

## **Modelagem da Superfície Freática na Cabeceira da Bacia do Paraguaçu, Área do Agropolo Mucugê – Ibicoara, Estado da Bahia: Parâmetro para Estudos de Contaminação da Água Subterrânea em Aquíferos Livres**

Ana Isabel Leite Oliveira<sup>1</sup>  
Washington de Jesus Sant'anna da Franca Rocha<sup>1</sup>  
Ardemírio de Barros Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS  
PPGM – Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente  
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Piracicaba - SP, Brasil.  
isanaleite@hotmail.com; wrocha@gmail.com; abarros@uefs.br

**Abstract.** One of the variables to be considered in developing models of vulnerability to groundwater contamination is the distance from the water table in relation to the land surface. This factor influences the time required for a contaminant to reach the aquifer, integrating itself to this analysis, the physicochemical characteristics of the overlay material and the contaminant load. Using GIS functions, data obtained directly from the registration forms of drilling wells, databases and pre-existing data from SRTM, which underwent exploratory analysis, which led to the use of ordinary kriging estimator, fitting the model with the experimental theoretical exponential model. These procedures were derived from four outcomes: (a) depth of water table, (b) groundwater flow model, (c) potentiometric curves and (d) 3D model of the potentiometric surface. The distance of the water table to the surface indicates that there is large area of the unconfined aquifer whose depth is less than 10 meters, from which, considering the GOD method, it represents extremely vulnerable to this parameter. Another relevant analysis is the recognition that these are the most used areas by farming and by identifying the existence of two preferential directions of the groundwater flow, and the contaminant loads that may be inserted in this sub-basin which can reach the second and the third largest river of the state : *Contas* and *Paraguaçu* river respectively.

**Palavras-Chave:** Geoprocessamento, Água Subterrânea, Vulnerabilidade, Geoprocessing, Groundwater, Vulnerability.

### **1. Introdução**

A degradação ambiental e a redução da qualidade de vida têm demonstrado que existe limite para a exploração dos recursos naturais. As previsões de esgotamento de tais recursos são atribuídas às conseqüências do desenvolvimento econômico e do crescimento de uma população que dependerá do mesmo ambiente no qual vivemos atualmente.

Pensando na água doce disponível para o consumo, sua distribuição não deixa dúvidas sobre a necessidade de se cuidar deste precioso recurso. Dele dependemos para realização de, praticamente, todas as atividades, ou melhor, para a própria sobrevivência humana. No entanto, representam menos de 3% do total da água em nosso planeta.

O consumo de água pelo setor agrícola, basicamente para irrigação, em termos globais, consta como correspondente a cerca de 90% dos recursos hídricos utilizados. A expansão das terras agrícolas, devido ao plantio excessivo, é citada pelo Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas, em 2002, como a principal ameaça às florestas, terras alagadas, montanhas e biodiversidade, inclua-se aqui, os recursos hídricos.

Neste contexto, a investigação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos é vista como instrumento de proteção ambiental e vem, cada vez mais, ganhando notoriedade e se desenvolvendo quanto às técnicas empregadas para sua elaboração, a exemplo das possibilidades abertas pelo Geoprocessamento. Isto, porque, conforme Hirata (2001) e Auge

(2004), a inserção de contaminação nestes ambientes traz grande dispêndio econômico, sendo, ainda, limitadas as técnicas e os especialistas para resolução deste problema.

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar a modelagem da superfície freática na sub-bacia do Alto Paraguaçu, Estado da Bahia. Área intensamente ocupada pelo uso agrícola, situada entre as coordenadas 12°40'N e 13°40'S e 41°15'E e 41°39'W, insere-se na Bacia do Paraguaçu, ecoregião da Chapada Diamantina.

