

# MODELO NUMÉRICO DE FLUXO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG) EM ÁREA DE AFLORAMENTOS – ARTIGAS (UY)/QUARAI (BR)

## NUMERICAL FLOW MODEL OF GUARANI AQUIFER SYSTEM (GAS) IN OUTCROP REGION – ARTIGAS (UY)/QUARAI (BR)

Gonzalo Sapriza<sup>1</sup>, Didier Gastmans<sup>2</sup>, Jorge de los Santos<sup>3</sup>, Alfonso Flaquer<sup>4</sup>, Kiang Hung Chang<sup>5</sup>,  
Martin Guimaraens<sup>6</sup>, Flávio de Paula e Silva<sup>7</sup>

**RESUMO** A utilização de modelos numéricos de fluxo das águas subterrâneas no auxílio à gestão de recursos hídricos subterrâneos vem crescendo em todo o mundo. Esse fato é decorrente da sua capacidade de fornecer subsídios aos gestores na tomada de decisões, em áreas onde a utilização intensa do recurso hídrico subterrâneo tem levado à depleção de níveis piezométricos, ou à alteração da qualidade natural das águas subterrâneas. Nas cidades de Quaraí e Artigas, localizadas na fronteira entre Brasil e Uruguai, poços perfurados no Sistema Aquífero Guarani (SAG) representam o principal manancial para o abastecimento público, e seu bombeamento vem ocasionando o rebaixamento dos níveis piezométricos do aquífero. Com o objetivo de se reproduzir a piezometria atual do aquífero, foi efetuada simulação numérica de fluxo das águas subterrâneas em regime permanente, utilizando-se o *software* Visual ModFlow 4.1<sup>®</sup>. A área foi discretizada em duas camadas com 16284 células cada uma; a primeira camada reproduz os basaltos e afloramentos do SAG, e a segunda reproduz o SAG; os parâmetros calibrados foram recarga, condutividade hidráulica, altura das lâminas d'água no leito dos rios e condutância do leito. A simulação resultou na reprodução da superfície piezométrica observada, com boa correlação entre os níveis calculados e os observados, e na estimativa da taxa de recarga que alimenta o SAG.

**Palavras-chave:** Sistema Aquífero Guarani, Simulação Numérica, Gestão de Recursos Hídricos, Artigas, Quaraí.

**ABSTRACT** The application of numerical models for groundwater flow to assist the groundwater resources management has been increased over the world mainly due its capability to provide subsidies when the managers have to take decisions concerning areas where the intense use of groundwater has produced a significant depletion in potentiometric levels, or changes in groundwater natural quality. At the cities of Quaraí and Artigas, located at the border of Brazil and Uruguay, water wells have been drilled in the Guarani Aquifer System (GAS) with the main purpose to supply water to the population. Due the intense use of groundwater an important decrease in GAS potentiometric surface is observed. Using the software Visual ModFlow 4.1<sup>®</sup> a numerical simulation of groundwater flow in steady state was achieved to reproduce the actual GAS potentiometric surface. The study area was divided in two layers, and each one of these layers in 16284 cells. The first layer reproduces the basalts and the sandstones outcrops, and the second reproduces the GAS in subsurface. Recharge, hydraulic conductivity, height of water in the streams and the conductance of the stream bed were the parameters modified to obtain a calibrated numerical model. A good match between simulated and measured heads in the observation have allowed the reproduction the potentiometric surface, and a good estimation of the recharge rates responsible by the GAS replenishment.

**Key words:** *Guarani Aquifer System, Numerical Simulation, Water Management, Artigas, Quaraí.*

### INTRODUÇÃO

A necessidade de gestão racional no uso dos recursos hídricos subterrâneos, faz com que novas ferramentas sejam empregadas como forma de subsidiar os gestores na tomada de decisões. Dentre essas, se destaca a simulação numérica do fluxo de águas subterrâneas, uma vez que a elaboração de um modelo numérico calibrado, permite a verificação de respostas do recurso hídrico subterrâneo a qualquer solicitação temporal ou permanente que se planeje executar, tornando o modelo numérico uma ferramenta auxiliar na gestão.

A resposta de um modelo numérico às questões formuladas, em um regime de fluxo estabelecido para um

determinado momento, é função do grau de conhecimento hidrológico existente, incluindo a geometria e o arcabouço geológico do aquífero no qual se pretende efetuar a simulação numérica. Tendo por base tais informações e os valores da condutividade hidráulica, mesmo que aproximados, é possível calibrar satisfatoriamente o modelo numérico de fluxo para um sistema hidrogeológico qualquer.

De maneira inversa, conhecendo-se a geometria da unidade, modelos numéricos podem ser utilizados para a estimativa dos valores de parâmetros hidráulicos de um aquífero. Para tanto devem ser consideradas todas as singularidades que podem existir dentro do domínio do modelo, previstas

<sup>1</sup> UDELAR – Facultad de Ingeniería – Uruguay, (gsapriza@gmail.com)

<sup>2</sup> LEBAC – UNESP Campus de Rio Claro, (gastmans@rc.unesp.br).

<sup>3</sup> UDELAR – Facultad de Ingeniería – Uruguay, (jedls@fing.edu.uy).

<sup>4</sup> LEBAC – UNESP Campus de Rio Claro, (aflaquer@fing.edu.uy).

<sup>5</sup> LEBAC – UNESP Campus de Rio Claro, (chang@rc.unesp.br).

<sup>6</sup> UDELAR – Facultad de Ingeniería – Uruguay, (marting@fing.edu.uy).

<sup>7</sup> LEBAC – UNESP Campus de Rio Claro, (flaviops@rc.unesp.br).

quando da construção do modelo hidrogeológico conceitual, tais como conexão entre água subterrânea e superficial (rios e lagos), existência de drenagem vertical, presença de outros aquíferos na área, limites impermeáveis, extração e recarga.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é a principal unidade hidroestratigráfica na porção centro-sul do continente sul-americano, e seus recursos são compartilhados por Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Em função de sua importância, foi recentemente objeto de estudo pela Organização dos Estados Americanos (OEA) com financiamento do Banco Mundial. O objetivo principal desse projeto – Projeto Aquífero Guarani (PSAG) – foi o de fornecer subsídios técnicos para a gestão sustentável do recurso pelos quatro países onde ocorre.

Simulações numéricas de fluxo de águas subterrâneas do SAG vêm sendo efetuadas em diversas escalas de trabalho e com os mais distintos objetivos; modelos numéricos regionais foram elaborados por Campos (2000) e Vives et al. (2008), este último como produto do PSAG, com vistas a compreensão das condições de fluxo regional no aquífero e validação de modelos conceituais. Simulações de fluxo em escala local foram elaboradas para a região de Ribeirão Preto por Montenegro et al. (1988) e Montenegro (1990). Guido (2004), a partir da simulação numérica em regime transiente, reproduziu a evolução do cone de rebaixamento devido ao bombeamento excessivo no município de Ribeirão Preto. Além desses, na região de Santana do Livramento (BR) e Rivera (UY), onde afloram arenitos das unidades que constituem o SAG recobertos localmente por basaltos, Rodriguez et al. (2007) e Gómez et al. (2010) realizaram simulações numéricas com a finalidade de entender o modelo conceitual de fluxo em áreas de afloramento, procurando também estimar as taxas de recarga.

O PSAG definiu quatro áreas prioritárias, denominadas de Projetos Pilotos, para a elaboração de estudos hidrogeológicos de detalhe: Ribeirão Preto (BR), Itapua (PY), Salto-Concórdia (UY-AR) e Santana do Livramento-Artigas (BR-UY). Nestas áreas foram efetuadas simulações numéricas de fluxo, com o objetivo principal de se determinar as respostas do aquífero frente a ações de incremento de bombeamento, função do aumento da demanda (OEA, 2009).

