

# ESTUDO DA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO NO SISTEMA JACARÉ-TIETÊ POR MEIO DE UM MODELO NUMÉRICO BASEADO EM SIG

Jorge Luiz Rabelo<sup>1</sup>; Edson Wendland<sup>2</sup>

**RESUMO** Este trabalho visa avaliar a interação entre o Aquífero Guarani e os rios da área delimitada pelas bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçú e Jacaré-Pepira, tributários do Rio Tietê, com 6.746 km<sup>2</sup>, na região central do Estado de São Paulo, Brasil, por meio de um modelo numérico. Técnicas de SIG foram utilizadas no armazenamento, processamento e análise de dados. Foi estabelecido um modelo conceitual para o sistema de escoamento subterrâneo a partir dos fenômenos hidrogeológicos mais significativos ao aquífero, o qual possui na área de estudo grande extensão de afloramento (46%). Os trechos de interação rio-aquífero foram atribuídos por comparação entre os níveis da superfície piezométrica e dos rios. A determinação das vazões de base pelo método numérico identificou os trechos ao longo dos rios nos quais o aquífero os carrega e é carregado. Apesar do aquífero essencialmente abastecer os rios, os trechos nos quais os rios o carregam são significativos e importantes por serem trechos nos quais o aquífero é potencialmente mais vulnerável.

**ABSTRACT** This work aims to assess the interaction between the Guarani Aquifer and the rivers delimited for the hydrographic basins of the rivers Jacaré-Guaçú and Jacaré-Pepira, sub-basin of the Tietê River, with 6.746 km<sup>2</sup>, in the central region of São Paulo State, Brazil, by means of a numerical model. GIS based tools were used in the storage, processing and analysis of data. A conceptual model was established for the groundwater flow system taking in count the more significant hydrogeologic effects related to the aquifer, which have great outcrop region in the study area (46%). The stretches of river-aquifer interaction were attributed by comparison between levels of piezometric surface and the rivers. The determination of the baseflows by numerical method identified the stretches to long of the rivers in which the aquifer loads and is loaded. Despite the aquifer essentially supplying the rivers, the inflows from the river into the aquifer are significant and have the utmost importance since the aquifer is potentially more vulnerable in these places.

Palavras-chave: Aquífero Guarani, interação rio-aquífero, modelo de fluxo

---

<sup>1</sup>Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia UFRB, Campus Cruz das Almas-BA, 44380-000, tel. 75 3621-9362, e-mail: rabelo@ufrb.edu.br

<sup>2</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo USP, São Carlos-SP, 13560-970, tel. 16 3371-9541, e-mail: ew@sc.usp.br

## **1 - INTRODUÇÃO**

O conhecimento acerca da dinâmica do fluxo entre mananciais de superfície e aquíferos tem como estímulo o desafio de se entender e propor soluções a questões práticas, frequentemente demandadas pela sociedade envolvendo gestão de águas em várias áreas, como na agricultura e irrigação, abastecimento, planejamento urbano, diluição de águas residuais, navegação fluvial, funcionamento de hidrelétricas e proteção ambiental, para nomear apenas algumas (Szilagyi et al., 2006).

A área de estudo, formada pelas duas bacias contíguas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (6.748 km<sup>2</sup>), tributários do Rio Tietê, na região central do Estado de São Paulo, tem como sistema aquífero o Aquífero Guarani, reconhecido internacionalmente por sua importância aos quatro países do Cone Sul: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, devido a sua característica transfronteiriça, sua elevada extensão (1.200.000 km<sup>2</sup>), elevada capacidade hídrica e importância socioeconômica e ambiental. O Aquífero Guarani, caracterizado como aquífero confinado, apresentar-se aflorante em parte significativa da área de estudo (46%), apresenta fortes indícios de conexão hidráulica entre as duas bacias (Corrêa, 1995) e possui uma estratigrafia de confinamento e semiconfinamento típica do Sistema Aquífero Guarani (SAG), além de incluir áreas com grande diversidade de atividades urbana, agrícola e industrial. Segundo a OAS/GEF (2001), o conhecimento do comportamento do Aquífero Guarani, sobretudo nas áreas sujeitas à recarga direta, naturalmente mais vulneráveis e com maior interação com o manancial de superfície, tem uma importância maior para sua conservação e fornecimento de subsídios aos intentos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável, que visem assegurar a qualidade e a quantidade de seu manancial às futuras gerações.

No SAG, e especificamente na área de estudo, os trechos de interação rio-aquífero ocorrem sobretudo nas regiões de afloramento do aquífero, entretanto podendo ocorrer em regiões de semiconfinamento a depender das características estratigráficas e quando a superfície potenciométrica se apresentar acima do topo dos reservatórios sedimentares do aquífero (Rosa Filho et al., 2003).

## **2 - OBJETIVO**

Estimar a distribuição espacial dos trechos de interação rio-aquífero na área de estudo, identificando a incidência dos sentidos dos fluxos de base, se entrada ou saída do aquífero, e quantificar os volumes deste fluxo estabelecendo a proporção entre o fluxo de base, a recarga do aquífero e demais fluxos que o compõem.

