

# MODELO CONCEITUAL DE ÁREA DE AFLORAMENTO DO AQÜÍFERO GUARANI NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

Jorge Rabelo<sup>1</sup>; Eduardo Quaresma<sup>2</sup> & Edson Wendland<sup>3</sup>

**Resumo** – Este trabalho apresenta um modelo conceitual para o sistema de escoamento subterrâneo nas Bacias Hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira na região central do Estado de São Paulo, onde se encontra significativa região de afloramento do Aqüífero Guarani. Técnicas de processamento em SIG foram utilizadas na preparação e análise de dados levantados em intensa revisão bibliográfica. Foram selecionados os fenômenos hidrológicos mais significativos, sendo construído um modelo conceitual, com ênfase na estimativa de fluxo e recarga, para o Aqüífero na região das bacias. Resultados de dados tratados são apresentados utilizando-se recursos de visualização SIG e a construção numérica do modelo conceitual proposto é analisada.

**Abstract** – This work presents a conceptual model for the groundwater flow system in the Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira basins, in the central region of São Paulo State, where a substantial portion of the Guarani Aquifer's outcrop zone can be found. Processing tools based on GIS were applied for the preparation and analysis of data obtained through intense bibliographic study. Main hydrologic phenomena were selected, leading to a conceptual model with emphasis on flux and recharge evaluation. Obtained results are shown through GIS visualization tools and the numerical construction of the proposed model is discussed.

**Palavras-Chave** – Aqüífero Guarani; afloramento; recarga.

## INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um modelo conceitual e um sistema de informações geográficas (SIG) aplicado ao Aqüífero Guarani na área correspondente às bacias hidrográficas contíguas dos Rios

---

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia Campus UFBA, Cruz das Almas-BA, 44380-000, tel. 75 621-3654, e-mail: [rabelo@ufba.br](mailto:rabelo@ufba.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: [quaresma@sc.usp.br](mailto:quaresma@sc.usp.br)

<sup>3</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](mailto:ew@sc.usp.br)

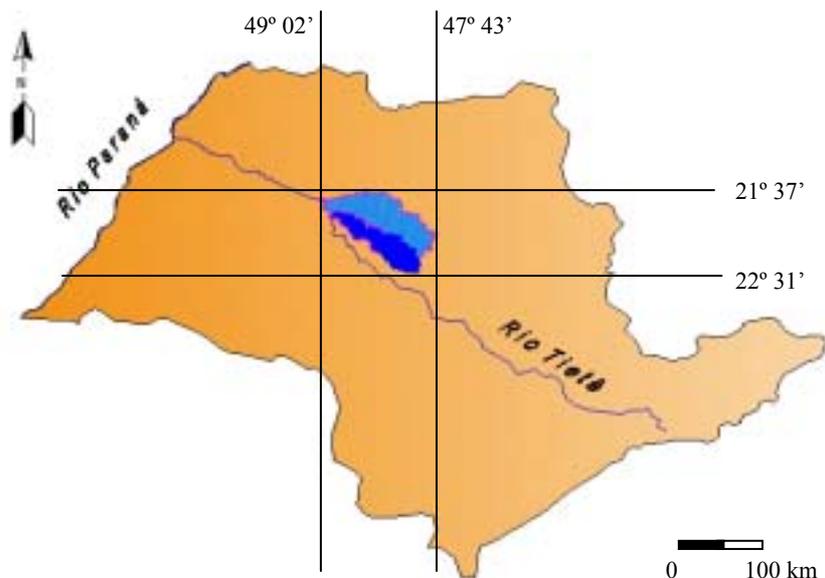
Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, de 6748 km<sup>2</sup>, sendo 47% de área de afloramento do Aquífero Guarani, localizada na região central do Estado de São Paulo. Para isso, foi feita uma revisão dos trabalhos mais significativos sobre a região das bacias e similares, abrangendo dados provenientes de fontes governamentais e acadêmicas, sobre a geologia superficial e subterrânea, envolvendo o Guarani livre e confinado. Foram também compilados dados sobre a fisiografia, hidrografia, distribuição de poços de captação de água, pluviometria e drenagem dos rios principais, sendo estes dados classificados e apresentados como características geológica, hidrológica e hidrogeológica da área de estudo. Os dados da fisiografia e geometria subterrânea, digitalizados pontualmente, foram generalizados para toda a área das bacias através de interpolação por *krigagem*. Sobre os dados de geometria subterrânea, foi adicionalmente utilizada técnica de *operação de rasters* para generalizar a distribuição dos dados de espessura e confinamento do Aquífero.