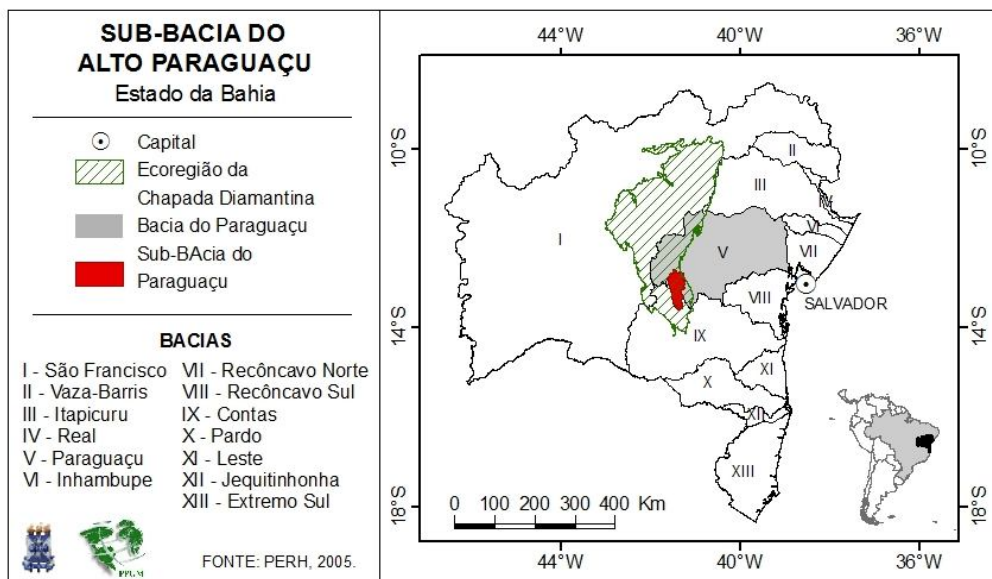
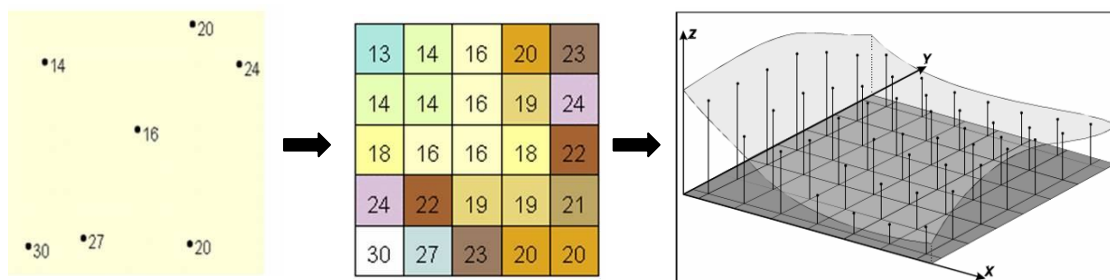


Figura 1. Localização da Sub-bacia do Alto Paraguaçu, estado da Bahia.

## 2. Abordagem conceitual

Para reconstituir uma superfície, a partir de valores amostrais, se faz necessário gerar uma representação que se aproxime da superfície real. Isto é possível através da construção de uma grade regular, ou seja, de uma matriz, na qual há associação de valores numéricos para cada elemento, obtendo-se assim uma superfície contínua (CÂMARA, et al., 2001), como apresenta a Figura 2.



FONTE: ESRI, 2008 e Câmara et al, 2004.

Figura 2. Representação geométrica de grade regular.

A interpolação é um processo que estima o valor de atributos em locais não amostrados, a partir de medições feitas dentro da mesma área ou região. É usada para converter dados de observações pontuais para superfícies contínuas, sendo que os padrões espaciais amostrados por estas medidas podem ser comparados com os padrões espaciais obtidos por estimação (BURROUGH & MCDONNELL, 1998).

Quando verificada a autocorrelação espacial, os procedimentos inferenciais estatísticos, em sua maioria, não oferecem boas estimativas, havendo a necessidade de utilizar modelos que considerem a localização geográfica do fenômeno (CÂMARA et al., 2004). Nestes termos, os métodos geoestatísticos mostram-se mais adequados. Para tanto, considera-se que este é um processo estocástico, ou seja, em toda a área os valores podem ser conhecidos.

Para verificar a autocorrelação espacial, dentre outros indicadores, pode-se utilizar o índice de Moran. Quando os valores do índice, situados normalmente entre -1 e +1, são próximos à +1, significa que possuem boa autocorrelação. Ao contrário, se os valores encontram-se próximo à -1, os valores não apresentam similaridade (SILVA, 2003).

Além dos índices, um instrumento de análise comumente utilizado é o semivariograma. Através dele, é possível medir a variação entre amostras de uma mesma variável, denominada covariância, diferindo da variância no contexto estatístico, visto que, neste último caso, analisa relações entre diferentes variáveis (BAILEY & GATRELL, 1995).