### 3 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A área objeto de estudo é delimitada pelo conjunto das duas bacias contíguas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (sistema Jacaré), abrangendo importantes centros urbanos, bem como, diversificadas atividades agro-pecuária e industrial. A região perfaz uma área de drenagem de 6.748 km<sup>2</sup>, com 140 km de comprimento, 70 km de largura máxima e 447,5 km de perímetro, localiza-se na porção central do Estado de São Paulo. Pertencentes à Bacia Hidrográfica Tietê/Jacaré, os rios Jacaré-Guaçu (4.161 km<sup>2</sup>) e Jacaré-Pepira (2.587 km<sup>2</sup>) deságuam na região do curso médio do Rio Tietê (Figura 1). Apresentam características semelhantes, tanto em ocupação e desenvolvimento como em sua geologia, pedologia, climatologia, hidrologia e hidrogeologia (DAEE, 1974; Corrêa, 1995). A confluência dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira determina os exutórios das respectivas bacias hidrográficas, próximos à Barragem de Ibitinga, localizada na calha do Rio Tietê, a aproximadamente 410 m de altitude enquanto as maiores cotas nas nascentes estão a aproximadamente 900 m de altitude. A declividade média das bacias é de 1,1%. Estudos neste trabalho calculou sua precipitação média, pelo *método de isoietas*, como sendo de 1371 mm.

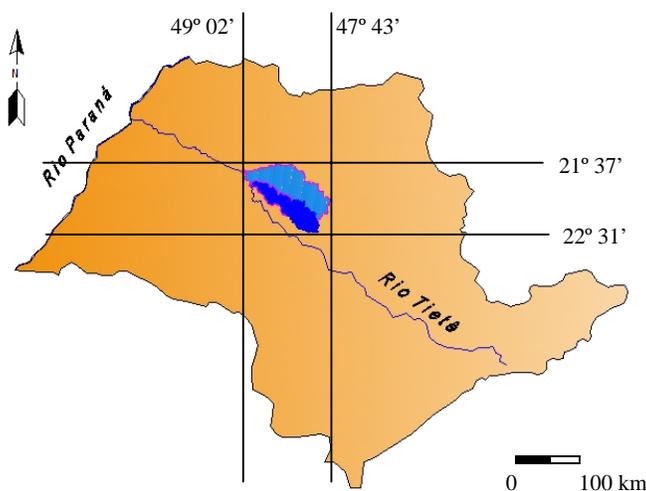


Figura 1 Localização do sistema Jacaré formado pelas bacias contíguas do Jacaré-Guaçu (hachura azul claro, mais ao norte) e do Jacaré-Pepira (hachura azul escuro, mais ao sul), em relação ao Estado de São Paulo

Geologicamente, a litoestratigrafia do SAG inclui rochas dos períodos Triássico, Jurássico e Cretáceo. Os arenitos do período Triássico (Fm. Pirambóia) e do Jurássico (Fm. Botucatu), de maior produtividade hidráulica e estratigraficamente acima do anterior, compõem o Aquífero Guarani. Abaixo destes, compreende uma formação de baixa permeabilidade que se caracteriza como um aquífero do período Permo-Triássico. Acima do Aquífero Guarani, ele é recoberto por sucessivas camadas de derrame basáltico da Formação Serra Geral (Cretáceo), provenientes de atividade

vulcânica, que formam rochas consolidadas descontínuas, caracterizadas em parte como aquífero e em parte como aquífero, em decorrência da incidência de fraturas e intercalações de arenito, que por sua vez é recoberto pela Formação Bauru (Cretáceo Superior), que são arenitos caracterizados como aquífero superior da seqüência. Superficialmente, todas estas estruturas apresentam-se como na Figura 2, onde, afora as formações Botucatu e Pirambóia do Aquífero Guarani (aflorante), todas as demais são estruturas que o confinam ou semiconfinam.

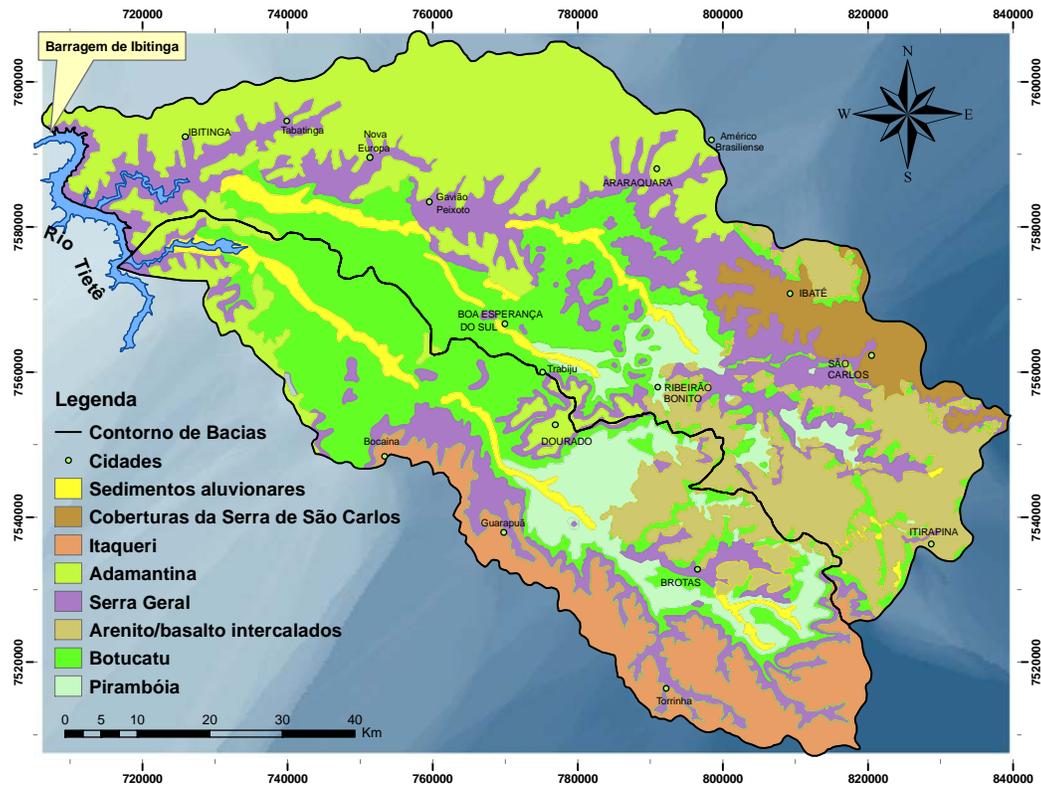


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo (fontes: mapas digitalizados IPT 2003; Corrêa, 1995)