O objetivo do trabalho consiste em apresentar os referidos dados sistematizados textualmente e através de recursos de visualização de SIG [1], bem como construir um modelo conceitual voltado para estimativa de fluxo e recarga do Guarani na área de estudo.

A área de estudo formada pelas duas bacias foi escolhida principalmente pelo fato do Aquífero Guarani – reconhecidamente um dos maiores mananciais transfronteiriços do mundo (aproximadamente 1.200.000 km<sup>2</sup>) e caracterizado como aquífero confinado – apresentar-se aflorante em parte significativa dessa área; por apresentar fortes indícios de conexão hidráulica entre as duas bacias [2]; por possuir uma estratigrafia de confinamento típica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e por incluir áreas com grande diversidade de atividades urbana, agrícola e industrial.

## 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. Perfaz uma área de captação de 6748 km<sup>2</sup>, com 140 km de comprimento, 70 km de largura máxima e 447.500 km de perímetro, localiza-se na porção central do Estado de São Paulo, entre os paralelos 21° 37' e 22° 31' de latitude sul e os meridianos 47° 43' e 49° 02' de longitude oeste. Pertencente à Bacia Hidrográfica Tietê/Jacaré, os Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira deságuam na região do curso médio do Rio Tietê (Figura 1). A área de estudo é atualmente classificada no Estado de São Paulo como pertencente à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 do sistema de bacias Tietê-Jacaré (UGRHI-TJ). As Bacias Hidrográficas do Jacaré-Guaçu (4161 km<sup>2</sup>) e Jacaré-Pepira (2587 km<sup>2</sup>) apresentam características semelhantes, tanto em ocupação e desenvolvimento como em sua geologia, pedologia, climatologia, hidrologia e hidrogeologia [3] [2].