Terminada a análise estrutural, escolhido o método de interpolação, o próximo passo é ajustar uma função ao semivariograma. Há uma variedade de modelos teóricos destacando-se o esférico, o exponencial e o gaussiano. Cada modelo é projetado para atender a diferentes fenômenos, atribuindo-lhes melhor precisão.

Diferente dos modelos determinísticos, as técnicas de modelagem, utilizando geoestatística, não apenas geram uma superfície de previsão, mas também fornecem previsão do erro, o que significa uma medida de segurança (BAILEY & GATRELL, 1995).

Alguns dos parâmetros estatísticos de previsão de erro, que podem ser utilizados como auxiliares nesta tomada são (ESRI, 2008):

- Média: valores o mais próximo de zero (0) ;
- Erro Médio Quadrático (RMS): deve apresentar o menor valor ;
- Erro Médio Padrão: esse valor deve ser o mais próximo possível do RMS;
- Média Normalizada: o mais próximo de zero (0);
- Erro Médio Quadrático Normalizado: o mais próximo de um (1).

### 3. Materiais e Procedimentos Metodológicos

A modelagem cartográfica, apresentada na Figura 3, demonstra os procedimentos empregados para interpolação da superfície freática na área de estudo. Como pode ser observado, foram utilizados, como dados de entrada, arquivos vetoriais, cujas tabelas de atributos traziam o valor da medição do nível estático (NE) em poços e os dados SRTM, para auferir a altimetria, em formato raster.

A base de dados dos poços foi obtida através do cadastrado de fichas de perfuração, diretamente levantadas nos arquivos da Companhia de Engenharia Rural da Bahia CERB, bem como dados contidos no SIG do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH, 2005) e do GIS do BRASIL (2004). Os dados da *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), reamostrados para 30 metros, pelo projeto TOPODATA.

Cabe ressaltar que os dados correspondentes ao NE podem apresentar algum tipo de inconformidade, visto que, remetem-se à épocas diferentes de perfuração. Para melhorar a acurácia dos resultados, sugere-se a realização de medição do nível estático em campo, integrando dados coletados em distintos regimes pluviométricos.

A modelagem cartográfica implementada, utilizando funções de SIG, resultou na geração de quatro resultados: Profundidade do Nível Freático (PNF), Modelo do Fluxo Subterrâneo (MFS), Curvas Potenciométricas (CP) e Modelo da Superfície Potenciométrica em 3D (MSP-3D). De maneira geral, duas etapas podem ser identificadas durante os procedimentos: (a) análise dos dados e (b) modelagem por krigagem ordinária, com ajuste do modelo experimental ao modelo teórico exponencial.

