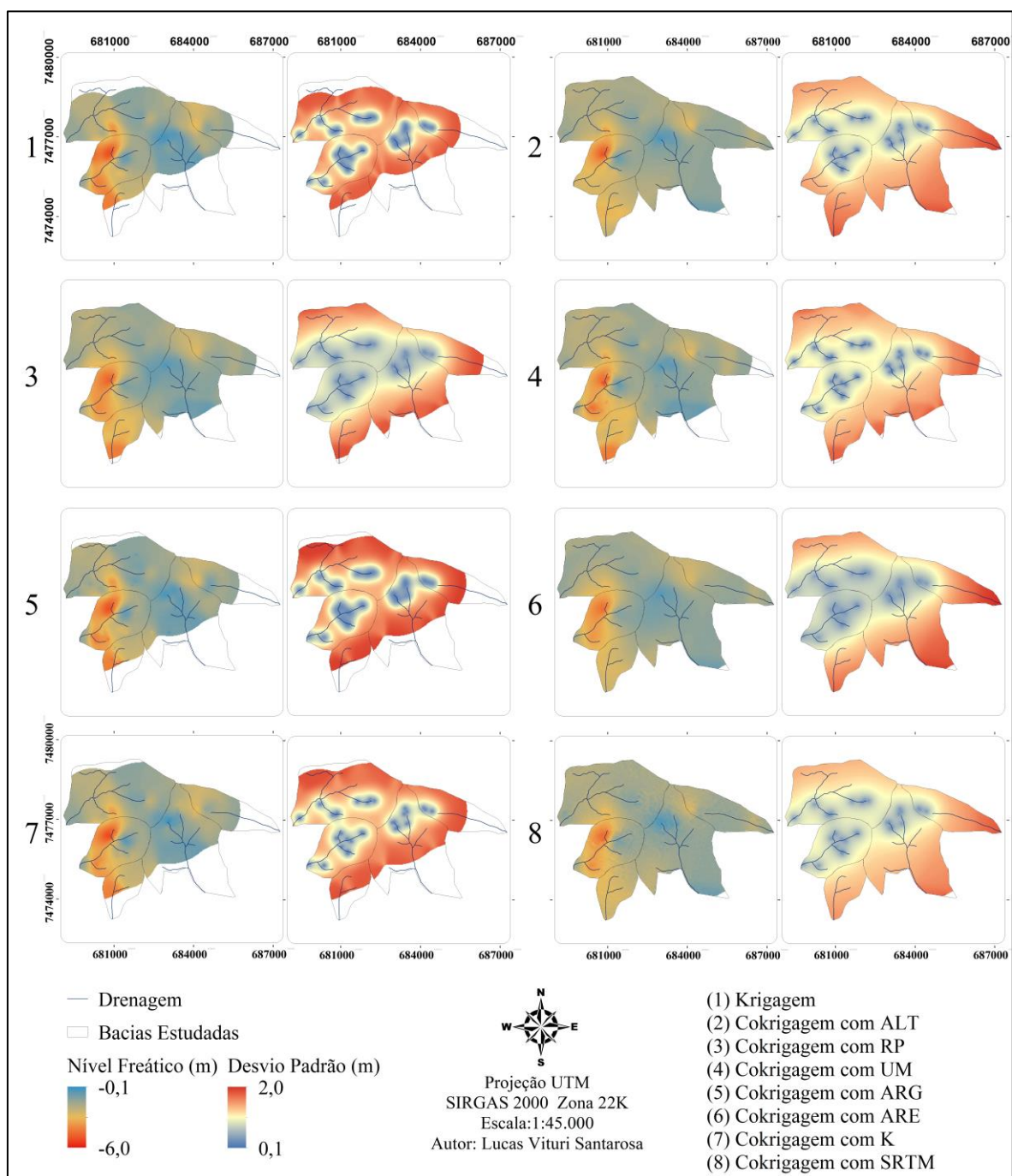


Figura 20. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 21/11/2014

A Figura 21 mostra que a krigagem apresentou um alcance maior dentre as interpolações com 32 pontos de medição. As variáveis com melhor desempenho foram com a utilização da ALT, SRTM, UM e RP como covariáveis. Em relação ao nível

freático verifica-se uma sensível retomada em relação aos mapas das medições do dia 21 de novembro de 2014.

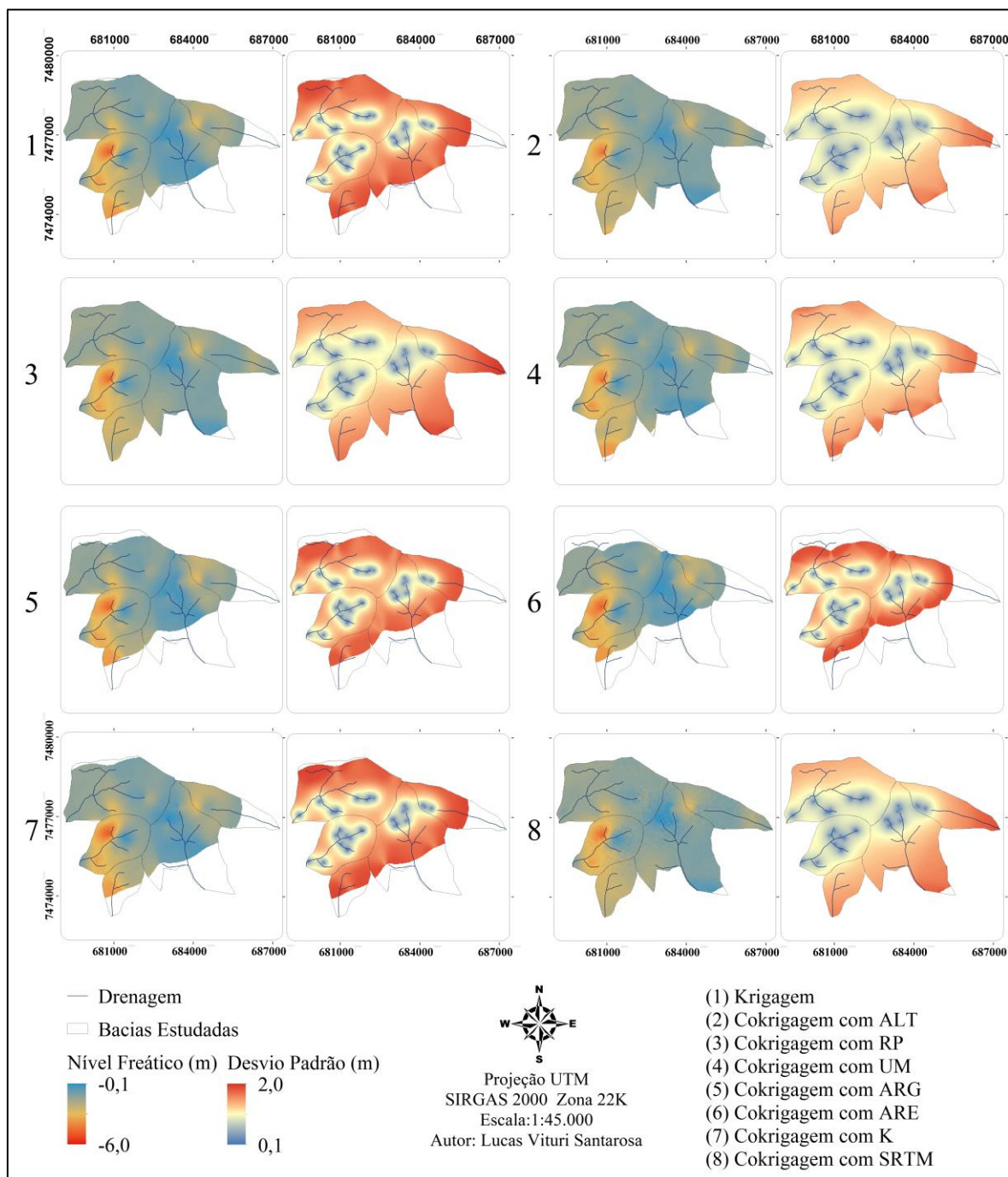


Figura 21. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 30/01/2015

Na Figura 22 o nível freático está mais elevado que nos mapas anteriores. O desvio padrão obteve ótimos resultados com o uso das ALT, SRTM, UM e RP. Esta contribui novamente para redução dos desvios próximo aos pontos de mensuração, entretanto, não sofre alteração abrupta como verificado anteriormente.

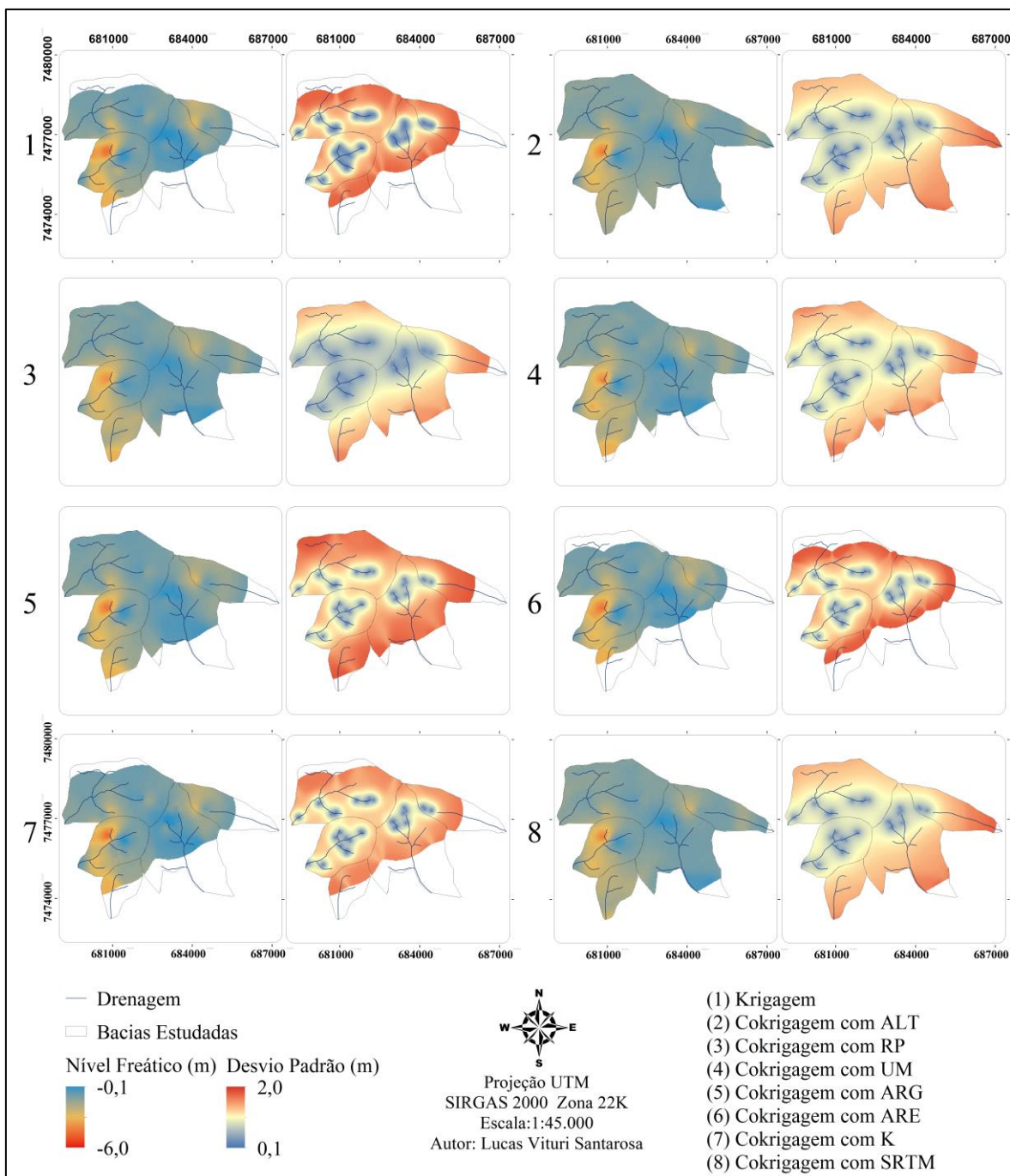


Figura 22. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 05/05/2015

A Figura 23 representa a ruptura do conjunto amostral, pois ocorre a adição de 16 novos poços de monitoramento. É possível ver a queda brusca do nível apresentada no Gráfico 1 e na análise exploratória, provavelmente uma resposta a profundidade do nível mais próxima de 6 metros causada pela adição de poços mais profundos na malha amostral combinada a estiagem anterior a medição.

Com a mudança do conjunto amostral é possível ver que o comportamento do desvio padrão sofreu alterações, a adição de algumas variáveis como a ARG, K, UM e RP apresentaram desvio padrão máximo acima de 2 metros. A melhoria foi visualizada com o uso da RP, com menores desvios na região de amostragem, e ALT, SRTM e ARE.

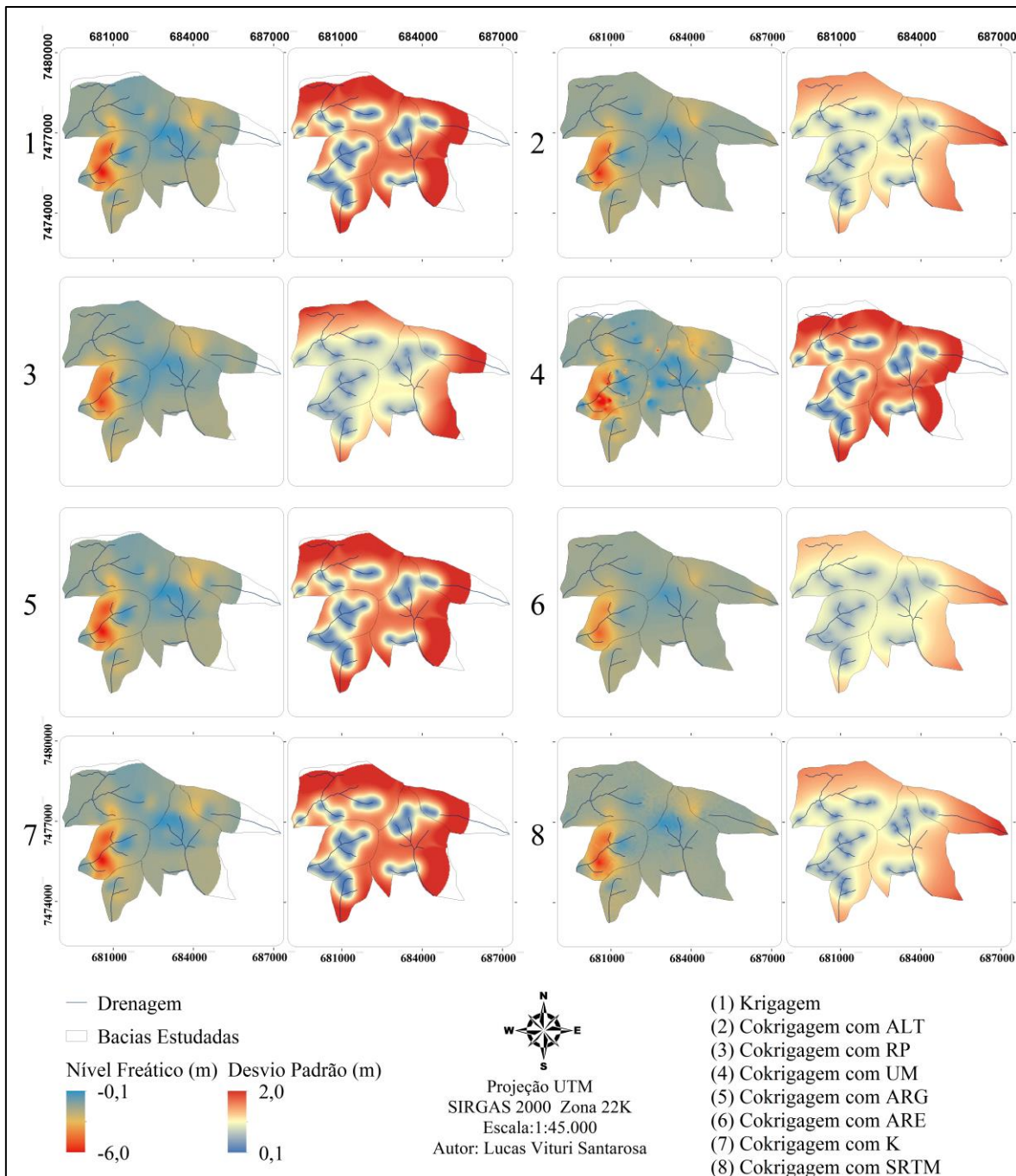


Figura 23. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 28/08/2015

A Figura 24 apresenta sensível aumento nos níveis freáticos com o início das chuvas do ano hidrológico 2015/2016. O desvio padrão foi melhor para o uso da ARE, ALT, SRTM e RP como variáveis auxiliares. Os resultados se comportaram como nas interpolações da mensuração do dia 28 de agosto de 2015 (Figura 23).