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

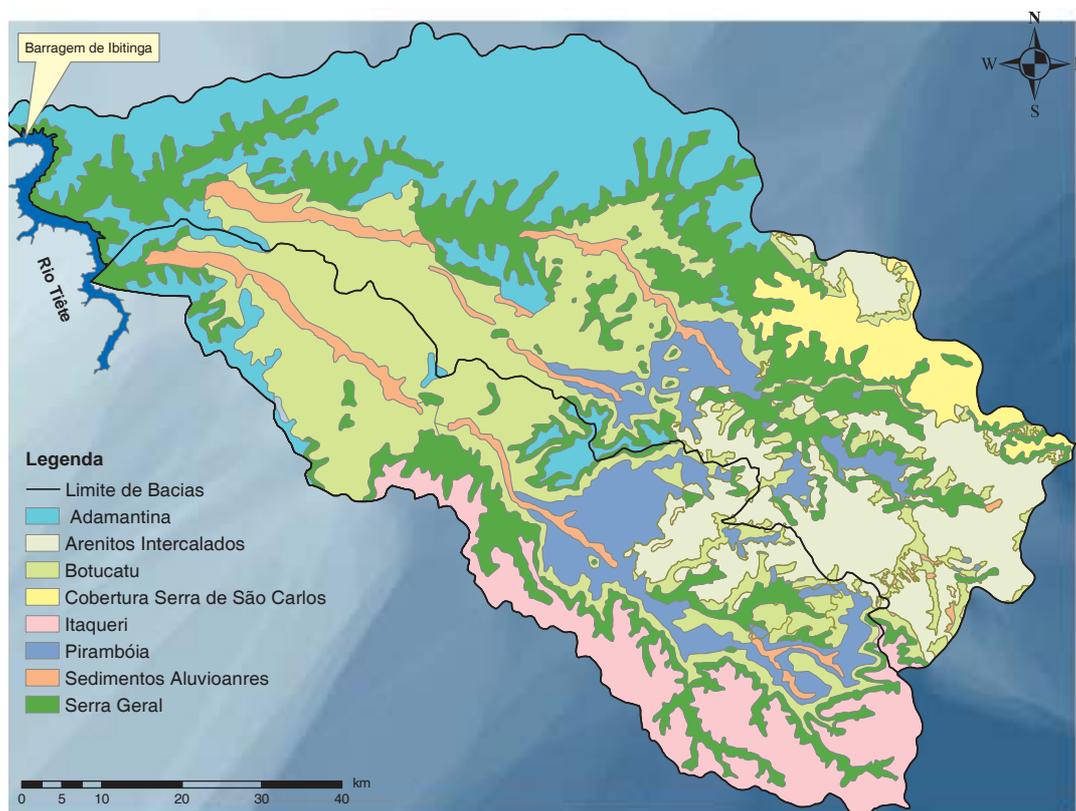
## GEOLOGIA

A geologia da área de estudo tem as características encontradas no conjunto do SAG. Ela inclui rochas do Cretáceo, Jurássico, e Triássico. O Sistema encontra-se estratificado, de modo geral, numa seqüência que inclui o próprio Aquífero Guarani, uma estrutura abaixo e outra acima. O Aquífero Guarani é composto por arenitos que compreendem duas formações: Pirambóia e Botucatu, respectivamente dos períodos Triássico e Jurássico. Os arenitos do Jurássico, de origem eólica e maior produtividade hidráulica, constituem-se nos melhores reservatórios das bacias do sistema Jacaré, enquanto os do Triássico, de origem flúvio-lacustre/eólico possuem elevado nível de argila, que compromete sua eficiência hidráulica. A estrutura abaixo do Aquífero compreende uma formação de baixa permeabilidade e caracteriza-se como um aquífero, do Permo-Triássico. Acima, o Aquífero Guarani é recoberto por sucessivas camadas de derrame basáltico Formação Serra Geral (Cretáceo), provenientes de atividade vulcânica, que formam rochas consolidadas descontínuas, caracterizadas em parte como aquífero e em parte como um aquífero, que por sua vez é recoberto por arenitos: Formação Bauru (Cretáceo Superior), caracterizados como aquífero superior da seqüência. A sucessão em que ocorrem essas formações na área de estudo e a respectiva caracterização das rochas estão incluídas na descrição geral da estratigrafia da Bacia do Paraná, acrescida das ocorrências de rochas mais recentes (Quaternário e Terciário) específicas da área de estudo (Tabela 1).

**Tabela 1 - Coluna litoestratigráfica de parte da Bacia do Paraná [4] [5]**

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

O Grupo São Bento compõe a maioria das formações envolvidas na área de estudo: Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Figura 2). Os sedimentos arenosos da Formação Pirambóia afloram na área, em duas manchas principais, ao longo das sub-bacias do Médio Jacaré-Guaçu e Médio Jacaré-Pepira. Manchas menores são observadas a leste e sudeste, geralmente junto aos vales das drenagens, onde já foram erodidas as unidades superiores [6] [7]. Esta Formação é composta por uma sucessão de camadas arenosas de coloração avermelhada a esbranquiçada.



**Figura 2** - Mapa geológico da área de estudo (fontes: mapas digitalizados [5] [2])

Segundo [8], a espessura tem seu máximo em torno de 300 m na Bacia do Tietê, e dados de perfuração de poços [9] obtiveram espessura máxima na área de estudo de 146 m em São Carlos. Os arenitos da Formação Botucatu afloram em uma expressiva área nas bacias dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, que se estende desde a região de Itirapina, a leste, até as proximidades da Barragem de Ibitinga, a oeste, onde aqueles rios se afunilam para desaguar no Rio Tietê (reservatório de Ibitinga). Dali para o oeste, os arenitos encontram-se recobertos pela capa representada pelos basaltos da Formação Serra Geral e pelos sedimentos do Grupo Bauru. A Formação Botucatu é constituída por arenitos avermelhados com estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte, de granulação fina a média, com grãos bem selecionados e apresentando alta esfericidade [5]. Segundo sondagens, a espessura no Estado provavelmente excede os 200 m e dados de perfuração de poços na área de estudo [9] obtiveram espessura máxima de 192 m em Ibaté. O conjunto das Formações Botucatu e Pirambóia encontra-se distribuído em toda a área de estudo, na maioria confinado pela Formação Serra Geral. As rochas eruptivas da Formação Serra Geral constituem um conjunto de derrames de basaltos toleíticos de espessura individual bastante variável, na área de estudo variando desde poucos metros a mais de 350 m, em Araraquara, [9]. Nos derrames intercalam-se arenitos com as mesmas características dos arenitos da Formação Botucatu, a maioria com estrutura típica de dunas e outros indicando deposição subaquosa [5]. Ocorrência significativa é identificada por [10], na parte leste da área de estudo, denominada de arenitos intercalares. Esta

