



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO
GUARANI NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO BONITO - SP**

João Gabriel Thomaz Queluz
Orientador: José Ricardo Sturaro

Rio Claro (SP)
2010

JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DA
VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO GUARANI NO
MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO BONITO - SP**

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Orientador: José Ricardo Sturaro

Rio Claro (SP)

2010

550.028 Quéluz, João Gabriel Thomaz
Q3m Mapeamento geoestatístico da vulnerabilidade do
Aquífero Guarani no município de Ribeirão Preto - SP / João
Gabriel Thomaz Quéluz. - Rio Claro : [s.n.], 2010
39 f. : il., figs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas

Orientador: José Ricardo Sturaro

1. Geologia – Métodos estatísticos. 2. Áreas de recarga. 3.
Krigagem. 4. Índice AVI. I. Título.

JO O GABRIE T OMA QUE U

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DA
VULNERABILIDADE DO AQUIFERO GUARANI NO
MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO BONITO - SP**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

José Ricardo Sturaro (orientador)

Gilda Carneiro Ferreira

Edson Gomes de Oliveira

Rio Claro, de de .

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha amada mãe, Thais Queluz, por todo seu apoio, sustento, a vida, sua longa paciência e por todos seus sábios ensinamentos durante minha caminhada até aqui.

Quero expressar minha grande gratidão ao meu falecido pai, por todos os momentos que dividimos durante 11 anos.

Gostaria de agradecer a Marina, minha melhor amiga, minha companheira por cada risada, por todo o carinho e principalmente por todo respeito e amor.

Ao Professor Doutor José Ricardo Sturaro por todo tempo que dedicou me a vida, dividindo seu conhecimento, pela grande chance que me ofereceu e por ter acreditado no meu potencial.

Ao Alan por toda sua vida no decorrer do projeto, pois sem ele esse projeto não teria chegado ao seu final.

Aos colegas da minha cidade, Lucas (Lucão), Gustavo (Tia), Fábio (Japa) por nossa grande amizade de longa data e por todos os acordos e ritmos que descobrimos e praticamos juntos.

Aos companheiros de república, Fábio (Sushi), Tales (Teus), Lucas (Feioso), Carlos dos Santos (Jabutí), Daniel Poli (Aranha), Leonardo (Biral), Daniel (Jamal), Matheus (Ohmo) e Carlos (Avatar) pela criação dessa família durante nossos cinco anos de companheirismo.

A todos os professores que realmente se dedicaram ao ensino dos alunos do curso de Engenharia Ambiental e contribuíram com minha formação profissional.

E finalmente, a todos que em algum momento estiveram junto comigo e contribuíram em algum aspecto para a conquista desse grande marco em minha vida.

RESUMO

O aquífero Guarani possui relevante importância tanto como fonte de água para diversos centros urbanos como para o desenvolvimento da agricultura e da pecuária. Nas áreas de recarga, o aquífero é livre e, portanto, está sujeito à contaminação de efluentes e rejeitos depositados sobre os solos que o cobrem. Assim, torna-se fundamental não apenas sua proteção em todos os níveis, como o conhecimento do seu grau de vulnerabilidade natural. Este trabalho utilizou técnicas de modelagem geoestatística para estudar a vulnerabilidade natural do aquífero Guarani no município de Ribeirão Bonito, Estado de São Paulo, região sudeste do Brasil, local onde o aquífero Guarani encontra-se exposto. Estas técnicas, de ampla e consagrada aplicação nos estudos de avaliação de depósitos minerais e reservatórios de petróleo, podem ser adaptadas para elaborar uma classificação espacial ou uma regionalização dos índices de vulnerabilidade em termos probabilísticos. Neste trabalho foi utilizada a Krigagem ordinária para a obtenção de mapas classificatórios de vulnerabilidade. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero foi empregado o Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI), que requer o conhecimento da espessura da zona insaturada e da permeabilidade da mesma. O produto final gerado foi um mapa probabilístico do índice de vulnerabilidade do aquífero Guarani, que apresentou valores entre 0 a 0,33 anos, enquadrando a área estudada na classe AVI de vulnerabilidade *Extremamente Alta*.

Palavras-chave: aquífero Guarani, geoestatística, índice AVI, vulnerabilidade.

ABSTRACT

The Guaraní aquifer has relevant importance both as a source of water for several urban centres and the development of agriculture and livestock. In recharge areas the aquifer is free and, therefore, subject to contamination of effluents and tailings deposited on soils that cover it. Thus, it becomes crucial not only its protection at all levels, as the knowledge of its degree of natural vulnerability. The present work used geostatistics modeling techniques to study the natural vulnerability of the Guaraní aquifer in the city of Rio Bonito, State of São Paulo, southeastern Brazil, where the Guaraní aquifer is exposed. These techniques, extensively used in evaluation studies of mineral deposits and oil tanks, can be adapted to produce a spatial classification or a regionalisation of probabilistic indices of vulnerability. By ordinary kriging method maps of vulnerability classification were obtained. To determine the vulnerability of the aquifer was employed the Aquifer Vulnerability Index (AVI), which requires knowledge of unsaturated zone thickness and permeability. The final product was a map with probabilistic index of vulnerability of the Guaraní aquifer, which presented values between 0 to 0.33 ears, framing the area studied in AVI class *extremely high vulnerability*.

Keywords: Aquifer Vulnerability Index, geostatistics, Guaraní Aquifer, vulnerability.

Lista de Figuras

Figuras	Descrição	Página
Figura 1	Localização do Aquífero Guarani na América do Sul	1
Figura 2	Representação esquemática da localização do Aquífero Guarani e da Bacia Sedimentar do Paraná	
Figura 3	Seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná	
Figura 4	Mapa esquemático do Aquífero Guarani e suas áreas de afloramento no Brasil	8
Figura 5	Mapa de localização do Sistema Jacaré	9
Figura	Localização da Área de Estudo no Sistema Jacaré	10
Figura	Localização das vias de acesso na área estudada	10
Figura 8	Mapa geológico das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepir	11
Figura 9	Coluna litostratigráfica da Bacia do Paraná	13
Figura 10	Bulbo de saturação d'água no solo	1
Figura 11	Imagem SRTM da área de estudo	20
Figura 12	Histograma de frequência da variável cota topográfica	21
Figura 13	Variograma modelado da cota topográfica	22

Figuras	Descrição	Página
Figura 14	Superfície da Cota Topográfica	22
Figura 15	istribuição espacial das amostras do nível estático	23
Figura 1	istograma de frequência da variável nível estático	24
Figura 1	Variograma modelado do Nível Estático	25
Figura 18	Superfície do Nível Estático	25
Figura 19	Mapa da Espessura da Zona Insaturada	2
Figura 20	Mapa da Espessura da Zona Insaturada com as drenagens	2
Figura 21	istribuição espacial dos ensaios de permeabilidade	28
Figura 22	istograma de frequência da variável condutividade hidráulica	29
Figura 23	Variograma modelado da Condutividade hidráulica	29
Figura 24	Mapa da Condutividade hidráulica	30
Figura 25	Mapa do Índice AVI	31

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	3
3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	4
3.1 - Aquífero Guarani	5
4. ÁREA DE ESTUDO.....	9
4.1 - Localização	9
4.2 - Vias de Acesso.....	10
4.3 - Geologia.....	11
5. METODOLOGIA	14
5.1 - Índice de vulnerabilidade AVI.....	14
5.2 - Ensaio de condutividade hidráulica com o Permeômetro de Guelph	15
5.3 - Caracterização da espessura da zona insaturada	17
5.3.1 - Caracterização da cota topográfica	17
5.3.2 - Determinação da altitude do nível estático	17
5.3.3 - Elaboração do mapa de espessura da zona insaturada.....	17
5.4 - Análise geoestatística.....	17
5.4.1 - Levantamento de amostras georeferenciadas.....	18
5.4.2 - Análise exploratória dos dados.....	18
5.4.3 - Análise da variabilidade espacial.....	19
5.4.4 - Estimativa por Krigagem.....	19
6. RESULTADOS.....	20
6.1- Caracterização da espessura da zona insaturada	20
6.1.1 - Caracterização da cota topográfica	20
6.1.2 - Determinação da altitude do nível estático (lençol freático).....	23
6.1.3 - Elaboração do mapa de espessura da zona insaturada.....	26
6.2- Ensaio de condutividade hidráulica com o Permeômetro de Guelph	28

3- Elaboração do mapa do Índice AVI.....	31
4. DISCUSSÃO.....	32
8. CONCLUSÃO.....	35
9. BIBLIOGRAFIA:	36

1. INTRODUÇÃO

O abastecimento de água doce é realizado em sua maior parte, através da utilização das águas superficiais e com o aumento das populações houve um acréscimo exagerado na demanda pelos recursos hídricos superficiais, porém a falta de planejamento, o uso inadequado e o lançamento de esgotos sem tratamento acabou afetando negativamente a qualidade desse recurso essencial à vida.

Nesse contexto é possível perceber a importância atual dos aquíferos como fonte de abastecimento de água doce para a crescente população mundial. Na América do Sul está localizado o Aquífero Guarani que apresenta uma extensão superior a muitos países da Europa sua área ocupa aproximadamente 1.200.000 km², estendendo-se pelos territórios brasileiro, argentino, paraguaio e uruguaio.



Figura 1 - Localização do Aquífero Guarani na América Do Sul, fonte: ARAÚJO et al., 1999

O Guarani é um aquífero que vem sendo estudado desde a década de 50, mas só na década de 80 com o aumento das atividades de empresas de captação d'água e prospecção de petróleo foi possível obter informações mais detalhadas sobre suas características (Boscardin Borghetti et. al., 2004).

O nome foi sugerido pelo geólogo anilo Ant n e foi aprovado pelos quatro países em uma reunião em Curitiba – PR, em maio 1990. O objetivo era determinar uma nomenclatura para as formações geológicas que compõem o aquífero e também prestar uma homenagem aos índios que habitavam a região de ocorrência do mesmo (Boscardin Borghetti et. al., 2004).

No Brasil está localizado nos Estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Atualmente o Aquífero Guarani tem relevante importância como fonte de água doce para diversos centros urbanos da América do Sul assim como, para o desenvolvimento da agricultura e da pecuária destas regiões.

Entretanto, nas áreas de recarga, o aquífero é livre e, portanto está sujeito à contaminação de efluentes e rejeitos depositados sobre os solos que o cobrem em toda sua extensão. Assim, torna-se fundamental não apenas sua proteção em todos os níveis, como o conhecimento do seu grau de vulnerabilidade natural.

A vulnerabilidade natural de um aquífero está em função de duas condições primárias e lógicas: Primeira – Acessibilidade dos fluxos de contaminantes a zona saturada Segunda – Capacidade de atenuação da zona insaturada, através de reações químicas e detenção física dos contaminantes (Foster e Irata, 1988).

Nas últimas duas décadas, alguns métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos foram desenvolvidos e aprimorados por pesquisadores de diferentes países, essas técnicas de avaliação da vulnerabilidade podem ser ferramentas importantes para o planejamento do uso da terra e ocupação territorial de determinada região, bem como o planejamento do uso e da proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

A área estudada está localizada na confluência das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, também denominada de “Sistema Jacaré”, na região centro-norte do Estado de São Paulo e foi selecionada por situar-se em uma porção aflorante do Aquífero Guarani.

2. OBJETIVO

Este trabalho objetivou utilizar as técnicas geoestatísticas da Krigagem ordinária e indicativa para elaborar mapas geoestatísticos da vulnerabilidade do Aquífero Guarani na região central da Bacia hidrográfica dos rios Jacaré Pepira e Guapiruba, região centro norte do estado de São Paulo através do método AVI – *Aquifer Vulnerability Index* (Índice de Vulnerabilidade de Aquífero) elaborado por Von Stempvoort et al. (1992).

3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Como é citado, as águas subterrâneas do aquífero Guarani constituem-se, nos dias atuais, numa das fontes de água doce de suma importância para países em desenvolvimento da América do Sul, que são abastecidos por este aquífero. Entretanto, por ser um aquífero livre, o uso e ocupação territorial diversificado que ocorrem nas regiões sudeste e sul do Brasil, podem comprometer de forma agressiva a qualidade dos seus recursos. A área de estudo deste projeto situa-se na parte centro-norte do Estado de São Paulo, onde se verifica intensa atividade antrópica com destaque para:

- *Expansão de centros urbanos*: as cidades, principalmente centros regionais, atraem indústrias de várias naturezas que, invariavelmente, produzem algum tipo de resíduos cuja disposição no solo gera, ao longo do tempo, algum tipo de efluente que pode contaminar as águas subterrâneas mais próximas da superfície.
- *Agricultura*: o uso indiscriminado de pesticidas, herbicidas e outras substâncias nocivas, que são absorvidos pelos solos e, conforme a natureza destes compostos químicos pode contaminar as águas subterrâneas e/ou superficiais.
- *Desastres de obras civis*: o rompimento de lagoas de rejeitos químicos, rompimento de oleodutos e similares, acidentes com cargas perigosas e outros acidentes trágicos, podem poluir as águas subterrâneas.

Assim, torna-se fundamental não apenas sua proteção em todos os níveis, como o conhecimento do seu grau de vulnerabilidade natural.

Os mapas de vulnerabilidade natural de aquíferos são elaborados de forma semi-empírica, com definição de classes de vulnerabilidade baseadas em ponderações semiquantitativas de atributos do meio físico ou na experiência do profissional da área. Por outro lado, os modelos determinísticos, que são muito conhecidos na engenharia, revelam-se muitas vezes, inadequados para o tratamento dos dados provenientes do meio físico, tendo em vista os inúmeros processos que podem conduzir aos valores das variáveis deste meio. Portanto, é praticamente impossível modelar deterministicamente os fenômenos naturais, o que faz com que os modelos estocásticos ou probabilísticos, que apresentam prováveis respostas de uma variável decorrente de um processo natural, surtam como a melhor alternativa para a resolução deste problema.