Assim, a utilização de modelos numéricos visando à **simulação do fluxo das águas subterrâneas em áreas de afloramento** das unidades geológicas que constituem o SAG, e onde o mesmo é responsável pelo abastecimento público de água potável, representa um avanço na gestão racional do recurso, pois permite subsidiar as decisões dos gestores públicos, de maneira a garantir o abastecimento continuado da população. Além disso, a simulação numérica permite compreender as relações entre as águas superficiais e subterrâneas nessas áreas.

Nesse trabalho é apresentada simulação numérica de fluxo das águas subterrâneas do SAG, em regime permanente, buscando reproduzir a piezometria atual do aquífero em re-

gião situada na fronteira entre Brasil e Uruguai, nas cidades de Artigas (UY) e Quaraí (BR), onde afloram sedimentos relacionados à Formação Botucatu e basaltos associados à Formação Serra Geral, com a utilização do *software* Visual ModFlow 4.1® (WATERLOO HYDROGEOLOGIC, Inc.; 2006).

#### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área em estudo está localizada no compartimento sul do SAG (LEBAC, 2008), entre as latitudes 30°20'24"S e 30°30'00"S e as longitudes 56°24'00"W e 56°36'00"W, com extensão aproximada de 2000 km<sup>2</sup>, englobando as cidades de Artigas e Quaraí. Estas duas cidades formam uma área urbanizada contígua na região de fronteira entre os territórios do departamento de Artigas (UY) e o estado do Rio Grande do Sul (BR), separadas pelo rio Quaraí, que corta a área de estudo com direção NW-SE. A população residente estimada é de cerca de 70000 habitantes, que utilizam o SAG como principal manancial para o abastecimento de água (Figura 1).

A modelação numérica do fluxo das águas subterrâneas do SAG foi realizada apenas na porção da área onde estão localizados os dois núcleos urbanos, com cerca de 1600 km<sup>2</sup> de extensão. Foi selecionada por corresponder à zona com maior número de informações hidrogeológicas de subsuperfície, onde ocorre a concentração da exploração de água subterrânea para abastecimento público, grande usuário do recurso.

#### ASPECTOS GEOLÓGICOS LOCAIS

Geologicamente, as cidades de Artigas (UY) e Quaraí (BR) estão **assentadas sobre rochas associadas à Bacia Chacoparanaense (BChPu)**, situada na região norte do Uruguai; compreende pilha sedimentar de idade devoniana a paleocênica, com espessuras máximas constatadas da ordem de 2300 metros (poço N08Yx-1-Yacaré), distribuída em área de cerca de 90000 km<sup>2</sup>. Denominada de Bacia Norte (de SANTA ANA, 1989 e 2004), seu registro sedimentar é caracterizado por cinco **seqüências limitadas, na base e no topo, por discordâncias regionais**: Seqüência Devoniana, Seqüência Permiana-Eotriássica, Seqüência Juro-Eocretácea, Seqüência Eocretácea e Seqüência Neocretácea-Paleocênica (Figura 2).

Afloram na região de estudo basaltos da Formação Serra Geral (Brasil) ou Arapey (Uruguai) e arenitos das formações Botucatu (Brasil) ou Tacuarembó (Uruguai), conforme pode ser visualizado no mapa geológico da figura 3. Localmente, ocorrem sedimentos quaternários associados aos principais cursos de água superficiais.

Em superfície, os arenitos relacionados à Formação Botucatu/Tacuarembó Superior apresentam granulação fina a média, coloração avermelhada; são limpos, fracamente cimentados; exibem estratificações cruzadas de grande porte. São recobertos pelos basaltos da Formação Serra Geral/Arapey, que afloram principalmente na região urbana dos dois municípios e nos topos das elevações aplainadas que ocorrem no entorno das duas cidades, cobrindo concordantemente o pavimento formado pelas du-

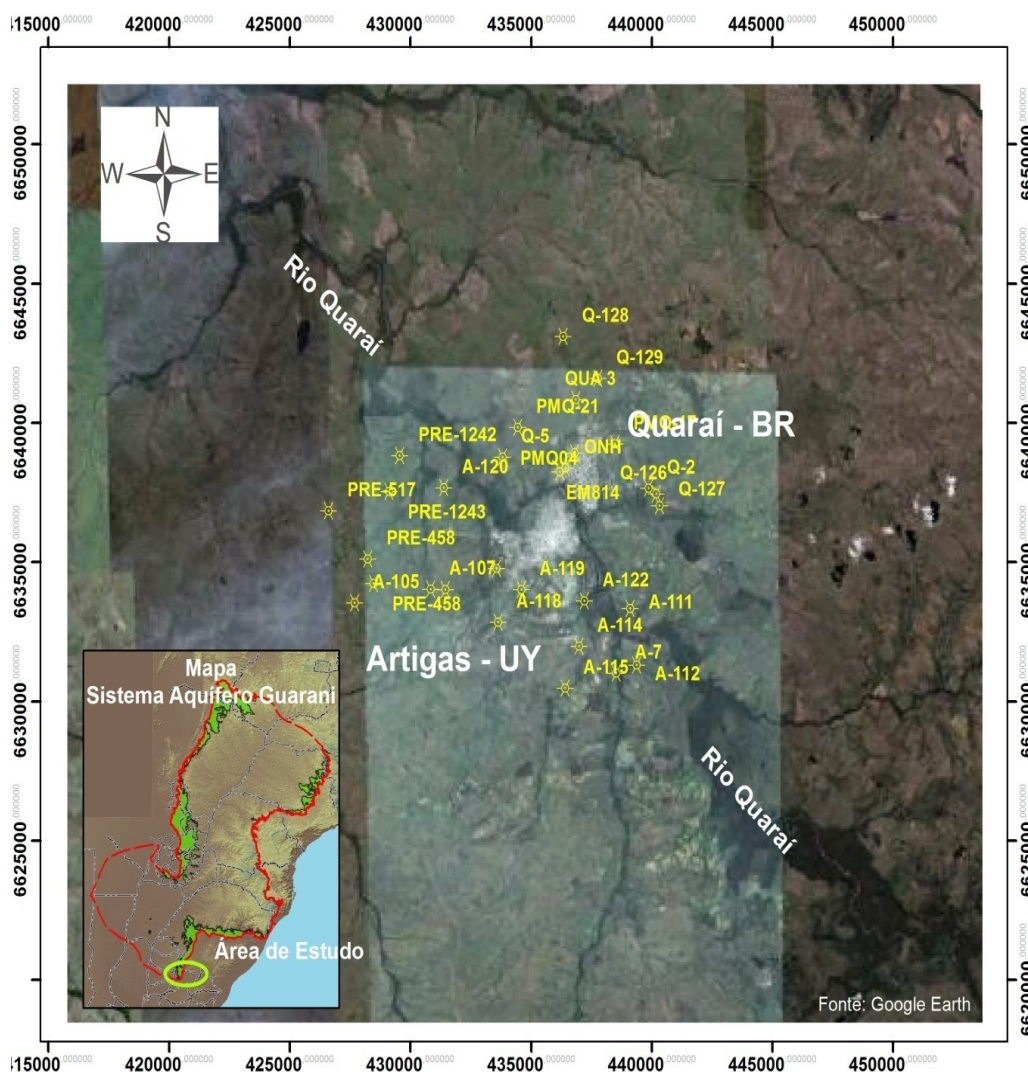


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, mostrando a localização dos poços utilizados para a elaboração do modelo numérico de fluxo.

Figure 1. Map of the area of study, showing the location of the wells used to construct the numerical flow model.

nas da unidade inferior (Botucatu/Tacuarembó Superior) (CHANG & PAULA e SILVA, 2004). Esse contato entre as rochas areníticas e os basaltos sobrepostos da Formação Serra Geral/Arapey é geralmente concordante e apresenta, como principal característica observada em afloramentos, a preservação das estruturas de topo das dunas preexistentes, fato esse observado por Scherer (2000) na área de afloramento da unidade no estado do Rio Grande do Sul.