#### 4 - METODOLOGIA

Baseado nas principais características levantadas do aquífero, implementou-se um modelo simplificador, ou modelo conceitual, que atribuiu uma recarga heterogeneamente distribuída e obteve fluxos de base gerados, em locais supostamente de interação rio-aquífero, por um modelo numérico de fluxo. Os fluxos de base foram então calibrados por hidrogramas de estações fluviométricas localizados ao longo dos dois rios principais, no total de 8. Os trechos de suposta interação rio-aquífero foram estimadas pela proximidade da superfície potenciométrica do aquífero (determinada a partir de dados de nível estático de poços –NE, no total de 170) e a cota altimétrica dos rios.

##### 4.1 - Modelo Conceitual

O Aquífero Guarani na área de estudo, delimitado pelo conjunto das bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, foi considerado como uma unidade hidroestratigráfica, possuindo regiões individualizadas de recarga, descarga de base e fluxo lateral, limitada inferiormente pela base da Formação Pirambóia e superiormente pelo topo das Formações Botucatu/Pirambóia. Foi considerado, inicialmente, um valor único para a condutividade hidráulica, posteriormente, distribuído espacialmente no processo de calibração do modelo.

Recarga: Foram consideradas seis zonas de recarga, correspondentes às respectivas estruturas geológicas existentes na área das bacias (Figura 2): formações Adamantina, Itaqueri e Serra Geral, Sedimentos da Serra de São Carlos, formações Botucatu/Pirambóia e arenito/basalto intercalados. As quatro primeiras estruturas (ou regiões) são onde o aquífero é semiconfinado (recarga indireta). A região denominada de arenito/basalto intercalados é formada pelas formações Botucatu/Pirambóia aflorantes, porém com característica diferenciada de recarga. Essa diferenciação, em relação à região denominada como Botucatu/Pirambóia, é atribuída à grande incidência de áreas de transição entre as duas estruturas: basaltos e formações Botucatu/Pirambóia, possibilitando infiltração diferenciada na interface dos dois tipos de estrutura.

Descarga: O fluxo de base, proveniente do Guarani, acontece ao longo de toda a drenagem das bacias, nas regiões onde existe interação rio-aquífero. Essa interação pode existir mesmo em regiões de aquífero semiconfinado, desde que exista proximidade entre o nível potenciométrico do Guarani e o nível do rio. Esta condição é verificada principalmente na região próxima aos exutórios das bacias, onde o aquífero é confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, e níveis estáticos de poços apresentam cotas próximas às dos lagos das represas da região.

Um outro tipo de descarga, mais comumente referido como escoamento ou fluxo lateral, representa a interação hidráulica entre o aquífero da área de estudo e o aquífero de seu entorno (fluxo subterrâneo entre bacias). Neste trabalho, essa contribuição foi estimada inicialmente a partir das estimativas dos gradientes hidráulicos e da condutividade para a área de estudo e seu entorno, aplicando-se a Lei de Darcy, como visto adiante.

#### *4.1.1 – Estimativa dos trechos com interação rio-aquífero*

Inicialmente, foi estimada a superfície potenciométrica para a região e seu entorno com o objetivo de estudar o fluxo subterrâneo entre bacias e a interação rio-aquífero. Para isso, foram interpolados dados de nível estático de 170 poços cadastrados na região (Figura 3). Para a área das duas bacias, o gradiente médio obtido é de 0,5% e os valores variam de 0,01 a 3%, com desvio-padrão de 0,3%. A tendência do desnível preferencial, no sentido SE-NW, concordam com achados em outros trabalhos (DAEE, 1974 e Corrêa, 1995).

Da distribuição dos contornos dos níveis piezométricos, observa-se uma tendência a um fluxo distinto entre bacias, apenas na parte montante da área de estudo. Nesta, observa-se tendência de fluxo lateral através do contorno, a sul-sudeste da bacia do Jacaré-Pepira e a leste da bacia do Jacaré-Guaçu. A localização destes fluxos coincide com os achados de Corrêa (1995).

