

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

## Geoprocessamento de Bacia Hidrográfica e a Solução Automatizada do Fluxo em Aquífero Freático

Alessandro Firmiano de Jesus<sup>1</sup>, João Paulo Martins dos Santos<sup>2</sup>

Academia da Força Aérea-AFA, Estrada de Aguaí, s/n - Jardim Bandeirantes, 13631-972, Pirassununga-SP, Brasil

Edson Wendland<sup>3</sup>

Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP, Av. Trabalhador Sancarlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP, Brasil

**Resumo** A resolução numérica das equações não lineares do modelo de fluxo de água subterrânea em aquífero freático ainda apresenta seus desafios conceituais e de modelagem. Neste trabalho, o nível potenciométrico da Bacia do Rio Itaqueri, foi simulado a partir de valores conhecidos de níveis estáticos em poços de monitoramento e da conectividade hidráulica com seus rios, represa e fronteira. Ferramentas de geoprocessamento foram empregadas na definição de malhas computacionais providas de condições iniciais e de contorno para obter uma distribuição inicial do potencial hidráulico da bacia. Esta solução numérica, após aplicação do esquema de iteradas de Picard no problema do fluxo livre com vazão, fornece o comportamento final do nível freático da Bacia do Rio Itaqueri disponibilizando resultados numéricos para visualizadores gráficos.

**Palavras-chave.** Geocomputação, Bacia Hidrográfica, Aquífero Livre, FEniCS-GIS

### 1 Introdução

A busca pela compreensão de fenômenos naturais relacionados aos recursos hídricos, além de engenheiros e cientistas, também desperta interesses em programadores que se dedicam ao domínio de técnicas recentes de modelagens denominadas geocomputação. Considerada como sendo a arte e a ciência para resolver os complexos problemas espaciais com o uso de computadores [4, 5, 15], a geocomputação, por integrar ferramentas de geoprocessamento com algoritmos computacionais, passa a ser considerada essencial, por exemplo, na representação dos limites de uma extensa bacia hidrográfica ou na identificação de zonas de vulnerabilidades na região de afloramento de um determinado aquífero. E ainda, de acordo com [5], existe um esforço crescente para integrar modelos matemáticos aos softwares livres dos sistemas de informações geográficas (SIG) no intuito de desenvolver processos eficientes que facilitem a entradas de dados georreferenciados na simulação

---

<sup>1</sup>alessandroafj@afa.aer.mil.br

<sup>2</sup>jp2@usp.br

<sup>3</sup>ew@sc.usp.br

numérica e forneçam sistemas robustos de ferramentas computacionais destinadas às visualizações gráficas dos resultados.

Neste trabalho, ferramentas de geoprocessamento disponíveis no software livre QGIS<sup>®</sup> auxiliam a implementação de um código computacional Python para obter a solução numérica da equação do fluxo estacionário de água subterrânea em um aquífero freático. Além de fornecer um domínio computacional em coordenadas projetadas, o geoprocessamento disponibilizará valores potenciométricos para condições de fronteira de Dirichlet e condições iniciais para o modelo matemático. Neste sentido, o objetivo do trabalho é obter a delimitação georreferenciada da Bacia Hidrográfica do Rio Itaqueri e, através de valores conhecidos de níveis potenciométricos em alguns pontos do seu interior, estimar o comportamento hidráulico em toda extensão de suas águas subterrâneas sujeitas ao bombeamento em seus poços internos. Assim, o texto foi organizado visando atender os três passos principais da modelagem dos recursos hídricos [5,13]: *i.*) desenvolvimento e modelo conceitual, *ii.*) desenvolvimento e aplicação do modelo matemático e *iii.*) processamento e visualização dos resultados.