O uso de técnicas de modelagem geoestatística, de ampla e consagrada aplicação, nos estudos de avaliação de depósitos minerais e reservatórios de petróleo, podem ser adaptadas no sentido de elaborar uma classificação espacial ou uma regionalização dos índices de vulnerabilidade em termos probabilísticos de áreas onde o aquífero Guarani encontra-se exposto. Estes produtos, na forma de mapas, são importantes, pois auxiliam os engenheiros profissionais para tomadas de decisões, visto que as estimativas são feitas junto com uma avaliação da incerteza. Este aspecto evidencia o risco e, portanto, contribui para o planejamento do uso e ocupação territorial da região estudada.

Para isso, podem ser utilizadas as principais técnicas geoestatísticas, cujo processamento permitirá a obtenção dos mapas classificatórios do Índice de Vulnerabilidade adotado. Assim, podem ser empregadas as seguintes técnicas:

- *Krigagem ordinária*: representa o método clássico da geoestatística e será empregado para uma avaliação preliminar da propriedade alvo. Será útil no sentido que possui uma medida de incerteza, ou seja, o desvio padrão da krigagem (STURARO e ANIM, 1988).

- *Krigagem indicativa*: reproduz a distribuição de probabilidade para um ponto situado no centro do bloco. Nesta forma, poder-se-á classificar probabilisticamente os blocos segundo as tabelas dos índices de vulnerabilidade, já estabelecidos na literatura. (STURARO e ANIM, 1999; STURARO *et al.*, 2000).

Por fim, podem ser elaborados mapas que integrem vários produtos geoestatísticos, com o intuito de gerar mapas dirigidos para uma determinada obra. Os principais mapas geoestatísticos envolvem variáveis como a espessura de solo, permeabilidade, propriedades granulométricas e outras (STURARO e ANIM, 1999; GOVONE e STURARO, 2000).

3.1 - Aquífero Guarani

O Aquífero Guarani está localizado na América do Sul, entre as latitudes sul de 12° e 35° e as longitudes oeste de 4° e 5°. O Aquífero tem grande importância econômica nos países onde está localizado e sobre sua área de ocorrência são realizadas diversas atividades com grande potencial poluidor.

O Sistema Aquífero Guarani ocupa 5% da superfície da Bacia sedimentar do Paraná. Esta bacia segundo CANG (2001), coincide com a calha do Rio Paraná. As bordas estão em elevações que podem variar entre 200 metros na borda oeste até 1200 metros na borda leste.

A Bacia Sedimentar do Paraná é caracterizada como sendo uma bacia intracratônica, pois sua evolução ocorreu sobre uma área cratônica, ou seja, sua formação ocorreu sobre uma placa continental pouco deformada. O maior eixo da bacia segue direção NE-S com uma extensão de aproximadamente 1 000 km e largura média de 900 km (Alán *et al*, 1999).



Figura 2 - Representação esquemática da localização do Aquífero Guarani e da Bacia Sedimentar do Paraná, fonte: Modificado de Boscardin Borghetti et. al., 2004

Segundo Milani (1999), as bacias cratônicas formaram-se desde o início do Ordoviciano até o Cretáceo. A deposição de suas seqüências ocorreu durante o Mesozóico, primeiramente uma deposição sedimentar seguida de uma deposição vulcânica (KITT, 2000).

Os sedimentos da Bacia Sedimentar do Paraná estão distribuídos em várias camadas litoestratigráficas, somando 1000 metros de espessura de sedimentos. Abaixo se pode observar a seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná e o fluxo previsto entre as seções geológicas típicas do Aquífero Guarani.

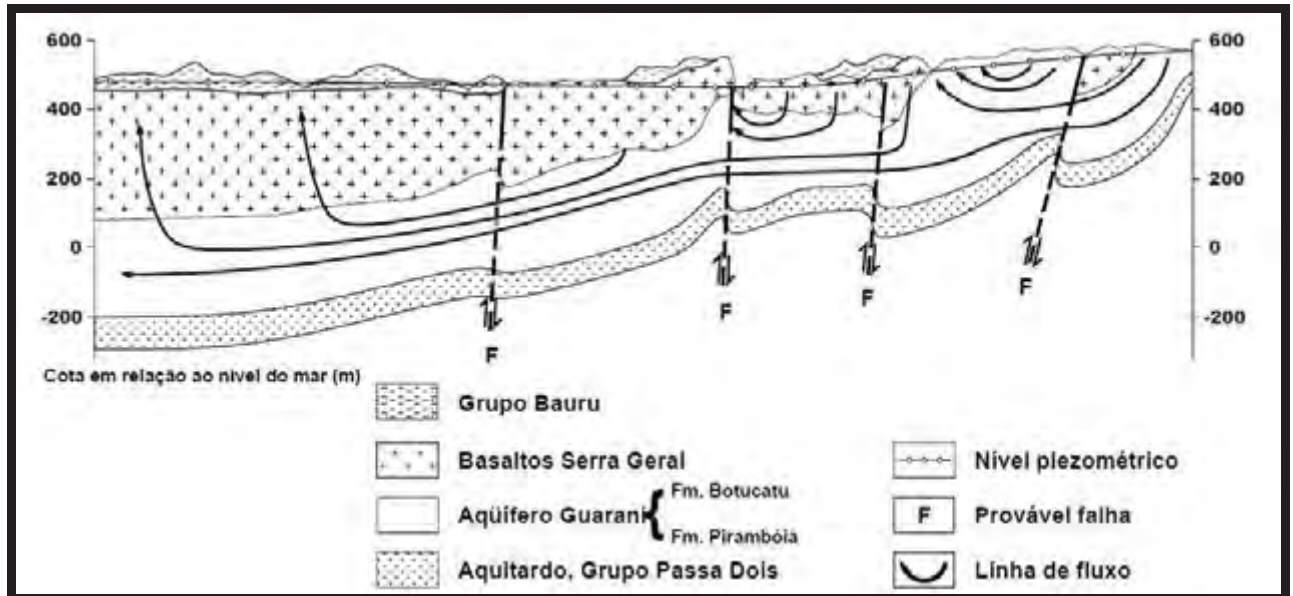


Figura 3 - Seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná e fluxo previsto para as formações geológicas do Aquífero Guarani, na região de Ribeirão Preto - SP fonte: RABELO 2006.

O Aquífero Guarani é composto em grande parte por rochas arenosas de deposição em ambiente fluvio-lacustre e eólica do Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu). Segundo ARAÚJO (1995), do ponto de vista hidráulico as rochas da Formação Botucatu configuram-se como bons aquíferos por apresentarem alta permeabilidade e maior porosidade, as rochas da Formação Pirambóia são uma fonte inferior de água por apresentarem maior concentração de argila e menor porosidade.

O Sistema Aquífero Guarani tem estrutura arqueada para baixo, as camadas mergulham dos afloramentos em direção a calha (Araújo *et al*, 1995). As zonas de afloramento são áreas de recarga direta do Aquífero e representam 13% da superfície do Aquífero Guarani.

Sobre as áreas de recarga direta são realizadas inúmeras atividades antrópicas com grande potencial poluidor. No Brasil podemos citar atividades como as plantações de soja, cana-de-açúcar, café, exploração de florestas e pastagens de bovinos e ovinos. As Áreas de

afloramento são os locais que ocorrem a recarga direta do Aquífero Guarani e podem ser observadas na figura abaixo:



Figura 4 - Mapa esquemático do Aquífero Guarani e suas áreas de afloramento no Brasil, fonte: Modificado de CAS/SRH/MMA (2001) por Boscardin Borghetti et. al., 2004

O Aquífero Guarani tem grande importância econômica para diversas regiões brasileiras e é uma grande fonte de abastecimento de água doce para a população mundial e sendo constituído principalmente por arenitos apresenta grande vulnerabilidade nas áreas de recarga, devido a esses fatos é de extrema importância a proteção de suas águas.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 - Localização

A área de estudo, situa-se próxima aos municípios de Araraquara, São Carlos e Ribeirão Bonito que estão localizados na porção central da confluência das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, também denominada de “Sistema Jacaré”. O referido sistema estende-se por 140 Km de comprimento (noroeste – sudeste) e 0Km de largura (norte – sul), drenando uma área correspondente a . 48Km² e com 44 Km de perímetro. A região localiza-se na porção central do Estado de São Paulo, entre os paralelos 21°37’ e 22°31’ de latitude sul e os meridianos 47°43’ e 49°02’ de longitude oeste.

Os rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira deságuam na região do curso médio do Rio Tietê e pertencem à Bacia hidrográfica Tietê-Jacaré, a qual compõe uma das 22 Unidades hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) do Estado de São Paulo, mais precisamente a UGRH I-13.

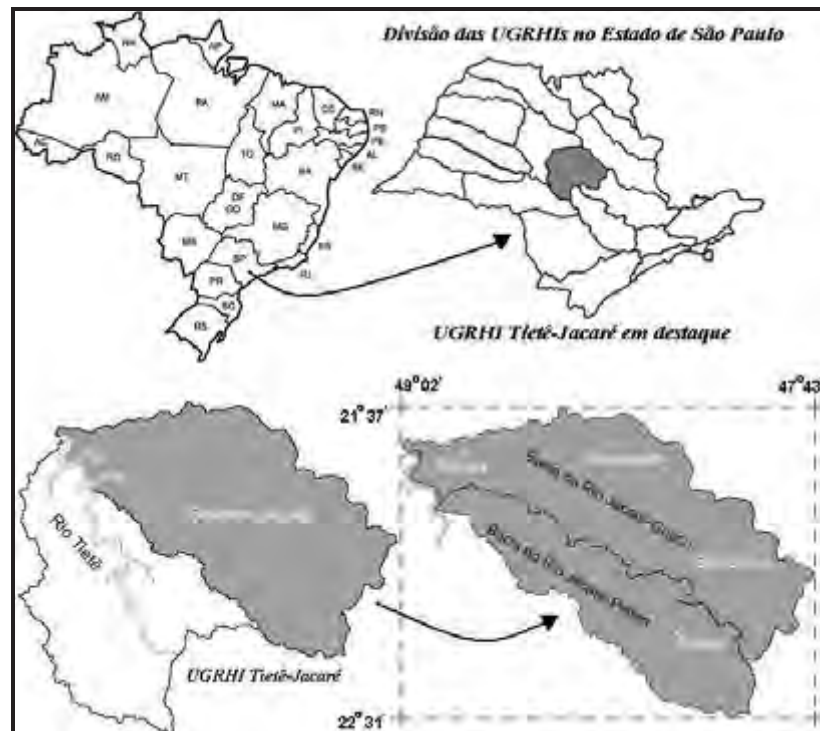


Figura 5 - Mapa de localização do Sistema Jacaré

O presente trabalho foi realizado em uma área com afloramentos do Sistema Aquífero Guarani e intensa atividade antrópica. A área tem aproximadamente 954 Km² e está localizada na porção central do Sistema Jacaré e pode ser observada abaixo:

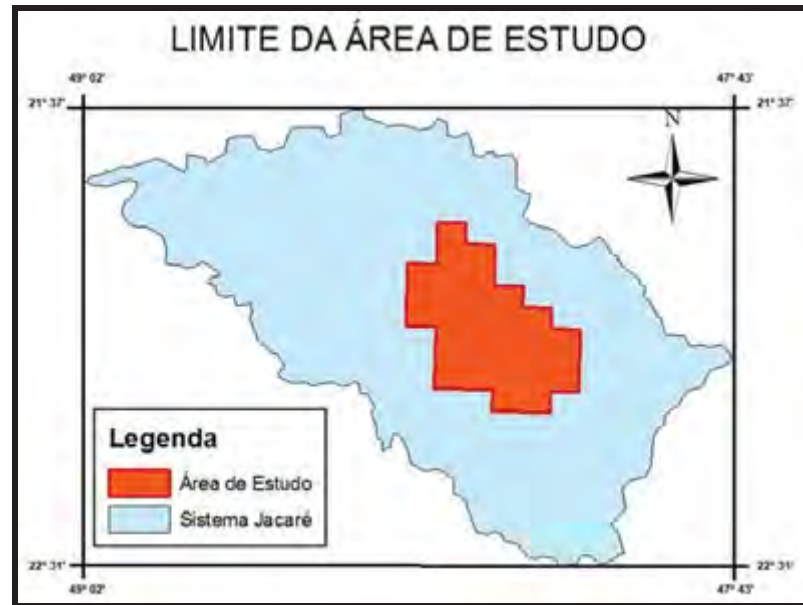


Figura 6 – Localização da Área de Estudo no Sistema Jacaré.

4.2 - Vias de Acesso

As principais vias de acesso a área de estudo são as Rodovias SP – 310 (Rodovia ashington uiz), SP – 215 (Rodovia uís Augusto de Oliveira) e a SP – 255.