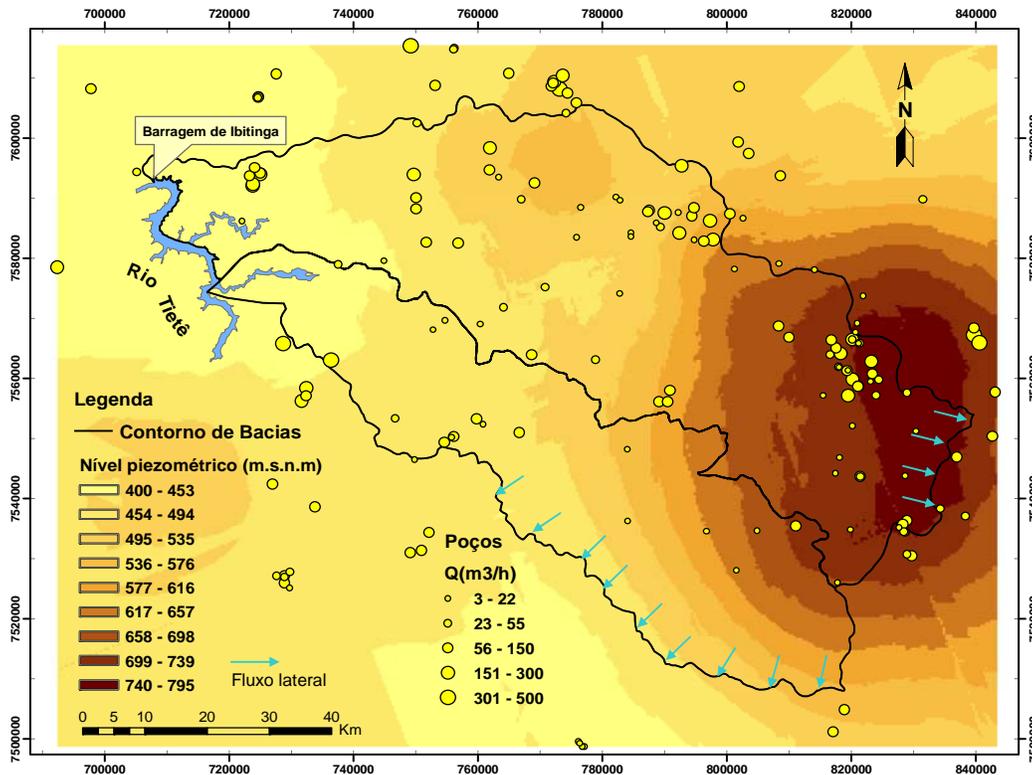


Figura 3. Níveis potenciométricos atribuídos à área das bacias e do seu entorno

Devido à necessidade de se avaliar espacialmente os erros na estimativa das cotas potenciométricas, durante a implementação e calibração do modelo numérico, foi gerada uma estimativa de erros atribuída à interpolação, obtida diretamente do método de interpolação utilizado (*krigagem ordinária*). O erro médio obtido para a área das duas bacias foi de 28,2 m e valores mínimo e máximo de 25,1 e 45,1 m, respectivamente, com um desvio-padrão de 3,2 m.

A região de interação rio-aquífero foi estabelecida comparando-se as cotas de superfície potenciométrica do aquífero com as correspondentes cotas altimétricas no delineamento dos rios. Foram consideradas zonas de interação as regiões que apresentam diferença entre esses conjuntos, inferior ou igual ao erro médio estimado para a superfície potenciométrica (28,2 m), distribuídas espacialmente como mostradas adiante no modelo numérico.

## 4.2 – Modelo Numérico

A implementação do modelo conceitual foi realizada em modelo numérico bidimensional horizontal, heterogêneo e isotrópico com recarga distribuída, aplicado sob condições de aquífero livre e confinado, tomando como domínio o contorno externo conjunto das bacias e cotas variáveis de base e de topo do aquífero. Foram utilizadas condições de contorno de *carga especificada* (condição de 1º tipo ou de *Dirichlet*) e de *fluxo especificado* (condição de 2º tipo ou de *Neumann*). O método numérico utilizado foi o de *elementos finitos* (MEF) e na geração automática de *malha não-estruturada* utilizou-se o método de *triangulação de Delaunay*. O aplicativo de simulação numérica utilizado para a implementação desses métodos e técnicas foi o SPA (Simulador de Processos em Aquíferos) (Wendland, 2003), pacote de programas estruturado em módulos, baseado em sistema operacional Linux. Os dados georeferenciados, obtidos pelo SIG, foram convertidos em arquivo tipo ASCII e transportados como dados de entrada do modelo numérico.

A recarga, atribuída como fonte, foi distribuída aos elementos da malha conforme sua localização em relação às estruturas geológicas. As vazões dos 231 poços de captação foram atribuídas como fontes diretamente aos nós da malha, nas posições correspondentes às posições reais dos poços e especificadas na geração da malha

A drenagem do aquífero aos rios e vice-versa (fluxo de base) foi simulada por condição de contorno de *carga especificada* (condição de 1º tipo, ou de *Dirichlet*). Os pontos onde são atribuídos os valores de carga especificada coincidem exatamente com nós da malha. As vazões obtidas nesses pontos são uma reação do modelo à restrição da carga. Foram utilizadas condições de 1º tipo em todos os pontos do aquífero supostamente em interação com os rios, escolhidos segundo descrição no modelo conceitual, e complementados posteriormente de modo a melhorar a geração da malha (Figura 4).

Os fluxos laterais são a transposição de manancial entre o domínio do aquífero e sua vizinhança. Foram simulados por condição de contorno de *fluxo especificado* (condição de 2º tipo ou de *Neumann*). A região de fluxo lateral foi estabelecida a partir da observação do comportamento do nível piezométrico no entorno das bacias (Figura 3). Segundo essa observação, duas regiões do aquífero, identificadas com essa característica, se situam a montante das bacias, uma a leste da bacia do Jacaré-Guaçu e outra a sul-sudeste da bacia do Jacaré-Pepira. Os pontos onde são atribuídos os valores de fluxo especificado coincidem exatamente com nós da malha, no seu contorno externo. Os valores de vazão foram atribuídos aplicando-se a relação de Darcy,