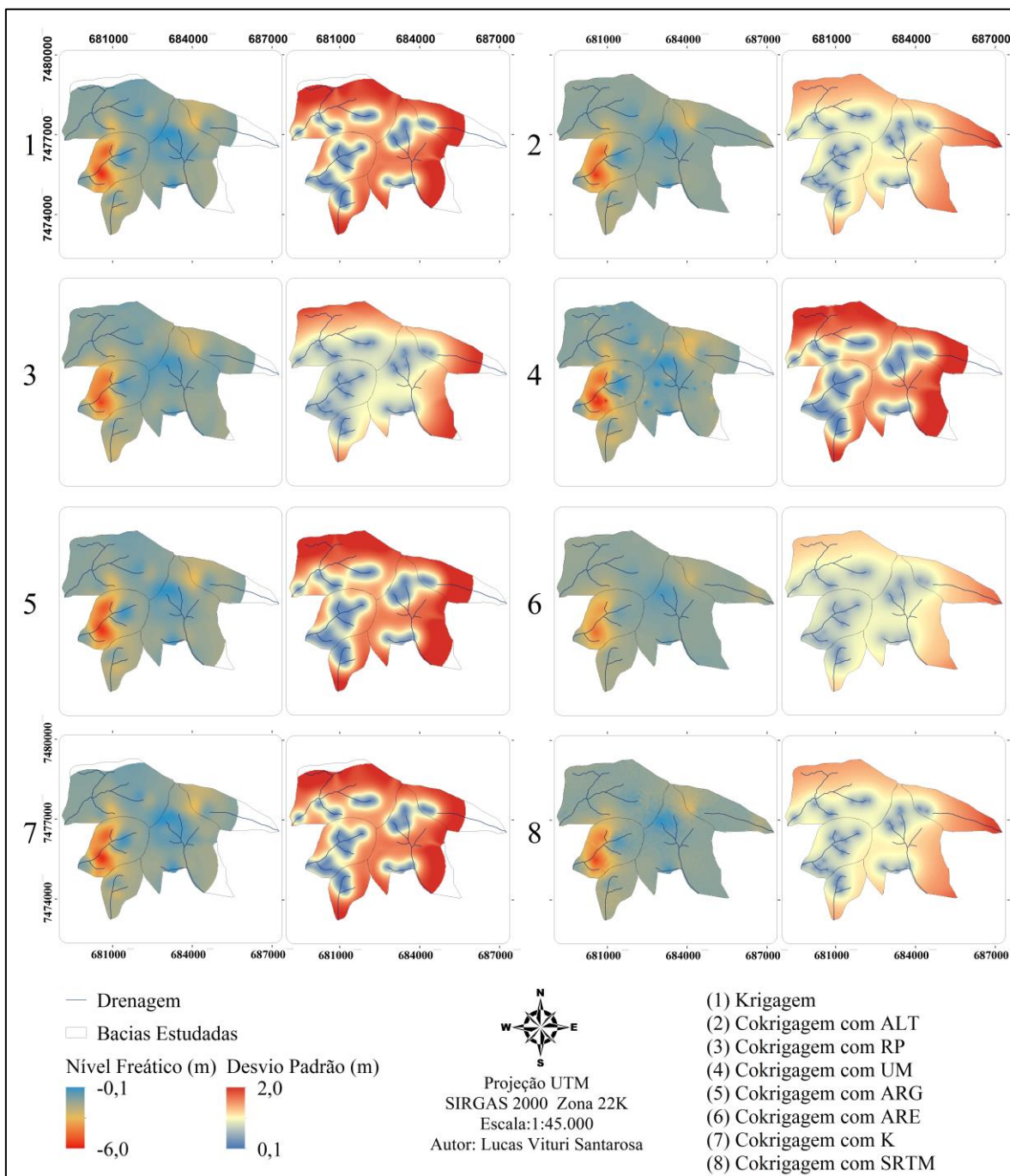


Figura 24. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 16/10/2015

A Figura 25 apresenta resultado completamente diferentes dos anteriores. Como mencionado na análise variográfica, a variância no conjunto amostral das

medições do dia 3 de dezembro de 2015 foi menor, provavelmente devido a redução da amplitude dos valores mensurados causada pela subida do nível freático (todos os níveis acima de 3 metros) em áreas que o nível costuma ser mais profundo.

O desvio padrão é menor em todas as interpolações fator completamente inverso as mensurações do dia 21 de novembro de 2014. Os destaques novamente são do uso da ARE, ALT, SRTM e RP como variáveis auxiliares.

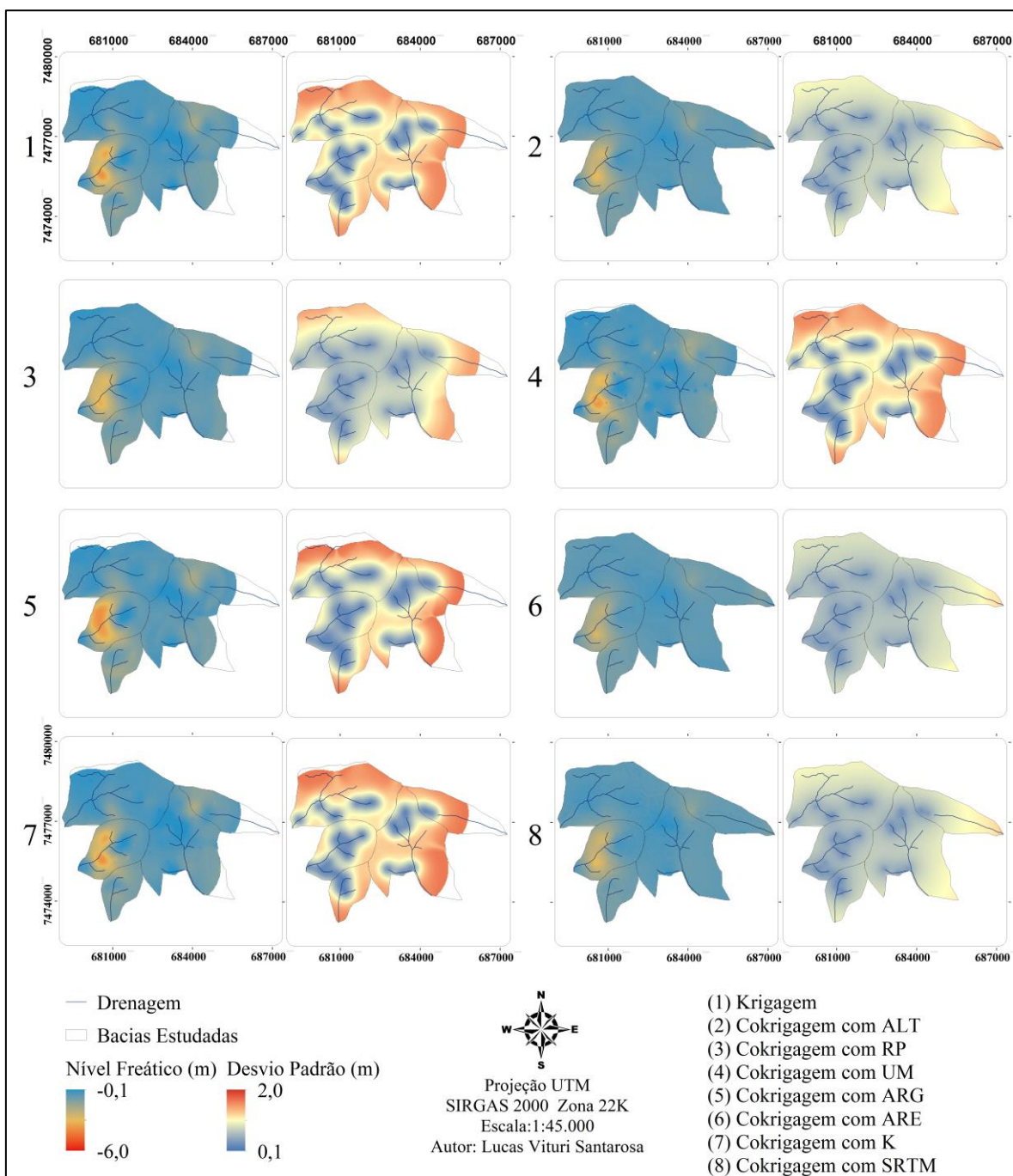


Figura 25. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 03/12/2015

De modo geral, os resultados analisados para a interpolação do nível frático com a avaliação dos parâmetros variográficos, da validação cruzada e dos mapas apresentados, mostra que a interpolação do nível freático pode sofrer variações com os diferentes conjuntos amostrais e com a sazonalidade do ciclo hidrológico local. Desta forma cada interpolação apresenta respostas diferentes diante das variáveis auxiliares utilizadas.

Os resultados da cokrigagem são mais satisfatórios em relação a krigagem, justamente pelo fato da variável auxiliar complementar o conjunto de dados e auxiliar na interpolação, muitas vezes garantindo melhores estimativas com redução da variância amostral e do desvio padrão e acrescentando algum sentido físico no comportamento do fenômeno mapeado. Podem ser destacados como as variáveis de maior sucesso o uso da ALT, SRTM, RP e, com menor expressividade, a UM e a ARE, como variáveis a serem utilizadas no mapeamento de aquíferos do tipo livre como o SAB.

As variáveis utilizadas apresentam alguma interrelação com o nível frático, porém, algumas variações nos métodos de mensuração dessas grandezas somadas a complexidade da dinâmica de oscilação do nível freático podem causar distorções na análise espacial fazendo com que os resultados sejam erráticos e não produzam o efeito esperado mesmo com uma alta correlação entre a variável principal e as variáveis secundárias.

4.2.5. Análise comparativa do conjunto amostral

Os resultados nas previsões apresentam grande nível de confiabilidade. Entretanto observou-se diferenças nos resultados ao comparar os conjuntos amostrais, com 30 ou 32 pontos em relação ao conjunto com 48 pontos. Deste modo, os 16 poços acrescentados ao conjunto amostral a partir de agosto de 2015 foi retirado para avaliação do aumento do número de poços com intuito de verificar o comportamento dos resultados da análise variográfica (Tabelas 23, 24 e 25), validação cruzada (Tabelas 26, 27 e 18) e da interpolação (Figuras 26, 27 e 28).

Esta comparação ajuda a definir se os custos operacionais com a perfuração de poços podem ser contornados com a utilização de variáveis estáticas ou relativamente estáticas que contribuam para o mapeamento do nível freático.

Ao observar as Tabelas 23, 24 e 25 e compara-las com Tabelas 13, 14 e 15, verificou-se principalmente a variância nos dados calculada pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0). Esta comparação foi realizada em cada Tabela e depois comparando o resultado geral entre os diferentes conjuntos amostrais. De modo geral, nota-se diferença nos modelos ajustado, assim como os valores do alcance (A_0) e da variância, menores com o conjunto amostral com 32 poços.

A Tabela 23 mostra que a ALT, ARE, RP e UM utilizadas como variável secundária apresentaram menor variância em relação a krigagem. Em relação ao parâmetros variográficos obtidos com 48 poços, a diferença foi encontrada apenas com uso da SRTM que apresentou melhor desempenho, as demais variáveis se retem.

Tabela 23. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 28/08/2015, utilizando 32 poços.

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A_0 (m)	C_0	C	Lags
32	KG	-	GAU	645,33	0,07	1,73	12
	COKG	ALT	EXP	2801,2	0,15	1,68	10
	COKG	RP	EXP	2984,00	0,13	1,78	12
	COKG	ARE	GAU	678,00	0,80	1,67	9
	COKG	ARG	GAU	766,00	0,10	1,90	9
	COKG	K	ESF	923,00	0,00	1,72	12
	COKG	UM	ESF	1030,00	0,00	1,07	11
	COKG	SRTM	EXP	3050,00	0,00	1,89	9

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A_0 : Alcance; C_0 : Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

A Tabela 24 apresentou uma variância menor com o uso da ALT, SRTM e UM. Nesta análise nota-se divergência nas variáveis com maior desempenho em relação aos parâmetros obtidos para a mesma data utilizando um número maior de amostras no conjunto (Tabela 14), que teve destaque com a utilização da RP, ARE e SRTM.

Tabela 24. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 16/10/2015, utilizando 32 poços.

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
32	KG	-	GAU	639,00	0,09	1,62	12
	COKG	ALT	EXP	2885,80	0,15	1,60	10
	COKG	RP	EXP	2983,00	0,10	1,65	12
	COKG	ARE	ESF	917,00	0,00	1,69	12
	COKG	ARG	ESF	926,30	0,00	1,70	9
	COKG	K	ESF	923,00	0,00	1,70	12
	COKG	UM	EXP	1661,00	0,00	1,41	12
	COKG	SRTM	EXP	2826,80	0,15	1,59	8

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Na Tabela 25 o uso da maioria das variáveis apresenta variância abaixo do encontrado para krigagem, exceto para K e UM. Resultado semelhante da estimativa com 48 poços, que não obteve bons resultados para as mesmas variáveis e para a o uso da ARG.

Tabela 25. Parâmetros variográficos da medição do nível freático no dia 03/12/2015, utilizando 32 poços.

Nº de poços	Interpolador	Variável Auxiliar	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
32	KG	-	GAU	808,30	0,13	1,05	9
	COKG	ALT	EXP	2801,20	0,08	0,99	10
	COKG	RP	EXP	2735,30	0,06	0,88	11
	COKG	ARE	EXP	1936,40	0,00	0,85	11
	COKG	ARG	EXP	1936,40	0,00	0,86	11
	COKG	K	ESF	808,30	0,00	0,94	9
	COKG	UM	ESF	1030,00	0,00	1,07	11
	COKG	SRTM	EXP	2843,50	0,10	0,87	8

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; ARG: Porcentagem de argila; K: Condutividade hidráulica; UM: Umidade do solo; ALT: Altimetria da carta topográfica; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Para avaliar a validação cruzada foram considerados a MS próxima de zero, o menor RMS possível, a média do ASE próxima da média padronizada e o RMSS próximo de 1. Foram consideradas determinantes para verificar a qualidade da interpolação

do nível freático o ASE, o RMSS e o R^2 , realizadas em cada Tabela depois comparando os diferentes conjuntos amostrais.