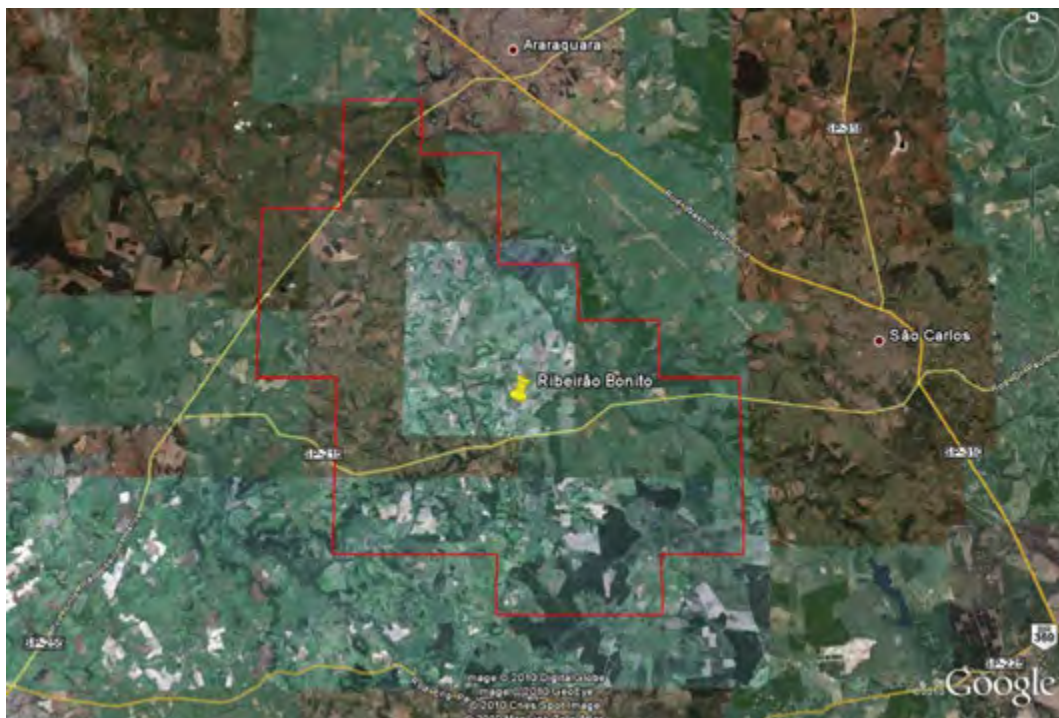


Figura 7 – Localização das vias de acesso na área estudada, Fonte: Google Earth

4.3 - Geologia

As bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira estão localizadas sobre a borda nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná onde afloram as unidades geológicas compostas por sedimentos arenosos das formações Pirambóia e Botucatu, das rochas ígneas da Formação Serra Geral, das rochas sedimentares do Grupo Bauru, principalmente a Formação Adamantina e, por fim, os sedimentos da Formação Itaqueri, com entretanto com os sedimentos aluvionares de idades recentes, isto é, do Terciário ao Quaternário.

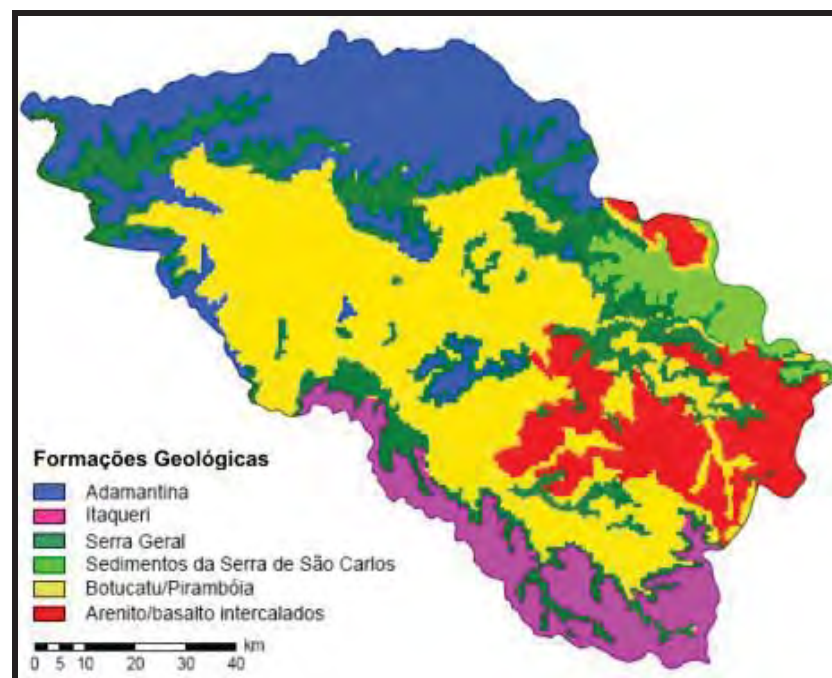


Figura 8 - Mapa geológico das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, fonte: RABELO 2006.

Porém, a geologia da área de estudo é composta predominantemente por rochas arenosas das Formações Pirambóia e Botucatu, por derrames basálticos da Formação Serra Geral e por arenitos e lamitos da Formação Adamantina. As Formações Pirambóia e Botucatu estão aflorantes em grande parte da área e também estão confinadas pela Formação Serra Geral.

4.3.1 - Formação Botucatu

A formação Botucatu está sobreposta pela Formação Serra Geral e sotoposta pela Formação Pirambóia. É constituída por arenitos eólicos de coloração avermelhada com predomínio de granulometria fina a média, bem arredondada e com grãos foscos (WU e CAETANO-CHANG, 1992).

Segundo Schneider *et al.*, 1974, a deposição ocorreu em ambiente desértico, com deposição eólica, podendo ter na parte basal contribuição de sedimentação fluvial. A posição estratigráfica e suas características de contato com a Formação Serra Geral indicam sua idade entre 12 e 10 Ma (COELHO, 1974), ou seja, idade jurássica-Cretácea.

4.3.2 - Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia segundo Caetano-Chang (1997), é composta por arenitos finos e arenitos finos silteosos e na porção superior ocorrem de arenitos finos a muito grossos. Os arenitos apresentam coloração esbranquiçada, amarelada e avermelhada os grãos são polidos, subangulares e subarredondados.

Através das características litológicas e sedimentares foi indicada origem continental fluvial, com depósitos de rios meandantes e pequenas lagoas associadas, em condições climáticas áridas (Schneider *et al.*, 1974).

A idade da Formação Pirambóia é determinada como sendo do Triássico Inferior.

4.3.3 - Formação Serra Geral

Autores como Schneider (1974) e Petri e Felfaro (1974), descrevem que a Formação Serra Geral resultou de processos de vulcanismo fissural, ou seja, penetração de magma em locais de fraqueza estrutural.

Segundo EAU (2002), essa Formação é composta em grande parte de basaltos e os derrames basálticos recobrem mais de um milhão de km². Basicamente a formação Serra Geral é composta por lavas basálticas, de textura afanítica e de coloração cinza a negra na porção superior (Schneider *et al.*, 1974). Na porção inferior podem ocorrer intercalações entre os derrames basálticos e os arenitos eólicos (EAU, 2002).

As intercalações entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral e os arenitos eólicos da Formação Botucatu são denominadas de feições intertrapianas. Schneider (1974) considera que os derrames Basálticos começaram durante as condições desérticas de deposição da Formação Botucatu.

4.3.4 - Formação Adamantina

A Formação Adamantina pertence ao Grupo Bauru e está sobreposta a Formação Serra Geral, ocorre em grande extensão do Estado de São Paulo e constitui a maior parte do Planalto Ocidental (Schneider *et al.*, 1974).

Apresenta bancos arenosos de granulação fina a muito fina, cor rósea a castanho e seios de argilito, cimento e nódulos carbonáticos (Soares et al., 1999). De acordo com Paula e Silva *et al.* (2002) e Fernandes e Coimbra (1999), a Formação Adamantina apresenta deposição fluvial em canais meandantes e em planície aluvial.

Era / Sist.	Grupo	Formação	Tipos de Rochas (Litologia)		
CENOZOICO	QUATERNÁRIO TERCIÁRIO		Sedimentos Aluvionares (Qa): aluviões em geral, incluindo depósitos de terraço. Cobertura da Serra de São Carlos e similares (TQi): arenitos conglomeráticos.		
		Itaqueri (KTi)	Predominantemente arenitos com cimento argiloso com lentes alongadas de folhelhos e com conglomerados limiticos.		
MESOZOICO	CRETÁCEO	BAURU	Marília (Km)	Arenitos de granulação fina e grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte. Subordinadamente ocorrem lentes de siltitos, argilitos e arenitos muito finos. Presença comum de nódulos carbonáticos.	
			Adamantina (Ka)	Arenitos finos e muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos com lentes de siltitos arenosos e argilitos ocorrendo em bancos maciços, estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno a médio porte.	
			Santo Anastácio (Ksa)	Arenitos muito finos e médios, mal selecionados, subordinadamente de caráter arosiano, geralmente maciços, apresentando localmente cimento e nódulos carbonáticos.	
			Caiuá (Kc)	Arenitos finos a médios, com grãos bem arredondados, com coloração arroxeada típica, apresentando abundantes estratificações cruzadas de grande e médio porte. Localmente ocorrem cimento e nódulos carbonáticos.	
	JURÁSSICO	SÃO BENTO	Serra Geral (JKsg)	Rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, apresentando estratificação cruzada tangencial. Ocorrem esparsos níveis vitrofíricos não individualizados.	
			Botucatu (JKb)	Arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. Ocorrem restritamente depósitos fluviais de natureza areno-conglomerática e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres.	
			Pirambóia (TJp)	Depósitos de arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, com estratificação cruzada ou plano-paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos variegados e raras intercalações de natureza areno-argilosa.	
PALEOZOICO	PERMIANO SUPERIOR	PASSA DOIS	Rio do Rasto (Prr)	Depósitos de planícies costeiras compreendendo arenitos muito finos a médios, esverdeados a avermelhados e, subordinadamente, argilitos e siltitos avermelhados.	
			Teresina (Pt)	Depósitos possivelmente marinhos prodeltâicos, compreendendo folhelhos e argilitos cinza escuros a esverdeados ou avermelhados, finamente laminados, em alternância com siltitos e arenitos muito finos, presença de restritas lentes de calcários oolíticos e sílex.	
			Serra Alta (Psa)	Depósitos essencialmente marinhos incluindo siltitos, folhelhos e argilitos cinza escuros a pretos, com laminação plano-paralela.	
			Irati (Pi)	Siltitos, argilitos e folhelhos silticos de cor cinza clara a escura, folhelhos pirobetuminosos, localmente em alternância rítmica com calcários creme silicificados e restritos níveis conglomeráticos.	
				Formação Corumbataí (Pc): depósitos possivelmente marinhos de planícies de maré, incluindo argilitos, folhelhos e siltitos cinza, arroxeados ou avermelhados, com intercalações de bandas carbonáticas, sílexitos e camadas de arenitos finos.	

Figura 9 – Coluna Litoestratigráfica da Bacia Do Paraná, Fonte: IPT, 1981; IPT, 2003; RARELO, 2006.

5. METODOLOGIA

Neste t3pico ser3o descritas as etapas e as considera3es sobre a estrutura33o e reali a33o deste trabalho. O presente trabalho pode ser dividido basicamente em quatro etapas distintas.

1 – levantamento Bibliogr3ficos nesta etapa foram determinados os m3todos a serem usados, foi definido o limite da 3rea de estudo, suas caracter3sticas geol3gicas e hidrogeol3gicas, atrav3s da utili a33o de teses e trabalhos cient3ficos e istentes na biblioteca da UNESP – Campus de 3io Claro, relacionados ao tema e a 3rea de estudo

2 – Obten33o de dados indiretos esta etapa compreende a coleta de dados a partir da utili a33o de imagens de sat3lite e utili a33o de cartas topogr3ficas na escala de 1:100.000 da 3rea de estudo

– Obten33o de dados diretos esta etapa est3 relacionada 3 coleta de dados de campo atrav3s de ensaios de permeabilidade com a utili a33o do Perme 3metro de Guelph e a coleta de amostras de solo

– Processamento dos dados nesta etapa os dados obtidos anteriormente foram organi ados e trabalhados para a obten33o dos produtos finais do estudo.

5.1 - 3ndice de vulnerabilidade AVI

Nas 3ltimas duas d3cadas, alguns m3todos de avalia33o de vulnerabilidade de a 3feros foram desenvolvidos e aprimorados por pes uisadores de diferentes pa3ses, merecendo desta ue a ueles ue fa em uso de 3ndices emp3ricos e semi-emp3ricos consagrados na literatura, como o 3ndice de vulnerabilidade do A 3fero (A), GO e AST C (A E *et al.*, 1992).

Neste pro 3eto ser3 utili ado m3todo o A , ue foi desenvolvido pelo National Hydrolog 3search nstitute (NH), no Canad3 (AN STE P OO T *et al.*, 1992). O referido m3todo baseia-se em dois par metros f3sicos (1) di – espessura de cada camada

litológica sedimentar acima da zona saturada (2) i – condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas. e posse destes dois par metros, calcula-se a resistência hidráulica C , conforme $C = \sum(d_i \cdot i)$. A relação entre a vulnerabilidade e a resistência hidráulica é apresentada no Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de vulnerabilidade do índice AVI

Resistência hidráulica (anos)	log C	Vulnerabilidade
0 - 10	< 1	Extremamente alta
10 -100	1 e 2	Alta
100 - 1000	2 a 3	Moderada
1000 - 10.000	3 a 4	Baixa
> 10.000	> 4	Extremamente baixa

5.2 - Ensaio de condutividade hidráulica com o Permeômetro de Guelph

A condutividade hidráulica do solo pode ser definida como a facilidade de um líquido se deslocar pelo solo. A condutividade hidráulica do solo também é denominada como o coeficiente de permeabilidade (k).

O Permeômetro de Guelph é um instrumento de fácil manipulação para medida *in situ* da condutividade hidráulica de maneira rápida e acurada. O equipamento pode ser transportado, montado, e operado facilmente por uma pessoa (SOUZA, OLIVEIRA E UPELANTICO, 1991).

O método do Permeômetro de Guelph (PG) consiste em medir a taxa de infiltração de água no solo utilizando o princípio do sifão de Mariotte, ou seja, o ensaio é realizado com fornecimento de água sob carga hidráulica constante (Santos, 2008). O ensaio de permeabilidade é realizado no solo dentro de um furo com dimensões conhecidas de 10 cm de diâmetro e a uma profundidade de 1,0 metros.

A taxa de infiltração de água no solo torna-se constante após determinado tempo de estabilização, a estabilização está diretamente relacionada com fatores físicos, dentre eles, a umidade, a composição e a textura do solo (EAU O, 2005). Quando é estabelecido um nível de água constante inicia-se a formação de um “bulbo” de saturação de água na base do furo (Santos, 2005). O bulbo tem a como função simular a infiltração de um líquido no solo.