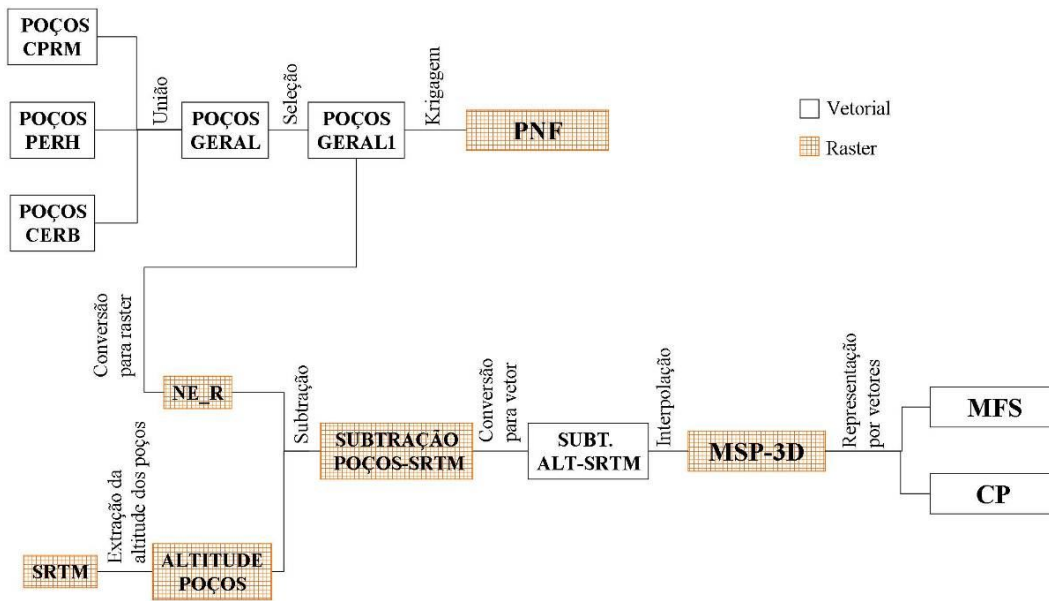


Figura 3. Modelagem cartográfica da superfície freática.

### 3.1. Análise dos Dados

A espacialização dos dados revela a distribuição dos poços tubulares na área de estudo e seu entorno (Figura 4). Pode-se notar que se trata de dados irregularmente distribuídos, com maior ocorrência de poços na região central, no interior da sub-bacia, justificada pela concentração da atividade agrícola nesta área.

Para o processo de interpolação foram considerados dados externos à área da sub-bacia buscando maior aproximação possível com a superfície real, na tentativa de minimizar a falta de dados nas áreas internas da sub-bacia e erros inferenciais nas bordas.

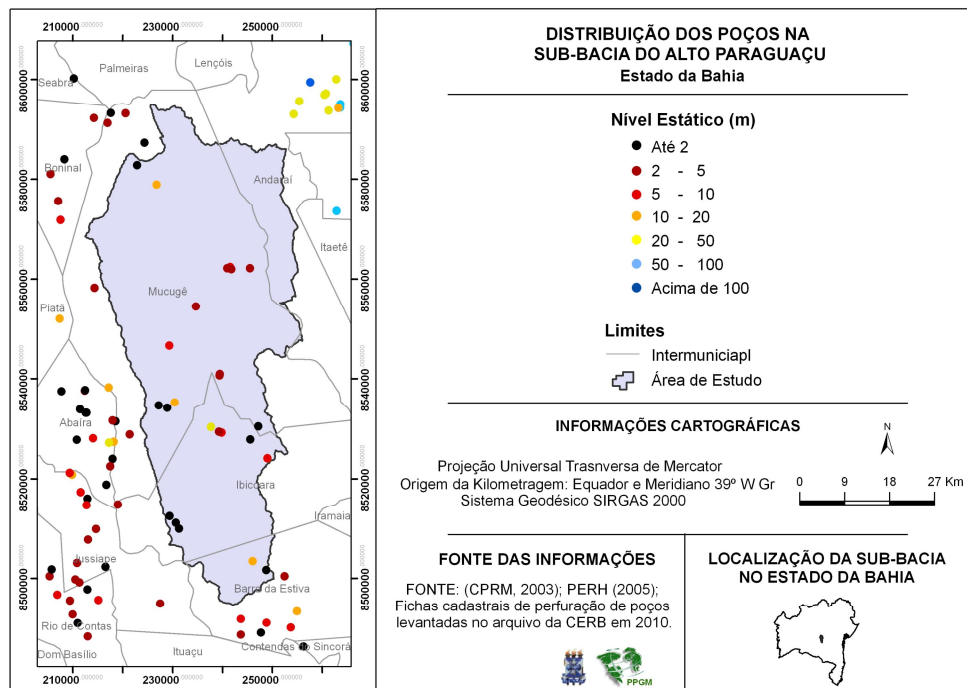


Figura 4. Distribuição de poços perfurados na sub-bacia do Alto Paraguau.

Verificou-se a autocorrelação espacial, como visto na Figura 5, avaliando se o padrão é expresso em grupos (*clusters*) ou disperso, através do Índice de Moran. Como o resultado foi igual a 0.82 (próximo a +1), os dados apresentam autocorrelação. Esta afirmativa possibilita o uso da geoestatística no procedimento de interpolação.

Em seguida, realizou-se a análise da variabilidade espacial. Pelo comportamento da curva, mostrado na Figura 6, verifica-se que os dados comportam-se como uma curva de função exponencial. Significando que próximo à origem dos eixos (x,y) os valores menores encontram-se mais próximos e, a medida que nos afastamos da origem, tanto para o eixo x como para o eixo y, os valores se distanciam, indicando que a profundidade do NE, representada no eixo y, aumenta com a distância, representada no eixo x. Assim, podemos dizer que os valores amostrais variam com a distância, obedecendo ao princípio da similaridade entre elementos mais próximos, o que reafirma o resultado obtido com Índice de Moran.