## 2 Desenvolvimento e Modelo Conceitual

A escolha do domínio computacional para o código numérico simular o comportamento do nível potenciométrico em aquífero freático apontou para a extensão total da Bacia Hidrográfica do Rio Itaqueri, pois a mesma encontra-se inserida numa região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) [12] e, supostamente, suas águas subterrâneas apresentam conexões hidrológicas com a Represa do Lobo (Broa) e seus rios principais e afluentes. A figura 1 ilustra a visualização aérea da área de estudo inserida na região de afloramento do SAG e a sua localização dentro do Estado de São Paulo. Logo, a região saturada de suas águas subterrâneas possui características de um aquífero freático [3].

O geoprocessamento do domínio foi realizado com o uso do software livre QGIS 2.12 e a representação digital para a delimitação da bacia foi obtida a partir de arquivos *.shp* disponíveis no endereço eletrônico *ftp://geofp.ibge.gov.br/organizacao\_do\_territorio/malhas\_territoriais/malhas\_municipais/municipio\_2014/SP/* para representação das cidades mais próximas: São Carlos, Itirapina e Brotas, seguidas das grades Topodata de modelos de elevação digital (DEM) disponíveis em *www.webmapit.com.br/inpe/topodata/*, para compor um mosaico de *rasters* fixados num sistema de coordenadas UTM (EPSG 31997 - SRC SIRGAS/UTM zone 22S) e deformados por reprojeção.

Após o pré-processamento do *raster*-DEM seguido da delimitação digital e georreferenciada da aérea de interesse, o emprego de ferramentas e funcionalidades do código integrado GRASS GIS foi aplicado para determinar a fronteira da Bacia do Rio Itaqueri e definir o contorno do domínio computacional. O mapa da esquerda da figura 2 ilustra este contorno irregular, a presença de sub-bacias, de uma rede de drenagem, a posição do enxutório na altitude 662,15m e, principalmente, a disposição geográfica de seus poços de monitoramento com seus respectivos valores cargas piezométricas. O contorno poligonal da represa do Lobo foi obtido posteriormente após o georeferenciamento de uma imagem

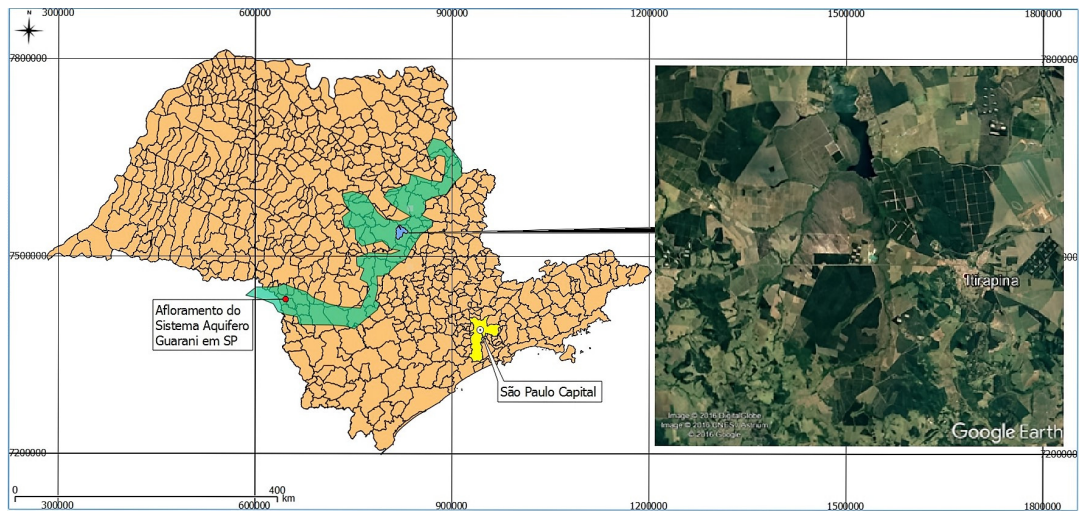


Figura 1: Localização da Bacia do Rio Itaqueri sobreposta à região de afluência do Aquífero Guarani no estado de São Paulo a a correspondente visualização aérea nas proximidades da Represa do Lobo (Broa)