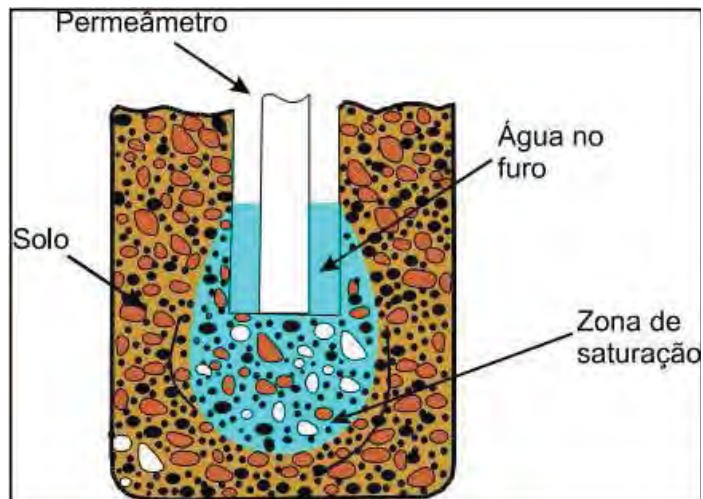


Figura 10 - Bulbo de saturação d'água no solo, fonte: Santos, 2005

Para o cálculo da condutividade são realizadas duas leituras, a primeira leitura é realizada com carga de pressão de h_1 cm (H1) e a segunda leitura é realizada com carga de pressão de h_2 cm (H2). O resultado da primeira leitura é denominado de Q_1 e o resultado da segunda leitura é denominado de Q_2 , ambos com unidade de leitura de cm s. Os parâmetros Q_1 e Q_2 são determinados após a estabilização do equipamento, analisando-se a variação de altura da coluna de água durante intervalos de tempo iguais.

É possível optar por realizar o ensaio de duas maneiras distintas, podem ser utilizados os dois reservatórios de água para o ensaio ou pode-se utilizar somente o reservatório interno. A equação matemática para o cálculo da condutividade hidráulica (K) utilizando o Permeômetro de Guelph, segundo Soil Moisture Corp.(1998), está descrita abaixo

$$K = \frac{(h_1 - h_2) \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) - (h_2 - h_1) \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)}{2(h_1 + h_2)} \quad \text{Em cm s}^{-1}$$

$$K = \frac{(h_1 - h_2) \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) - (h_2 - h_1) \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)}{2(h_1 + h_2)} \quad \text{Em cm s}^{-1}$$

Onde

- Correspondentes ao reservatório d'água utilizado, em cm^2 .

(dois reservatórios) $1,22 \text{ cm}^2$ (reservatório interno) $2,1 \text{ cm}^2$

5.3 - Caracterização da espessura da zona insaturada

Para a caracterização da espessura das camadas litológicas acima da zona saturada foram realizadas etapas que estão descritas abaixo

5.3.1 - Caracterização da cota topográfica

Nesta etapa foi elaborado um mapa da cota topográfica da área de estudo utilizando uma imagem de satélite no formato S T , o software Global Mapper e técnicas e softwares geoestatísticos.

Com o auxílio do software Global Mapper a imagem de satélite foi transformada em uma malha de pontos digital com o espaçamento de 1 metros entre cada ponto, após a elaboração dessa malha de pontos foram utilizadas técnicas geoestatísticas no software Surfer para a confecção do mapa da cota topográfica.

5.3.2 - Determinação da altitude do nível estático

Para a caracterização da altitude do nível estático (lençol freático) foram utilizados conceitos de hidrologia e hidrogeologia. Com a utilização de cartas topográficas da área estudada na escala de 1:1 foram elaboradas tabelas com as coordenadas e as cotas dos cursos de água. Para complementar os dados extraídos das cartas topográficas, nas etapas de campo foram realizadas leituras da profundidade do nível d'água com um medidor de nível d'água.

Através dessas informações e a utilização das técnicas geoestatísticas no software Surfer foi confeccionado o mapa do nível d'água.

5.3.3 - Elaboração do mapa de espessura da zona insaturada

Com os dados gerados nas duas etapas anteriores e sabendo que a espessura da zona insaturada em cada ponto é a diferença entre a cota topográfica e a cota do nível d'água, o mapa da cota do nível d'água foi subtraído do mapa da cota topográfica gerando o mapa da espessura média da zona insaturada.

5.4 - Análise geoestatística

A essência da teoria geoestatística está fundamentada na Teoria das Variáveis Aleatórias, ou seja, está baseada nos modelos probabilísticos e é dirigida para efetuar estimativas no espaço. A realização de estimativas no espaço é uma das principais atividades

nas geociências e ciências exatas e constitui-se no mapeamento de variáveis discretas e contínuas (STU A O AN , 2).

A diferença entre Estatística Clássica e a Geoestatística consiste em que, a Estatística Clássica considera os valores amostrados como sendo independentes espacialmente, enquanto a Geoestatística requer que os valores das amostras estejam relacionados com sua posição espacial. A Geoestatística primeiramente avalia e modela a variabilidade espacial dos dados, para em seguida utilizar técnicas apropriadas de estimativas, cujos resultados serão imagens que representam a distribuição espacial da variável em estudo (STU A O AN , 2).

A variabilidade espacial é a principal característica da variável em estudo, o seu entendimento e modelamento representam a base de toda a análise Geoestatística, pois a sua propagação espacial determina o fenômeno que a originou (STU A O AN , 2).

Neste trabalho para a análise geoestatística foram seguidas as etapas descritas abaixo:

5.4.1 - Levantamento de amostras georeferenciadas

Atualmente, nota-se uma maior consciência sobre a importância da preservação do meio ambiente, porém existem ainda limitações de custos na tecnologia ambiental para a coleta e análise de amostras. A amostragem de dados considerados exatos (“hard”) é dispendiosa e, portanto, encontram-se malhas precárias destes dados. Por outro lado, existe uma disponibilidade de dados do tipo expeditos (“soft”), isto é, dados de fácil aquisição, cujas magnitudes encontram-se em intervalos, como exemplo pode-se citar os valores das cotas topográficas e traçados de mapas topográficos.

5.4.2 - Análise exploratória dos dados

A construção do histograma da(s) variável(eis) é essencial para a análise da distribuição dos valores das amostras. Através da análise dos histogramas é possível determinar a existência de valores que escapem os limites da média ± 2 desvios padrões, esses valores são denominados de anomalias. Anomalias podem influenciar negativamente na análise da variabilidade espacial das amostras com pontos distorcidos em relação a um modelo clássico (STU A O AN , 2).

5.4.3 - Análise da variabilidade espacial

A forma de análise da variabilidade espacial está fundamentada na regressão linear e tem como objetivo determinar a dependência de valores de uma variável com ela mesma, mas separadas por um vetor h (STU A O AN , 2).

O grau de dependência de uma variável () com ela mesma, separada por um vetor h , pode ser determinado pelo momento de inércia, que pode ser representado por uma função denominada de variograma. Calculando-se o momento de inércia para várias distâncias h , elaboram-se um gráfico denominado de semivariograma experimental da variável () (STU A O AN , 2).

Com o semivariograma elaborado é possível adotar um modelo matemático teórico que representa a propagação e variabilidade espacial das amostras.

5.4.4 - Estimativa por Krigagem

A geoestatística, principalmente a não-paramétrica, devido à sua capacidade de trabalhar com a transformação dos dados originais em indicadores, possui recursos para a integração de dados e atos com dados situados em intervalos e, através desta conexão, fornecer respostas em termos de probabilidades (STU A O AN , 2).

A krigagem é um método de estimativa linear e local, que procura minimizar os erros de estimativas, levando em conta as características do modelo de propagação e variabilidade espacial das variáveis regionais determinadas pela função semivariograma (STU A O AN , 2).

Nas variáveis estudadas deve existir certa correlação espacial para que os dados obtidos por amostragens sejam utilizados para estimar os valores de pontos desconhecidos (STU A O AN , 2).

6. RESULTADOS

Neste capítulo para cada variável será apresentado seu histograma, variograma e mapa geoestatístico e também serão apresentados os mapas elaborados através da utilização dos mapas gerados em cada variável. Os dados estatísticos e geoestatísticos foram elaborados em programas de domínio público e também por aqueles adquiridos pela universidade.

6.1 - Caracterização da espessura da zona insaturada

6.1.1 - Caracterização da cota topográfica

Com o auxílio de software de geoprocessamento, uma imagem de satélite da área de estudo no formato SRTM (Figura 11) foi transformada em uma malha com 2 mil pontos e com o espaçamento de 1 metro entre cada ponto. Tendo em vista a limitação do software foram selecionados 100 pontos aleatórios e sem repetição para a elaboração dos resultados.

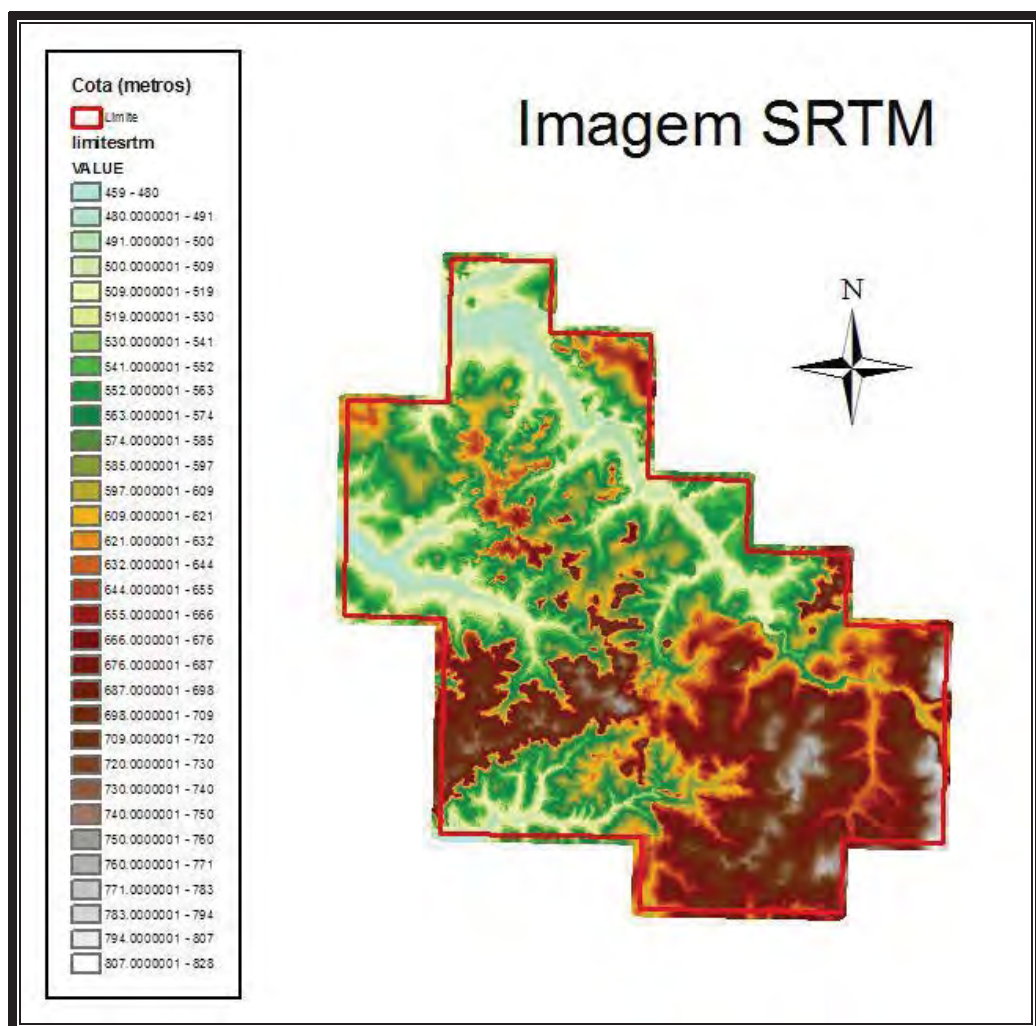


Figura 11 - Imagem SRTM da área de estudo

A malha de Pontos digital contém 1 pontos e os valores da cota topográfica para as amostras variaram de 9 até 22 metros de altitude. Os valores da média e da mediana encontram-se próximos e representam a tendência central da distribuição.

Nota-se no histograma a presença de duas modas que refletem o arcabouço litológico da área, ou seja, as cotas das Formações Botucatu e Pirambóia são comumente mais baixas que as cotas da Formação Serra Geral.

O histograma de frequência da variável Cota Topográfica pode ser observado na figura 12.