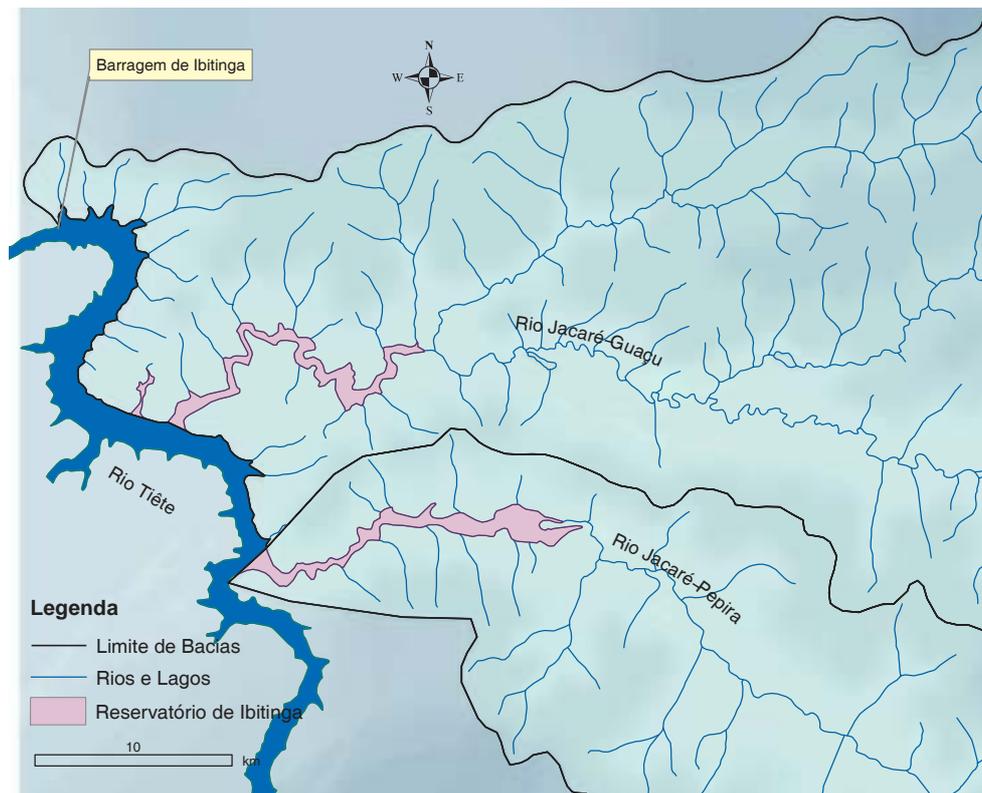
ocorrência foi mapeada e estudada por [2]. As mesmas foram delimitadas (Figura 2) por determinarem uma característica diferenciada das formações.

Entre as unidades sedimentares existentes acima dos derrames basálticos da Formação Serra Geral, integrantes do Grupo Bauru, a Formação Adamantina é a unidade geológica que ocupa uma das maiores áreas de exposição na Bacia do Jacaré estendendo-se desde as proximidades da Barragem de Ibitinga, de onde segue para leste-nordeste, até a região de Araraquara. Os sedimentos Formação Adamantina apresentam espessura preservada e bastante regular de aproximadamente 100 m, obtida de poços perfurados para água subterrânea no Estado de São Paulo [11], sendo possivelmente menor na área de estudo, por tratar-se de área de borda das formações do Grupo Bauru [5].

Entre os sedimentos pertencentes ao Cenozóico, encontra-se a Formação Itaqueri, já considerada pertencente à seqüência do Grupo Bauru [12] e também como pós-Bauru [13] [14]. A Formação é admitida com idade do Cretáceo ao Terciário [15] [16]. Ocorre na porção sudeste da área de estudo, numa mancha que se estende pelas serras de Itaqueri e de São Pedro, nas cabeceiras do Rio Jacaré-Pepira. Constitui-se de um pacote de até 120 metros de espessura, de camadas alternadas de arenitos com cimento argiloso, folhelhos e conglomerados. As Coberturas da Serra de São Carlos são depósitos observados na região de São Carlos, ocupando o topo do divisor de águas da parte nordeste da Bacia Hidrográfica do Jacaré-Guaçu, estendendo-se desde a região de São Carlos até a região de Ibaté. Tratam-se de arenitos conglomeráticos provenientes das serras vizinhas, cuja deposição é sincrônica da escavação da Depressão Periférica, em regime de transporte curto e violento, sob um agente de grande competência e com regime intermitente que permitiu a deposição contemporânea de seixos e argilas [4]. Os depósitos quaternários constituem-se essencialmente depósitos aluvionares, cuja distribuição é governada pelos grandes cursos d'água e pela evolução do relevo. Na área de estudo encontram-se aluvionares mais expressivos nos vales dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