De modo geral, validação cruzada das interpolações com a utilização do conjunto amostral composto por 32 poços (Tabelas 26, 27 e 28) mostrou melhores resultados se comparados com o conjunto amostral com 48 poços (Tabelas 20, 21 e 22) verificada na maior quantidade de variáveis que contribuíram para redução do ASE comparando a krigagem ordinária com a cokrigagem.

Entretanto, os valores do R^2 com a utilização de 48 poços apresentou resultado mais satisfatórios, revelando que o modelo de previsão utilizado apresentou melhor grau de dependência ao comparar os valores mensurados e predito pela interpolação. Isso mostra que a estimativa foi mais eficaz com o conjunto amostral maior, mesmo com a constatação do aumento da variância e do ASE.

A Tabela 26 mostra que a maior parte dos valores obteve resultado do ASE abaixo do valor encontrado para a krigagem, com destaque para utilização da ALT, SRTM, RP e UM. O R^2 foi melhorado com a utilização da ALT, SRTM e RP. O RMSS apresentou resultado satisfatório na maioria das interpolações, exceto para a utilização da ARE, SRTM e UM.

Tabela 26. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 28/08/2015, utilizando 32 poços

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R^2
KG	-	0,8868	-0,0146	0,8681	0,9255	0,37
COKG	ALT	0,8453	-0,0146	0,9849	0,8001	0,39
COKG	RP	0,8445	-0,0144	0,9864	0,7959	0,39
COKG	ARE	0,9344	-0,0356	0,8911	0,9197	0,33
COKG	ARG	1,0271	-0,0630	0,9637	0,8936	0,27
COKG	K	0,8722	-0,0105	0,9413	0,8961	0,38
COKG	UM	0,6960	-0,0126	1,0589	0,6613	0,31
COKG	SRTM	0,8196	-0,0359	1,0947	0,6974	0,43

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R^2 : coeficiente de determinação.

Na Tabela 27, assim como na Tabela 26, a maior parte dos valores obteve resultado de ASE abaixo do valor encontrado para a krigagem, com destaque para a ALT, SRTM, RP e UM. O R^2 foi melhorado com uso de muitas variáveis, principalmente a ARE e RP. O RMSS apresentou resultado satisfatório na maioria das interpolações, exceto

para a utilização da granulometria (ARE e ARG) e K, abaixo do ideal, outras variáveis ficaram acima do ideal, mas em uma proporção aceitável.

Tabela 27. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 16/10/2015, utilizando 32 poços

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,8593	-0,0090	0,8792	0,9269	0,37
COKG	ALT	0,8273	-0,0132	1,0077	0,7798	0,38
COKG	RP	0,8135	-0,0155	1,0309	0,7465	0,40
COKG	ARE	0,8279	-0,0200	0,8195	0,9232	0,40
COKG	ARG	0,8439	-0,0202	0,8589	0,9028	0,38
COKG	K	0,8347	-0,0081	0,9169	0,8962	0,39
COKG	UM	0,8348	-0,0393	1,0476	0,7373	0,38
COKG	SRTM	0,8458	-0,0313	1,0363	0,7765	0,36

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

Na Tabela 28 o ASE com uso das variáveis foi melhor que o encontrado na krigagem, apenas a K obteve uma redução pouco significativa. O coeficiente de determinação foi melhor apenas com o uso da granulometria (ARE e ARG) como variável auxiliar. E o RMSS ficou acima do ideal na maioria dos casos.

Tabela 28. Validação cruzada para a interpolação do nível freático no dia 03/12/2015, utilizando 32 poços

Interpolador	Variável Auxiliar	RMS	MS	RMSS	ASE	R ²
KG	-	0,6673	-0,0104	0,8767	0,7224	0,29
COKG	ALT	0,6628	-0,0142	1,0948	0,5803	0,27
COKG	RP	0,6559	-0,0157	1,1109	0,5665	0,29
COKG	ARE	0,6410	-0,0292	1,1011	0,5690	0,32
COKG	ARG	0,6444	-0,0309	1,1016	0,5701	0,32
COKG	K	0,6890	0,0061	0,9759	0,7165	0,25
COKG	UM	0,6960	-0,0126	1,0589	0,6613	0,24
COKG	SRTM	0,6787	-0,0272	1,1007	0,5914	0,24

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); R²: coeficiente de determinação.

De modo geral, quando comparamos as Figuras 26, 27 e 28, interpoladas utilizando 32 poços, com as Figuras 23, 24 e 25, interpoladas utilizando 48 poços, verifica-se que o desvio padrão foi menor com a utilização do menor conjunto amostral.

Na Figura 26 destaca-se bons resultados com a utilização da ALT, SRTM, UM e RP, enquanto que na Figura 23 os melhores resultado foram encontrados também com o uso da ALT, SRTM e ARE. A RP apresetou os melhores resultados apenas proximo as áreas dos poços de monitoramento.

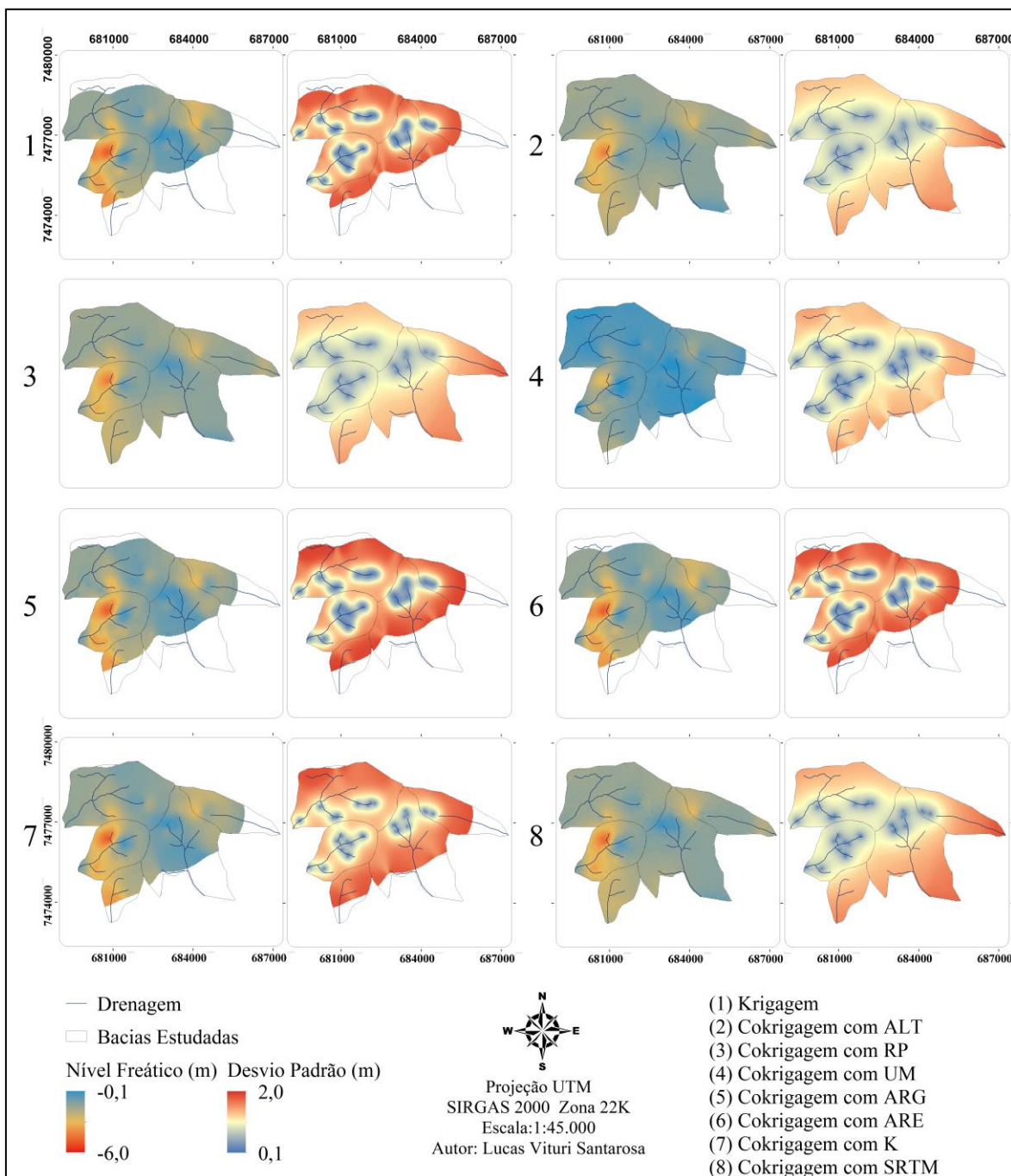


Figura 26. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 28/08/2015 utilizando 32 poços

Na Figura 27 os resultados foram parecidos com os da Figura 26, com bons resultados com a utilização da ALT, SRTM, UM e RP. A comparação entre os

conjuntos amostrais também mostra os mesmos resultados uma vez que a Figura 24 apresenta resultados parecidos com a Figura 23, nas quais os melhores resultados foram encontrados também com o uso da ALT, SRTM e ARE. A RP novamente com os melhores resultados apenas próximo as áreas dos poços de monitoramento.

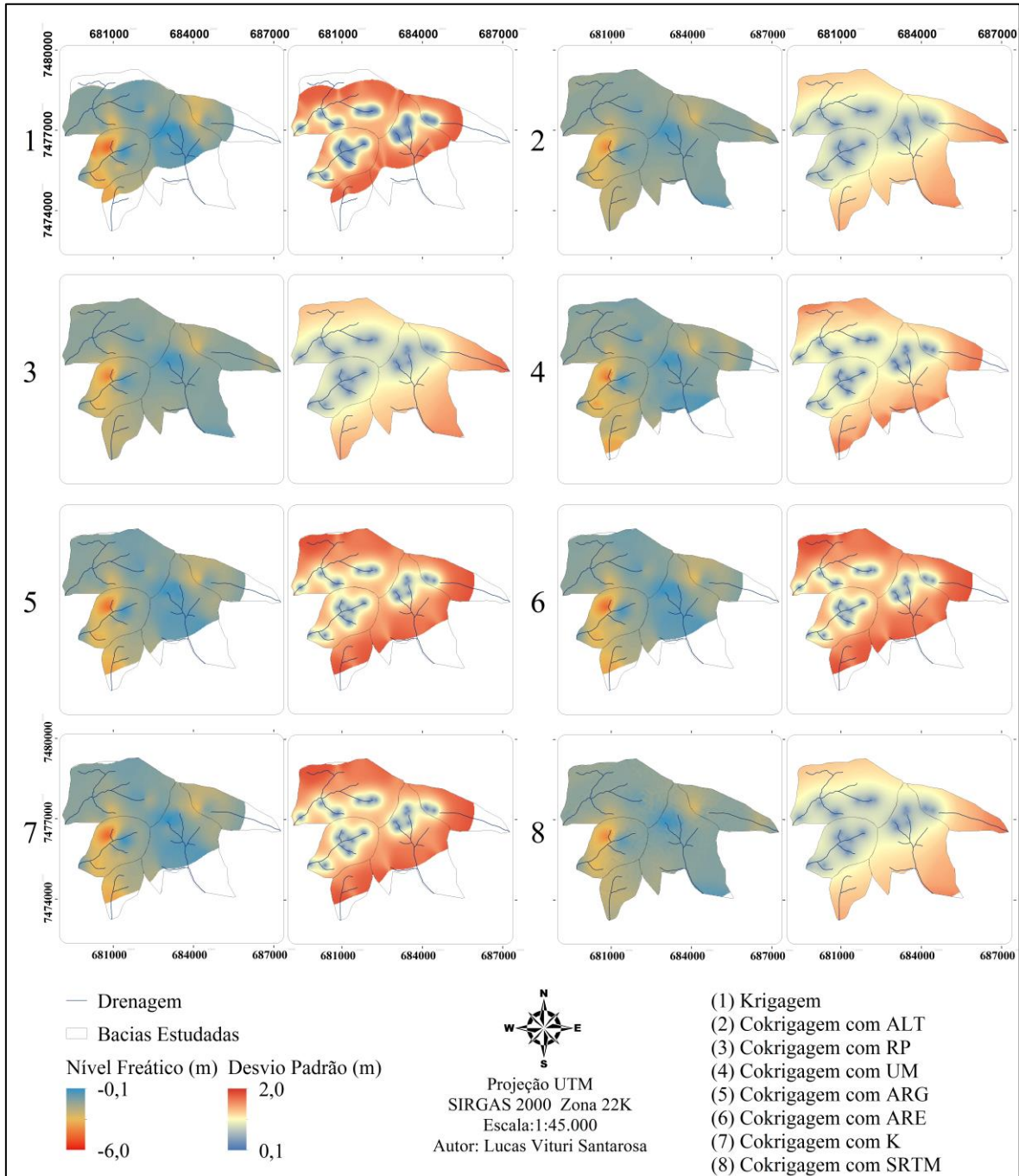


Figura 27. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 16/10/2015 utilizando 32 poços

A Figura 28 apresenta melhores resultados que as medições anteriores, com menor desvio padrão na maioria das interpolações, exceto com a utilização da K e ARG. Um resultado considerável, comparado com a Figura 25 que obteve melhorias, mas manteve destaque nas mesmas variáveis secundárias apresetadas nos mapas das Figuras 26 e 27.