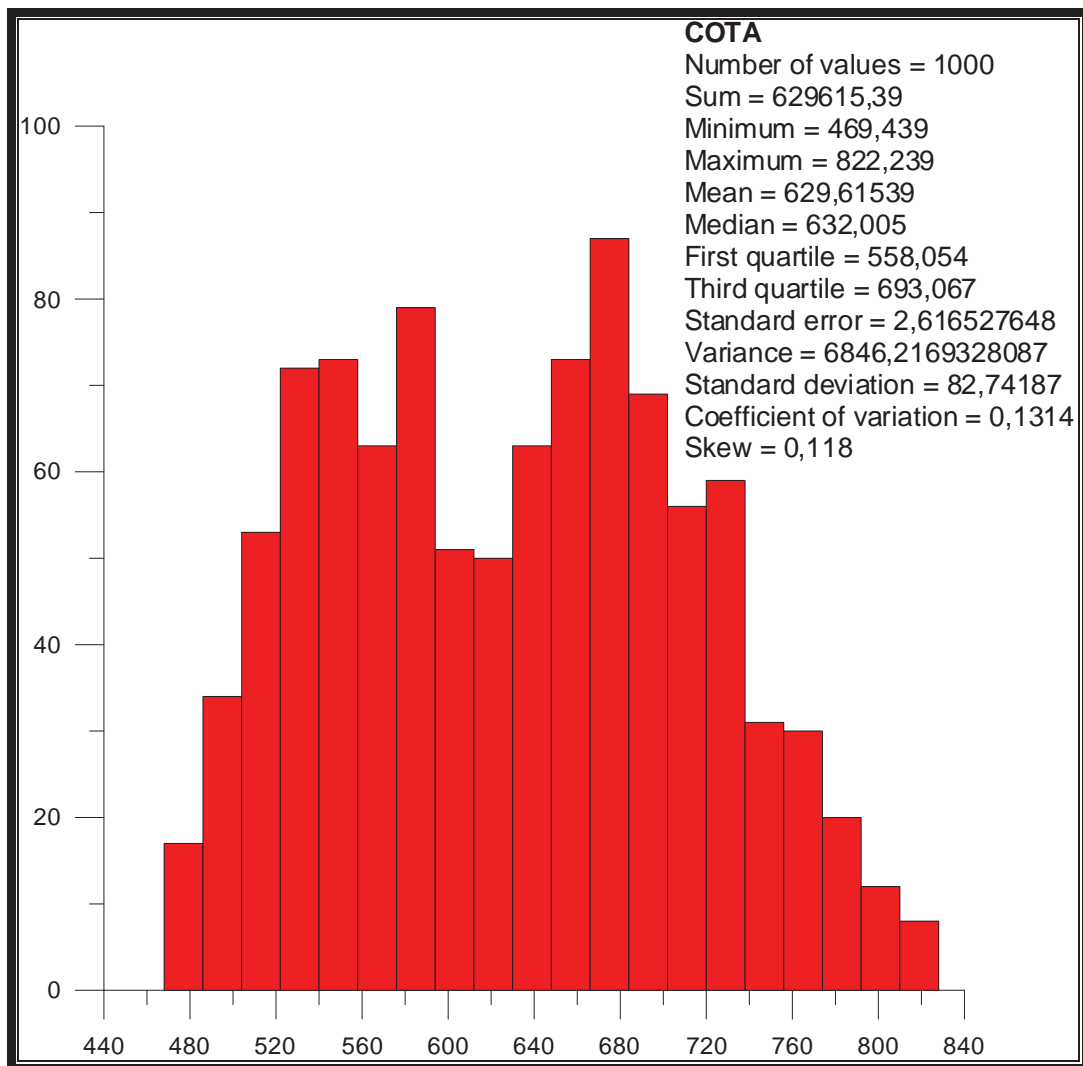


Figura 12 - Histograma de frequência da variável cota topográfica

O variograma modelado da Cota Topográfica apresentou uma componente aleatória de 1 m^2 (Efeito Pepita - C), 1 m^2 de range e 1 , Sill ($C1$). O modelo adotado foi do tipo esférico, cu o gráfico de variação encontra-se na Figura 13.

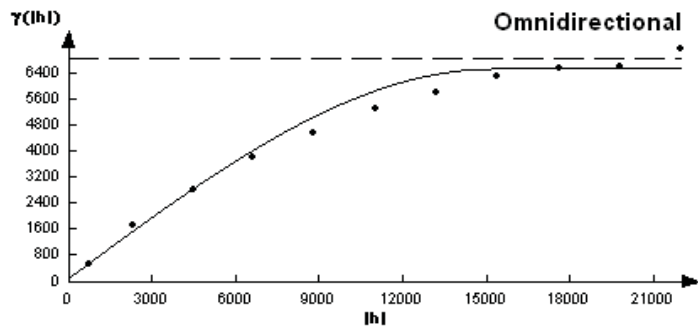


Figura 13 - Variograma modelado da Cota Topográfica

Após a modelagem do variograma e a obtenção dos parâmetros Efeito Pepita, range e Sill foi elaborada uma superfície da variável Cota topográfica através da interpolação.

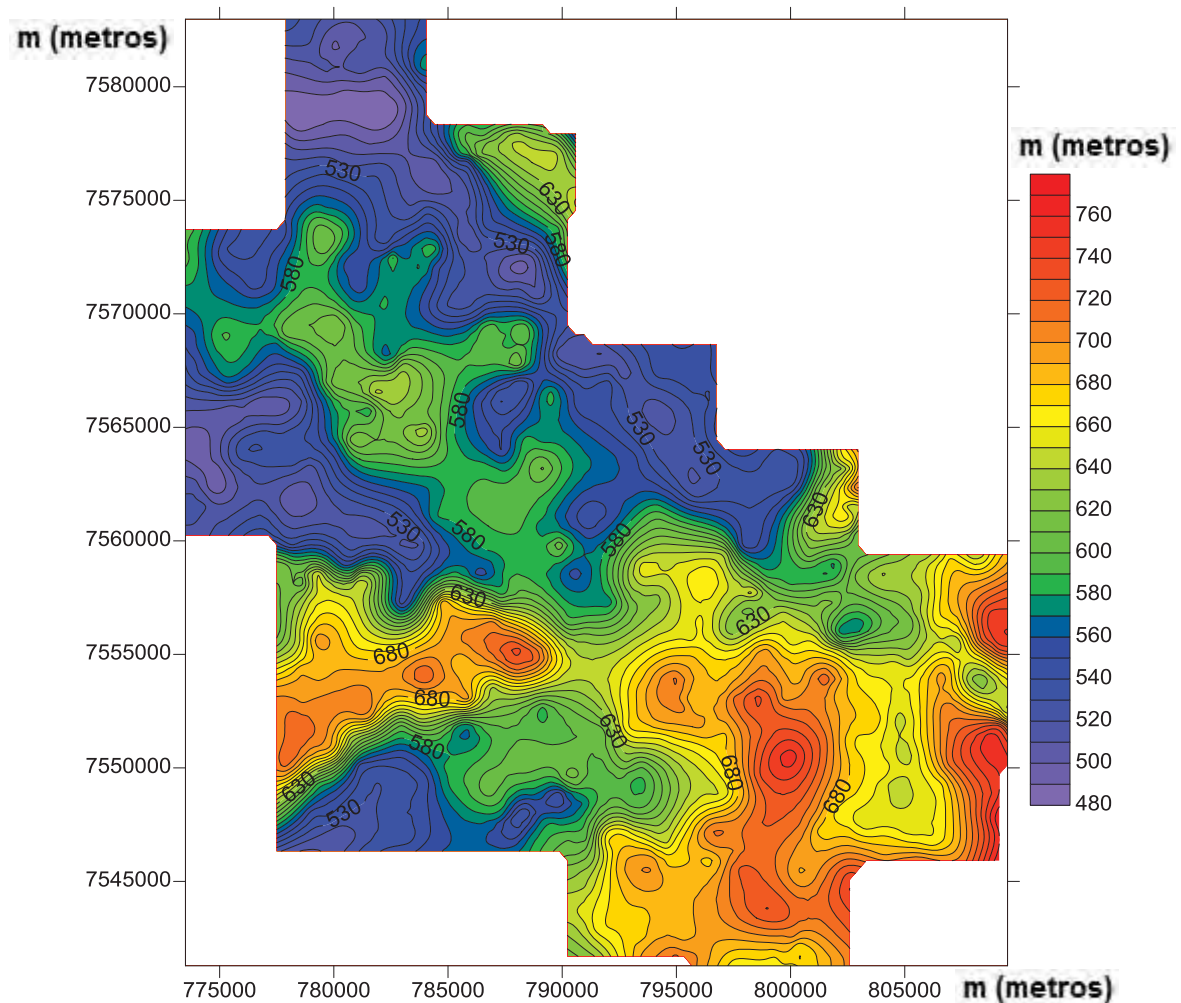


Figura 14 - Superfície da Cota Topográfica

6.1.2 - Determinação da altitude do nível estático (lençol freático)

Como descrito no item 6.1.2 para a caracterização do nível estático foram utilizadas cartas topográficas da área estudada na escala de 1:100.000. Na Figura 15 pode ser observada a distribuição espacial dos pontos amostrados e a configuração do mosaico das folhas topográficas que compõem a área estudada.

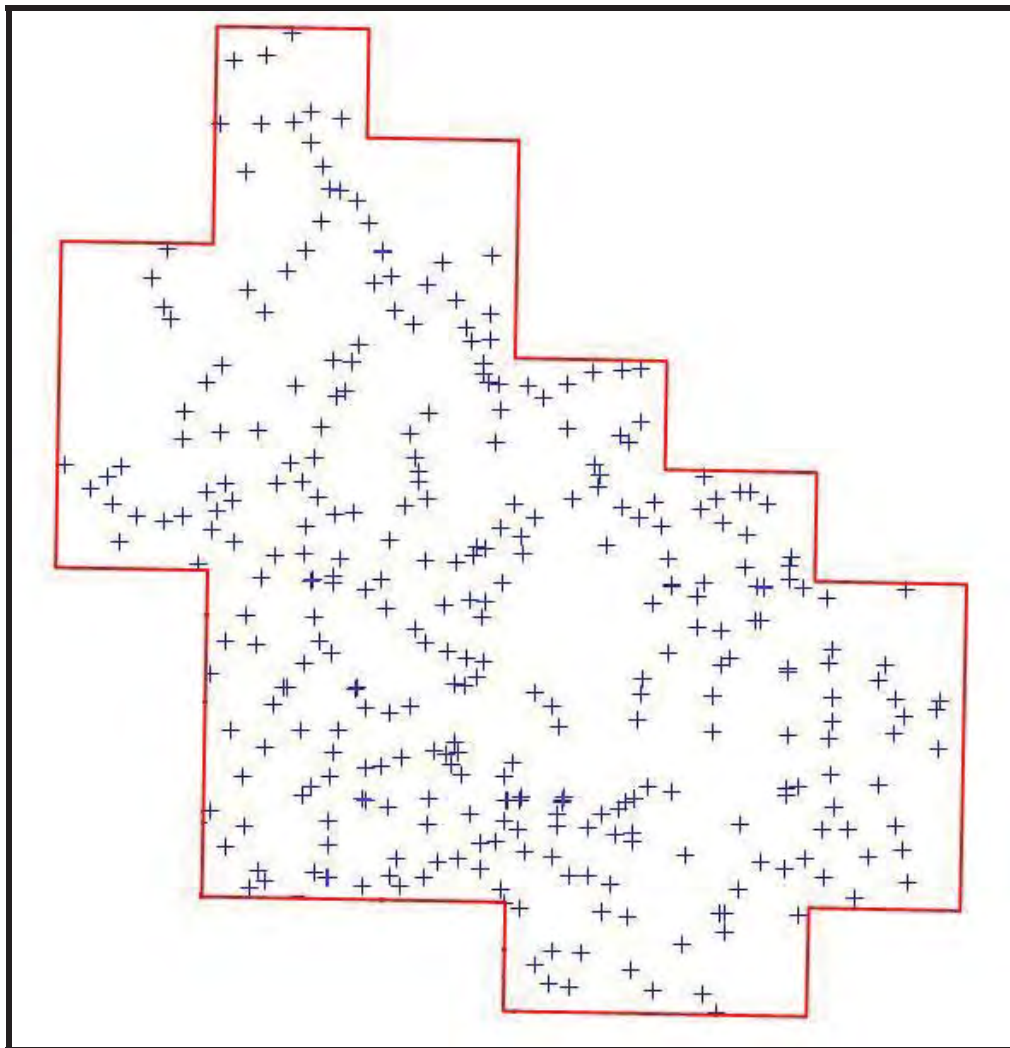


Figura 15 - Distribuição espacial das amostras do nível estático

Foram obtidos 100 pontos que variaram entre 10 a 12 metros, a média dos pontos amostrados foi de 11,5 metros e este valor está um pouco acima do valor da mediana e os principais valores estão entre 9 a 11 metros. A Figura 16 representa o histograma da variável Nível Estático inferido na área.

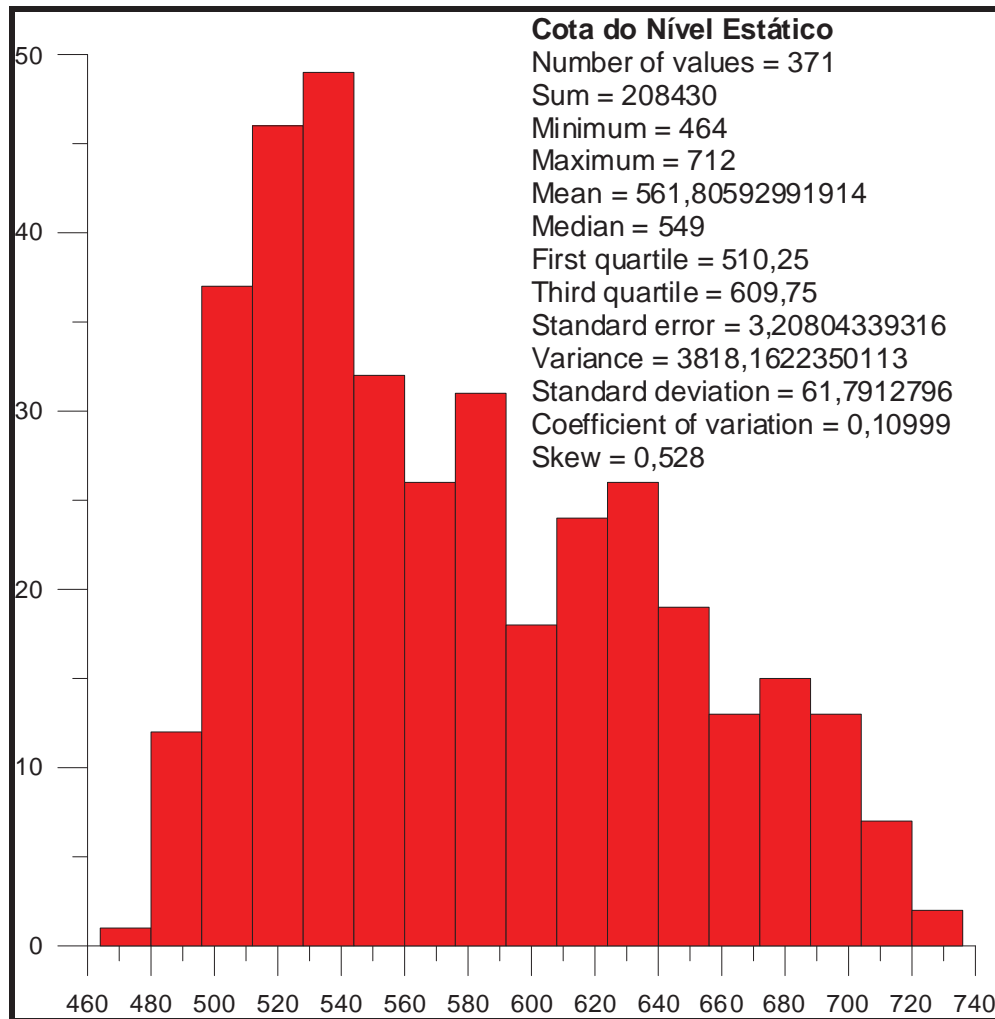


Figura 16 - Histograma de frequência da variável nível estático

O variograma modelado do Nível Estático apresentou Efeito Pepita (C_0) de $0,0000$, anisotropia de 2 e Sill (C_1) de $0,0000$. Para o modelamento foi adotado um modelo esférico e o variograma pode ser observado na Figura 1.