A principal característica geológica da área está relacionada à existência de espessuras maiores de basalto na região urbanizada das cidades de Artigas e Quaraí, com afloramentos de arenitos da Formação Botucatu/Tacuarembó Superior ao redor, geralmente sotopostos a pequenas espessuras de basalto preservadas nos altos dos morros, que se apresentam como pequenos platôs (CHANG & PAULA e SILVA, 2004), conforme pode ser observado nas seções geológicas da figura 4.

Nessas seções se observa o aumento da espessura dos basaltos nas áreas urbanas das duas cidades, bem como a existência de camadas de espessura variável de arenitos *intertraps* dentro dos basaltos, indicando a contemporaneidade da deposição dos arenitos com os primeiros eventos relacionados ao magmatismo básico. As descrições litológicas de alguns perfis de poços perfurados na cidade de Quaraí apontam para a existência de arenitos relacionados à Formação Rosário do Sul, o que permite inferir espessuras máximas de 30-40 metros para os arenitos da Formação Botucatu/Tacuarembó na área (CHANG & PAULA e SILVA, 2004).

#### ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS LOCAIS

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu/Tacuarembó e os basaltos da Formação Serra Geral/Arapey constituem as duas unidades aquíferas pre-



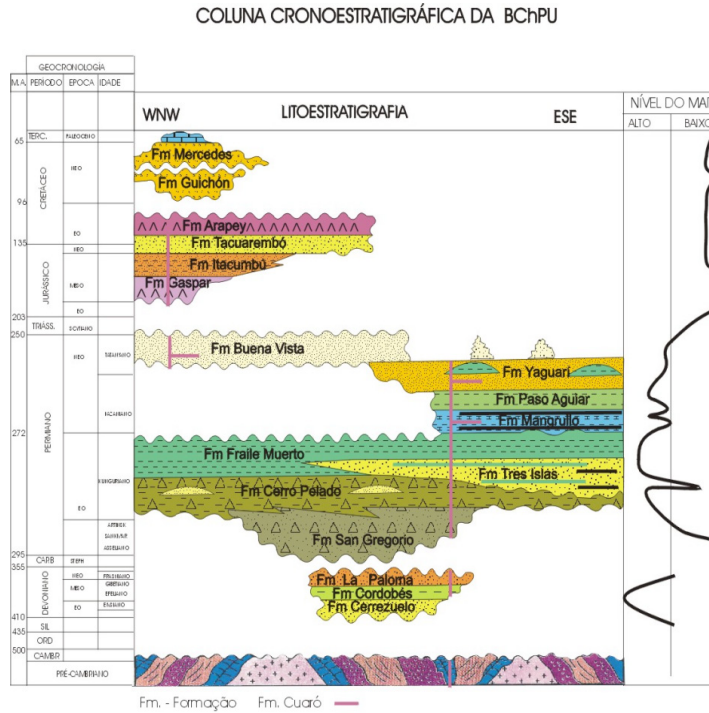


Figura III - 1. Representação das relações e distribuição temporal e espacial das unidades litoestratigráficas das seqüências deposicionais, e da curva de variação do nível do mar.

Figura 2. Relações e distribuição temporal e espacial das unidades litoestratigráficas das seqüências deposicionais da Bacia Chacoparanaense em território uruguaio (modificado de de SANTA ANA, 2004).

Figure 2. Relationship and spatial-temporal distribution of the lithostratigraphics units from depositional sequences of Chacoparanaense Sedimentary Basin in Uruguay (modified from de SANTA ANA, 2004).

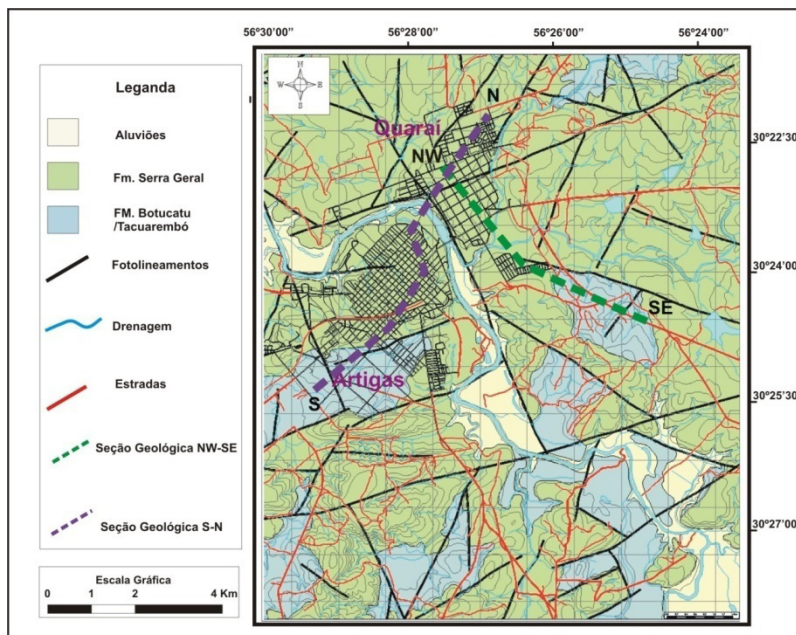


Figura 3. Mapa geológico da área de estudo (modificado de SCHIPILOV, 2005) com localização das seções geológicas da figura 4.

Figure 3. Geological map of the study area (modified from SCHIPILOV, 2005) showing geological cross sections location presented in figure 4.

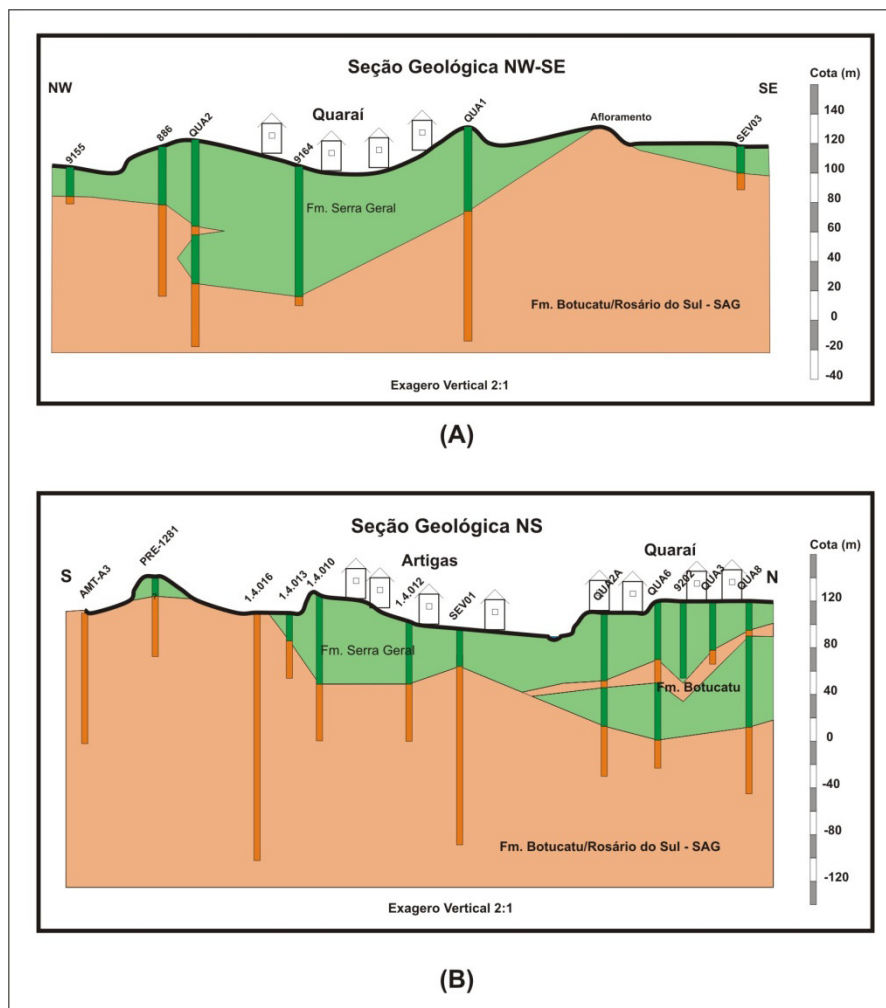


Figura 4. (A) Seção geológica NW-SE, passando por Quaraí, onde se observa a presença de espessuras maiores de basalto na cidade, com a possível presença da Formação Rosário do Sul abaixo da Formação Botucatu. (B) Seção geológica NS, mostrando as maiores espessuras de basaltos nas cidades de Quaraí e Artigas, bem como a presença de arenitos intercalados aos basaltos na porção norte da área.