## **HIDROLOGIA**

O Rio Jacaré-Guaçu inicia sua formação pela junção dos Ribeirões do Lobo e do Feijão, nos planaltos de Campo Alegre e Itirapina, respectivamente, a aproximadamente 700 m de altitude. O Rio Jacaré-Pepira inicia sua formação na Serra de Itaqueri, pelos Ribeirões do Jardim e do Tamanduá, a aproximadamente 900 m de altitude.



**Figura 3** - Contornos das bacias do sistema Jacaré na região dos exutórios.

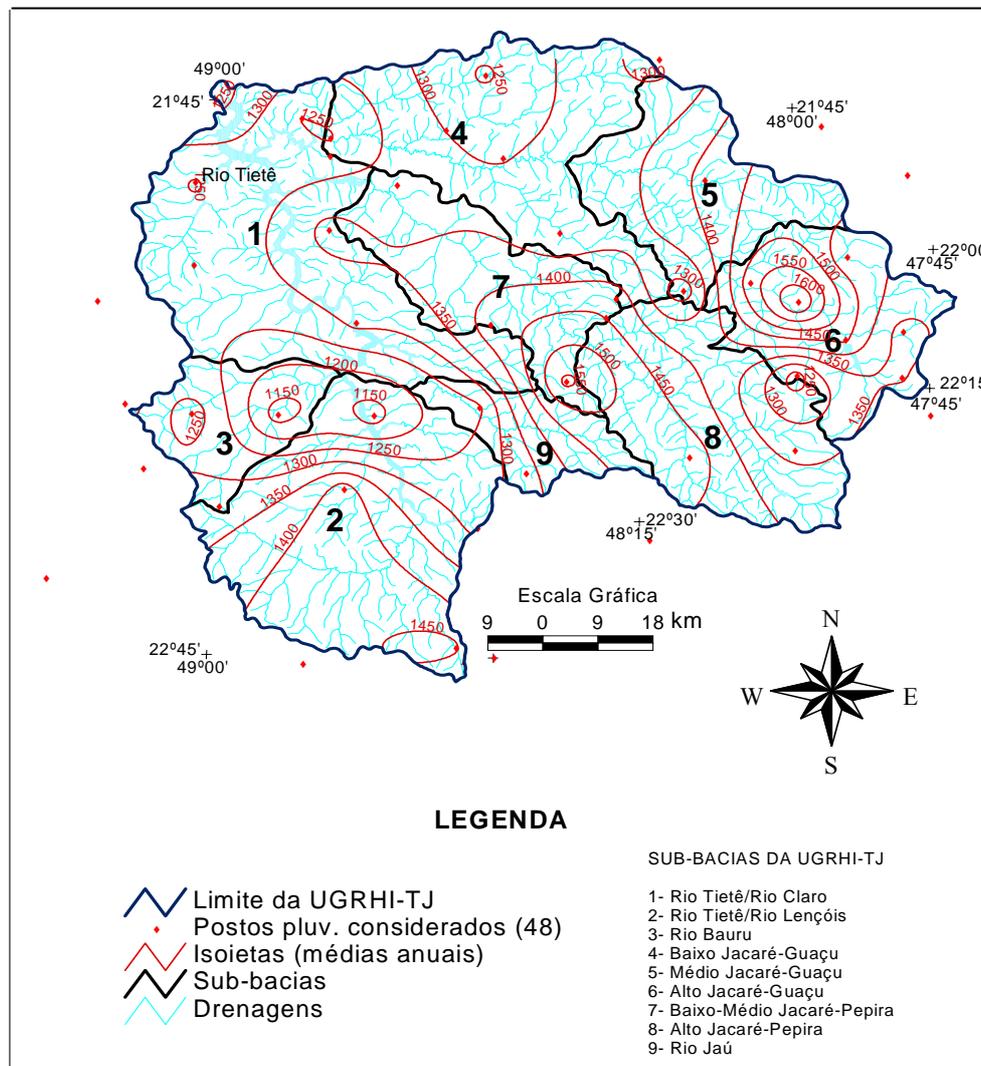
A confluência de ambos os rios determina os exutórios das respectivas bacias hidrográficas próximos à Barragem de Ibitinga, localizada na calha do Rio Tietê a aproximadamente 400 m de altitude. Neste trabalho os exutórios de ambas as bacias foram considerados em suas posições naturais (calha do Rio Tietê) (Figura 3), e não nos limites do reservatório criado pelo represamento das águas dos respectivos rios, como em [5] (Figura 4). Este procedimento gerou uma área, para as duas bacias, 398 km<sup>2</sup> superior a obtida pelo procedimento adotado em [5].