Nota-se um raio de influência relativamente pequeno que proporciona uma suavização em área da variável.

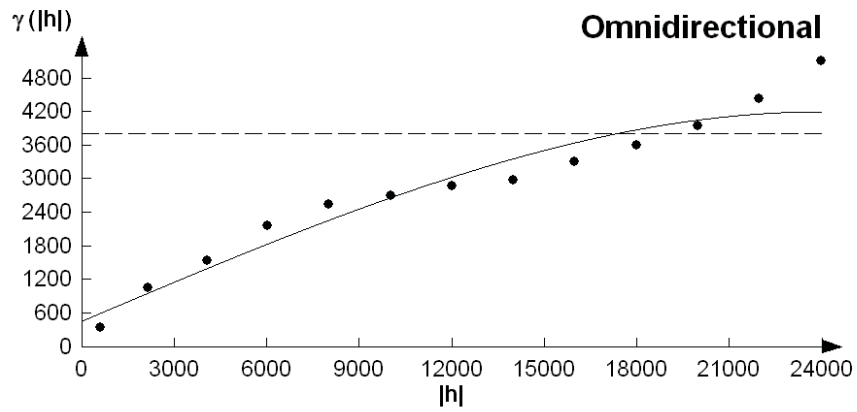


Figura 17 - Variograma modelado do Nível Estático

Após a modelagem do variograma foi elaborada uma superfície da variável Nível Estático através da rigagem. A superfície do nível estático encontra-se na Figura 1 .

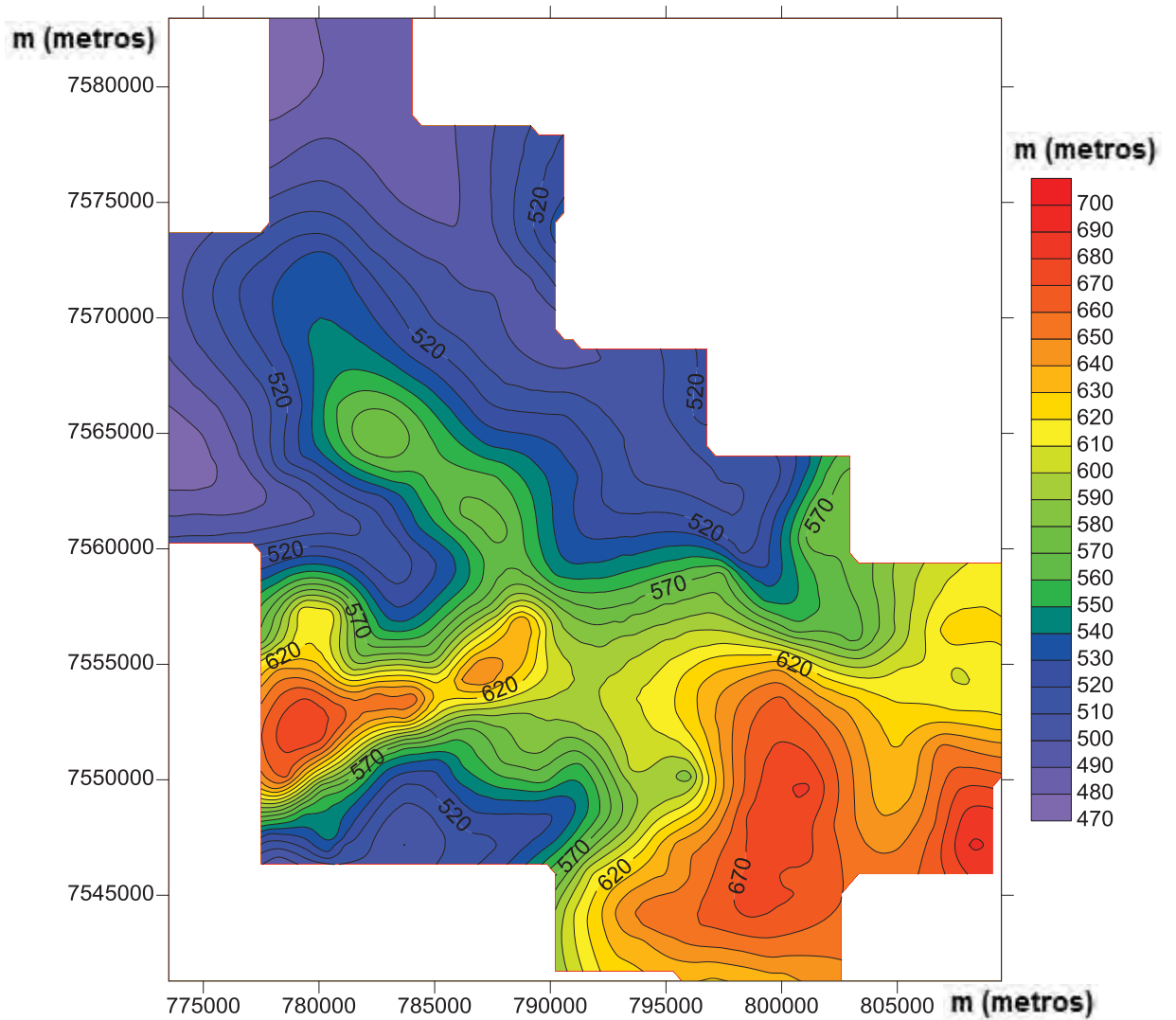


Figura 18 - Superfície do Nível Estático

6.1.3 - Elaboração do mapa de espessura da zona insaturada

Após a confecção da superfície da Cota Topográfica e da superfície do Nível Estático, foi feita uma subtração entre as duas malhas, isto é, a espessura da zona insaturada é a diferença entre a Cota Topográfica (CT) e o Nível Estático (NE).

$$\text{ESPESSURA DA ZONA INSATURADA} = \text{CT} - \text{NE}$$

esta forma foi gerado o mapa da espessura média da zona insaturada, representada na Figura 19. A presença de valores negativos encontra-se ao longo dos rios, este fato permite que os valores negativos da espessura sejam alterados para zero, tendo em vista o controle consistente das cotas do nível d'água junto às drenagens.

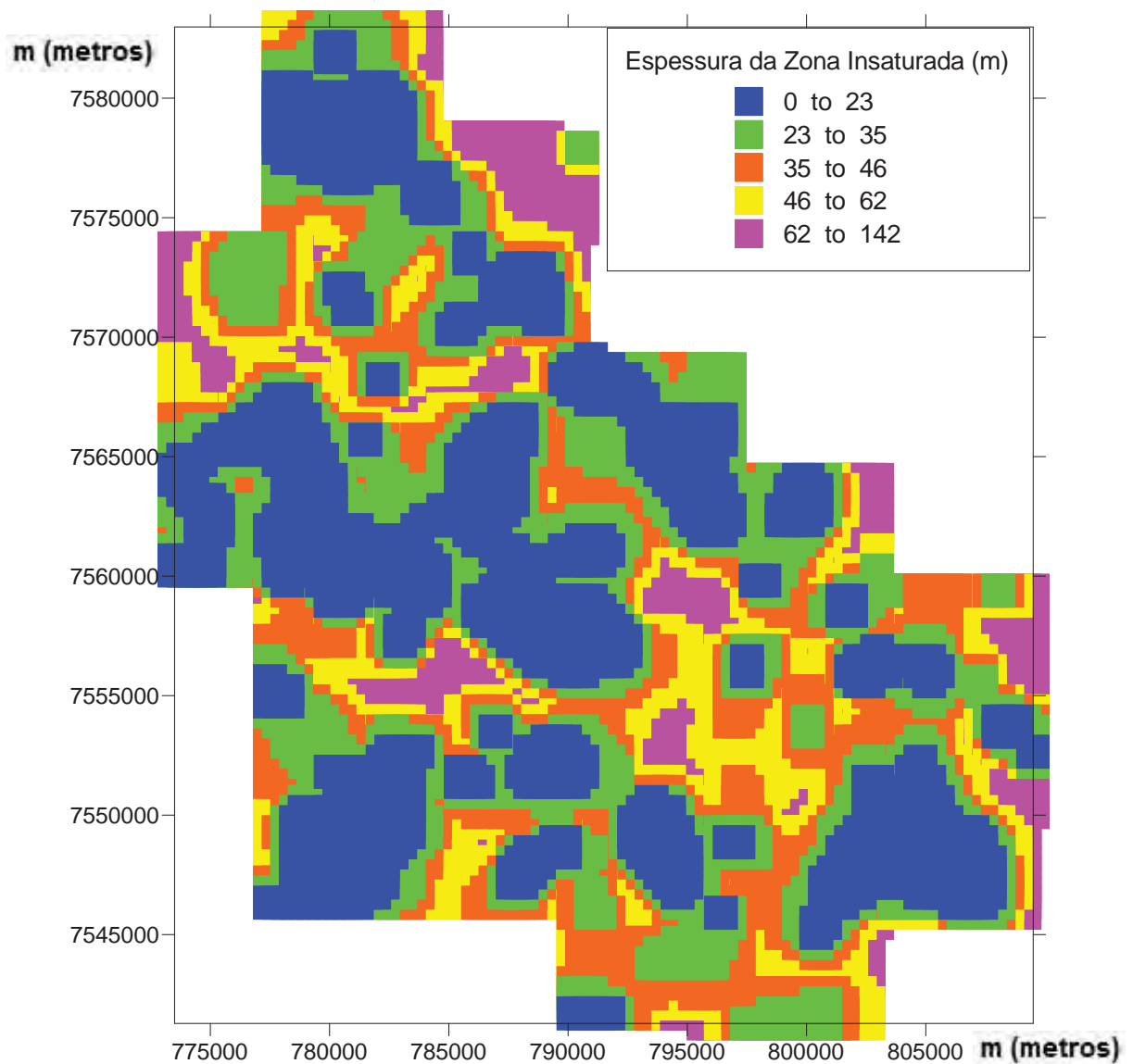


Figura 19 - Mapa da Espessura da Zona Insaturada

Para uma melhor interpretação do comportamento da variável Espessura da zona insaturada foi confeccionado um mapa que combinou a superfície da zona insaturada com a rede de drenagens da área estudada.

A Figura 20 representa o mapa da Espessura da zona insaturada com as drenagens da área de estudo e encontra-se abaixo.

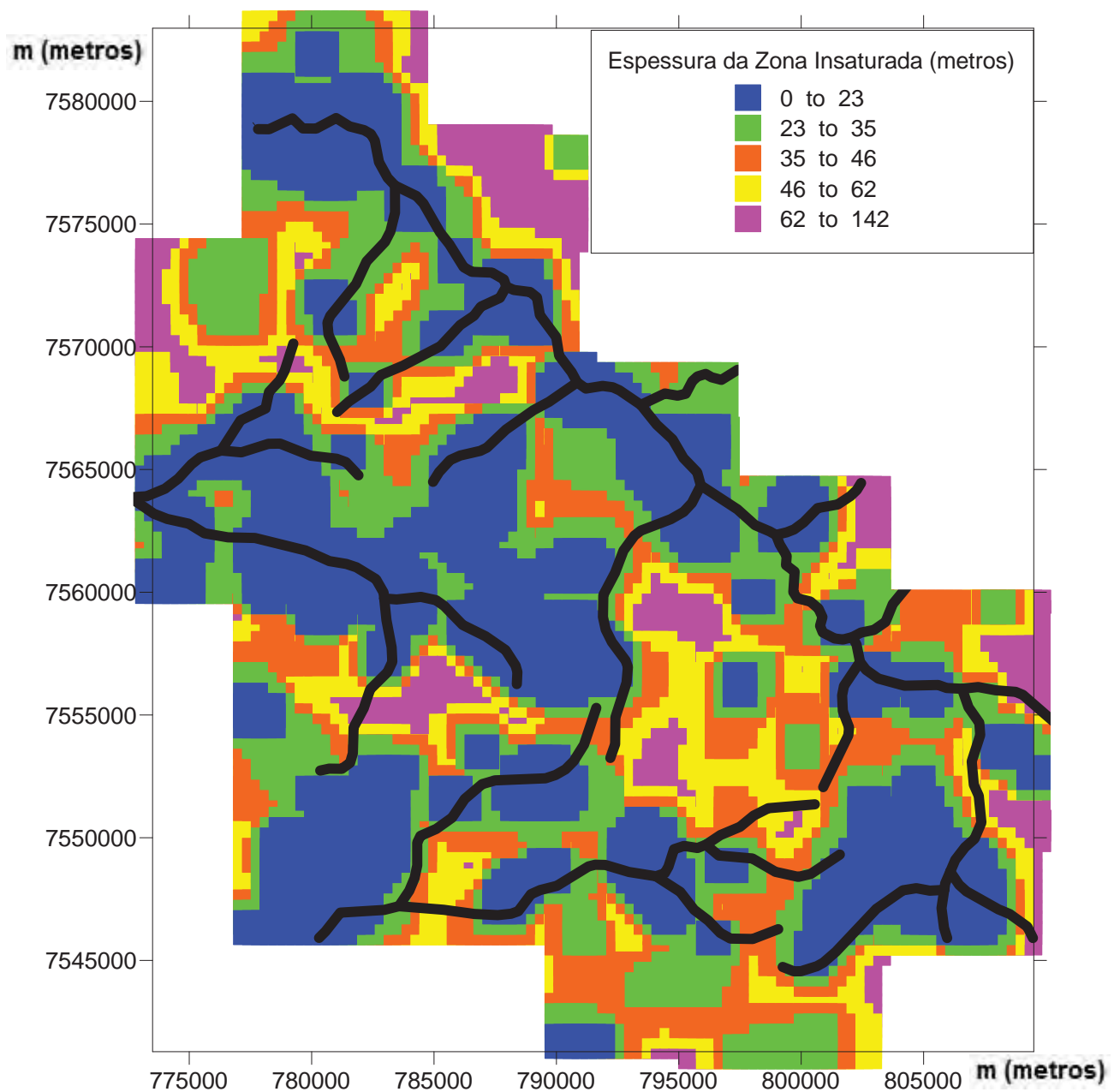


Figura 20 - Mapa da Espessura da Zona Insaturada com as drenagens

6.2 - Ensaio de condutividade hidráulica com o Permeômetro de Guelph

Para a determinação da Condutividade Hidráulica () da área de estudo foram realizados 9 ensaios de campo em locais escolhidos aleatoriamente utilizando o Permeômetro de Guelph, a distribuição espacial dos locais dos ensaios pode ser observada abaixo.