$$q = -K \frac{dh}{dx} \quad [\text{L/T}] \text{ e} \quad (1)$$

$$Q_L = q \cdot h_e \quad [\text{L}^3/\text{T}/\text{L}] \quad (2)$$

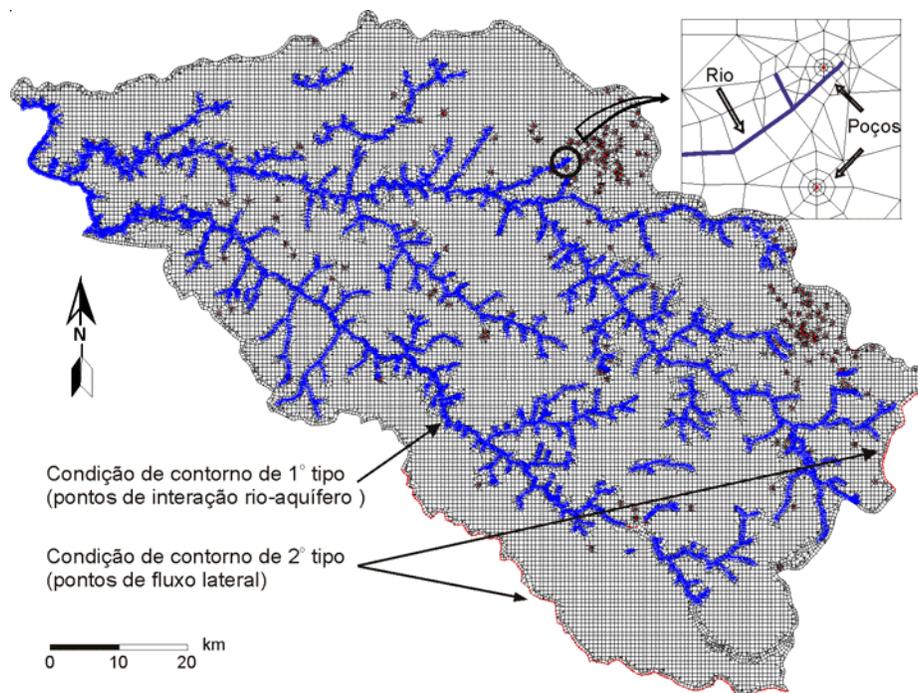


Figura 4. Trechos da malha com atribuição de condições de contorno de 1º e 2º tipos

nos quais  $Q_L$  é o fluxo lateral por unidade de comprimento e  $h_{e[L]}$ , é a espessura saturada do aquífero. Identificada a extensão do trecho definido pela condição de contorno,  $Q_L$  foi dividido entre os correspondentes nós da malha. Os gradientes hidráulicos foram medidos através do contorno externo das bacias, a partir dos dados interpolados dos níveis piezométricos, e à condutividade foi atribuído um valor médio. Foram aplicados valores iniciais de  $4 \times 10^{-5}$  m/s para condutividade e  $(6 \text{ a } 8) \times 10^{-3}$  para os gradientes.  $Q_L$  foi posteriormente alterado durante a calibração do modelo. A espessura do aquífero foi estimada a partir dos dados de nível estático e estratigrafia dos poços, atribuídos por interpolação pelo método de *krigagem ordinária*.

#### 4.2.1 - Calibração do Modelo

A calibração do modelo deu-se por meio da comparação entre dados calculados e estimados (ou observados) de dois conjuntos de referência (conjuntos-referência de calibração):

- a) carga hidráulica do aquífero na área das duas bacias ( $h$ );
- b) fluxo de base ao longo dos dois rios principais ( $Q_b$ ).

Os dados de referência da carga hidráulica foram obtidos dos níveis estáticos de 99 poços contidos apenas na área das duas bacias. Eles são um subconjunto dos 170 poços na área das bacias e no seu entorno (Figura 3). Os dados de vazão de base foram obtidos da separação de fluxo de base

de hidrogramas de estações fluviométricas ao longo dos dois rios principais. Os valores de fluxo de base foram determinados em 6 pontos ao longo do Rio Jacaré-Guaçu e 2 ao longo do Rio Jacaré-Pepira, correspondentes aos locais das respectivas estações fluviométricas.

Foram utilizados para a calibração, ajustes nos valores dos seguintes parâmetros (parâmetros de ajuste de calibração, PACs):

- cargas hidráulicas dos pontos com suposta interação rio-aquífero ( $h_{R-A}$ );
- recarga distribuída nas seis zonas de recarga ( $R$ );
- condutividade hidráulica ( $K$ );
- fluxo lateral ( $Q_L$ ).

Foi realizada uma seqüência iterativa de modificações desses valores. A seqüência de ajustes é esquematizada na Figura 5 e composta de três etapas. Na etapa 1, os parâmetros de ajuste são fornecidos ao modelo como um conjunto de dados iniciais para simulação; na etapa 2 (Cali), são avaliadas as respectivas raízes dos erros quadráticos médios (*root mean square error*, *RMSE*) entre os dados observados, ou estimados, (obs) ou (est) e dados calculados (calc) simultaneamente para os dois conjuntos-referência de calibração,  $h$  e  $Q_b$ :

$$RMSEH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{obs} - h_i^{calc})^2} \text{ e} \quad (3)$$

$$RMSEQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{bi}^{est} - Q_{bi}^{calc})^2} \quad (4)$$