local sobreposta à delimitação GIS conforme ilustra o mapa a direita da figura 2. Dos *shapefiles* de linha que representam a fronteira da bacia, o contorno da represa e cada margem de seus rios internos foram convertidos em um único arquivo de pontos equidistantes para compor uma malha de elementos finitos no formato Dolfín (.xml) através de um *script* python específico [10], conforme a malha central da figura 2. No detalhe desta figura e na proximidade do enxurtório é apresentado a conexão entre a fronteira da bacia e os demais trechos de fronteira que representam os corpos hídricos em seu interior.

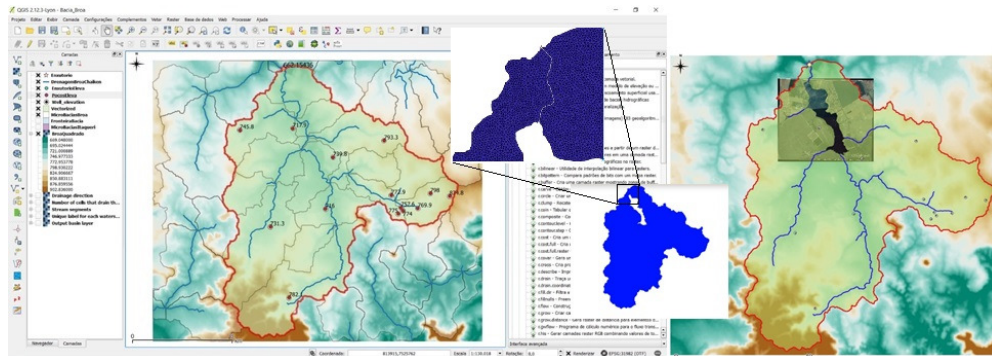


Figura 2: Delimitação da Bacia do Rio Itaqueri com o uso do GRASS GIS, georreferenciamento da represa e obtenção da malha Dolfín com detalhe da conexão entre fronteiras internas e externas da bacia

### 3 Desenvolvimento e Aplicação do Modelo Matemático

As equações governantes do modelo de fluxo subterrâneo em aquífero freático são as conhecidas equações não lineares de Boussinesq [3] que necessitam para a sua resolução

numérica, via o método de elementos finitos [6–8, 16], de um eficiente método de substituição sucessivas, tais como o esquema iterativo de Picard [11].

Nesta implementação, a tabela de atributos do *shape* de pontos, além das coordenadas projetadas UTM, informa os valores de cotas piezométricas como sendo o nível do terreno para a margem da represa e dos rios, o nível do terreno descontados de 20m para os pontos da fronteira da bacia hidrográfica (divisores de águas superficiais), e o nível do terreno descontado do nível estático (Ne) para os poços de monitoramento. Uma importante relação entre esta tabela de atributos e o código numérico para resolução das equações do fluxo subterrâneo é estabelecida por um *script* python específico que extrai informações georreferenciadas de cotas hidráulicas em pontos conhecidos e, através da criação de um arquivo .csv, repassa essas informações dos pontos para a malha em formato Dofin.

Assim, estes valores de cargas hidráulicas são implementados nas condições de fronteira do tipo Dirichlet e na condição inicial para a resolução automatizada do problema de fluxo em aquífero freático [11, 14] através da criação e leitura do arquivo .csv. A figura 3 apresenta as linhas de código das iteradas de Picard, a malha de elementos finitos e os valores estabelecidos na fronteira de Dirichlet e nos poços de monitoramento como condição inicial e a correspondente solução estacionária do fluxo subterrâneo em aquífero freático.