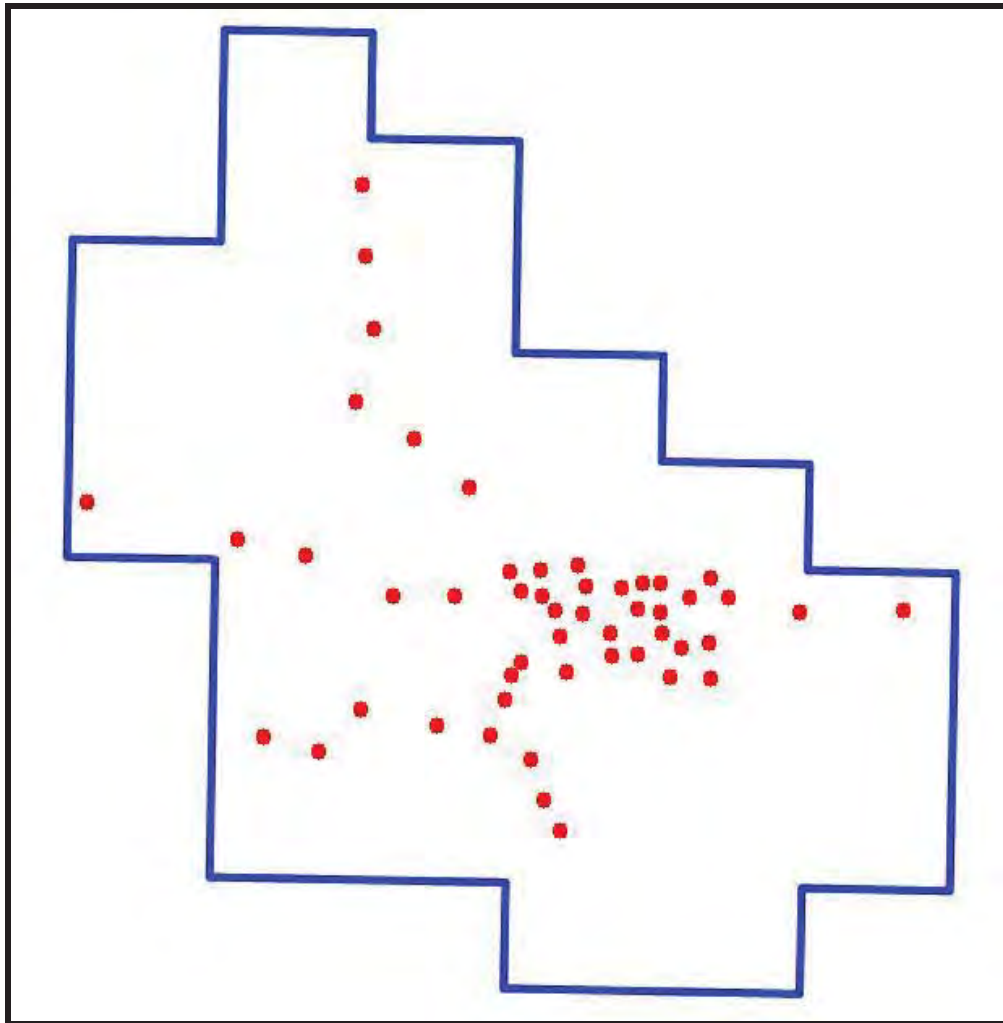


Figura 21 - Distribuição espacial dos ensaios de permeabilidade

Os valores da condutividade hidráulica situaram-se entre 0,12 a 0,91 m/d, trinta dos valores obtidos estão entre 0 a 2 m/d e os outros valores estão entre 2 e 0,91 m/d, a média dos valores de condutividade hidráulica é igual a 2,9 m/d. Porém, tendo em vista a forte assimetria da distribuição o valor da mediana é mais representativo, ou seja, 1, m/d.

A distribuição de frequência da variável condutividade hidráulica pode ser observada na Figura 22.

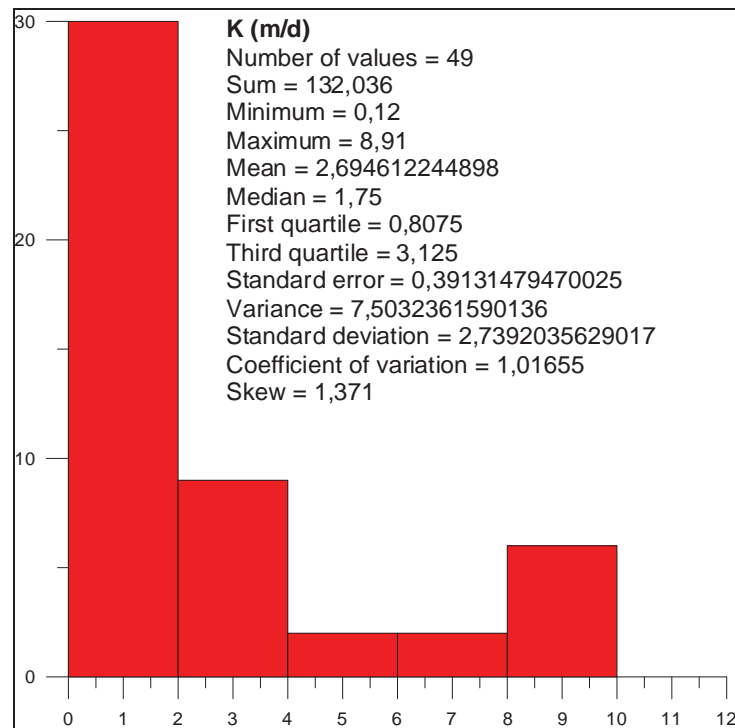


Figura 22 - Histograma de frequência da variável condutividade hidráulica

O variograma modelado da Condutividade Hidráulica apresentou 1 de Efeito Pepita (C), 999 de range e Sill (C1). Para o variograma da Condutividade Hidráulica foi adotado o modelo esférico e o mesmo pode ser observado na Figura 23.

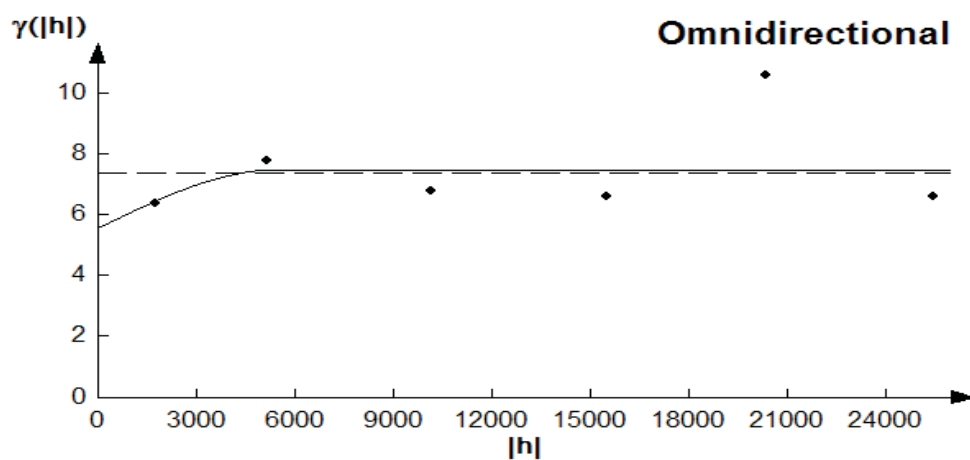


Figura 23 - Variograma modelado da Condutividade Hidráulica

Após a modelagem do variograma e a obtenção dos parâmetros principais do modelo (Efeito Pepita, range e Sill) foi utilizado o software Surfer para elaborar uma superfície da variável Condutividade Hidráulica através da interpolação Ordinária.

A superfície da Condutividade Hidráulica pode ser observada na Figura 24.

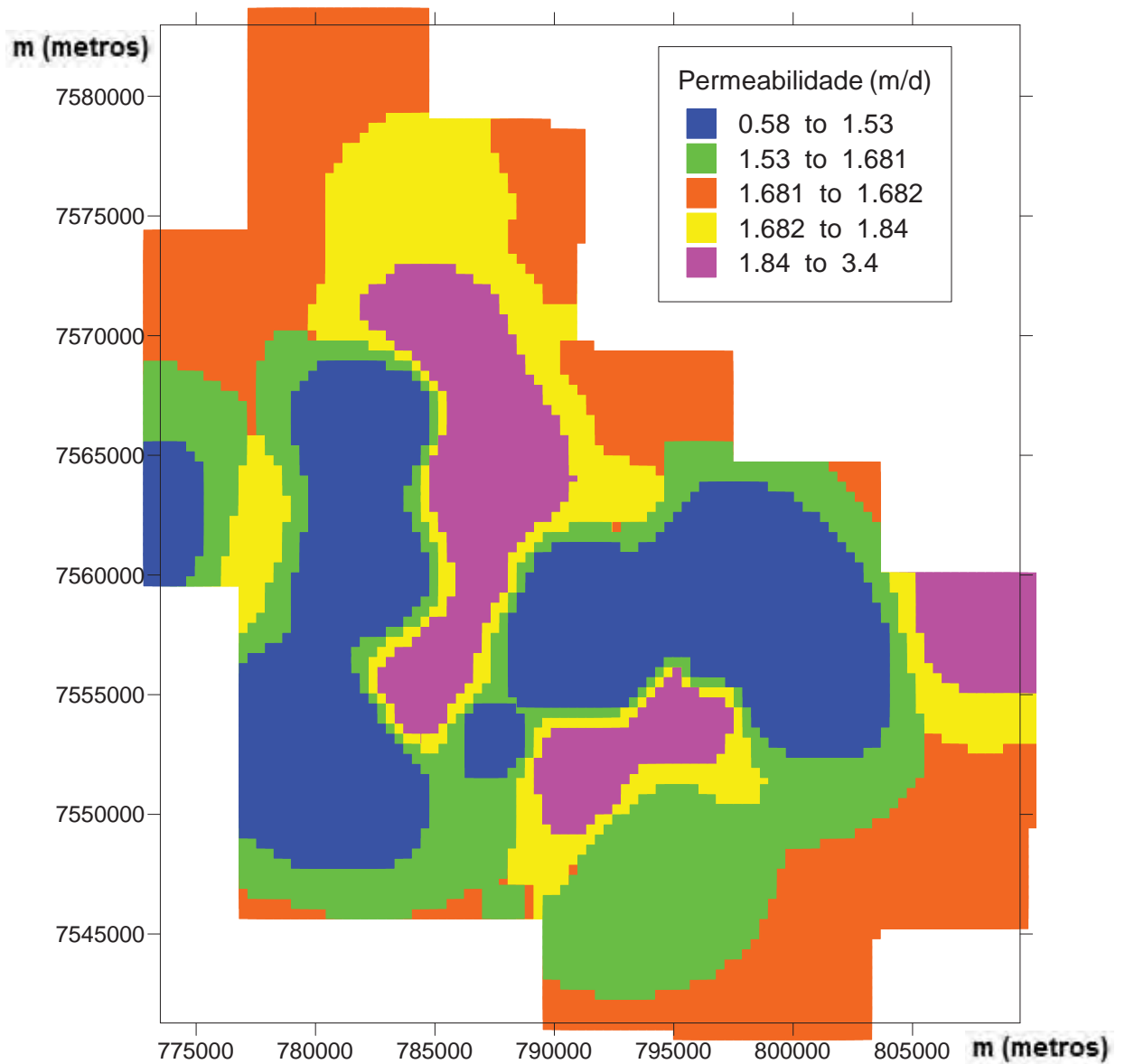


Figura 24 - Mapa da Condutividade Hidráulica

6.3 - Elaboração do mapa do Índice AVI

Para a confecção do mapa do Índice AVI foram utilizadas as malhas densas de pontos, tanto da Espessura da zona saturada, assim como, da Condutividade Hidráulica. Com base na equação do Índice AVI descrita no capítulo 4.1 e utilizando a malha (Grid) da Superfície da Espessura da zona saturada foi dividido pela malha (Grid) da Superfície da Condutividade Hidráulica, fornecendo como resultado o mapa do Índice AVI. O Índice AVI é dado em anos e sua caracterização em blocos encontra-se na Figura 25.