Figure 4. (A) Geological cross section NW-SE, through Quaraí city, showing the thickness of basalts in city and the presence of Rosário do Sul Formation underneath Botucatu Formation. (B) Geological cross section NS, showing thicker basalt beds in the cities of Quaraí and Artigas than in other parts, and also the presence of intertraps in the North portion of the area.

sentes na área de estudo. Na primeira, formadora do SAG, o fluxo das águas subterrâneas se dá através dos poros dos arenitos; na segunda, formadora do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), o fluxo ocorre em meio fraturado. O SASG representa, ainda, uma possível zona de recarga dos arenitos subjacentes, em razão da sua pouca espessura e alto grau de fraturamento. O SAG apresenta-se como aquífero livre, quando afloram os arenitos, e confinado, quando sobreposto pelos basaltos da Formação Serra Geral.

As águas subterrâneas do SAG na região de fronteira entre Brasil e Uruguai apresentam valores de pH que variam de 5,16 a 7,52, com condutividades elétricas inferiores a 300 mS/cm (SILVÉRIO DA SILVA et al., 2007), tendo sido classificadas por Perez et al. (2000) e Perez & Rocha (2002)

como sendo bicarbonatadas cálcio-magnesianas.

Foram cadastrados por Silvério da Silva et al. (2007), durante projeto desenvolvido sob os auspícios do PSAG, 76 poços tubulares na cidade de Quaraí e mais 95 poços na cidade uruguia de Artigas, instalados nas duas principais unidades aquíferas da área, o SAG e o SASG. Entretanto, apenas trinta poços apresentavam informações hidrogeológicas relevantes, como os perfis construtivos, níveis d'água e vazões de exploração. Esses poços, cuja localização pode ser visualizada na figura 1, foram utilizados para a elaboração do modelo numérico de fluxo da área. O bombeamento dos poços retira água tanto dos basaltos do SASG, quanto dos arenitos do SAG, sendo esta extração estimada em cerca de  $3,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, dos quais cerca de 60% na porção brasilei-

ra e 40% em território uruguaio (Figura 1 e Tabela 1).

O levantamento de campo efetuado por Silvério da Silva et al. (2007) contou também com a medição dos níveis estáticos nos 30 poços com informações hidrogeológicas (Tabela 2), e que permitiram a elaboração do mapa potenciométrico para o SAG na região de estudo (Figura 5). Como pode ser observado nesse mapa, o fluxo das águas subterrâneas é radial, direcionado para as zonas urbanas dos dois municípios, condicionado, aparentemente, pelo bombeamento contínuo dos poços na área, que acarretou na inversão do fluxo das águas subterrâneas na área, uma vez que o fluxo regional, segundo LEBAC (2008) é de SE para NW, e o gradiente observado atualmente, entre as bordas do cone de rebaixamento implantado na área, indica a existência de fluxo de SW para NE.

A transmissividade do SAG apresenta valores que variam de 5 até 120 m<sup>2</sup>/dia, resultados obtidos a partir de ensaios de bombeamento, o que permite inferir um valor de 0,5 m/dia para a condutividade hidráulica horizontal do SAG na área de estudo (SILVÉRIO DA SILVA et al., 2007).

## MODELAGEM NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A movimentação da água subterrânea ocorre devido à variação espacial de energia (seja esta mecânica, termal e/ou química), que faz com que a água se desloque de uma região para outra em virtude da diferença do gradiente potencial dessas energias, procurando encontrar equilíbrio entre essas diferenças (BEAR, 1972).

A lei de Darcy estabelece que o fluxo da água subterrânea em um aquífero é proporcional ao decréscimo da carga hidráulica, dividido pela distância percorrida pelas partículas de água, e rege a movimentação da água em meio poroso. A equação geral do fluxo, para meios porosos não confinados (Equação 1), estabelecida a partir da associação entre a lei de Darcy e o princípio da conservação de massa, em função das coordenadas espaciais tridimensionais, permite descrever numericamente o comportamento do fluxo de água em meios porosos, considerando o armazenamento de água e a possibilidade de recarga e descarga em um volume elementar representativo do aquífero (WANG & ANDERSON, 1982).

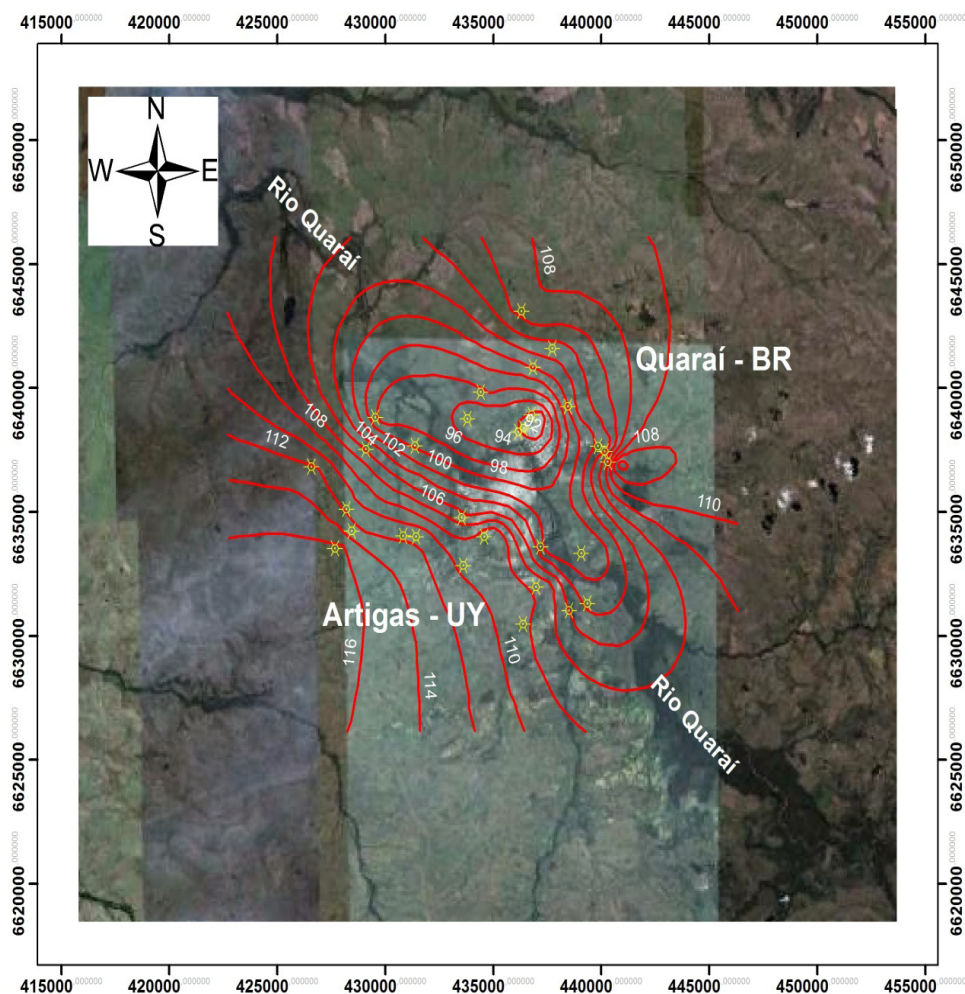


Figura 5. Piezometria da área de estudo elaborada com base nos níveis d'água levantados no ano de 2005.