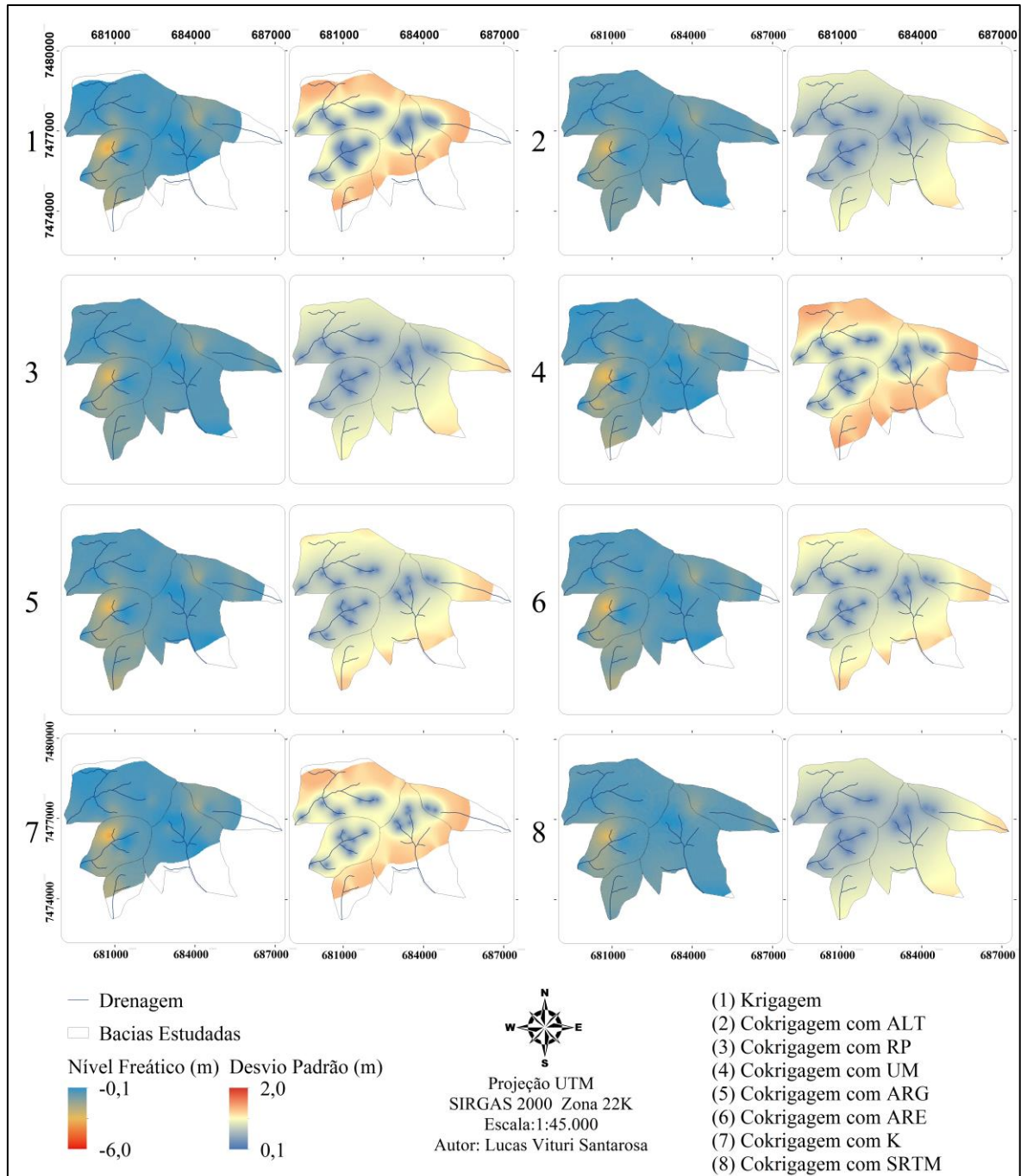


Figura 28. Mapas do nível freático e de desvio padrão para as medições do dia 03/12/2015 utilizando 32 poços

A análise comparativa dos diferentes conjuntos amostrais apresentada revela que nas duas situações existem vantagens. A interpolação com um conjunto amostral menor apresentou menor desvio padrão. Entretanto, o R^2 foi mais baixo para o conjunto amostral menor, revelando a baixa qualidade da interpolação em relação ao grau de dependência espacial dos valores preditos e mensurados.

Contudo, é preferível utilizar um conjunto amostral maior para que, mesmo com o aumento das incertezas na predição, o modelo seja mais eficiente. Mas é importante levar em conta que a incorporação de uma variável ambiental “estática” pode favorecer o monitoramento do nível freático que apresente restrições operacionais para incorporação de novos poços de monitoramento. A vantagem de coletar informações auxiliares está na facilidade e no custo inferior em relação ao aumento dos poços de monitoramento, que necessita de uma grande equipe de trabalho, equipamentos e veículos disponíveis para perfuração e monitoramento periódico dos poços, além do orçamento capaz de manter todas essas atividades.

4.3. Volume de água recuperado

Com o mapeamento realizado foram selecionados os melhores mapas para realização do cálculo do volume explorável de água ou o montante de água que foi recuperado no período estudado. Para isso foi realizada a seleção das melhores interpolações e realizados os procedimentos descritos no item 4.5. Os mapas selecionados foram aqueles resultantes da cokrigagem utilizando como variável auxiliar a altimetria retirada da carta topográfica (ALT). O cálculo foi estruturado a partir de dois momentos da retomada do nível freático: (R1) do dia 21 de novembro de 2014 até 05 de maio de 2015 e (R2) do dia 16 outubro a 03 de dezembro de 2015 (R2) (Figura 29).

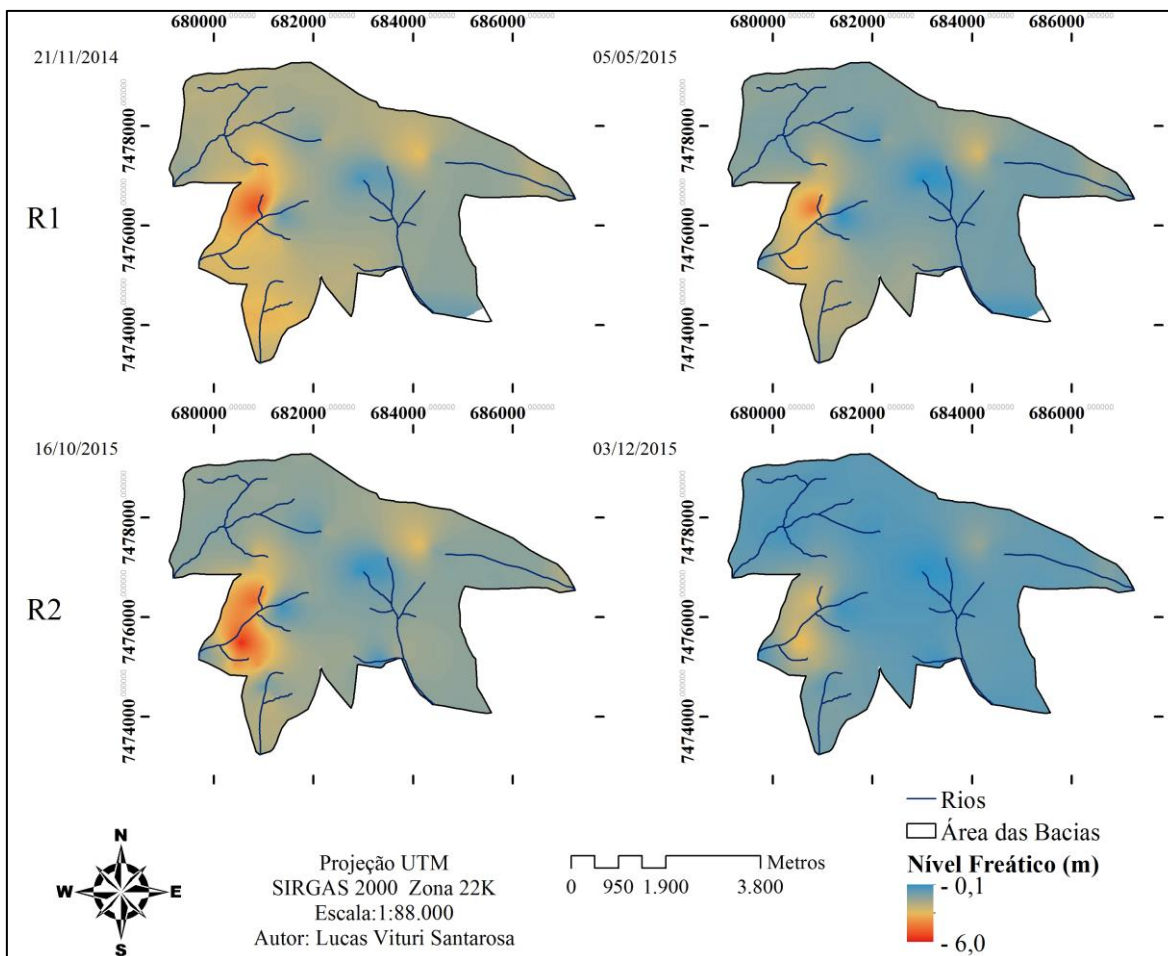


Figura 29. Mapas do nível freático para R1 e R2 utilizados no cálculo do volume de água explorável

Aplicando a Equação 6 os valores de cada pixel, que representavam a profundidade do nível freático, foram convertidos em volume de água recuperado em cada período (R1 e R2). Os valores totais são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29. Volume de água recuperado em R1 e R2

	Volume (m ³)
R1	1.491.271,00
R2	2.069.901,00
Total	3.561.172,00

O valor acumulado total de precipitação responsável pelas retomadas do nível temos cerca de 890 mm para R1 e 470 mm para R2 (1360 mm), este valor convertido em volume em relação a área das bacias estudadas (2.549 hectares)

representa um volume precipitado de 34.659.530,64 m³. O valor recuperado total equivale a 10% da chuva incidente e representa uma recarga de 140 mm (Tabela 30).

Tabela 30. Volumes armazenados no aquífero nos períodos R1 e R2

	R1	R2	Total
Período de recuperação (Dias)	166	49	-
Precipitação Total (mm)	890,00	470,00	1.360,00
Volume precipitado (m ³)	22.681.604,61	11.977.926,03	34.659.530,64
Área (m ²)	25.485.000,00		
Volume recuperado (m ³)	1.491.271,00	2.069.901,00	3.561.172,00
Relação entre o volume precipitado e o recuperado (%)	7,00	17,00	10,00
Recarga em (mm)	58,00	81,00	140,00

Nota-se que no R2 a chuva foi mais concentrada proporcionando uma recarga maior em um período mais curto. Assim, é possível inferir que o volume a ser captado dependerá diretamente do comportamento da precipitação, uma vez que a oscilação do nível freático é muito sensível aos eventos de chuva.

Considerando os valores calculados e que seja possível captar 30% (Tabela 32) desse volume recuperado na área das bacias da EECSB e o consumo médio nos municípios de Águas de Santa Bárbara, Manduri e Cerqueira Cesar (Tabela 31) segundo os dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS). Esse volume seria capaz de suprir o abastecimento para população dos municípios por 3 meses, considerando ainda uma perda 20% no sistema de captação e distribuição de água.

Tabela 31. Volume de água necessário para abastecimento dos municípios próximos a EECSB.

Municípios	Águas de Santa Bárbara	Manduri	Cerqueira Cesar	Total
Consumo médio per capita (l/dia)	201,00	277,00	222,00	-
População (hab.)	5.600,00	8.900,00	17.530,00	32.030,00
Consumo mensal (m ³)	33.768,00	73.959,00	116.750,00	224.477,00

Tabela 32. Simulação de volume captado (m³) e meses de abastecimento supridos

	R1	R2	Total
Volume captado (m ³) – 30%	357.905,04	496.776,24	854.681,28
Meses de abastecimento supridos	1,30	1,80	3,10

Com os cálculos realizados justifica-se a importância de aquíferos do tipo livre utilizado como meio natural de estoque e disponibilização das águas das chuvas. Estudos com este permitem medir a relação percentual da precipitação que estará disponível para captação, considerando neste caso apenas parte do volume de entrada, o que não afetaria os regimes hídricos naturais locais. Contudo, identifica-se a potencialidade dos aquíferos livres como fontes de abastecimento estratégicos de curto prazo, uma vez que as oscilações nos níveis são de escala mensal.

O SAB apresenta grande potencialidade para este fim o que reforça a necessidade de uma gestão eficiente, capaz levantar as potencialidades regional e mensurar os volumes disponíveis. Para isso é fundamental que ocorra promoção de práticas conservacionistas, tal qual a criação de áreas de preservação como a EECSB com a capacidade de captar, filtrar e disponibilizar volumes de água para suprir as demandas dos municípios em períodos críticos como a estiagem de 2014.

Outra forma de utilizar a potencialidade dessas áreas seria gerenciando uma recarga induzida por meio de estratégias de Manejo Artificial de Recarga (MAR) que poderia ser destinada para purificação de volumes de águas que necessitem de tratamento simples ou armazenamento com o uso de pequenas barragens.

Estas medidas proporcionariam a utilização de volumes que teriam que ser tratadas ou devolvidas diretamente nos cursos hídricos ou manteria estoques subterrâneos infiltrados lentamente. Ambos seriam volumes fundamentais a serem explorados com uma água de qualidade superior sem grandes custos no tratamento, uma vez que a filtração seria feita naturalmente, ou disponibilizar volumes excedentes do período úmido para o período seco, característico do inverno.

4.4. Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC)

Os dados reunidos para elaboração do MHC permitiram a formulação de diferentes produtos cartográficos que auxiliam na interpretação da dinâmica das águas subterrâneas nos domínios da EECSB.

As Figuras 30, 31 e 32 representam a oscilação máxima e mínima do nível potenciométrico, referentes aos níveis das medições do dia 21 de novembro de 2014 e 03 de dezembro de 2015, respectivamente os menores e maiores níveis mensurados. Este levantamento foi associado ao mapa de condutividade hidráulica calculado pelo

método de Hazen, a espessura média da camada dos arenitos do Grupo Bauru (em torno de 40 m ao sul da área e 50 metros ao norte) estimada pelos dados dos poços da CPRM, e a altimetria, possibilitando a aplicação das ferramentas do pacote *Groundwater*.

Foram utilizados os dados da carga hidráulica, que para aquíferos livres é igual ao nível potenciométrico, estimada pela diferença entre a altitude e o nível freático; da espessura saturada, estimada pela definição da espessura média da camada de arenito; da transmissividade, obtida pela multiplicação dos valores de condutividade hidráulica pela espessura da camada saturada; e da porosidade específica do aquífero, considerada como 10% conforme apresentado no item 3.5.

A combinação dos dados no pacote *Goundwater* utilizando as ferramentas *Darcy Velocity*, que calcula os vetores de velocidade e a magnitude da água subterrânea baseados na Lei de Darcy (Figuras 30 e 31), e *Particle Track*, que estima o caminho de uma partícula baseada na direção e na magnitude, possibilitaram a estimativa da direção dos fluxos subterrâneos (Figura 32).