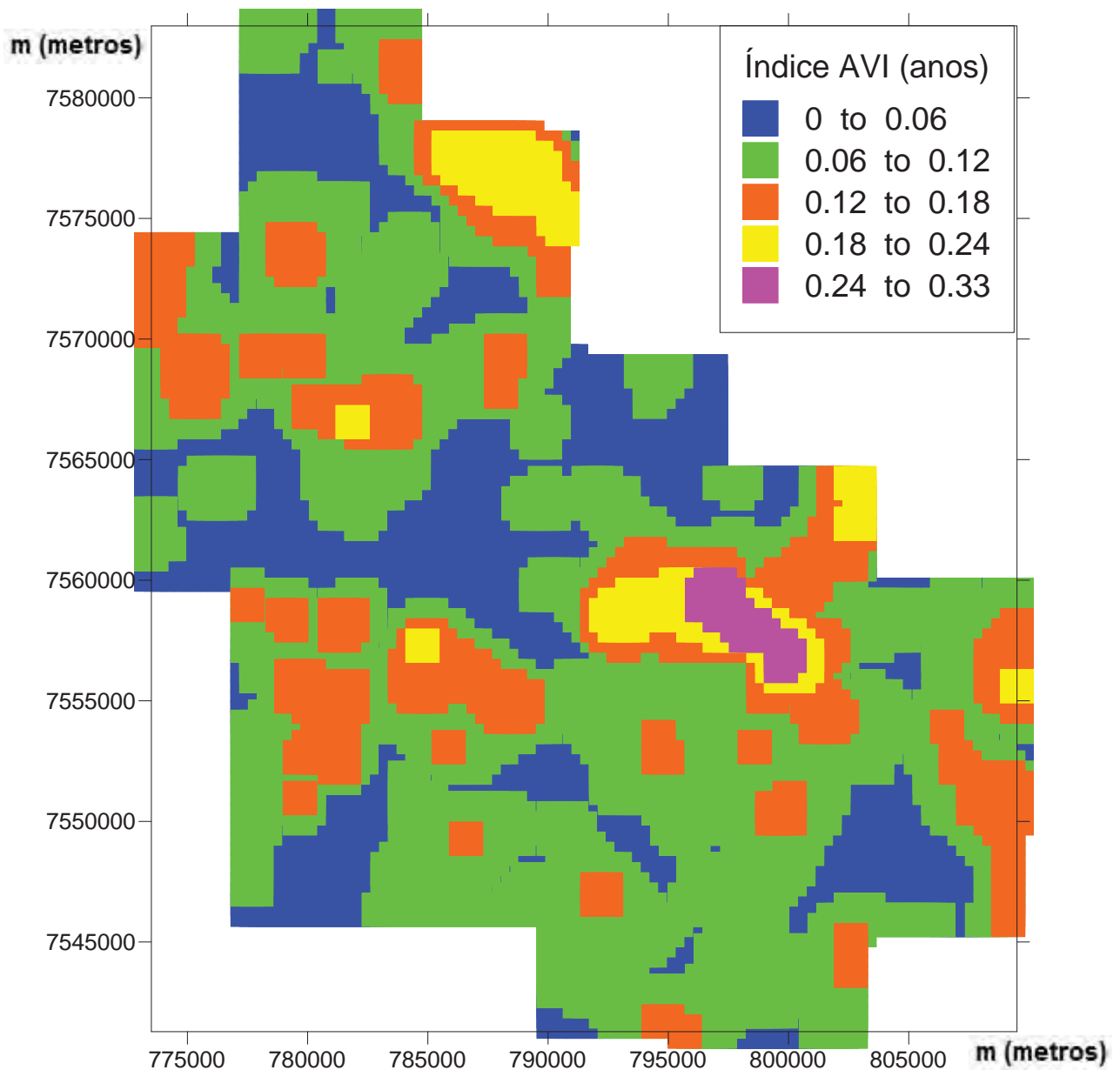


Figura 25 - Mapa do Índice AVI

7. DISCUSSÃO

A área de estudo está localizada sobre a borda nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná onde predominantemente afloram unidades geológicas arenosas da Formação Botucatu e da Formação Pirambóia e rochas basálticas da Formação Serra Geral.

Do ponto de vista hidráulico as rochas das Formações Botucatu e Pirambóia apresentam e celeres características como rocha-reservatório de água doce por sua alta porosidade e permeabilidade.

O Sistema Aquífero Guarani é composto pelas rochas da Formação Botucatu e da Formação Pirambóia, atualmente suas águas são utilizadas intensamente para atividades nas cidades e para o abastecimento de água doce.

Porém, com a diminuição da qualidade das águas superficiais é de essencial importância preservar esse reservatório como fonte para o abastecimento de água potável. Nos locais de recarga o aquífero é livre e pode ser facilmente contaminado, por isso conhecer a vulnerabilidade do aquífero nas zonas de recarga é muito importante para a sua proteção.

O método escolhido para determinar a vulnerabilidade do Aquífero Guarani depende de duas variáveis: espessura da zona insaturada acima do nível estático e da condutividade hidráulica estimada dessa zona. Para todas as variáveis foram confeccionadas seus histogramas, variogramas e superfícies de isovalores através da técnica geoestatística da krigagem.

Para a confecção do mapa da Espessura da zona insaturada foram elaboradas duas superfícies distintas, uma superfície da Cota Topográfica e outra do Nível Estático. Essas duas superfícies foram subtraídas uma da outra para a confecção do mapa da Espessura da zona insaturada.

O mapa elaborado para a Cota Topográfica (Figura 1) apresentou características semelhantes à imagem de satélite (Figura 11) utilizada para sua confecção. Os locais com a menor cota topográfica estão relacionados às drenagens e essa característica pode ser confirmada através da imagem de Satélite. As rochas das Formações Botucatu e Pirambóia estão localizadas nas menores cotas topográficas e as rochas da Formação Serra Geral estão sobrepostas sobre as Formações Botucatu e Pirambóia.

O mapa do Nível Estático (figura 1) foi confeccionado utilizando as coordenadas e as cotas dos cursos d'água extraídas de mapas topográficos na escala 1:100.000 da área de estudo. A superfície obtida confirma a rede drenagem utilizada para sua confecção. As principais drenagens podem ser observadas no sentido SE-NW e na porção SW da área estudada.

Os dois mapas gerados apresentam duas características semelhantes, que indicam a boa qualidade dos dados gerados. As principais drenagens da área podem ser observadas nos dois mapas e as cotas de elevação dessas drenagens têm valores muito próximos.

Com as duas superfícies geradas foi confeccionado o mapa da Espessura da Zona Insaturada (Figura 19). A superfície da espessura gerada apresentou alguns valores negativos ao longo dos corpos d'água, esses valores foram removidos e substituídos por zero, pois nesses locais a cota topográfica apresenta a mesma cota que o nível estático.

Na superfície da Espessura da Zona Insaturada a espessura variou de 0 a 1,2 metros e pode-se observar na Figura 20 pontos locais com a menor espessura estão relacionados com os locais onde estão localizadas as principais drenagens.

O mapa da Condutividade Hidráulica (Figura 21) foi elaborado com base em 9 ensaios realizados em campo com o Permeômetro de Guelph. O mapa gerado apresenta valores variando entre 0,1 a 0,5 m/d.

Deve-se ressaltar que seria importante estabelecer o perfil estratigráfico do solo, pois poderíamos obter diferentes níveis de permeabilidade. Porém, este trabalho não obteve verba suficiente para fazer sondagens e para fazer ensaios estratigráficos.

De outra forma, os furos de 1,0 metros de profundidade feitos para os ensaios de condutividade hidráulica refletiram um solo arenoso, bem selecionado e homogêneo.

Portanto, a elevada condutividade hidráulica da área estudada é reflexo da grande porcentagem de arenitos porosos relacionados às Formações Botucatu e Pirambóia.

Deve-se destacar que a condutividade hidráulica é muito sensível às variações do material testado, bem como, na operação do permeômetro para a obtenção do seu valor. Assim com uma malha relativamente rarefeita é muito difícil elaborar um mapa que represente adequadamente a condutividade hidráulica para toda a área.

Após a caracterização das variáveis Espessura da zona insaturada e Condutividade Hidráulica foi possível calcular a Resistência Hidráulica C segundo o método A. O cálculo foi realizado através de ferramentas de softwares gráficos como o Surfer. Nesse cálculo a superfície da zona insaturada foi dividida pela superfície da Condutividade Hidráulica gerando o mapa do índice A (Figura 2).

O índice A é medido em anos e na área de estudo variou de a , anos enquadrando a área estudada na classe de vulnerabilidade do índice A Extremamente Alta (para valores entre a 1 anos).

Comparando a superfície da Resistência Hidráulica com a superfície da Espessura da zona insaturada é possível notar uma grande semelhança entre as duas. Essa semelhança demonstra a importância que a variável Espessura da zona insaturada apresenta em relação à vulnerabilidade do Aquífero Guarani na área estudada.

É possível perceber que no mapa do índice A as áreas mais vulneráveis estão sobre os locais de menor espessura, ou seja, sobre as drenagens. Também é possível perceber que os locais com a maior espessura também apresentam alta vulnerabilidade devido à alta condutividade hidráulica do solo.

8. CONCLUSÃO

A vulnerabilidade do Aquífero Guarani na área de estudo foi determinada através do método A e dentro das classes de vulnerabilidade A foi classificada como sendo da classe de vulnerabilidade E extremamente Alta.

Os valores de vulnerabilidade variaram entre a , anos, essa alta vulnerabilidade em grande parte da área estudada está relacionada com a pequena espessura da zona insaturada e nos locais com a espessura mais elevada a alta vulnerabilidade está relacionada com a alta permeabilidade da região devido as grandes taxas de arenitos porosos das Formações Botucatu e Pirambóia.

Para proteger as águas do Sistema Aquífero Guarani na área estudada é de essencial importância a elaboração de planos diretores para o uso e ocupação do solo e para o uso dos recursos hídricos subterrâneos com base na vulnerabilidade do aquífero nos locais onde o Aquífero Guarani é livre.

9. BIBLIOGRAFIA:

- A E , . BENNET, T. EH , . H. PETT , . .. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings.** E.U.A. EPA, EPA 2- 1 , 19 .
- A A O, . . F AN A, A, B, POTTE , P, E. **Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó.** Curitiba Universidade Federal do Paraná, Biblioteca de Ciência e Tecnologia e Petrobrás, 199 .1 p.
- BOSCA N BO GHETT , N. . BO GHETT , . . OSA F HO, E. F. – **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do MERCOSUL.** 21 p. Curitiba, 2 .
- CAETANO-CHANG, . . **A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo.** 199 .19 p.Tese (ivre oc ncia em Geologia) nstituto de Geoci ncias e Ci ncias E atas – io Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), io Claro, 199 .
- CO AN , U.G AN O OS, P. **Basaltics rocks of the Paraná Basin: Problems in Brazilian gondwana geology.** Plate , CNP , Boletim Paranaense de Geografia, Curitiba, v.21, n 22, p. 2 -2 1, 19 .
- CO A, U. . P.. **Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo.** 199 . 1 f. issertação (estrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 199 .
- CHANG, H, . **Uso atual e potencial do Aquífero Guarani: atividade 3 do projeto Aquífero Guarani.** Brasil Agência Nacional de guas, 2 1.

- FERNANDES, A. COBARRA. **A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil).** Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p.19-22, 1997.
- FOSTER, S. S. ; HATA, C. A.. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** Lima World Health Organization, Pan American Health Organization. Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences. 1997. Technical report.
- FOSTER, S. S. ; HATA, C. A. GOES, E. A., PAS, .. **Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environmental agencies.** Washington The World Bank, 2002.
- GONCALVES, S. STUAO, .. **A Aplicação da Esperança Condicional para Integração de Mapas em Geotecnia.** in SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 1., 2002, Cambu, Anais... Cambu, 2002. CD-ROM.
- GOUVEIA, F. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP).** 2002. 1 f. dissertação (estrado em Geociências e Meio Ambiente)- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2002.
- GUANZANI, É. **Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental.** 1997. 2 p. volume de anexo Tese de doutoramento (Curso de Pós-Graduação em Geologia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1997.

- PAU A E S A, F. CHANG, H. . CAETANO-CHANG, . . **Perfis de Referência do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo.** Geoci ncias, São Paulo, v.22, p.21- 2,2 .
- PET , S. F FA O, . . **Geologia do Brasil (Fanerozóico).** São Paulo E USP, 19 . 1p.
- ABE O, . .. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê.** 2 2 fTese (outorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2 .
- SANTOS, . . **Avaliação Hidrogeológica Para Determinação Da Vulnerabilidade Natural Do Aquífero Freático Em Área Seleccionada Na Cidade De Londrina (Pr).** 2 . dissertação (estrado em Geoci ncias) - nstituto de Geoci ncias e Ci ncias E atas, UNESP, io Claro, 2 .
- SCHNE E , . , **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** n CONG ESSO B AS E O E GEO OG A, 19 , Porto Alegre. Anais Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 1- .
- SOA ES, P.C. AN , P. .B. F FA O, . . SOB E O NETO, A.F. **Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru.** revista Brasileira de Geoci ncias, São Paulo, v.1 , p.1 -1 , 19 .
- SO O STU E E U PA ENT CO P. **2800K1 operating instructions.** Santa Barbara, CA, 1991. 2 p.
- STU A O, . ., AN , P. . B. **Estudo do Nível Piezométrico pela Análise Geoestatística.** revista Geoci ncias. São Paulo SP, v. 2, 19 . p. 2 1 – 21 .

- STUÁO, . . AN, P. . B. **Mapeamento Geoestatístico de Ensaio de Penetração Padronizada (SPT)**. Solos e Rochas - revista Brasileira de Geotecnia. São Paulo, v.19, n.1, p. - 1, 199 .
- STUÁO, . ., AN, P. . B. **Apostila prática de Geoestatística**, Rio Claro -SP, 2 .
- STUÁO, . . AN, P. . B. **Indicator kriging for Gis's Maps Integration. In: Annual Conference of the Internacional Association for Mathematical Geology**, 199 ,Barcelona - Espanha. Proceedings... 199 . p.22 – 2 .
- STUÁO, . . AN, P. . B. E E, P. S. **O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em Geotecnia Ambiental**. revista Solos e Rochas, v. 2, n. , p. 1 -1, 2 .
- ONSTEPHOTT, . EWE T, . WASSENAA, . **Aquifer Vulnerability Index : a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping**. *Canadian Water Resources Journal*, vol. 1, nº1, p. 2 - , 1992.
- ONSTEPHOTT, . EWE T, . WASSENAA, . **A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada**. PPW . Pilot Project. Sept-1991- arch 1992. Groundwater and Contamination Project. Environmental Sciences Division, National Hydrological Research Institute, 1992.
- WU, F.T. CAETANO-CHANG, . . **Estudo Mineralógico dos Arenitos das Formações Pirambóia e Botucatu no Centro Leste do Estado de São Paulo**. revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 1, n 1, p. - , 1992.
- AN, P. . **Contribuição ao estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná**. 1999.