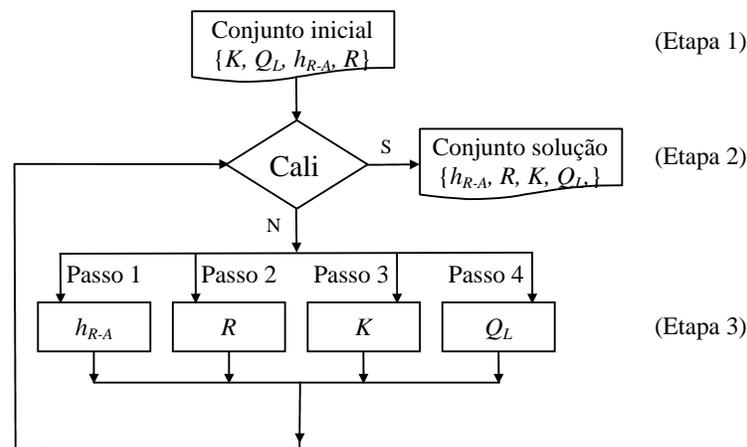


Figura 5. Sequência de ajustes de parâmetros utilizados na calibração

nos quais  $n$  é o número de observações. Na etapa 3, são efetuados os ajustes individuais sobre cada PAC, seguindo os passos de 1 a 4, indicados na Figura 5. A calibração utilizada foi do tipo semi-automática; os parâmetros  $h_{R-A}$ ,  $R$  e  $Q_L$  foram ajustados manualmente e  $K$ , automaticamente,

utilizando-se o método de minimização dos gradientes hidráulicos, entre os conjuntos observado e calculado, visando simultaneamente obter menores valores de  $RMSEH$  e  $RMSEQ$ , durante as etapas iterativas 2 e 3.

Às cargas hidráulicas ( $h_{R-A}$ ), foi estabelecida faixa de variação de até 10 %, conforme a incerteza atribuída aos níveis estáticos; a condutividade hidráulica ( $K$ ) foi permitida variar entre  $0,2 \times 10^{-5}$  e  $5 \times 10^{-5}$  m/s (0,2 a 4,3 m/d), variação admitida para a área de estudo; aos fluxos, lateral ( $Q_L$ ) e recarga por formação geológica ( $R$ ), não foram estabelecidos limites prévios de variação por ausência de dados experimentais. Contudo, foram estabelecidas recargas maiores através das formações Botucatu/Pirambóia e arenito/basalto intercalados que através do sistema Bauru-basaltos.

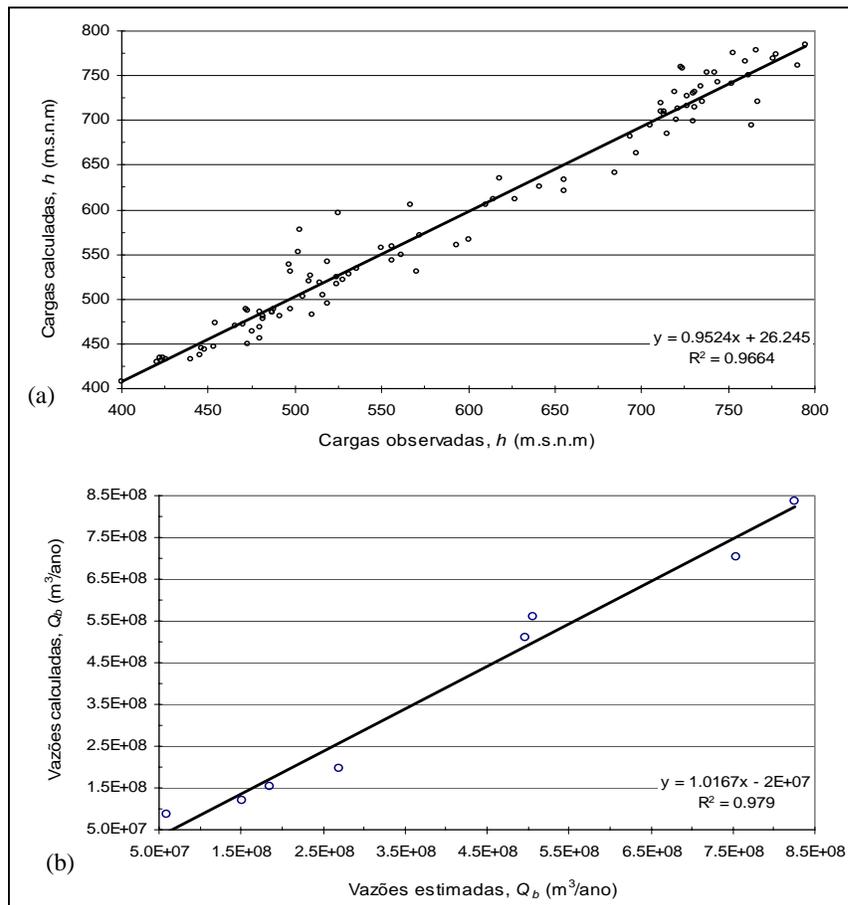


Figura 6. Dados calculados versus observados (ou estimados) para o modelo calibrado: dados de carga hidráulica ( $h$ ) e vazão ( $Q_b$ ), figuras (a) e (b)

Como avaliação da calibração, foram estabelecidas comparações entre dados observados (ou estimados) e calculados de  $h$  e  $Q_b$  (Figura 6).

## 5 - RESULTADOS

O coeficiente de correlação  $R^2$  do processo de calibração para ambos os conjuntos  $h$  e  $Q_b$ , respectivamente 0,97 e 0,98, mostrou uma significativa extensão da relação linear entre dados calculados e observados. A inclinação da linha de melhor ajuste, dos conjuntos  $h$  e  $Q_b$ , próxima à unidade, 0,95 e 1,02, respectivamente, é também um indicador de baixos desvios obtidos entre dados calculados e observados, que refletem a capacidade do modelo em simular vazões e cargas hidráulicas ante a complexidade hidrogeológica da área de estudo.

Uma vez o modelo calibrado, foi possível extrair informações relativas a suas propriedades hidráulicas e ao seu sistema de fluxo, como descrito a seguir.