Figure 5. Piezometric map for the study area based in water levels measured in 2005.



Tabela 1. Volumes diários extraídos dos poços nas cidades de Artigas e Quaraí.  
Table 1. Daily volumes extracted by wells in Artigas and Quaraí

Poço	Cidade	EW	NS	Q (m³/dia)
OSE410	Artigas	437022	6635799	2112
OSE1_4_003	Artigas	435890	6635475	720
OSE1_4_015	Artigas	435100	6635749	200.4
OSE1_4_004	Artigas	434276	6636059	216
OSE1_4_011	Artigas	434108	6636247	624
OSE1_4_010	Artigas	435390	6636890	264
OSE1_4_002	Artigas	434907	6637158	594
OSE1_4_012	Artigas	435360	6637756	1320
9153	Quaraí	437374	6640211	24
PMQ13	Quaraí	436822	6640391	60
QUA_6	Quaraí	436799	6640432	1296
9159	Quaraí	436957	6640590	96
9155	Quaraí	436113	6640719	24
QUA_3	Quaraí	437308	6640856	209.76
QUA_4	Quaraí	437836	6640797	730.8
QUA_8	Quaraí	437370	6641433	1200

(Fonte: OSE para Artigas e CORSAN para Quaraí)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{S_s}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

onde  $S_s$  é o armazenamento específico e  $b$  é a espessura do aquífero.

O primeiro termo dessa equação consiste na variação de carga ao longo do domínio tridimensional, e o segundo corresponde às variações do fluxo ao longo do tempo (carga e/ou descarga) e o armazenamento de água no meio poroso.

Essa equação não possui solução analítica, a não ser em casos específicos de fluxo unidirecional em meio isotrópico e homogêneo, sendo então necessária a utilização de técnicas numéricas para sua resolução. Os principais métodos numéricos empregados nessa solução são os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos.

O código numérico *MODFLOW* (McDONALD & HARBAUGH, 1984) é amplamente utilizado na solução de problemas complexos relativos ao fluxo de águas subterrâneas em meios porosos, e presta-se à solução da equação geral de fluxo por meio do método das diferenças finitas, dentro de elementos retangulares ou quadrados, calculando a carga em cada uma dessas células localizadas dentro do domínio do modelo discretizado. Este código numérico é utilizado pelo *software* Visual Modflow v4.1<sup>®</sup> (WATERLOO HYDROGEOLOGIC, Inc.; 2006).

#### DISCRETIZAÇÃO DO MODELO, CONDIÇÕES DE CONTORNO E ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO

A simulação numérica foi efetuada em regime estacionário, buscando reproduzir o cone de rebaixamento observado pelo bombeamento de poços do SAG na área das cidades de Artigas e Quaraí, sendo considerada a existência de um sistema hidrológico constituído por duas camadas; a primeira com espessura constante de 50 metros, representando os basaltos do SASG, e as zonas de afloramentos dos arenitos que constituem o SAG. A segunda camada, com espessura constante de 150 metros, representa os arenitos do SAG (Figura 6).

Apesar do reconhecimento de variações de espessuras para os basaltos, adotou-se a estratégia de reproduzir a primeira camada com espessura constante, devido a ausência de informações geológicas nas porções mais externas da área a ser modelada. Visando reproduzir as áreas de ocorrência dos arenitos do SAG e dos basaltos do SASG para essa camada, foram atribuídos valores distintos de condutividade hidráulica, sendo os valores adotados para os basaltos três ordens de grandeza menores, quando com-

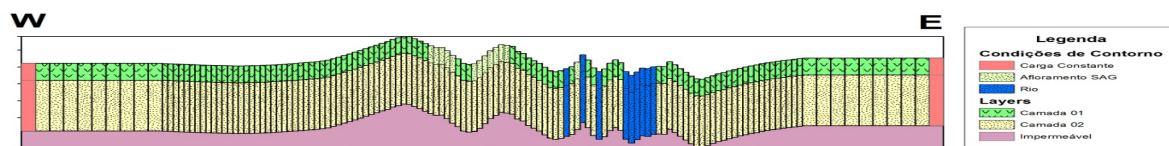


Figura 6. Seção WE mostrando a divisão das camadas, discretização e condições de contorno estabelecidas o modelo numérico.  
Figure 6. Cross section showing the layers, discretization and contour conditions assumed for the groundwater flow modeling.

parados com as condutividades atribuídas aos arenitos.

Cada camada da área de estudo foi discretizada em células de 200m x 200m na porção com maior densidade de informações, e em células de 500m x 500m, nas bordas da área a ser modelada, e onde o volume de informações é menor. Esta discretização resultou em um modelo constituído por 118 linhas e 138 colunas, totalizando 16284 células por camada. As condições de borda atribuídas à área a ser modelada foram de três tipos: ausência de fluxo (*no flow*), carga ou nível fixo/constante e feição de rio, conforme pode ser visualizado nas figuras 6 e 7.

Para as zonas mais externas ao modelo, e que representam os limites onde se considerou a presença de células inativas, foram consideradas condições de contorno de carga constante, sendo que na extremidade SW o valor adotado foi de 115 metros, enquanto na porção NW a cota piezométrica adotada foi de 110 metros.

O cone de rebaixamento produzido pelo bombeamento (Figura 5) indica a existência de curvas isopiezométricas aproximadamente perpendiculares às bordas NW e SE do modelo, situação que pode ser traduzida para o modelo numérico como condição de não fluxo (Figura 7).

A definição das taxas de recarga exige uma acurada observação de campo, embasada em rede de poços de observação, poucas vezes disponível para estudos hidrogeológicos, como neste caso específico. Como maneira de tratar esta situação, foi feita uma simplificação para o modelo, que consistiu na distribuição da recarga em taxas distintas em função da geologia de superfície. Para as regiões onde afloram os arenitos, a taxa de recarga foi estimada inicialmente em 7% do total da pluviometria, valor semelhante ao empregado por Sinelli (1987) para a Bacia do Rio Pardo, próximo a Ribeirão Preto (SP), e para a região de Artigas-Santana do Livramento por Rodríguez et al. (2007). Para as zonas onde afloram os basaltos do SASG foi estimada uma taxa de recarga de menos de 1% do total da pluviometria média anual da área, que é de 1400 mm/ano, e que posteriormente foi recalculada, uma vez que a taxa de recarga foi adotada como um dos critérios de calibração do modelo.

Os rios considerados na simulação foram aqueles identificados na área de estudo, e sua conexão foi considerada

condição de contorno em toda a área do domínio do modelo para a primeira camada, enquanto que para a segunda camada, essa conexão foi considerada apenas nas áreas onde os arenitos são aflorantes, ou seja, onde não existe distinção entre as litologias da camada 1 e 2. Essa abordagem buscou agregar ao modelo numérico, possíveis descargas advindas de fluxos regionais do SAG para os cursos d'água. Foi considerada uma espessura de lâmina de água entre 1 e 2 metros, a cota do fundo dos rios foi tomada a partir do Modelo Digital do Terreno e a condutância do leito variou entre 50 e 100 m<sup>2</sup>/dia.

A simulação levou em consideração o bombeamento nos poços da área, diretamente responsável pelo rebaixamento observado sob as duas cidades; a taxa de bombeamento e os poços utilizados na simulação são aqueles apresentados na tabela 1.

A calibração foi realizada comparando-se os valores das cotas piezométricas medidos nos poços, com aqueles calculados pela simulação numérica, sendo considerado como critério de calibração a observação de coeficiente de correlação superior a 90% entre os valores de carga hidráulica observados e os calculados. Para que esses critérios fossem atingidos, foi empregada a técnica da calibração manual com modificação e ajuste dos seguintes parâmetros:

- Taxa de recarga;
- Condutividade hidráulica das duas unidades aquíferas que compõe o sistema;
- Altura das lâminas d'água nos rios e cursos d'água;
- Condutância hidráulica nos leitos dos rios.

#### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A estratégia de calibração utilizada para o modelo numérico elaborado apresentou resultados satisfatórios quando se comparam os níveis estáticos medidos nos poços com aqueles calculados por meio da simulação numérica de fluxo, conforme pode ser observado no gráfico da figura 8, e nos resultados dos erros obtidos, apresentados na tabela 3.

O erro máximo obtido, de -4,88 m no poço Q-126A, representa cerca de 33% da variação de cargas observadas na área, enquanto o erro médio representa apenas 6% dessa variação, -0,899 m. O coeficiente de correlação observado entre as cargas calculadas e as observadas foi de 95%, considerado muito bom para esse tipo de simulação.



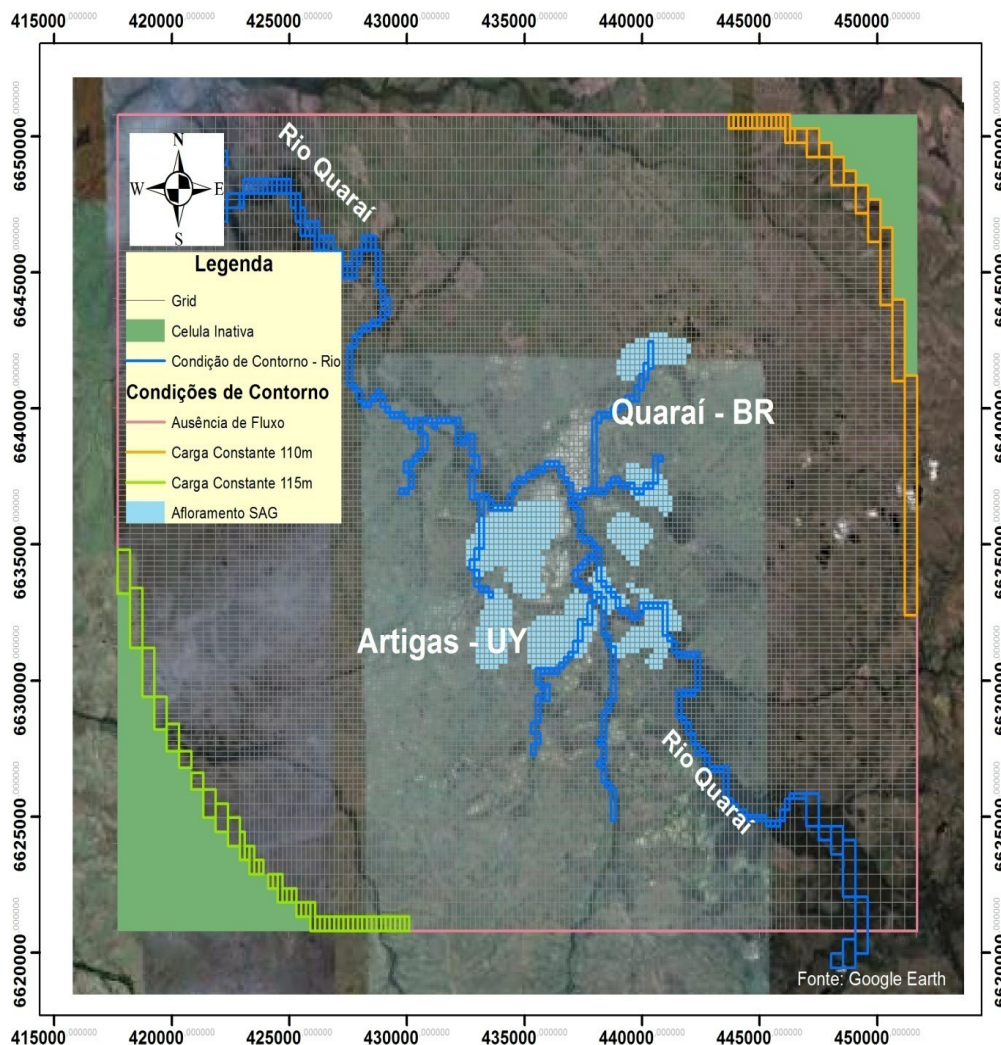


Figura 7. Discretização e condições de contorno estabelecidas para a primeira camada do modelo numérico. As condições de carga especificada foram mantidas para a camada 2

Figure 7. Discretization and contour conditions assumed for the first one of the groundwater flow modeling. The contour conditions were preserved for the second layer.

Os valores calibrados para as condutividades hidráulicas dos aquíferos, que permitiram a reprodução da piezometria da área, podem ser considerados adequados às premissas estabelecidas para a construção do modelo numérico da área, ou seja, de um sistema hidrogeológico composto por duas camadas, onde a condutividade hidráulica horizontal nessas camadas é igual nas direções x e y ortogonais ( $k_{xx}=k_{yy}$ ). Este valor foi calibrado em 1 m/dia, para os arenitos do SAG e em 0,001 m/dia para os basaltos constituintes do SASG. O valor calibrado para o SAG é um pouco superior àquele obtido a partir dos ensaios de bombeamento efetuados na área por Silvério da Silva (2007), entretanto, para o SASG, os valores são coerentes aos obtidos por Wahnfried (2010), em estudo realizado sobre o comportamento hidráulico dos basaltos na região de Ribeirão Preto.

Já os valores calculados para a condutância hidráulica do leito do Rio Quaraí são da ordem de 50 a 100  $m^2/dia$ , semelhantes à transmissividade do aquífero.

Esses parâmetros de calibração permitiram a reprodução coerente da piezometria observada para o SAG na área de estudo, conforme pode ser verificado na figura 9, que mostra o rebaixamento ocasionado pelo bombeamento concentrado na região que compreende as zonas urbanas das cidades de Artigas e Quaraí. Entretanto, deve ser salientado que a reprodução é condicionada pelas condições de contorno de carga constante fixadas para o modelo.

O funcionamento hidráulico das áreas de recarga do SAG é caracterizado pela existência, concomitante, de recarga direta pela água de chuva, com descargas que alimentam o fluxo de base dos rios que cortam os afloramentos de arenitos, como observado por LEBAC (2008), e em escala local por Rodriguez et al. (2007).

O modelo numérico calibrado, construído a partir de modelo conceitual embasado nessa premissa, reproduz esse comportamento, como mostra o balanço de massas obtido a partir da simulação numérica (Tabela 4). A recarga do SAG

Tabela 2. Dados Piezométricos dos Poços nas cidades de Artigas e Quaraí, medidos em 2005.  
Table 2. Piezometric levels in wells from Artigas and Quaraí measured in 2005.

Poço	Cidade	EW	NS	Cota NE (m)
ONH	Artigas	436876	6638384	90,29
PMQ04	Quaraí	437265	6638932	91,30
EM814	Artigas	436649	6638254	91,89
Q-5	Quaraí	434281	6638782	92,08
PRE-1242	Artigas	430013	6638833	94,92
PMQ-21	Quaraí	434897	6639845	95,94
A-120	Artigas	431842	6637679	97,48
A-111	Artigas	439559	6633342	97,73
A-122	Artigas	437664	6633614	98,46
QUA 3	Quaraí	437308	6640856	100,47
A-112	Artigas	439828	6631319	101,21
A-7	Artigas	438993	6631029	102,49
PMQ-17	Quaraí	438931	6639263	102,88
Q-129	Quaraí	438217	6641610	103,05
Q-2	Quaraí	440323	6637669	103,12
PRE-1243	Artigas	429573	6637545	103,67
A-116	Artigas	434025	6634787	104,43
A-114	Artigas	437450	6631982	107,54
A-115	Artigas	436863	6630488	107,68
Q-128	Quaraí	436791	6643118	107,70
A-118	Artigas	434091	6632852	108,89
Q-126	Quaraí	440651	6637459	109,09
A-119	Artigas	435057	6634018	110,53
PRE-458	Artigas	428680	6635119	110,98
PRE-1346	Artigas	431899	6634023	111,13
A-107	Artigas	431302	6634043	111,64
PRE-458	Artigas	428923	6634239	112,14
PRE-517	Artigas	427059	6636843	112,16
Q-127	Quaraí	440789	6637029	114,97
A-105	Artigas	428147	6633541	116,38

Tabela 3. Erros de calibração obtidos  
Tabela 3. Calibration error.