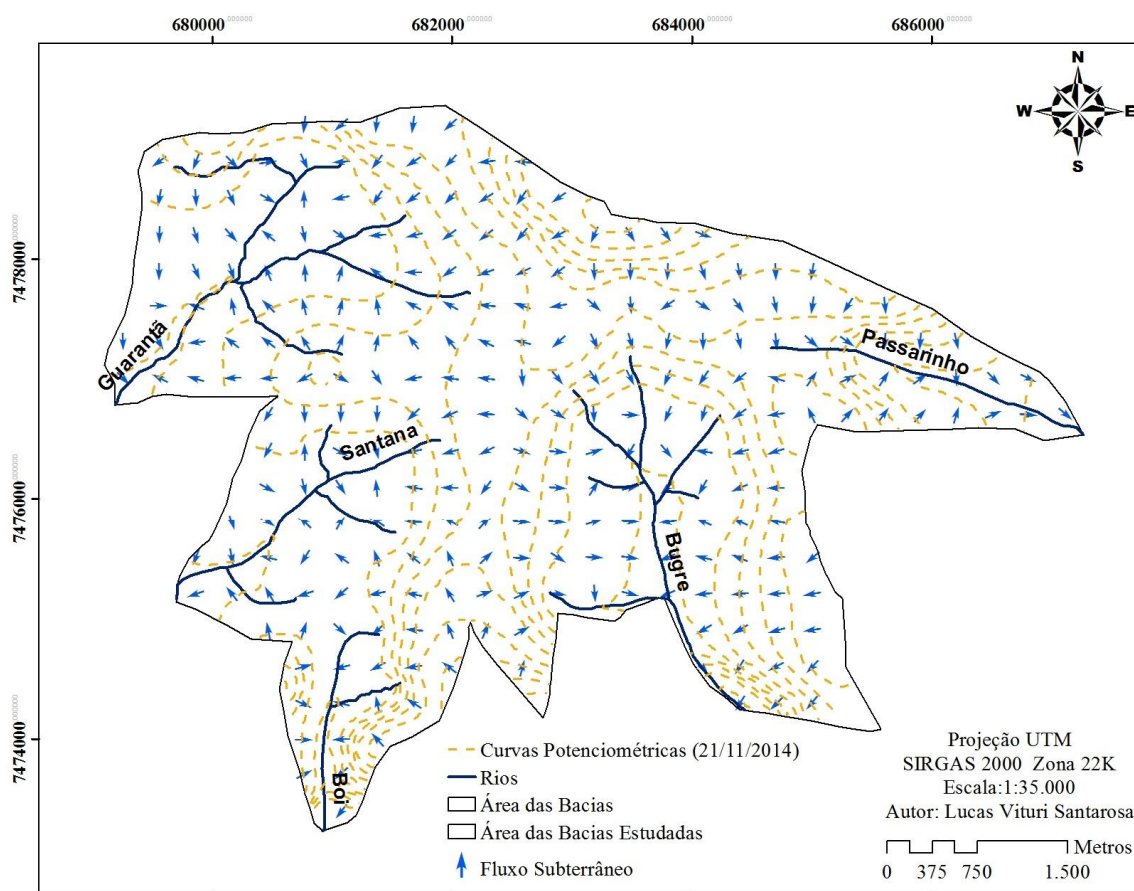


Figura 30. Mapa potenciométrico da EECsB para o dia 21/11/2014 e fluxos subterrâneos predominantes

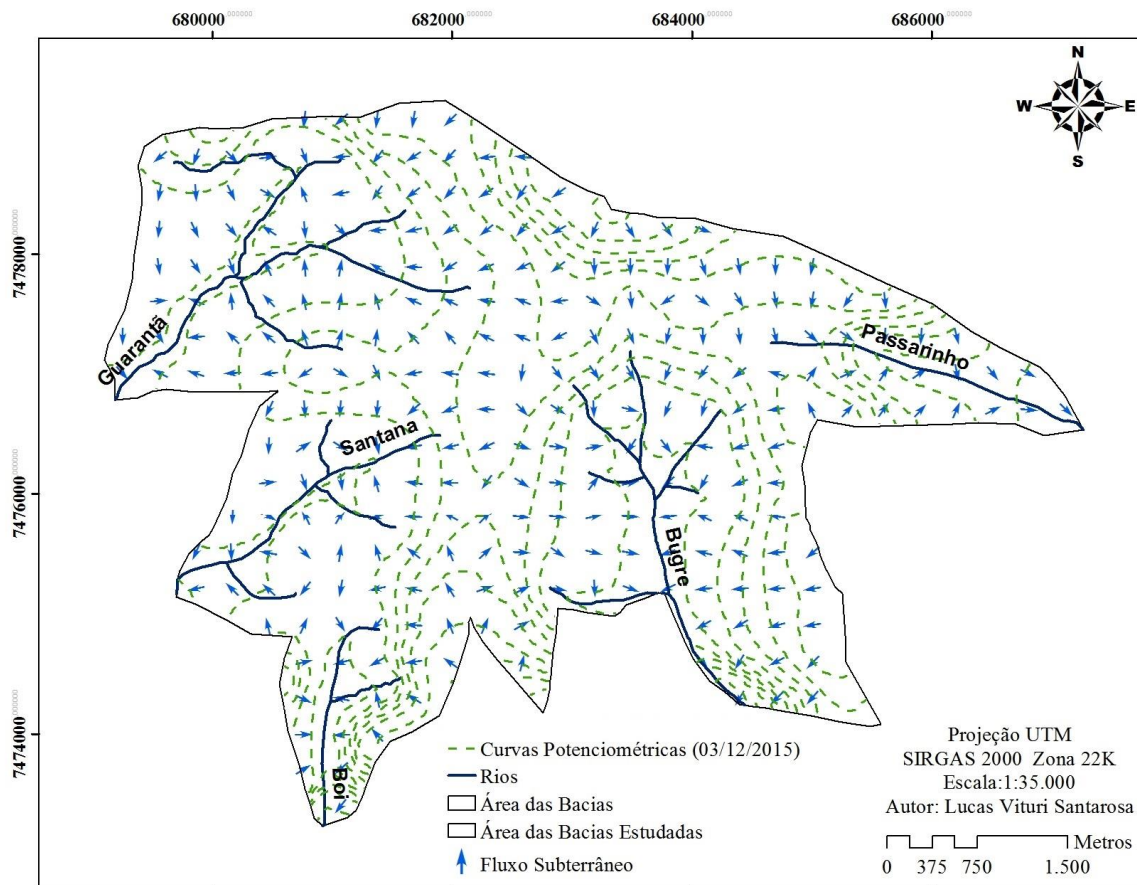


Figura 31. Mapa potenciométrico da EECsB para o dia 03/12/2015 e fluxos subterrâneos predominantes

Notou-se alterações entre os níveis potenciométricos de um período para outro. Uma alteração pouco perceptível nas áreas com valores mais elevados e que apresentam gradiente mais intenso, representado pela proximidade entre as curvas potenciométricas. É possível inferir que nessas áreas existe maior velocidade no escoamento e que são predominantemente áreas de recarga, que transmitem a água interceptada para as áreas mais baixas no sentido dos fluxos. Variações maiores nos níveis potenciométricos foram verificadas nas proximidades dos cursos hídricos do Guarantã, Santana e Boi, sendo menos expressiva no Bugre e no Passarinho, estas variações podem ser verificadas também na sensível alteração vetores dos fluxos das mesmas áreas.

A Figura 32 apresenta os percursos dos fluxos simulados a partir do *Particle Track* simulando o fluxo subterrâneo a partir dos vetores calculados. Nota-se que o escoamento subterrâneo segue o padrão do nível potenciométrico e não foram diferentes para as duas datas representadas, pode-se aferir que as formas de relevo são predominantes

no padrão da circulação da água subterrânea na EECSB em relação aos outros dados utilizados no cálculo dos vetores de velocidade.

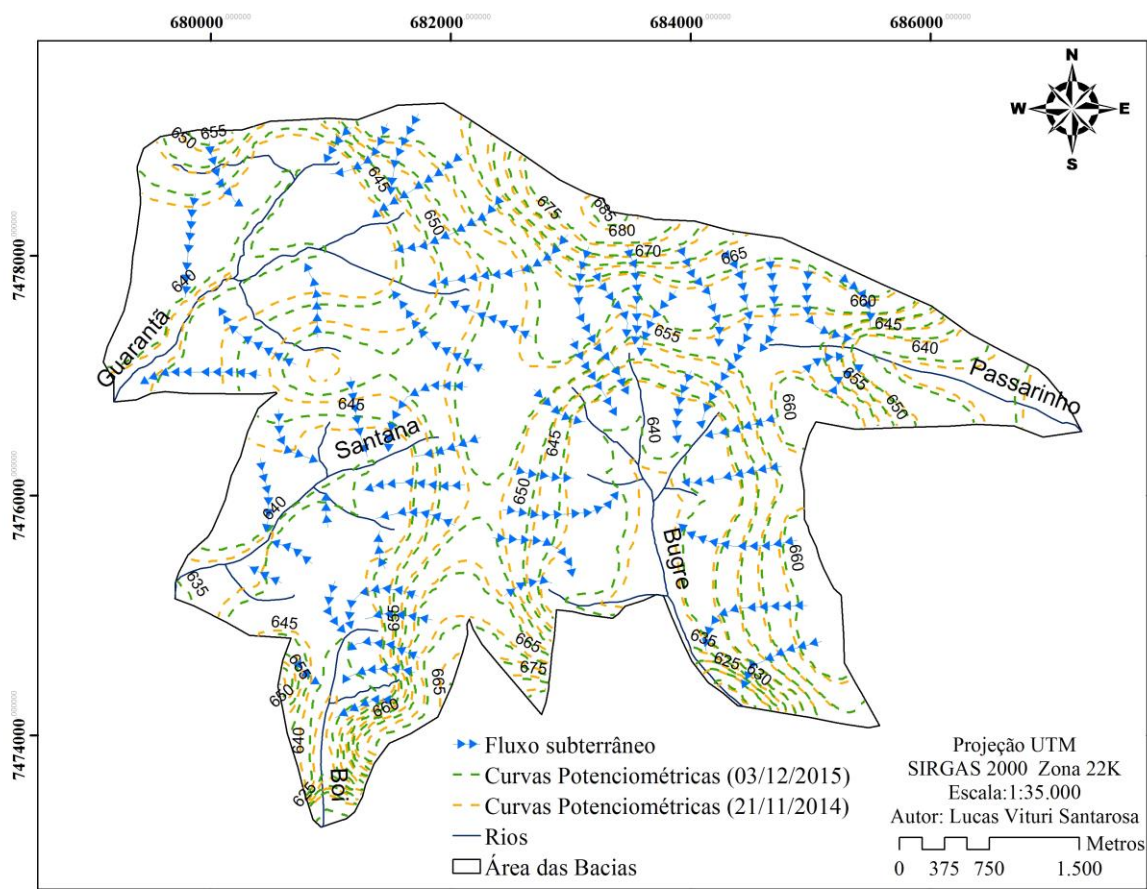


Figura 32. Comparação entre os níveis potenciométricos da medição do dia 21/11/2014 e 03/12/2015

Este comportamento na modelagem do fluxo pode estar associado a relativa homogeneidade do material do subsolo, a representatividade da oscilação do nível freático em relação a escala dos dados e/ou a qualidade das informações utilizadas para realização da estimativa de fluxo, abrindo precedentes para um levantamento mais detalhado para formulação de um modelo mais completo, capaz de fazer a representação mais detalhada dos fluxos.

Nessa análise, foi possível observar três padrões de fluxo:

- 1) Escoamento na direção das bacias da região oeste, seguindo o sentido das bacias do Guarantã, Santana e Boi em direção do Rio Capivari;
- 2) Escoamento na direção da Bacia do Bugre com maior recepção dos fluxos gerados ao norte da área indo no sentido sul; e

- 3) Uma representatividade menor de fluxos no extremo leste, na direção da Bacia do Passarinho, revelando menor volume de água desta região que contribui para vazão do Rio Capão Rico.

Para melhor visualização deste padrão foi feita a construção de um modelo 3D (Figura 33 e 34). Na Figura 33, observa-se a imagem no sentido sudoeste-nordeste destacando as bacias do Guarantã, Santana e Boi, onde foi possível notar a divisão dos sentidos dos fluxos marcada pelo divisor de águas entre essas bacias e a bacia do Bugre.

A observação neste ângulo permitiu identificar que o nível mais baixo da água subterrânea na região da bacia do Santana pode ter relação direta com a forma do relevo que está voltado para o Rio Capivari e ao mesmo tempo se acentua no sentido da Bacia do Boi na direção do Rio Pardo, que pode ser um fator determinante e mantém a permanente redução dos níveis na região da bacia do Santana. Esse processo só é alterado quando ocorre a saturação da jusante da Bacia do Boi no sentido da Bacia do Santana, elevando os níveis na área.

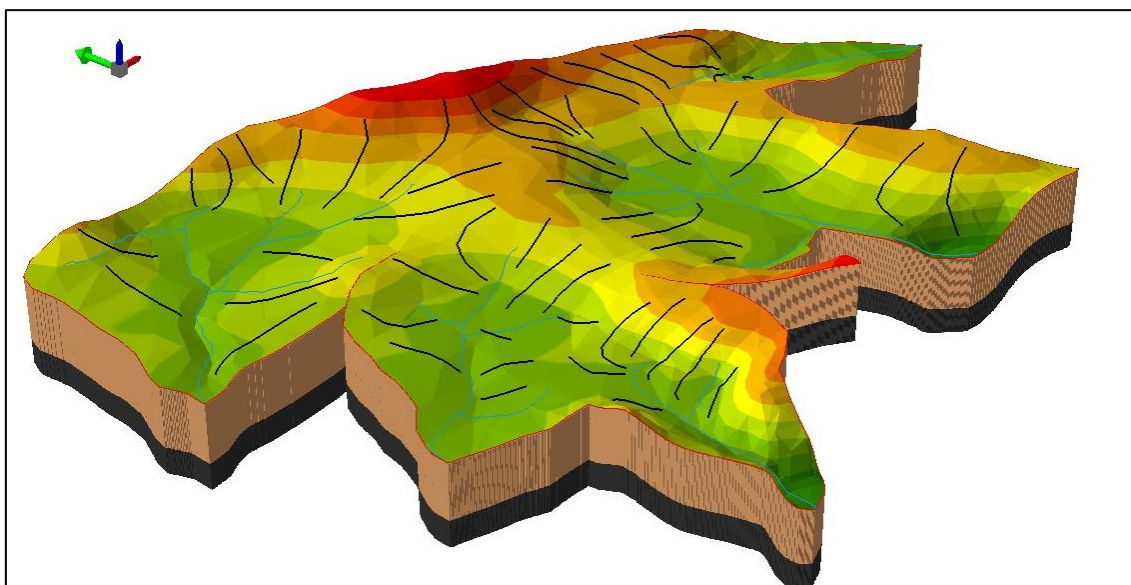


Figura 33. Perfil em três dimensões do relevo, da espessura de arenito e dos fluxos no sentido sudoeste-nordeste.

A Figura 34 mostra a visada no sentido sudeste-noroeste, destacando a imponência da Bacia do Bugre na região central da área com os fluxos subterrâneos convergindo no sentido da drenagem. É possível inferir que esta característica

associada a topografia da bacia permite a manutenção da elevação do nível conforme verificado nos mapas do nível freático.

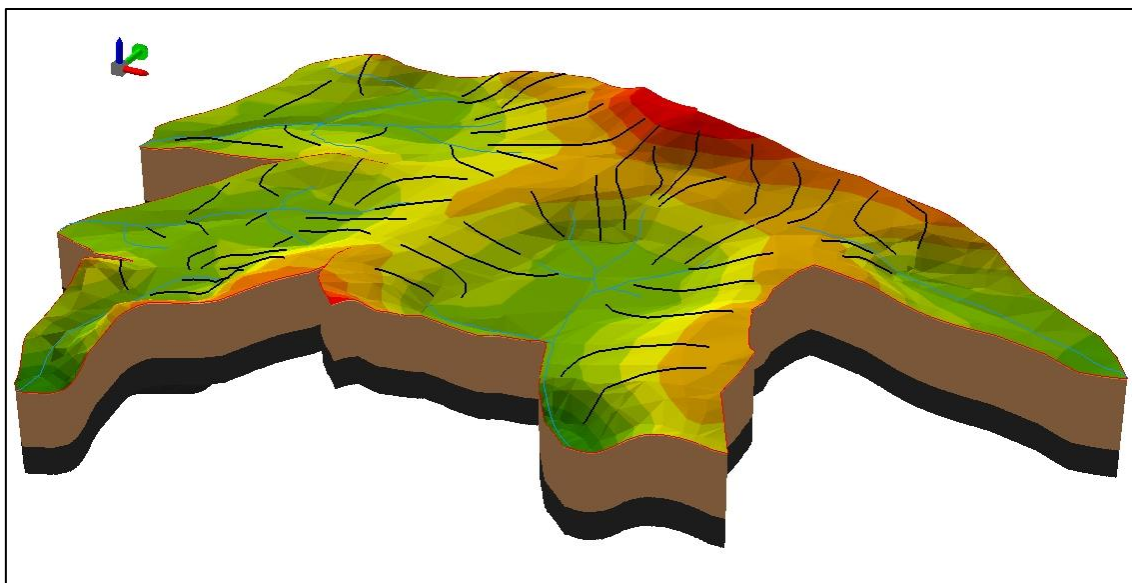


Figura 34. Perfil em três dimensões do relevo, da espessura de arenito e dos fluxos no sentido sudeste-noroeste.