O valor obtido para a condutividade hidráulica média foi  $K=2,4$  m/d, o qual é próximo ao valor médio encontrado por Borghetti et al. (2004) de 3m/d. A transmissividade, obtida pela expressão  $T = K \cdot b$ , na qual  $b$  é a espessura saturada do aquífero, obteve um valor médio  $T = 411.6$  m<sup>2</sup>/d e variou entre 8,6 e 1183,7 m<sup>2</sup>/d. O valor médio obtido está dentro dos limites mais comumente aceitos para o Aquífero Guarani: 150 a 800 m<sup>2</sup>/d (Borghetti et al. 2004), 39 to 1,037 m<sup>2</sup>/d (Sracek e Hirata, 2002) e 2.4 to 500 m<sup>2</sup>/s (Araujo et al., 1999). Entretanto, o limite superior obtido excede aos dos referidos trabalhos. Isto é uma indicação de que o modelo pode apresentar inconsistências locais em relação ao real comportamento do aquífero.

A recarga anual total ( $R_t$ ), obtida para a área das bacias foi de 297,6 mm, distribuída entre as formações e estruturas geológicas e determinada pela relação

$$R_t = \frac{1}{A_t} \sum_i^n R_i \cdot A_i \quad (5)$$

cujos parâmetros estão indicados na Tabela **1Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 1. Valores anuais de recarga do Aquífero Guarani distribuídos entre formações e estruturas geológicas

Estruturas geológicas	Recarga $R_i$ (mm)	Área		Recarga	
		$A_i$ (km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	(%)
Fm. Botucatu/Pirambóia	465	2.321	34,4	10.793	53,8
Arenito/basalto intercalados	530	778	11,5	4.123	20,5
Fm. Serra Geral	215	1.470	21,8	3.161	15,7
Fm. Adamantina	75	1.358	20,1	1.019	5,1
Sedimentos da Serra de São Carlos	305	237	3,5	0,723	3,6
Fm. Itaqueri	45	584	8,7	0,263	1,3
Total	$R_t = 297,6$	$A_t = 6.748$	100,0	20,08	100,0

Os resultados obtidos de recarga indicam que, na área das bacias, esta se processa essencialmente na região de afloramento do aquífero, através das formações identificadas como Botucatu/Pirambóia e arenito/basalto intercalados, correspondendo a 74,3% da recarga total. Este valor é significativamente distinto da proporção entre área de afloramento e área total do aquífero (aproximadamente 46%).

A recarga por zona variou de 530 a 45 mm respectivamente para as regiões de arenito/basalto intercalados e de Formação Itaqueri.

A recarga da região arenito/basalto intercalados (530 mm), superior a da região Botucatu/Pirambóia (465 mm) reforça a suposição, empregada pelo modelo conceitual, de que o contato extensivo entre arenito e basalto determina uma situação diferenciada de infiltração e recarga, que no caso dos resultados obtidos, aumenta a taxa média de recarga.

Entre as menores taxas de recarga, estão as obtidas através das formações Adamantina e Itaqueri, 75 e 45 mm, respectivamente. Essas taxas de recarga sugerem neste sistema aquífero um fluxo com comportamento quase exclusivamente horizontal que drena as nascentes dos rios, sobrando pouca água para percolar verticalmente através do basalto. Além disso, essas formações possuem relativamente maior teor de argila, o que acarreta em valores mais baixos de condutividade hidráulica.

As áreas de afloramento da Formação Serra Geral apresentam valores de recarga absoluto e relativo elevados, 215 mm e 15,7 %, respectivamente, considerando-se tratar de basaltos e por representar um aquífero. Contrariamente a estes resultados, está o fato dos basaltos serem derrames de rochas consolidadas, e a favor está o fato de cursarem freqüentemente com fissuras e fraturas, representando um meio de drenança ao Aquífero Guarani subjacente.

Os sedimentos da Serra de São Carlos, apesar de classificados como mais recentes que os da Formação Bauru, também são genericamente tratados como pertencentes ao sistema aquífero Bauru-basaltos. Apesar disso, o valor obtido de taxa de recarga (305 mm) é significativamente mais elevado que os referentes às formações Adamantina e Itaqueri. Como possível explicação desse resultado, está o fato destes sedimentos serem menos consolidados e ocorrerem encravados principalmente entre as regiões de arenito/basalto intercalados

Juntamente com as entradas (recargas) estimadas pelo modelo através das estruturas geológicas, foi possível estabelecer os trechos nos quais o escoamento de base possui valores positivos (injeção ou recarga do aquífero) e negativo (drenagem ou descarga do aquífero), Figura 7. Estes escoamentos obtidos do modelo numérico são uma reação à especificação atribuída de carga hidráulica ao logo dos pontos de interação rio-aquífero (condição de contorno de 1º tipo, Figura 4).