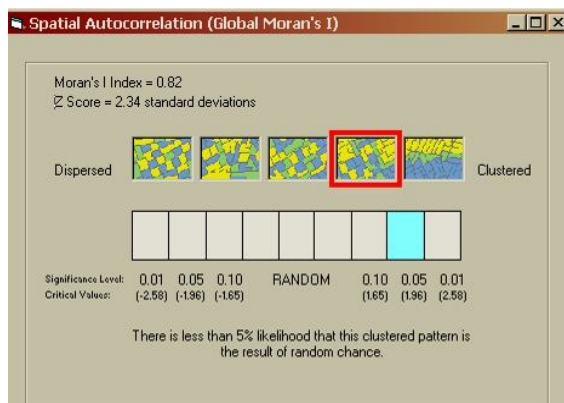


Figura 5. Resultado do Índice de Moran calculado no ArcGis 9.x.

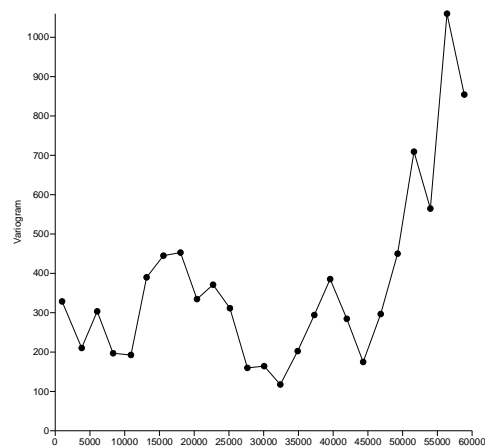


Figura 6. Distribuição das amostras do nível estático em poços perfurados na sub-bacia do Alto Paraguaçu e entorno.

### 3.2. Modelagem por Krigagem Ordinária

Para ajuste do modelo verificou-se que a distância média entre as amostras é de 570 metros, demonstrado na Figura 7. Realizando-se testes de interpolação, a distância de 680 metros foi assumida para determinar o alcance.

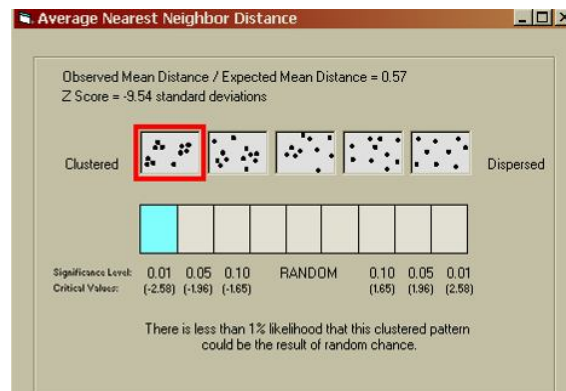


Figura 7. Cálculo da distância média entre os pontos amostrais.

Para a qualificação da incerteza da superfície, utilizando krigagem ordinária, foram testados três diferentes modelos teóricos, realizando-se comparação entre as respectivas predições de erros para análise do modelo mais adequado (Quadro 1).

Quadro 1 - Comparação das predições de erros entre as superfícies geradas por três diferentes modelos teóricos.

	<b>EXPONENCIAL</b>	<b>GAUSSIANO</b>	<b>ESFÉRICO</b>
Média	0.04785	0.3281	0.08534
Erro Médio Quadrático	16.34	16.14	16.09
Erro Médio Padrão	16	18.79	16.98
Média Padronizada	0.002434	0.01653	0.004468
Erro Médio Quadrático Padronizado	1.001	0.8584	0.9353
Efeito Pepita	166	326	224,6

A análise da predição de erros, conforme parâmetros anteriormente vistos, demonstra que o modelo exponencial é o que melhor representa a superfície freática. Embora não apresente o menor Erro Médio Padrão, sendo essa diferença relativamente muito pequena, possui a Média cujo valor mais se aproxima de zero (0), menor Erro Médio Quadrático, Média Padronizada mais próxima do erro médio quadrático, erro médio quadrático padronizado mais próximo a um (1), bem como menor efeito pepita.