É importante mencionar que parte das estimativas para as regiões dos divisores de água nesta área apresenta incertezas devido ao fato da maioria dos poços terem sido perfurados nas regiões próximas a drenagem.

Para complementar esta análise foram gerados perfis longitudinais simulando as camadas e os fluxos subterrâneos baseado na interpretação dos dados coletados. Para isso foram selecionados três perfis que pudessem explicar a dinâmica da água subterrânea, a Figura 35 apresenta as secções utilizadas para elaboração dos perfis: (A-B) da bacia do Guarantã, passando pela Bacia do Santana até a Bacia do Boi; (C-D) da bacia do Guarantã, passando pela montante da bacia do Bugre até a nascente do Ribeirão Passarinho e; (E-F) da bacia do Santana até a Bacia do Bugre.

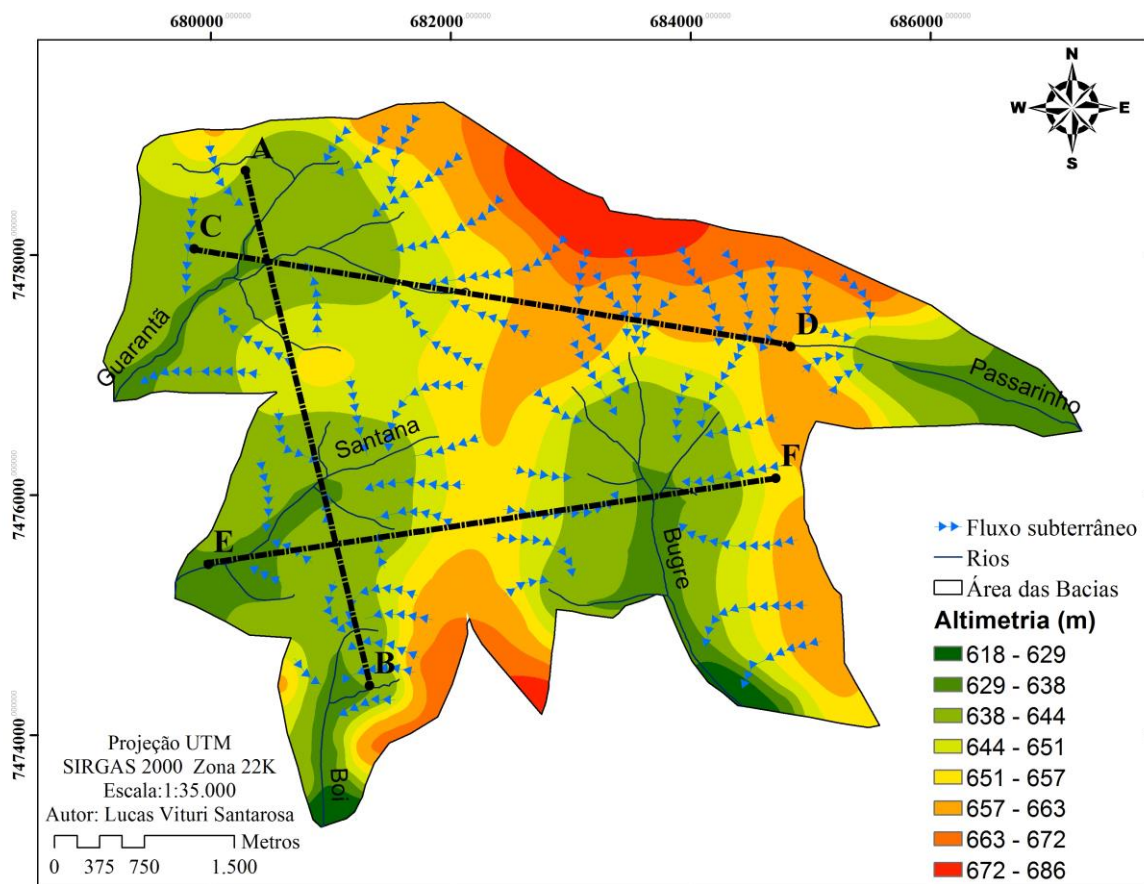


Figura 35. Seções escolhidas para elaboração dos perfis longitudinais

Para o perfil A-B (Figura 36) estima-se que existam fluxos menores na direção das drenagens e um fluxo conectando as três bacias no sentido da bacia do Rio Capivari na condição de afluente do Rio Pardo. Acredita-se na existência de fluxos de drenagem profunda na formação Serra Geral a partir de fissuras conectando o aquífero Bauru ao Aquífero Serra Geral e, possivelmente, o Guaraní. Esta constatação está pautada na nos níveis freáticos mais profundo na bacia do Santana

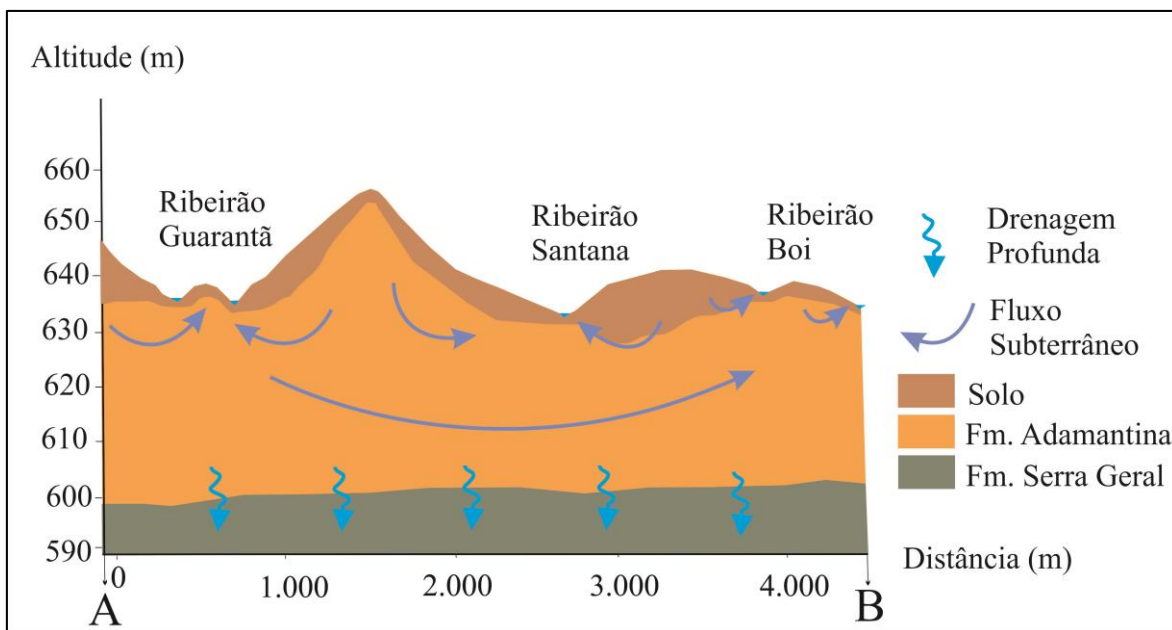


Figura 36. Perfil longitudinal A-B

No perfil C-D (Figura 37) estima-se uma dinâmica entre a bacia do Guarantã, passando pela montante da bacia do Bugre até a nascente do Ribeirão passarinho. Baseado no gradiente hidráulico proporcionado pelo relevo, é possível inferir que existe um fluxo maior no sentido do ribeirão Guarantã.

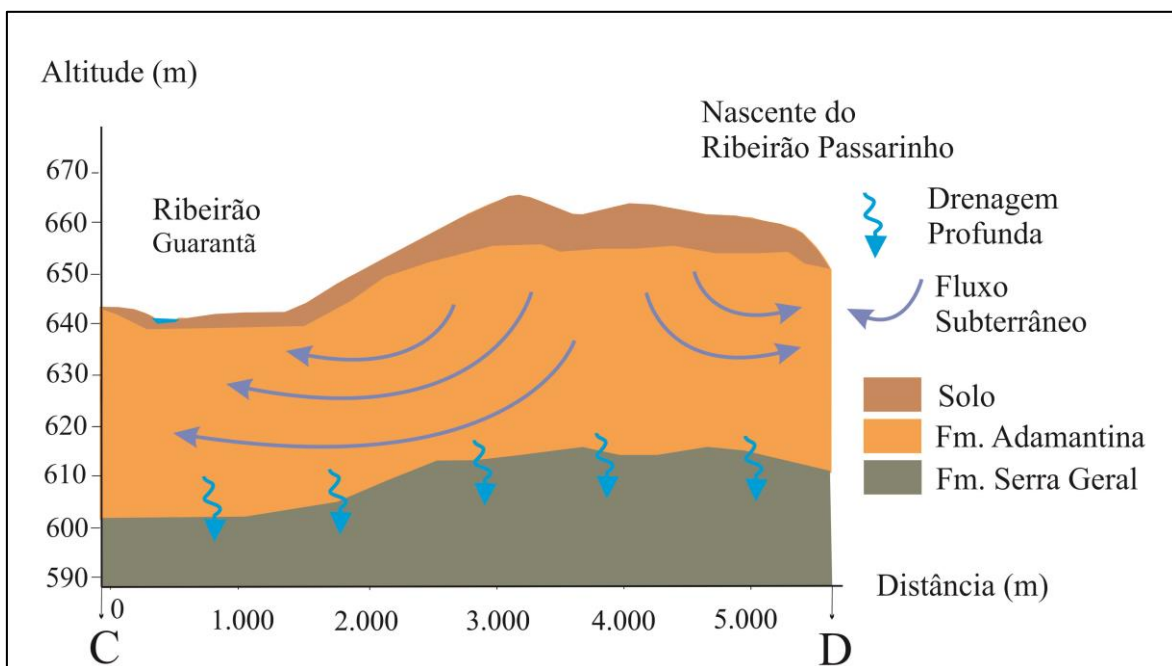


Figura 37. Perfil longitudinal C-D

No perfil E-D (Figura 38) estima-se que existe a predominância dos fluxos no sentido da drenagem do Ribeirão Bugre, com a existência de um fluxo mais no sentido da bacia do Santana devido ao nível potenciométrico calculado e a diferença de altitude, além de uma drenagem profunda como apresentado no perfil A-B.

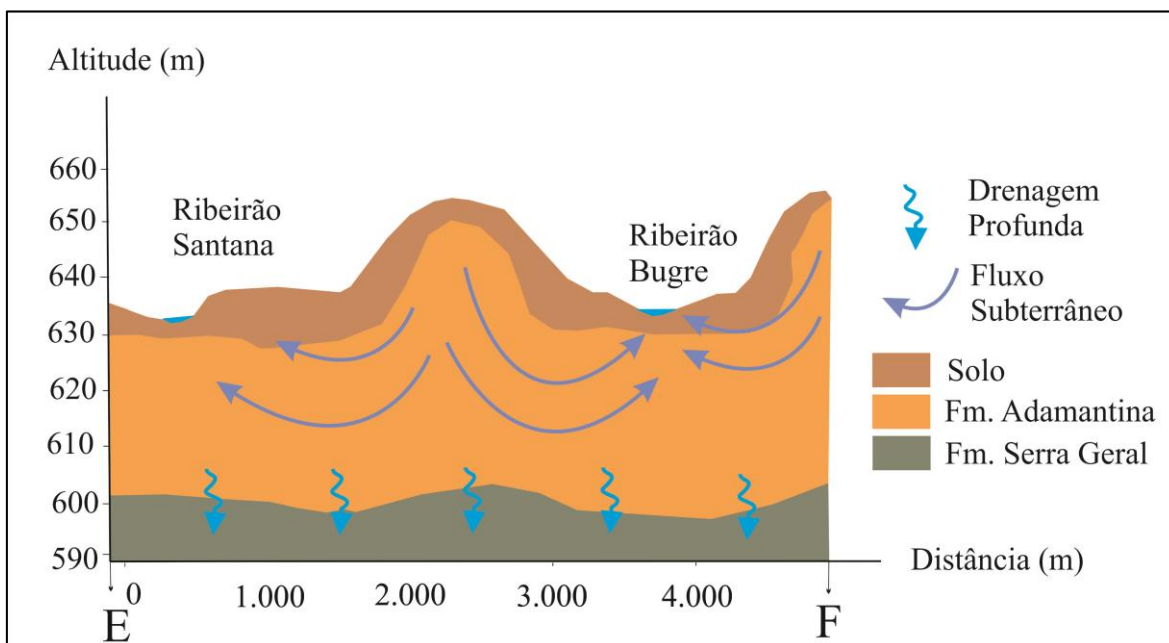


Figura 38. Perfil longitudinal E-F

Contudo, as informações reunidas neste estudo permitem realizar inferências importantes em relação a dinâmica das águas subterrâneas capazes de fornecer dados fundamentais para uma gestão das águas subterrâneas na região. Este estudo abre o precedente para aprofundamento do levantamento de dados mais precisos para uma modelagem mais completa. Este conhecimento permite a interpretação de dinâmicas dos recursos hídricos para que a tomada de decisão seja mais eficaz com a solução de questões emergenciais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, foi possível constatar que o uso de diferentes propriedades físico-hídricas do solo, com destaque para a resistência do solo a penetração e do relevo, como variáveis secundárias para interpolação dos níveis freáticos obteve bons resultados. O uso da cokrigagem como interpolador mostrou-se superior se comparado com os resultados obtidos pela krigagem. São perceptíveis melhorias nos parâmetros variográficos, na validação cruzada e nos mapas de desvio padrão. Em alguns casos, mesmo não apresentando melhoras nos parâmetros, a cokrigagem permitiu o maior alcance das predições, para além da área das medições, ampliando a escala da informação. Fato fundamental para a gestão das águas subterrâneas, pois a interpolação de dados foi capaz de transpor os limites inerentes aos levantamentos de dados para estudo das águas subterrâneas. Barreiras muitas vezes impostas pelos recursos disponíveis para estudos ou pelo próprio ambiente.

Assim, pode-se atribuir como vantagem na adoção das variáveis auxiliares a facilidade de coleta dos dados, uma vez que são dados relativamente “estáticos” que teriam coletas realizadas numa periodicidade menor, e apresentam menor custo em relação ao aumento da malha de poços de monitoramento. Pois uma grande quantidade de poços de monitoramento exige mais recursos: uma equipe maior, disponibilidade de equipamentos e veículos para perfuração e monitoramento dos poços.

O volume recuperado estimado pode ser utilizado para suprir a demanda de abastecimento para uma população superior a 30.000 habitantes dos municípios próximos a EECSB em períodos de escassez hídrica, como a que foi vivenciada no ano hidrológico de 2013/2014. Assim, áreas como a EECSB pode ser utilizada de forma estratégica com a capacidade de captar, filtrar e disponibilizar volumes de água para suprir as demandas períodos críticos, gerenciando a recarga dessas áreas por meio de estratégias de Manejo Artificial de Recarga (MAR).

O comportamento temporal e espacial do nível freático, suas respostas diante dos episódios de precipitação, os fluxos subterrâneos, as características das dinâmicas e a relação entre as bacias estudadas que foram contemplados pelo Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) permitem conhecer, mesmo que superficialmente, muitas das dinâmicas da água na área de estudo. Tais dados podem subsidiar o plano de gestão dentro da EECSB para formular uma gestão eficiente capaz de proteger os recursos hídricos subterrâneos locais.