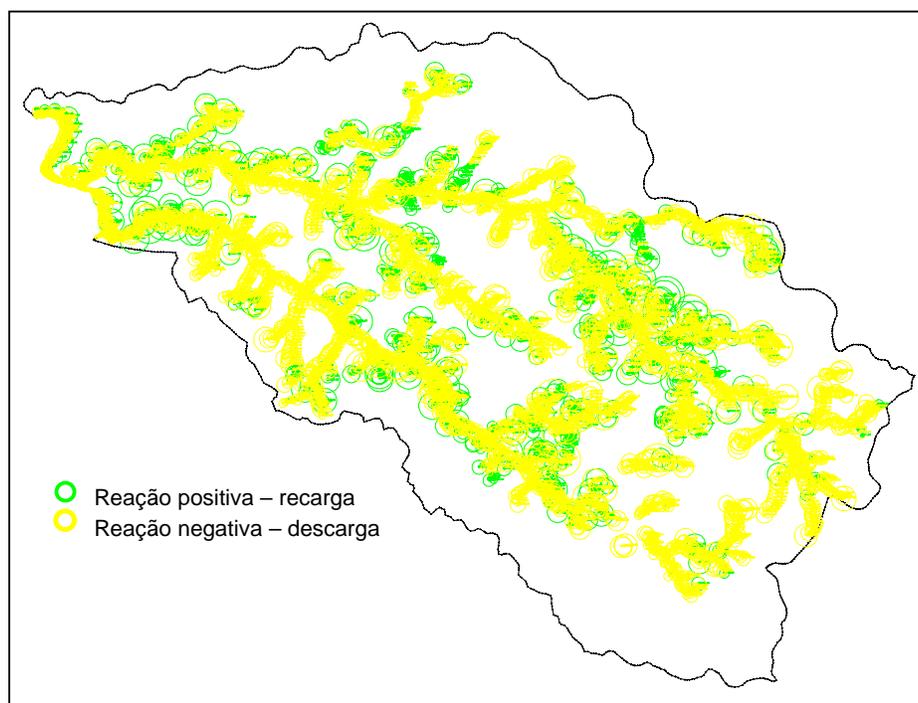


Figura 7. Escoamentos de base decorrentes da especificação de cargas hidráulicas

Por esta distribuição, verifica-se que ao longo de toda a drenagem os dois tipos de fluxo ocorrem no escoamento de base. Entretanto, relativamente, a incidência de recarga nestes trechos é maior do centro para jusante das bacias. Somadas, a recarga anual ao longo da drenagem é de  $5,85 \times 10^8 \text{ m}^3$ , correspondente a 29,1% da recarga total ( $20,08 \times 10^8 \text{ m}^3$ ), Tabela 1.

Complementarmente, um balanço hídrico resultante do modelo obteve os seguintes valores para os fluxos de entrada e saída do aquífero, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Balanço hídrico anual do Aquífero Guarani na área de estudo

Fluxos		Fluxos		
Entrada		( $10^8$ $\text{m}^3/\text{ano}$ )	(mm/ano)	(%)
	Recarga total ( $R_t$ )	20,08	297,6	100
Saída	Rios and lagos ( $Q_b$ )	14,09	208,8	70,2
	Descarga profunda ( $Q_{pro}$ )	4,14	61,4	20,6
	Fluxo lateral subterrâneo ( $Q_L$ )	1,17	17,3	5,8
	Poços ( $Q_P$ )	0,68	10,1	3,4

Neste balanço, a descarga profunda, que sai pelo exutório do aquífero por sua região mais a jusante, sem escoar por seu sistema de drenagem superficial, foi determinado pela diferença entre os totais de entrada e saídas de fluxos.

O balanço hídrico, possui a recarga como única entrada, e como saídas, o escoamento de base ( $Q_b$ ), igual a 70,2 % da recarga total ( $R_t$ ), e o restante, dividido entre a descarga profunda ( $Q_{pro}$ ), fluxo lateral ( $Q_L$ ) e exploração por poços ( $Q_P$ ), conforme discriminados na Tabela 2. Esse resultado indica que o Aquífero Guarani na área de estudo essencialmente drena a sua recarga através dos rios.

## 6 - CONCLUSÕES

Este trabalho verificou que o fluxo de base se estabelece na maior parte do sistema de drenagem das bacias e que o aquífero essencialmente drena a sua recarga através dos rios como escoamento de base (70,2% da recarga total), cabendo à descarga profunda e descarga lateral contribuições sensivelmente menores (20,6% e 5,8%, respectivamente) e o restante (3,4%), atribuído à ação de poços.

Apesar do aquífero essencialmente abastecer os rios, o valor obtido para a vazão de base positiva (injeção do aquífero) é significativo (29,1% da recarga total), uma vez que, os trechos nos quais ocorre injeção o aquífero é potencialmente mais vulnerável.

O modelo, considerando-se os resultados de sua calibração, mostrou-se satisfatório e capaz de simular fluxos e cargas hidráulicas ante a complexidade hidrogeológica da área de estudo, entretanto podendo apresentar inconsistências locais em relação ao real comportamento hidráulico do aquífero.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology J*, v. 7, n. 3, p. 313-336.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. 2004. *Aquífero Guarani – a verdadeira integração dos países do Mercosul*. Curitiba: Nova Editora. 214 p.

CORRÊA, U. M. P. 1995. *Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo*. 3 v, 107 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1974. *Estudo de Águas Subterrâneas: Região Administrativa nº 6, Ribeirão Preto*. São Paulo: v. 4.

- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2003. *Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré*. IPT. Relatório 40.674. São Paulo
- OAS/GEF – ORGANISATION OF AMERICAN STATES / GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. 2001. *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG*. Montevideo. 133 p.
- ROSA FILHO et al. 2003. Sistema Aquífero Guarani – Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, São Paulo. v. 17, p. 91-111.
- SRACEK, O.; HIRATA, R. 2002. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeol J*, v.10, n. 6, p. 643-655.
- SZILAGYI, J.; PARLANGE, M. B.; BALINT, G. 2006. G. Assessing stream–aquifer interactions through inverse modeling of flow routing. *Journal of Hydrology*, v. 327, n.1-2, p. 208-218.
- WENDLAND, E. 2003. *Desenvolvimento do pacote computacional SPA (Simulação de Processos em Aquíferos)*. Relatório de Pesquisa, Processo FAPESP 02/09696-3, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 78 p.