Índices	Valores	Poço Observado
Número de Pontos Analisados	27	---
Erro Máximo (m)	-4,934	Q-126A
Erro Mínimo (m)	0,358	PRE-458A
Erro Médio (m)	-0,899	---
Erro Médio Absoluto (m)	1,954	---
Erro Padronizado de Estimativa (m)	0,435	---
Erro Médio Quadrático (m)	2,395	---
Coefficiente de Correlação	0,947	---

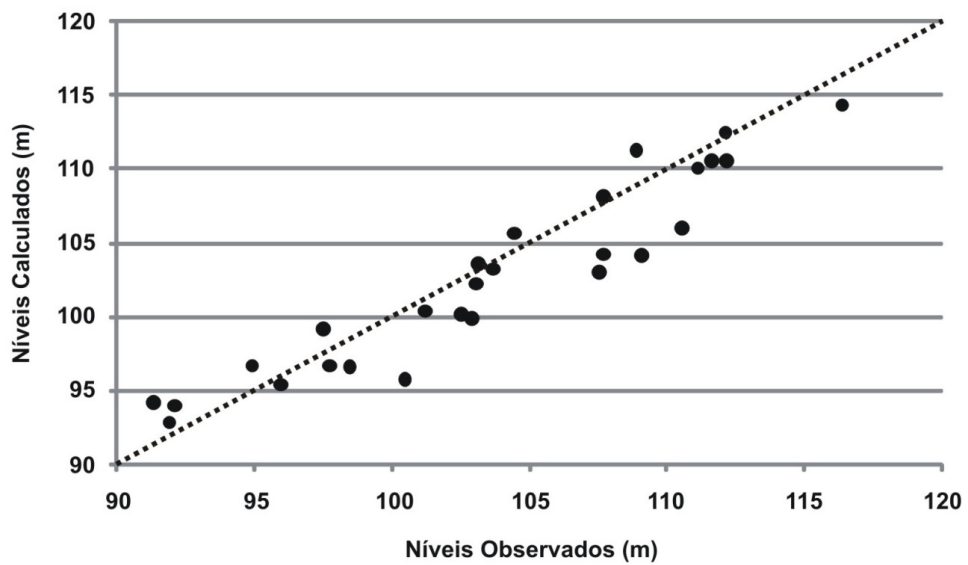


Figura 8. Gráfico mostrando a correlação entre os valores medidos e calculados por meio da simulação para as cotas potenciométricas dos poços de observação.

Figure 8. Scareplot correlating groundwater levels observed and calculated by numerical simulation in the observation wells.

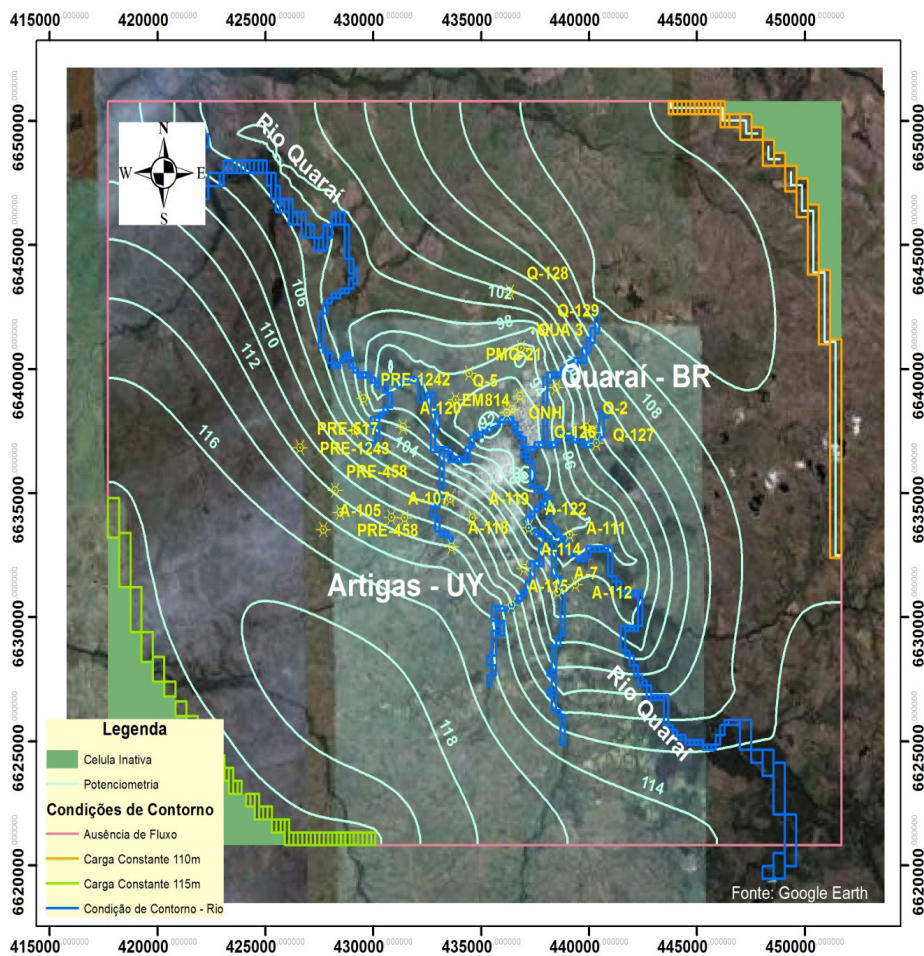


Figura 9. Mapa com a piezometria calculada a partir da simulação numérica de fluxo para a área em estudo.

Figure 9. Calculated piezometric map achieved by numerical flow simulation for the study



ocorre tanto através dos basaltos fraturados, representado pelo fluxo de entrada na camada 2 proveniente da camada 1, como pelas áreas de afloramento, e em pequena escala ao longo dos cursos d'água. As saídas de água do sistema estão concentradas ao longo dos rios que cortam as faixas de afloramento dos arenitos e nas áreas com maior concentração de bombeamento pelos poços existentes. Um resumo deste balanço de massa pode ser observado na Tabela 4.

Os valores obtidos para a recarga são semelhantes àqueles

estimados e observados em simulações numéricas na região de Ribeirão Preto (SP) por Sinelli (1987) e nas cidades de Rivera e Santana do Livramento por Rodríguez et al. (2007). A simulação realizada indica que a recarga através dos basaltos é de cerca de 16 mm/ano, e o volume de água que recarrega diretamente o aquífero através dos arenitos aflorantes é de 150 mm/ano, representando respectivamente 1,14% e 10,7% da precipitação total, próximas ao valor inicial considerado.

Tabela 4. Balanço de massa obtido a partir da simulação numérica  
Table 4. Mass balance achieved by numerical simulation.

Camada	Condições de Contorno	Volumes (m <sup>3</sup> /dia)	
		Entrada	Saída
Camada 1	Carga Constante	----	66
	Bombeamento (poços)	----	----
	Rios	353	4.923
	Recarga	54.206	----
	Camada 2	1.165	50.735
	<b>Balanço Camada 1</b>	<b>55.724</b>	<b>55.724</b>
Camada 2	Carga Constante	----	7.791
	Bombeamento (poços)	----	9.691
	Rios	3.576	35.686
	Recarga	22	----
	Camada 1	50.735	1.165
	<b>Balanço Camada 2</b>	<b>54.333</b>	<b>54.333</b>
Modelo	Carga Constante	----	7.857
	Bombeamento (poços)	----	9.691
	Rios	3.929	40.609
	Recarga	54.228	----
	<b>Balanço Total</b>	<b>58.157</b>	<b>58.157</b>

## CONCLUSÕES

A simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas representa uma importante ferramenta para a gestão de recursos hídricos, pois permite prever o comportamento do reservatório frente a solicitações advindas dos usuários de águas subterrâneas. Entretanto, para que os modelos numéricos possam auxiliar na gestão é necessário o conhecimento prévio da unidade aquífera que se está modelando, com a definição do arcabouço geológico e hidrogeológico que leve à formulação de um modelo conceitual de funcionamento hidráulico da unidade aquífera, válido ou a ser validado.