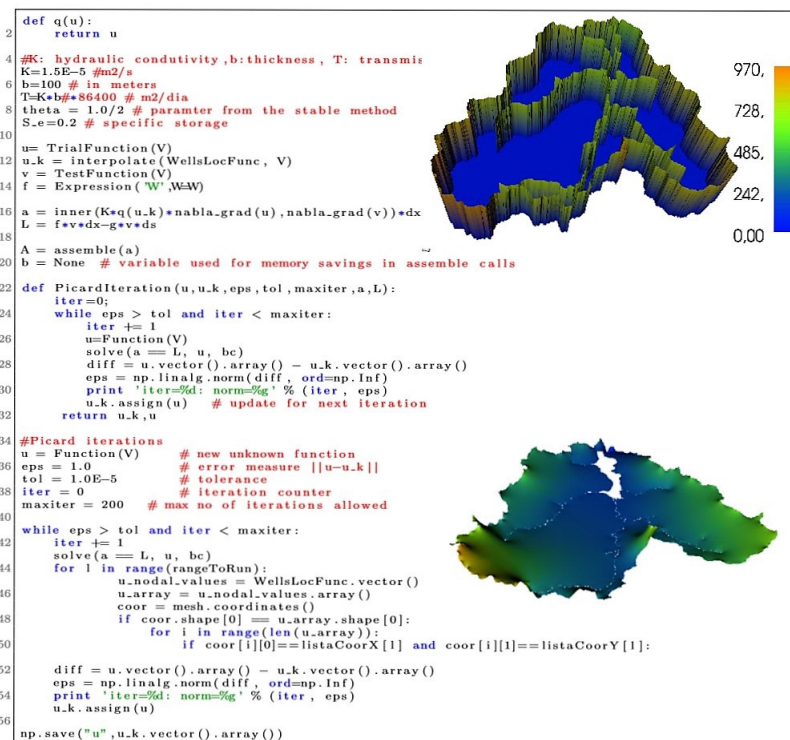


Figura 3: *Script* Python implementando o método de substituição sucessivas de Picard numa malha Dofin inicial (acima) e a solução estacionária da equação do fluxo em aquífero freático (abaixo)

## 4 Processamento e Visualização dos Resultados

Visando a minimização do erro numérico, o processamento da malha Dofin contou com uma estratégia de translação de coordenadas para diminuir seus expressivos valores UTM. E ainda, na fase de processamento da malha, aplicou-se também um esquema para que todos poços de monitoramento sejam, necessariamente, um de seus nós. Após o refinamento nos elementos em região próxima aos poços, as condições iniciais e de fronteiras são estabelecidas para obtenção da solução numérica do fluxo sem vazão nos poços da bacia. Esta solução numérica do fluxo estacionário, exibida na figura 3, agora será a solução inicial para um novo problema estacionário e não linear do fluxo em aquífero freático com valores não nulos e conhecidos que simulam a vazão  $Q_j(m^3/s)$  em cada poço  $j$  da Bacia do Rio Itaqueri. Após mais um emprego das iteradas de Picard no código numérico que simula vazão, a solução com rebaixamento é obtida. A figura 4 apresenta a diversidade de visualizadores de resultados disponível no código computacional.