### Precipitação

Na área de estudo como na maior parte do Estado, o período mais chuvoso ocorre de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. O período mais seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto. Em [17] é apresentada uma carta síntese da variação têmporo-espacial das chuvas, definindo oito “unidades regionais” e 25 “subunidades homogêneas” para o Estado de São Paulo, estando a área de estudo compreendida na unidade Cuestas Basálticas, subunidade São Carlos/São Pedro; e na unidade oeste, subunidade Vale Médio do Rio Tietê. A primeira corresponde à região mais elevada do centro oeste paulista, com altitudes entre 700 e 900 metros, apresentando chuvas médias anuais entre 1.500 e 1.800 mm e cerca de 40 a 50% das chuvas anuais localizadas no trimestre mais chuvoso. A segunda corresponde à região central do Estado, no entorno da Cidade de Bauru, abrangendo a parte leste da área de

estudo, registra altitudes entre 300 e 500 metros e chuvas médias anuais entre 1.300 e 1.500 mm. Tem como características forte estiagem no inverno e grande variação de ano para ano. Cerca de 75 a 80% das chuvas ocorrem no período mais chuvoso, e 20 a 25% no período mais seco. Num período de 23 anos (1971-1993), para a área de estudo, nove anos apresentaram-se com padrão normal, nove chuvosos e cinco secos, sendo considerado por [17] os seguintes valores de precipitação anual para definir os anos secos e chuvosos:

- anos normais/habituais: 1.423 a 1.628 mm;
- anos com tendência a chuvosos: 1.628 a 1.730 mm;
- anos chuvosos: superiores a 1.730 mm;
- anos com tendência a secos: 1.320 a 1.423 mm.



**Figura 4** - Isoietas médias anuais na UGRH –TJ; distribuição de postos pluviométricos utilizados e contorno de sub-bacias [5].

Em [5] foram considerados dados de séries históricas disponíveis de 48 postos pluviométricos com área de influência na UGRHI-TJ e determinadas as isoietas de médias anuais (Figura 4). A UGRHI-TJ foi objeto de divisão em unidades hidrográficas, utilizando-se de critérios hidrológicos e climáticos, sendo os limites definidos a partir dos divisores principais e das bacias de captação dos rios de maior porte, além de outros aspectos do meio físico. Neste processo as bacias dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira foram divididas em cinco sub-bacias: Baixo, Médio e Alto Jacaré-Guaçu, Baixo-Médio e Alto Jacaré-Pepira, respectivamente sub-bacias 4,5,6,7 e 8. As precipitações anuais médias para as sub-bacias que compõem o sistema Jacaré encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2** - Precipitação média anual histórica nas sub-bacias do sistema Jacaré, segundo divisão das sub-bacias em [5].

Nº	SUB-BACIA	ÁREA (km <sup>2</sup> )	PRECIPITAÇÃO ANUAL (mm)
4	BAIXO JACARÉ-GUAÇU	1.708	1.341
5	MÉDIO JACARÉ-GUAÇU	1.066	1.395
6	ALTO JACARÉ-GUAÇU	1.113	1.290
7	BAIXO /MÉDIO JACARÉ-PEPIRA	1.052	1.402
8	ALTO JACARÉ-PEPIRA	1.411	1.257
TOTAL		6350 <sup>(*)</sup>	

## Drenagem

Em [3] foram selecionadas séries fluviométricas de quatro anos, pertencentes a um período de monitoramento de dez anos (1961 – 1971), de bacias da região central do Estado (então Região Administrativa 6 - Ribeirão Preto). Esta região abrange a área de estudo, onde foi monitorada a vazão em postos fluviométricos ao longo do curso dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. As vazões anuais médias obtidas em cada uma das estações encontram-se na Tabela 3. Para o mesmo período, as chuvas anuais médias foram calculadas em 1378 mm e 1348 mm, respectivamente para as bacias dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