O modelo obtido, exposto na Figura 8, apresenta variação de profundidade na sub-bacia na ordem de 3 metros a 45 metros, aproximadamente. Classificado de acordo com a indexação GOD (G - *groundwater occurrence*, O - *overall litology of aquifer* e D - *deph of water*), o padrão espacial indica variação crescente de profundidade em direção SW-NE. Este fato decorre das características litológicas, uma vez que nas áreas mais claras (em intervalo inferior a 13.77), no interior da sub-bacia, predominam as coberturas sedimentares, enquanto que, as profundidades maiores são registradas, de modo geral, em áreas da Formação Tombador, constituída de arenitos e metaconglomerados e que formam o embasamento local.

A partir dos dados correspondentes ao nível estático, também é possível obter a direção do fluxo da água subterrânea, curvas potenciométricas e representação em 3D desta superfície, apresentado na Figura 9(a,b,c). Estes indicam as áreas de recarga e descarga, sendo importantes instrumentos para a compreensão da distribuição de substâncias contaminantes, pois informam sobre sua mobilidade em casos de ocorrência da sua inserção nestes ambientes.

Percebe-se na Figura 9(a), o que poderíamos chamar do divisor do fluxo hidrogeológico ao centro, na cor azul. O fluxo da água subterrânea apresenta assim, duas direções principais:

- Sentido oriental, tendendo para N-NE: neste caso, o fluxo e acúmulo direcionam-se para a bacia do Paraguaçu.
- Sentido ocidental, tendendo para sul-sudeste: este fluxo direciona-se para a bacia do Rio de Contas.

#### 4. Considerações

O método de interpolação por krigagem ordinária e o ajuste do modelo experimental ao modelo teórico exponencial foram os procedimentos que melhor modelaram a superfície potenciométrica na sub-bacia, em função da correlação espacial existente nesta variável.

Os modelos gerados indicam grande área com valores abaixo de 10 metros de profundidade, o que, considerando-se o método GOD, representa extrema vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea, para este parâmetro.

Outra análise relevante é o reconhecimento de que são essas as áreas de maior exploração agrícola e, ao se identificar a existência de duas direções preferenciais do fluxo subterrâneo,



verificou-se que a inserção de possíveis cargas contaminantes pode alcançar não apenas a bacia do Paraguaçu, mas também, da bacia de Contas.

Esta constatação amplia a preocupação quanto à contaminação destas águas, visto que a fluxo subterrâneo irá conduzir tais substâncias para duas diferentes bacias hidrográficas, o que reafirma a necessidade da gestão integrada dos recursos hídricos.

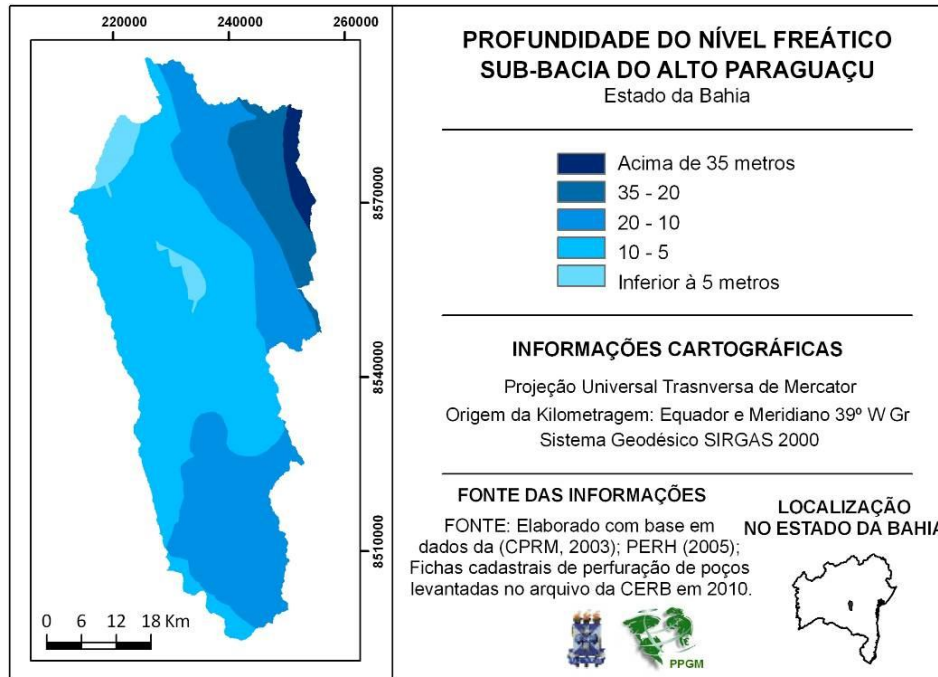


Figura 8. Modelo da Profundidade do Nível Freático.