A realização de estudos como este permite melhorar o conhecimento dos nosso aquíferos e se faz necessário no caso de aquíferos do tipo livre como o SAB considerando que são vulneráveis as ações antrópicas e extremamente voláteis as mudanças nos regimes pluviométricos. Portanto, além de pensar em seu uso estratégico para exploração sustentável é importante conhecer seus limites e as funções ecológicas que dependem da boa qualidade desse sistema aquífero e traçar planos de preservação.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDIAN, H.; MOHAMMADI, K.; RAFIEE, R. Optimizing monitoring network of water table by geostatistical methods. **Journal of Geology and Mining Research**. v. 5, n. 9, p. 223–231, 2013.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. San Diego: Academic Press, 1992.

ADHIKARY, P. P.; CHANDRASEKHARAN, H.; CHAKRABORTY, D.; KAMBLE, K. Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 167, n. 1-4, p. 599–615, ago. 2010.

AHMADI, S. H.; SEDGHAMIZ, A. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 138, n. 1-3, p. 357–368, 25 maio 2007.

ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. São Paulo: Oficina de textos. 2007. 151 p.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil, e, Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília/DF: ANA, 2007.124 p.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Introdução à Geoestatística**. Acta Geologia Leopoldensia n.27 Vol. XI. 1988 p.7-82

ASSAF, H.; SAADEH, M. Geostatistical Assessment of Groundwater Nitrate Contamination with Reflection on DRASTIC Vulnerability Assessment: The Case of the Upper Litani Basin, Lebanon. **Water Resources Management**. v. 23, n. 4, p. 775–796, mar. 2009.

BAALOUSHA, H. Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: A case study from Heretaunga Plains, New Zealand. **Agricultural Water Management**. v. 97, n. 2, p. 240–246, fev. 2010.

- BARCA, E.; PASSARELLA, G. Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation. A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 137, n. 1-3, p. 261–273, fev. 2008.
- BELDRING, S.; GOTTSCHALK, L.; SEIBERT, J.; TALLAKSEN, L. M. Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 98-99. 1999. p. 305-324. Disponível em: <http://www.seibert-space.com/hydro/pdf/Beldring_etal_1999_Agmet.pdf> Acessado em: 05 fev. 2015
- BETTÚ, D. F.; FERREIRA, F. J. F. Modelos da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Caiuá no noroeste do estado do Paraná: comparação entre krigagem ordinária e krigagem com tendência externa do modelo numérico do terreno. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 55–66, 2005.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BREDEHOEFT, J. The conceptualization model problem surprise. **Hydrogeology Journal**, v. 13, n. 1, p. 37–46, mar. 2005.
- CABRAL, J. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2000. p.34-51.
- CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura). **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 16 mar. 2016.
- CHEN, S. et al. The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale. **Ecological Complexity**. Eco Summit 2007 Special Issue: Part Two. v. 7, n. 2, p. 131–138, jun. 2010.
- CHEN, X.; HU, Q. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation. **Journal of Hydrology**. Vol. 297, 2004, p. 285–300.
- CINNIRELLA, S.; BUTTAFUOCO, G.; PIRRONE, N. Stochastic analysis to assess the spatial distribution of groundwater nitrate concentrations in the Po catchment (Italy). **Environmental Pollution**. v. 133, n. 3, p. 569–580, fev. 2005.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2015. DOI 10.1007/s00704-015-1540-9
- COOPER, R. M.; ISTOK, J. D. Geostatistics applied to groundwater contamination. I: Methodology. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 2, p. 270–286, 1988a.
- COOPER, R. M.; ISTOK, J. D. Geostatistics applied to groundwater contamination. II: Application. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 2, p. 287–299, 1988b.
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil) **Domínio Geológico Litoestratográfico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2006. Escala 1:750.000

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica); IG (Instituto Geológico); IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas); CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo escala: 1:1.000.000**: nota explicativa. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

DEBARATS, A. J.; LOGAN, C.E., HINTON, M.J.; SHARPE, D.R. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**. V. 255. 2002, p. 25-38.

DEMETRIO, J. G.; CORREIA, L. C.; SARAIVA, A. DE L. Utilização de Imagens SRTM na Confecção de mapas Potenciométricos. **Águas Subterrâneas**, 2006.

DESBARATS, A. J. et al. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 255, n. 1-4, p. 25-38, 2 jan. 2002.

DRUCK, S. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Empraba Cerrados, 2004.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of American Journal**. V. 56. p. 320-323. 1992.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed.. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESOURCE INSTITUTE). **An overview of the Groundwater toolset**. Disponível em:

<<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-groundwater-tools.htm>>. Acesso em: 3 jun. 2016.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4th ed ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.

FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo). **Orientações para a utilização de Águas subterrâneas no Estado de São Paulo**, 2005. 40 p.

FIORI, J. P. DE O.; CAMPOS, J. E. G.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. **Geociências (São Paulo)**, v. 29, n. 2, p. 229-235, 2010.

FOGG, G. E.; LABOLLE, E. M.; WEISSMANN, G. S. Groundwater Vulnerability Assessment: Hydrogeologic Perspective and Example from Salinas Valley, California. In: CORWIN, D. L.; LOAGUE, K.; ELLSWORTH, T. R. (Eds.). **Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone**. [s.l.] American Geophysical Union, 1999. p. 45-61.

FORMAGGIO, L. F.; CAMPOS, J. E. G.; OTHERS. Estudo da variabilidade da potenciometria em aquíferos freáticos com auxílio de regressão múltipla espacial. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 101-111, 2009.

- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1979.
- GAUS, I. et al. Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging. **Environmental Geology**, v. 44, n. 8, p. 939–948, 1 nov. 2003.
- GIMENES, F. B. Q.; AUGUSTO FILHO, O.; SOARES, W. C. Modelagem dos fluxos de água subterrânea na região metropolitana de João Pessoa (PB) utilizando ferramentas de hidrologia em SIG. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 9–18, 2012.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997.
- HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping**. 2nd extended. Amsterdam: Hengl, 2009.
- HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, v. 120, n. 1-2, p. 75–93, maio 2004.
- HIRATA, R.; ZOBY, J. L.; OLIVEIRA, G. F. R. de. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. p.149-161.
- HONDA, E. A.; NIZOLI, E. C. **Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas De Santa Bárbara**. Relatório Técnico. São Paulo: Instituto Florestal, 2005. 41 p.
- IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:500,000,
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente – SMA, 2008. 104p.
- ISSAKS, E. H., SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p.
- JOHNSTON, K.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N.; VER HOEF, J. M. **Using ArcGIS geostatistical analyst**. Esri Redlands, 2001. v. 380
- KITANIDIS, P. K. **Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology**. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1997.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal. v.18, n.2. p. 45-54. 1998.
- KNOTTERS, M.; BIERKENS, M. F. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. **Geoderma**, v. 103, n. 1, p. 51–77, 2001.
- KNOTTERS, M.; VAN WALSUM, P. E. V. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component, **Journal of Hydrology**. v.197. p.25-46. 1997.

KRESIC, N.; MIKSZEWSKI, A. **Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization**. Leiden: CRC Press, 2012. 600 p.

KRIVORUCHKO, K.; KRAUSE, E. **Concepts and Applications of Kriging**. In: ESRI - TECHNICAL WORKSHOP. São Diego, Califórnia (EUA), 24 jul. 2012. Disponível em: <<http://video.esri.com/watch/1796/concepts-and-applications-of-kriging>>. Acesso em: 25 mar. 2016

LISBÔA, É. G.; CARVALHO, J. M. C. M. D.; MENDES, R. L. R. O Uso da Geoestatística na Avaliação dos Parâmetros Hidrogeológicos para Compor o Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 188–199, 2016.

MANOEL FILHO, J. Água subterrânea: História e importância, In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 3-12.

MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. M. B. Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation, In: **Brazilian Symposium on Remote Sensing**. 13, 2007. Florianópolis, Proceedings... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3437-3444. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.22.15/doc/3437-3444.pdf>>. Acessado em: 15 Jan. 2015.

MANZIONE, R. L.; SOLDERA, B. C.; PAES, C. O.; WENDLAND, E. Analyses of water table depths variations in an outcrop area of the guarani aquifer system in brotas/sp-brazil. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 186, 2015.

MANZIONE, R. L.; MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. C. Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1368–1375, 2012a.

MANZIONE, R. L.; WENDLAND, E. C.; TANIKAWA, D. H. Stochastic simulation of time-series models combined with geostatistics to predict water-table scenarios in a Guarani Aquifer System outcrop area Brazil. **Hydrogeology Journal**. v. 20. P. 1239-1249. 2012b.

MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. M. B.; VON ASMUTH, J. R.; CÂMARA, G. Predictive risk mapping of water table depths in a Brazilian Cerrado area. In: STEIN, A., SHI, J., BIJKER, W. **Quality Aspects in Spatial Data Mining**, CRC Press, Boca Raton, 2008, p.73-89,

MANZIONE, R. L.; DRUCK, S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Modelagem de incertezas na análise espaço-temporal dos níveis freáticos em uma bacia hidrográfica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 25–34, 2007.

McBRATNEY, A. B., MENDONÇA-SANTOS, M. L., MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**. V.117. p.3-52. 2003.

McKENZIE, N. J., RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**. V.89. p.67– 94. 1999.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. **Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara**. São Paulo: Instituto Florestal, 2011. 222p.

- MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C. MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. **A.Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 673-686.
- NAS, B.; BERKTAY, A. Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 160, n. 1-4, p. 215–227, jan. 2010.
- ODEH, I.; McBRATNEY, A.; CHITTLEBOROUGH, D. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**. v.63, p. 197-214. 1994.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. 1:500,000. Campinas: IAC/FAPESP, 1999.
- OLIVEIRA, J. B.; **Solos do estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. Bol. Ci. n, 45, Campinas/SP: IAC, 1999. 63p.
- PEBESMA, E. J.; DE KWAADSTENIET, J. W. Mapping groundwater quality in the Netherlands. **Journal of Hydrology**, v. 200, n. 1–4, p. 364–386, 15 dez. 1997.
- PETERSON, T. J.; CHENG, X.; WESTERN, A. W.; SIRIWARDENA, L.; WEALANDS, S. R. Novel indicator geostatistics for water table mapping that incorporate elevation, land use, stream network and physical constraints to provide probabilistic estimation of heads and fluxes. **19th International Congress on Modelling and Simulation**, Perth, Australia. Anais...2011. Disponível em: <<http://www.mssanz.org.au.previewdns.com/modsim2011/I9/peterson.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015
- REBOUÇAS, A, da C, **Importância da água subterrânea**, In: FEITOSA, F, A, C,; MANOEL FILHO, J,; FEITOSA, E, C,; DEMETRIO, J, G, (Eds,) Hidrogeologia: conceitos e aplicações, Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008, p, 3-12.
- REICHERT, J. M.; SANCHES, L. E. A.; REINERT. D. J. **Compactação do solo em Sistemas Agropecuários e Florestais: Identificação. Efeitos. Limites Críticos e Mitigação** IN: Tópicos em ciência do solo. Vol. 1, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- RITTER, D. F.; KOCHER, R. C.; MILLER, J. R. **Process geomorphology**. 5th ed ed. Long Grove, Ill: Waveland Press, 2011.
- ROCHA, M. M.; LOURENÇO, D. A.; LEITE, C. B. B. Aplicação de krigagem com correção do efeito de suavização em dados de potenciometria da cidade de Pereira Barreto-SP. **Geologia USP. Série Científica**, v. 7, n. 2, p. 37–48, 2007.
- ROCHA, M. M.; YAMAMOTO, J. K.; FONTELES, H. R. da N. Cokrigagem Ordinária versus Krigagem com Deriva Externa: Aplicações para a Avaliação do Nível Potenciométrico em um Aquífero Livre. **Geologia USP. Série Científica**, v. 9, n. 1, p. 73–84, 2009.
- ROSA, D. R. M. **Evolução das instituições florestais estaduais do estado de São Paulo**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2006.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, n,10, 1996: 41-56,

- SALARASHAYERI, A. F.; SIOSEMARDE, M. Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. **World Acad. Sci. Eng. Technol**, v. 61, n. 61, p. 454–458, 2012.
- SÁNCHEZ-MARTOS, F.; JIMÉNEZ-ESPINOSA, R.; PULIDO-BOSCH, A. Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. **Hydrological Sciences Journal**, v. 46, n. 2, p. 227–242, abr. 2001.
- SANTOS, R. D. DOS; LEMOS, R. C. DE; SANTOS, H. G. DOS; KER, J. C.; ANJOS, L.H.C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa/MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.
- SANTOS; D. B. DOS; CECÍLIO, R. A.; COELHO, E. F.; BATISTA, R. O.; SILVA, A. J. **P. Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração**. Revista Agrarian. v. 5. n. 16, 2012. p.131-139
- SILVA, F. DE P. E. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do grupo Bauru no estado de São Paulo**. 166 f. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.
- SILVA, F. DE P. E; HUNG KIANG, C.; CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, 28 jun. 2005.
- SNIS (Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento) **Série Histórica**. Ministério das Cidades: Brasília/DF, 2014. Disponível em: <<http://www.deepask.com.br/goes?page=Consumo-de-agua:-Veja-indicadores-da-sua-cidade>>. Acesso em: 31 mar. 2016.
- SNYDER, D.T. **Estimated depth to ground water and conFfiguration of the water table in the Portland, Oregon area**: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008–5059, 2008, 40 p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5059/>> Acesso em: 04 de abr. 2016
- SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2^a. ed. Lisboa: IST Press, 2006.
- THEODOSSIOU, N.; LATINOPOULOS, P. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 7, p. 991–1000, 2006.
- TOBLER, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234, jun. 1970.
- TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. 3rd ed ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- UZUMAKI, E. T. **Geoestatística Multivariada**: Estudos de métodos de predição. Dissertação (Mestrado em Estatística / Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação) - UNICAMP Campinas, 1994. 104 p.

- VARGAS, T.B.; MARTINEZ, J.F.E.; TOBON, C.A.P. Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results In: KAZEMI, G. A. (Org) **Significance of Hydrogeochemical Analysis in the Management of Groundwater Resources: A Case Study in Northeastern Iran**. [s.l.] INTECH Open Access Publisher, 2012. p.203 – 222.
- VAROUCHAKIS, E. A.; HRISTOPULOS, D. T. Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, n. 1, p. 1–19, jan. 2013.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V. V. H., SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. SBCS, Viçosa, 2000. p. 1-54.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**. V.296, p, 34-118, 2004.
- WACKERNAGEL, H. **Multivariate Geostatistics: An introduction with applications**. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 387 p.
- WINTER, T. C. (ED.). **Ground water and surface water: a single resource**. Denver, Colo: U.S. Geological Survey, 1998.
- YAMAMOTO, J. K. LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.
- YANG, F. et al. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging*. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, v. 20, n. 3, p. 339–346, jun. 2008.
- ZHANG, X. et al. Quantifying the impacts of land use/land cover change on groundwater depletion in Northwestern China – A case study of the Dunhuang oasis. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 270–279, dez. 2014.