**Tabela 3** - Vazões obtidas em postos fluviométricos ao longo dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (fonte: [3])

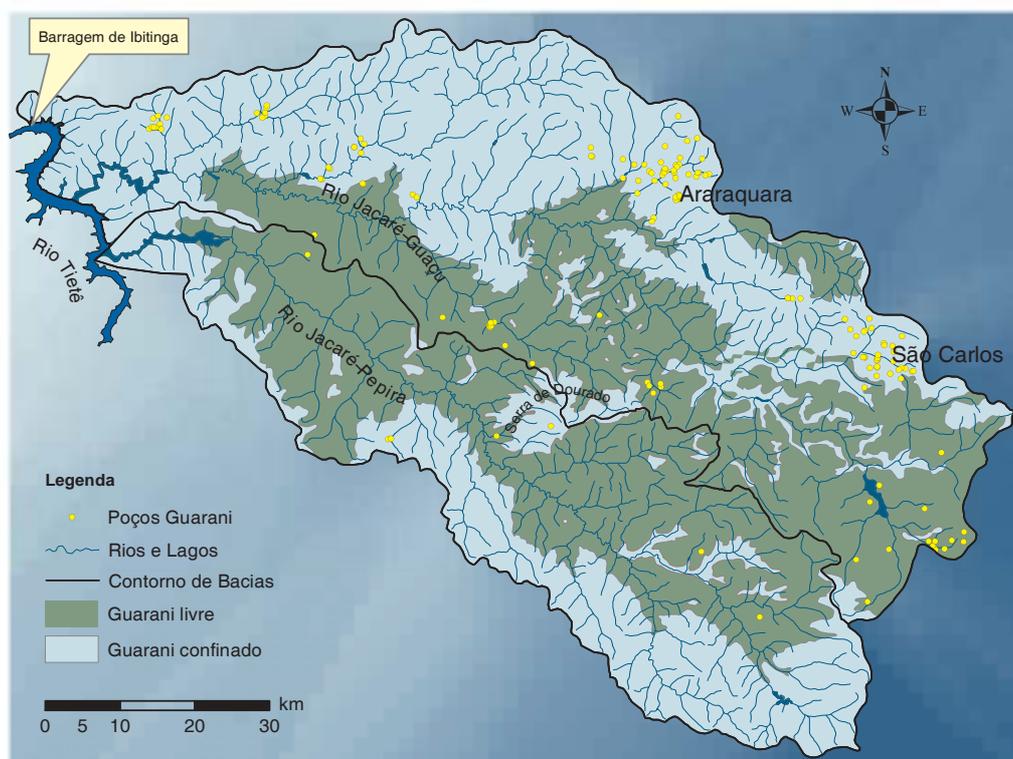
POSTO	1 (montante)		2		3		4		5 (jusante)	
	Q (m/s)	Ac (%)	Q (m/s)	Ac (%)	Q (m/s)	Ac (%)	Q (m/s)	Ac (%)	Q (m/s)	Ac (%)
JACARÉ-GUAÇU	7,1	16,0	25,5	45,9	44,1	84,7	49,2	aprox. 100		
JACARÉ-PEPIRA	1,7	22,0	6,6	32,7	24,9	82,0	28,8	91,9	29,6	aprox. 100

Ac = área acumulada da bacia

(\*) As áreas das bacias foram reavaliadas neste trabalho devido a considerações diferentes (das feitas em [5]) sobre seus contornos na região dos exutórios das Bacias Hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

## Poços

Os dados referentes aos poços cadastrados na área de estudo, obtidos junto ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré - CBH-TJ, produzidos pelo [5], têm como fontes de dados o DAEE, a Sabesp e a CPRM. Do total de 225 poços, 153 foram identificados como pertencentes ao Aquífero Guarani. Os demais (72), pertencentes à Formação Serra Geral, formações do Grupo Bauru ou do Cenozóicos. Em função do objetivo do trabalho, foram estudados apenas os 153 poços. Esses poços, parcial ou totalmente penetrantes no Aquífero, foram identificados e georeferenciados na área de estudo (Figura 5). Dentre eles, 107 localizados na região do aquífero confinado e 46 na região do aquífero livre. Encontram-se mal distribuídos, estando a maioria na Bacia do Jacaré-Guaçu, nas regiões das cidades de Araraquara e São Carlos. Uma média dos poços cadastrados com dados de vazão obtidos de testes de bombeamento indicam uma vazão média de 70 m<sup>3</sup>/h. Dentre os poços tomados para estudo, 66 não tinham informação sobre perfil litológico, assim o georeferenciamento das zonas de afloramento do Aquífero, do contorno das bacias e da espessura da camada confinante - gerado por processamento do SIG - foram decisivos para selecionar os poços pertencentes ao Guarani. Contudo, alguns poços, principalmente os próximos ao contorno de afloramento do Aquífero, mantiveram essa seleção duvidosa.