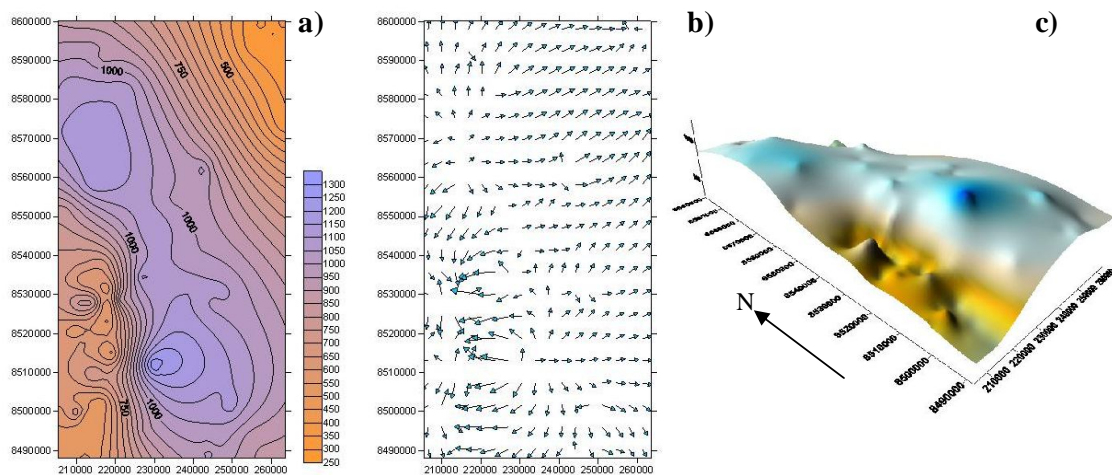


Figura 9. (a) Curvas Potenciométricas; (b) Modelo de Direção do Fluxo Subterrâneo e (c) Modelo 3D da Superfície Potenciométrica.

## 5. Agradecimento

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas de mestrado e ao Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ) e a FAPESB pelo suporte financeiro à pesquisa.

## 6. Referências

- AUGE, M. Hidrogeologia Ambiental I. Universidade de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas. Buenos Aires, 2004.
- BAILEY, Trevor C.; GATRELL Anthony C. **Interactive Spatial Data Analysis**. 1995.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução ao geoprocessamento. In.: CÂMARA, G; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. [org]. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.. Análise Espacial e Geoprocessamento. In.: **Análise Espacial de Dados Geográficos**. DRUCK, S. et al. (edit.). Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- ESRI. **ArcGis Geostatistical Analyst Tutorial**. 2008.
- HIRATA, R. . Protección de acuíferos frente a la contaminación: Metodología. In.: **I Seminario-Taller**. Toluca, México. 20a 22 de Jun, 2001. Disponível em <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>, acessado em . Acesso em 27 de outubro de 2009.
- NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais para a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável. **Desafios Globais, Oportunidades Globais. Tendências do Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: [www.ana.gov.br/.../1747-Desafios%20Globais,%20Oportunidades%20 Globais](http://www.ana.gov.br/.../1747-Desafios%20Globais,%20Oportunidades%20Globais), acessado em 23 de julho de 2009.
- SCHOBENHAUS, C; GONÇALVES, J. H; SANTOS, J. O. S; ABRAM, M. B; LEÃO NETO, R; MATOS, G. M. M; VIDOTTI, R. M; RAMOS, M. A. B; JESUS, J. D. A. de (eds.) **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas**. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM, 2004. CD-ROM.
- SECRETARIA DE RECURSO HÍDRICOS - SRH. **Plano Estadual de Recursos Hídricos - SIG**. Salvador, 22 de março de 2005.
- SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas, Ed. Unicamp, 2003.