APÊNDICE 1

Resultado das análises granulométricas

Amostra	Areia	Argila	Silte	Fracionamento da Areia				
				Muito Fina	Fina	Média	Grosa	Muito Grossa
				%				
B01	79,4	19,8	0,8	12,3	47,9	37	2,8	0
B02	82	17,6	0,4	18,6	54,3	25,8	1,3	0
B03	81,1	18	0,9	12	46,5	36,9	4,6	0
B04	85	14,6	0,4	13,4	51,2	33	2,3	0
B05	87,7	11,4	0,9	11,4	45,6	39,3	3,7	0
B06	86,7	12,2	1,1	17,2	53,1	28,1	1,6	0
B12	79,5	20	0,5	13	51,6	33,6	1,8	0
B13	77,9	21,6	0,5	14,2	50	33,5	2,4	0
BO_01	85,6	12,8	1,6	12,5	48,9	36	2,6	0
BO_02	79,7	17,4	2,9	13,1	45,2	38,6	3,1	0
BO_03	85,7	12,4	1,9	8,6	44,8	42,9	3,7	0
BO_04	83	14,6	2,4	11	42,4	42,7	3,9	0
BO_05	83,5	13,8	2,7	12,5	47,4	37,1	3	0
BO_06	77,5	19,8	2,7	15,9	49,9	32	2,2	0
BOI_1	75,8	23	1,2	16,9	48,1	32,6	2,3	0
BOI_2	78,3	20,2	1,5	11,6	46	39	3,4	0
BOI_3	77,5	20	2,5	15,3	45,2	35,9	3,6	0
BOI_4	77,1	22	0,9	15,8	46,6	35,5	2,2	0
BOI_5	73,7	24,2	2,1	19,6	47,6	31,5	1,3	0
BOI_6	84,6	13,2	2,2	16,5	51,1	30,6	1,8	0
BOI_7	85,2	13,2	1,6	15,8	55,5	25,1	3,6	0
BOI_8	79,9	18,8	1,3	13,1	49,5	34,8	2,6	0
BOI_9	83,4	15,6	1	12	46,1	38,4	3,5	0
BU01	83,1	15,6	1,3	13,1	47,7	36,6	2,6	0
BU02	84,7	14,6	0,7	15,8	52	30,1	2,1	0
BU03	79,7	19	1,3	23	53,4	22,5	1,1	0
BU04	89,9	9,2	0,9	10,3	45	41,9	2,7	0
BU05	80,7	17,8	1,5	13,1	52,9	32,2	1,8	0
BU06	83	16,4	0,6	13,6	50,9	33,9	1,6	0
BU07	84,7	14,8	0,5	13,7	52,5	32,1	1,7	0
BU08	86,9	12,6	0,5	13,5	51,5	32,9	2,1	0
BU09	88,4	10,8	0,8	11,9	44,8	40,5	2,8	0
BU10	85,4	14	0,6	14,3	53,5	31,1	1,2	0
BU11	87,1	12,4	0,5	14,4	55,1	29,5	1,1	0
BU12	86,1	13,4	0,5	13,6	51	33,3	2,1	0
BU13	85	13,8	1,2	14,3	53,2	31,3	1,3	0
BU14	86,2	13,2	0,6	14	52,3	31,4	2,3	0

Amostra	Areia	Argila	Silte	Fracionamento da Areia				
				Muito Fina	Fina	Média	Grosa	Muito Grossa
				%				
BU15	79,2	19,6	1,2	16,6	50,7	30,9	1,9	0
BU16	76,5	22	1,5	20,2	50,6	27,9	1,3	0
BU17	78,3	21,2	0,5	19,1	51,1	27,9	1,8	0
BU18	79,8	18,8	1,4	17,2	51,4	29,7	1,8	0
BU19	78,5	21	0,5	16,4	51,5	30,3	1,8	0
BU20	80,8	16,2	3	15,7	51,9	30,4	2	0
BU21	80	19,4	0,6	16,8	52	29,8	1,4	0
BU22	83,4	15,8	0,8	15,4	52,3	30,5	1,8	0
BU23	85	14,2	0,8	12,7	47,9	36,6	2,8	0
BU24	86,9	12,2	0,9	14,1	49,3	34,3	2,3	0
G01	84,3	14,8	0,9	16	49,4	31,6	3,1	0
G02	93	4	3	13,1	50	34	2,9	0
G03	87,8	9,6	2,6	11	49,4	37,2	2,5	0
G04	85,5	11,4	3,1	11,1	49,6	36,8	2,5	0
G05	87,2	10,2	2,6	11,9	55,8	30,6	1,7	0
G06	92,8	6,6	0,6	12,7	48,5	34,3	4,4	0
G07	84,6	14,6	0,8	10,7	44,2	37,4	7,6	0
G08	86,5	12,8	0,7	10	44,4	40,7	4,8	0
GD1	83	16,2	0,8	16,1	54,5	27,7	1,7	0
GR01	82,4	16,8	0,8	12,4	46,5	37,4	3,7	0
GR02	80,8	18	1,2	12,5	46	37,8	3,6	0
GR03	77,6	21,6	0,8	15,4	48,4	34,5	1,7	0
GR04	81	17,6	1,4	13,9	46,7	36,5	2,9	0
GR05	83,6	13,8	2,6	10,8	43,4	40,8	5	0
GR06	84,3	13,8	1,9	10,8	50,8	35,7	2,8	0
GR07	85,4	13,2	1,4	12,4	51,4	34,3	1,9	0
GR08	82,7	16,8	0,5	15,5	49,3	33	2,2	0
GR09	91,5	6,8	1,7	13,3	55,4	29,7	1,6	0
GR10	91,6	7,6	0,8	15	49,4	33,1	2,5	0
GR11	86,1	11,6	2,3	15,2	53,9	29,5	1,4	0
GR12	82,4	16,6	1	17,9	48,7	32,5	0,9	0
GR13	84,4	14,6	1	17,6	58,1	23,6	0,7	0
GR14	89,1	10,4	0,5	15	55,7	28,3	1	0
GR15	81,9	16	2,1	19,7	56,2	23	1,1	0
P01	94,2	3,8	2	4,7	45,7	46,8	2,9	0
P02	91,8	5,8	2,4	11,6	46,2	37,1	4,5	0
P03	87,4	11,4	1,2	15	50,6	31,6	2,7	0
PA01	88,5	10,8	0,7	15,7	41,3	38,8	4,3	0
PA02	88	10,8	1,2	11,7	49,1	36,7	2,6	0
PA03	84,6	13,6	1,8	12	52,3	33,4	2,3	0

Amostra	Areia	Argila	Silte	Fracionamento da Areia				
				Muito Fina	Fina	Média	Grosa	Muito Grossa
				%				
S01	90,1	8,2	1,7	11,2	44,6	41,1	3,1	0
S02	87	11,4	1,6	7,8	46,1	43,1	3	0
S03	86,1	12,6	1,3	6,5	45,3	44,4	3,7	0
S04	75,5	22,6	1,9	10	39	44,1	6,8	0
S05	82,7	17	0,3	13,8	50,4	33,2	2,6	0
S06	84,1	13,6	2,3	11,8	48	35	4,3	0
S07	88,8	8,4	2,8	13,9	44,7	38,1	3,3	0
S08	92,4	5	2,6	8,8	44,8	42,4	3,9	0
S09	83,8	14,4	1,8	15,8	44,5	36,2	3,5	0
S10	83,9	14,8	1,3	11,3	37,5	43,2	8	0
S11	88,8	10	1,2	15,2	47,7	34,4	2,8	0
S12	83,9	14,8	1,3	18,8	55,5	24,5	1,1	0
S13	85,7	11,6	2,7	15,9	47,9	33,4	2,8	0
S14	74,7	23	2,3	18	48,5	31,1	2,3	0
S15	82,2	15,6	2,2	10,6	46,3	39,2	3,9	0
ST01	77,7	20,4	1,9	24,1	52,4	22,4	1,2	0
ST02	80	18	2	20,5	53	25,2	1,2	0
ST03	83,8	14,4	1,8	18,7	52,9	27,2	1,3	0
ST04	93,1	5,4	1,5	15,9	48,1	34	2	0
ST05	91,2	7	1,8	14,9	47,9	34,4	2,5	0
ST06	91,6	7,6	0,8	17,2	47,7	32,8	2,3	0
ST07	90,9	7,2	1,9	17,7	50,9	29,8	1,6	0
ST08	82,3	16,4	1,3	16,5	55,3	24,9	3,3	0
ST09	85,4	13,4	1,2	11,4	42,5	43	3,1	0
ST10	86,5	12	1,5	10,6	45,1	40,2	4,1	0
ST11	89,3	8,6	2,1	10	45,7	40,9	3,3	0
ST12	87,2	11,6	1,2	10,1	46,4	40,3	3,3	0
ST13	86,4	12,8	0,8	9,3	44,1	42,7	4	0
ST14	89	9,8	1,2	10,5	52,3	34,6	2,5	0
ST15	88,6	10,2	1,2	12	51,9	33,5	2,5	0
ST16	88,2	10,8	1	9,8	50,3	36,6	3,3	0
ST17	86,8	11,8	1,4	12	51,8	33,5	2,5	0
ST18	85,6	12	2,4	14,6	55,1	28,6	1,7	0
ST19	84,4	14,2	1,4	12,5	51	33,9	2,6	0
ST20	83,7	14	2,3	11,1	50	35,6	3,4	0
ST21	81,8	16	2,2	12,6	49,4	35,2	2,8	0

APÊNDICE 2

Resultados dos cálculos de Condutividade Hidráulica segundo o método de Hazen

Amostra	Condutividade Hidráulica		Amostra	Condutividade Hidráulica		Amostra	Condutividade Hidráulica	
	cm/s	m/dia		cm/s	m/dia		cm/s	m/dia
B01	0,0042	3,6	BU16	0,0043	3,7	PA03	0,0058	5,0
B03	0,0046	3,9	BU17	0,0044	3,8	S01	0,0096	8,3
B04	0,0050	4,3	BU18	0,0045	3,9	S02	0,0056	4,8
B05	0,0060	5,2	BU19	0,0042	3,7	S03	0,0057	4,9
B06	0,0066	5,7	BU20	0,0047	4,1	S04	0,0040	3,4
B07	0,0059	5,1	BU21	0,0049	4,2	S05	0,0045	3,9
B12	0,0044	3,8	BU22	0,0047	4,1	S06	0,0056	4,9
B13	0,0043	3,7	BU23	0,0058	5,0	S07	0,0224	19,3
BO_01	0,0048	4,2	BU24	0,0072	6,2	S08	0,0129	11,1
BO_02	0,0041	3,5	G01	0,0056	4,8	S09	0,0051	4,4
BO_03	0,0063	5,5	G02	0,0087	7,5	S10	0,0050	4,4
BO_04	0,0052	4,5	G03	0,0063	5,5	S11	0,0061	5,3
BO_05	0,0055	4,7	G04	0,0058	5,0	S12	0,0055	4,8
BO_06	0,0039	3,3	G05	0,0060	5,2	S13	0,0059	5,1
BOI_1	0,0038	3,3	G06	0,0047	4,0	S14	0,0037	3,2
BOI_2	0,0043	3,7	G07	0,0046	4,0	S15	0,0061	5,3
BOI_3	0,0033	2,8	G08	0,0059	5,1	ST01	0,0042	3,6
BOI_4	0,0041	3,5	GD1	0,0050	4,3	ST02	0,0045	3,9
BOI_5	0,0042	3,7	GR01	0,0053	4,5	ST03	0,0053	4,6
BOI_6	0,0055	4,8	GR02	0,0048	4,2	ST04	0,0110	9,5
BOI_7	0,0037	3,2	GR03	0,0041	3,6	ST05	0,0110	9,5
BOI_8	0,0044	3,8	GR04	0,0049	4,2	ST06	0,0104	9,0
BOI_9	0,0051	4,4	GR05	0,0055	4,7	ST07	0,0046	3,9
BU01	0,0057	5,0	GR06	0,0055	4,7	ST08	0,0036	3,1
BU02	0,0058	5,0	GR07	0,0094	8,1	ST09	0,0053	4,5
BU03	0,0045	3,9	GR08	0,0057	4,9	ST10	0,0060	5,2
BU04	0,0080	6,9	GR09	0,0085	7,3	ST11	0,0070	6,1
BU05	0,0047	4,1	GR10	0,0098	8,5	ST12	0,0059	5,1
BU06	0,0053	4,5	GR11	0,0064	5,5	ST13	0,0057	4,9
BU07	0,0064	5,5	GR12	0,0112	9,6	ST14	0,0061	5,3
BU08	0,0065	5,6	GR13	0,0058	5,0	ST15	0,0054	4,7
BU09	0,0076	6,6	GR14	0,0078	6,7	ST16	0,0072	6,2
BU10	0,0056	4,9	GR15	0,0049	4,2	ST17	0,0055	4,7
BU11	0,0073	6,3	P01	0,0184	15,9	ST18	0,0054	4,6
BU12	0,0061	5,3	P02	0,0105	9,1	ST19	0,0052	4,5
BU13	0,0060	5,2	P03	0,0059	5,1	ST20	0,0051	4,4
BU14	0,0057	4,9	PA01	0,0053	4,6	ST21	0,0046	4,0
BU15	0,0043	3,7	PA02	0,0063	5,4			

APÊNDICE 3

Valores de umidade do solo e de resistência do solo a penetração mensurados

Medição	Umidade média do solo	Resistencia do solo a Penetração (500 mm de profundidade)	Medição	Umidade média do solo	Resistencia do solo a Penetração (500 mm de profundidade)
	%	kPa		%	kPa
BO01	5,7	1952,0	GR06	11,5	1642,0
BO02	6,5	2250,3	GR07	10,5	3565,0
BO03	7,3	1856,0	GR08	11,7	1074,7
BO04	8,6	1644,3	GR09	11,1	1231,7
BO05	7,7	1427,7	GR10	9,2	1376,3
BO06	11,0	1461,5	GR11	10,9	1500,0
BU01	12,4	1461,3	GR12	9,5	1546,3
BU02	5,8	1056,7	GR13	14,0	1471,7
BU03	13,6	1492,0	GR14	10,8	1232,0
BU04	7,5	1033,0	GR15	13,9	1492,3
BU05	14,9	1507,5	PA01	6,2	1817,3
BU06	13,4	1244,7	PA02	7,5	974,0
BU07	12,4	1742,3	PA03	9,9	1319,7
BU08	6,6	1791,3	ST01	8,9	1373,3
BU09	9,6	1603,0	ST02	14,2	1216,7
BU10	8,1	1296,3	ST03	7,8	1036,0
BU11	15,9	1871,0	ST04	14,7	1128,7
BU12	12,9	1732,0	ST05	6,8	1466,3
BU13	11,2	1133,7	ST06	10,4	1742,3
BU14	9,3	876,0	ST07	16,5	1252,3
BU15	14,8	1067,0	ST08	12,1	1252,5
BU16	17,9	1317,0	ST09	18,8	1806,7
BU17	13,3	1030,7	ST10	13,4	2051,7
BU18	14,1	1288,7	ST11	11,2	1147,0
BU19	16,9	1742,3	ST12	14,1	1443,3
BU20	11,8	1149,3	ST13	11,2	2237,3
BU21	14,1	1281,0	ST14	11,7	2057,0
BU22	10,2	1389,3	ST15	10,3	2134,0
BU23	8,8	1561,7	ST16	10,4	1461,7
BU24	8,7	1693,7	ST17	9,7	1925,7
GR01	14,7	1502,7	ST18	14,8	1982,0
GR02	13,6	1283,7	ST19	8,9	1615,7
GR03	13,4	1646,7	ST20	15,0	1716,5
GR04	12,0	1463,7	ST21	11,2	1737,0
GR05	11,8	1549,0	ST22	24,6	1288,7