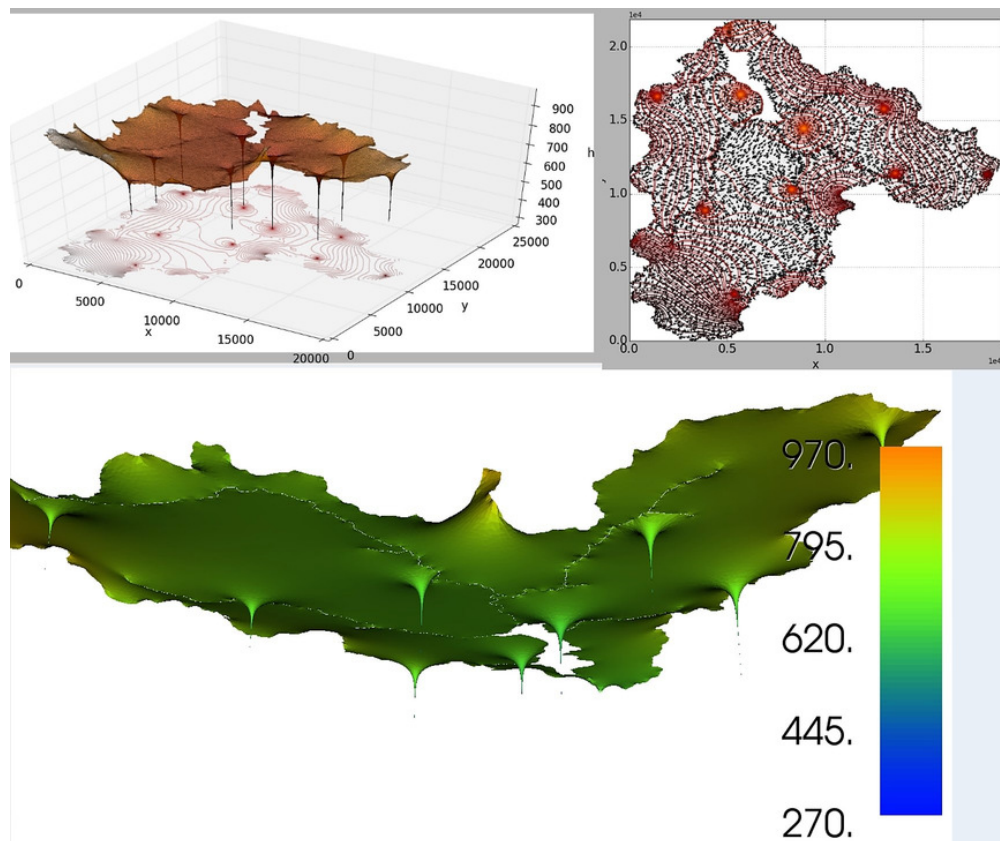


Figura 4: Solução numérica do nível potenciométrico das águas subterrâneas da Bacia do Rio Itaqueri, linhas equipotenciais, campo de velocidades e cones de rebaixamento ocasionados pela vazão dos poços

Os resultados gráficos apresentados acima utilizaram o Matplotlib, uma biblioteca desenvolvida em linguagem Python [9] e o software ParaView [1, 2]. Nestas visualizações, a simulação do comportamento 3D do nível freático das águas subterrâneas sob a Bacia do

Rio Itaqueri é sobreposta às respectivas curvas equipotenciais, conforme apresentado no mapa acima e a esquerda da figura 4. Além de identificar de imediato, através da distância entre as linhas equipotenciais, regiões que apresentam maior intensidade na queda do potencial hidráulico, o mapa revela também a região de influência para cada poço. O campo de velocidades, visto no mapa 2D acima e a esquerda na figura 4, indica a direção em que seguem as águas subterrâneas em cada porção da extensão do aquífero freático. Estas informações são úteis para a implementação dos componentes dispersivos e advectivos da equação do transporte de contaminantes. Finalmente, em cada cone de rebaixamento, visto no mapa 3D abaixo na figura 4, em função do alcance de sua profundidade, a região do aquífero é classificada como sendo de boa ou de baixa permeabilidade. Pelos resultados apresentados, o aquífero freático da simulação neste trabalho possui baixa permeabilidade. E ainda, para problemas de fluxo transiente, se um dos rebaixamento se estabiliza, a partir de determinado passo de tempo da simulação, será identificado que o respectivo poço passou a operar em condições de equilíbrio.

## 5 Considerações Finais

A geocomputação oferece ferramentas de geoprocessamento essenciais na descrição de sistemas hídricos naturais, tais como aquíferos freáticos e de suas conectividades hidráulicas com a fronteira de bacias hidrográficas, rios interiores, represa e curvas de rebaixamento em poços de monitoramento.