Os resultados apresentados pela simulação numérica para a área de recarga/afloramentos do Sistema Aquífero Guarani na região das cidades de Quaraí e Artigas, localizadas na fronteira entre o Brasil e o Uruguai, permitiram reproduzir, em regime permanente, a superfície piezométrica do aquífero nesta região, afetado pelo bombeamento excessivo e concentrado em área reduzida. Além disso, a simulação realizada confirmou os

valores de parâmetros hidráulicos medidos em campo.

A estimativa das taxas de recarga, embasadas na calibração do modelo numérico, indica que as porcentagens de água da chuva que alcançam o SAG são da ordem de 10% da precipitação direta sobre áreas de afloramento do SAG, caindo para valores próximos a 2% quando o mesmo é capeado pelos basaltos da Formação Serra Geral.

O balanço de massas obtidos por meio da calibração do modelo numérico indica que é possível a existência de recarga ao SAG através dos basaltos, o que aponta para a necessidade de planejamento territorial e controle na utilização dessas áreas, uma vez que fluxo através de vias preferenciais, como é esperado para aquíferos fissurados, pode levar contaminantes rapidamente ao SAG.

O presente modelo, elaborado em regime permanente de fluxo, reproduz satisfatoriamente as condições atuais de exploração do aquífero. Alterações nessa condição deverão produzir uma nova configuração na superfície potenciométrica, modificando as condições de contorno impostas a

este modelo numérico. A revisão e calibração periódica do modelo em regime permanente ora apresentado, sempre que houver aumento na disponibilidade de informação, pode fornecer subsídios para a gestão, que pode ser aprimorado com a elaboração de um modelo em regime transiente, que per-

mitiria previsões mais consistentes em relação ao comportamento do cone de rebaixamento frente a novas solicitações, mas para tanto, a implantação de um programa de monitoramento de níveis de vazões bombeadas faz-se necessário.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York, American Elsevier Publishing Company, New York. 1972. 764p.
- CAMPOS, H.C.N.S. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur. **Acta Geológica Leopoldinense**, São Leopoldo, v. 23, nº 4, p. 3-50, 2000. (Mapas).
- CHANG, H.K.; PAULA E SILVA, F. Relatório de Pesquisa – Processo Cnpq 49.1498/2004-7, Inédito, 2004. 13p.
- de SANTA ANA, H. Consideraciones tectónicas y deposicionales en la Cuenca Norte uruguaya. **Bol. Técnico ARPEL**, vol.18, no.4, p. 319 – 339, 1989.
- de SANTA ANA, H. **Análise Tectono-Estratigráfica das Sequências Permotriássica e Jurocretácea da Bacia Chacoparanaense Uruguiaia (“Cuenca Norte”)**. Tese de Doutorado, IGCE–UNESP–Rio Claro, 2004. 274p.
- GÓMEZ, A.A.; RODRÍGUEZ, L.B.; VIVES, L.S. The Aquifer Guarani System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. **Hydrogeology Journal**, vol. 18, p.1667-1684, 2010.
- GUIDO, M. **Grundwasserbewirtschaftung mittels eines dreidimensionalen numerischen Grundwassermodells im Raum Ribeirão Preto**. Diplomarbeit im Fachgebiet Hydrogeologie, Technische Universität Berlin, disponível em [www.hydrogeologie.tu-berlin.de](http://www.hydrogeologie.tu-berlin.de), Acessado em 21 de junho de 2008. 2004.
- LEBAC **Informe Final Hidrogeología Regional do SAG**. Coord.: GASTMANS, D & CHANG, H.K. Equipe: PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 2008. 154p.
- McDONALD, M.G. & HARBAUGHT, A.W. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey, 1984.
- MONTENEGRO, A. **Modelação matemática do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto, SP**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo. 1990.
- MONTENEGRO, A. A., RIGHETTO, A.M. & SINELLI, O. Modelação do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5, 1988, São Paulo. **Anais....** São Paulo, ABAS, p.32 – 41, 1988.
- OEA – Organização dos Estados Americanos. **Acuífero Guarani: programa estratégico de ação**. – Edição bilíngüe. – Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai: Organização dos Estados Americanos (OEA), janeiro 2009, 424 p. + 2 DVD, 2009.
- PEREZ, A.; ROCHA, L.; DECOUD, P.; CARBAJAL, A. Comportamiento del Acuífero Guarani em la Ciudad de Artigas, Uruguay. **1st Join World Congress on Groundwater**, Fortaleza, Brasil, p.7, 2000.
- PEREZ, A.; ROCHA, L. Aportes al conocimiento del Acuífero Guarani. Área Ciudad de Rivera – Uruguay. **Groundwater and Human Development**. OSE, Obras Sanitarias del Estado, Uruguay, p.598-605, 2002.
- RODRÍGUEZ, L.; GÓMEZ, A.A.; OLEAGA, A.; PACHECO, F.; ROULLIER, G.; SEOANE, N.; SILVA BUSO, A.; VIVES, L. Desarrollo Metodológico para la Evaluación de la recarga y la vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guarani em Argentina y Uruguay. **Acuífero Guarani: avances em El conocimiento para su gestión sostenible**. Montevideo, p.77-92, 2007.
- SCHERER, C.M.S. Eolian dunes of Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: Morphology and Origin. **Sedimentary Geology** vol. 137, p.63-84, 2000.
- SCHIPILOV, A. Carta Geológica 1:25.000 da região Artigas/Quarai. Inédito. 2005.
- SILVÉRIO DA SILVA, J.L.; BESSOUAT, C.; CAMPONOGARA, I.; FRANTZ, L.C.; GUIMARAENS, M.; GAMAZO, P.; FAILICHE, L.; FLORES, E.L.M.; FLORES, E.M.M.; DRESSLER, V.L. Caracterização de áreas de recarga e descarga do SAG em Rivera-Livramento (R-L) e Quarai-Artigas (Q-A). Estudo da vulnerabilidade na área de influência de Quarai-Artigas. **Acuífero Guarani: avances em El conocimiento para su gestión sostenible**. Montevideo, p.61-75. 2007.
- SINELLI, O. Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (SP). **Revista Águas Subterrâneas**, nº11, São Paulo, 1987.
- VIVES, L.; RODRÍGUEZ, L.; GÓMEZ, A. Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guarani. **Informe Técnico–Consórcio Guarani**. Montevideo, 2008. 144p.
- WAHNFRIED, I. **Modelo Conceitual de Fluxo do Aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na Região de Ribeirão Preto**. Tese de Doutorado Instituto de Geociências – USP. São Paulo, 2010. 124p.
- WANG, H.F. & ANDERSON, M.P. **Introduction to Groundwater Modelling: Finite Difference and Finite Elements Methods**. San Diego, California, USA: Academic Press Limited. 1982. 237p.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC, Inc. Visual MODFLOW version 4.1. Canadá. 2006.

#### **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho é resultado de projeto realizado sob a égide do Programa de Cooperação Bilateral Brasil-Uruguai, com financiamento do CNPq e DYCID (Processos nº 49.1498/2004-7 e 490637/2006-0). Os au-

tores gostariam de agradecer à Prof. Dr. Maria Rita Caetano-Chang pela leitura dos manuscritos e sugestões apresentadas; aos três revisores, cujas valiosas sugestões e recomendações muito acrescentaram ao trabalho.