Simplificações foram consideradas na simulação numérica apresentada neste trabalho com relação à estratificação geológica (morfologia, consistência e porosidade) da Bacia Hidrográfica do Rio Itaqueri. No entanto, estas descrições e propriedades hidráulicas, uma vez obtidas, serão facilmente implementadas no código numérico. Assim, mesmo que valores empíricos foram fornecidos para parâmetros físicos do aquífero freático, para alguns níveis estáticos ausentes, para vazão ou taxas de recargas, não houve comprometimento na robustez do código computacional utilizado.

Portanto, a versatilidade da geocomputação na Bacia do Rio Itaqueri, acompanhadas de suas peculiares condições iniciais e de fronteiras, contribuíram para a modelagem computacional no sentido de padronizar dados geoespaciais e permitir a obtenção de solução numérica da equação não linear do fluxo de água subterrânea em aquífero freático sujeito ainda ao rebaixamento do nível potenciométrico ocasionado por vazões conhecidas em vários poços de monitoramento georreferenciados.

## Referências

- [1] J. Ahrens, *et al.*, *ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization*, Visualization Handbook, Elsevier, 2005, ISBN-13: 978-0123875822.
- [2] U. Ayachit, *The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application*, Kitware, 2015, ISBN 978-1930934306.
- [3] J. Bear, *Hydraulics of Groundwater*, New York, McGraw Hill, 2012.

- [4] R. Chesnaux *et al.* Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay-Lac-St-Jean Region. Canada, *Computers & Geosciences*, 2011. DOI 10.1016/j.cageo.2011.04.013.
- [5] B. Dixon, V. Uddameri, *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering*, Wiley Publishers AGU, 2015.
- [6] J. Donea, A. Huerta, *Finite Element Methods for Flow Problems*, John Wiley & Sons, 2004.
- [7] A. Firmiano, E. Wendland, *Solução numérica adaptativa da equação do transporte de contaminantes*, Biblioteca24horas, São Paulo, 2012.
- [8] M. Gockenbach, *Understanding and Implementing the Finite Element Method*, SIAM, 2006.
- [9] J.D. Hunter, Matplotlib: A 2D graphics environment, *Computing In Science & Engineering*, v.9, n.3, pg. 90-95, 2007. DOI = 10.1109/MCSE.2007.55.
- [10] H.P. Langtangen, *A Primer on Scientific Programming with Python*, Texts in Computational Science and Engineering, vol 6. Springer, 2011.
- [11] A. Logg, K.A. Mardal, G. Wells, *FEniCS Project: Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer, New York, 2010. DOI 10.1007/978.3.642.23099.8
- [12] A. Machado, E. Wendland, P. Krause, Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. *Environmental Processes*, v. 3, p. 1-20, 2016. DOI 10.1007/s40710.016.0128.4.
- [13] M. Morio, M. Finkel, E. Martac, Flow guided interpolation: A GIS-based method to represent contaminant concentration distributions in groundwater, *Environmental Modelling & Software*, volume 25, No. 12, 1769–1780, 2010. DOI 10.1016/j.envsoft.2010.05.018.
- [14] J.P.M. Santos, Método Multigrid Algébrico: A Reutilização das Estruturas Multigrid no Transporte de Contaminantes, Tese de Doutorado, EESC/USP, 2015.
- [15] G. Strassberg *et al.*, *Arc Hydro Groundwater: GIS for Hydrogeology*, ESRI Incorporated, 2011.
- [16] R. Verfürth, *Adaptive Finite Element Methods Lecture Notes Winter Term*, Fakultät für Mathematik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland, 2008.

## A Informações Complementares

A validação do modelo matemático aplicado neste trabalho para a resolução numérica da equação não linear é apresentada em outro trabalho complementar que também foi submetido ao XXXVII CNMAC, intitulado por **Transporte de Contaminantes em Aquífero Freático**