**Figura 5** - Distribuição de poços no Aquífero Guarani (em regiões de aquífero livre e confinado) nas Bacias dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

## **Evapotranspiração**

Em solos vegetados, o processo combinado de evaporação pela superfície do solo e transpiração pelas plantas é considerado evapotranspiração. Provavelmente, entre os processos hidrológicos, o mais difícil de ser quantificado devido a grande quantidade de parâmetros dependentes. Esses parâmetros podem ser agrupados em dois conjuntos: os referentes aos elementos meteorológicos e os referentes aos elementos físico-biológicos. Assim, a quantificação deste processo hidrológico está sujeita à incerteza desses elementos, como descritos nos métodos indiretos que estimam a evapotranspiração potencial ([18] [19] e tanque Classe-A). Em [3] os dados de evaporação obtidos dos postos meteorológicos da área de estudo foram considerados bastante deficientes e duvidosos, atribuído à deficiência de séries de dados de evaporação de tanque Classe-A. Em [20], os modelos de Panman e Thornthwaite foram comparados, juntamente com o método de utilização de lisímetro (evapotranspiração real), em uma região de afloramento da área de estudo. Os dois primeiros mostraram-se inadequados para estimar a evapotranspiração potencial em regiões com invernos muito secos e presença de solo arenosos, características da área de estudo, enquanto o lisímetro mediu uma evapotranspiração real (monitorada durante um ano) de 651 mm. [21] estimou a evapotranspiração total anual, em 12 estações meteorológicas da região das bacias (dados de período de até 14 anos), obtendo melhores resultados pelo método [22], para evapotranspiração real e para solos profundos (armazenamento de solo igual a 150 m), mais adequado aos solos das bacias do sistema Jacaré. Foram obtidas deste trabalho isolinhas de evapotranspiração real anual de 960 a 1120 mm, com valores crescentes de SE-NW das bacias.

## **HIDROGEOLOGIA**

### **Características regionais**

Segundo estudo hidrológico realizado na região Administrativa 6 – Ribeirão Preto – SP [3], dos 300 m de espessura local da Formação Pirambóia, os 100 a 200 m superiores, adjacentes à base da Formação Botucatu, são considerados aquífero de média qualidade por causa do pequeno teor de finos na areia. Devido à semelhança entre essa porção superior da Formação Pirambóia e a Formação Botucatu, é difícil distinguir a transição entre elas. Segundo a amostragem de poços na região, ambas são consideradas como um aquífero unificado, sendo a parte inferior da Formação Pirambóia, que jaz sobre a Formação Corumbataí, principalmente argilosa, definida como aquífero, não sendo considerada como importante fonte regional de água, excluindo-se solução de pequenos problemas de abastecimento localizado. Em [23], os poços que penetram inteiramente o Guarani não apresentam conteúdo técnico suficiente que justifique a separação entre as duas

formações aquíferas, e as características gerais das rochas indicam a condição de isotropia do Aquífero Guarani.

### **Características dimensionais**

As rochas que constituem o Aquífero Guarani abrangem toda a área de captação das bacias estudadas (6748 km<sup>2</sup>), superficialmente ou subsuperficialmente, estando parcialmente coberta por derrames basálticos em seus limites (Figura 5). Segundo dados obtidos de processamento do SIG, o Aquífero aflora em 47% da área de estudo (aproximadamente 3178 km<sup>2</sup>), estendendo-se pelo centro da área de estudo, desde o extremo leste da (região de Itirapina) até às proximidades do reservatório de Ibitinga, expandindo-se a noroeste, com surgências a nordeste e algumas exceções, principalmente, na região central do divisor das duas bacias (Serra de Dourado) (Figura 5). Sedimentos recentes de idade Quaternária também recobrem o Guarani ao longo dos Rios Jacaré-Guacu e Jacaré-Pepira na forma de depósitos aluvionares (Figura 2). Considerando-se a interação hidráulica natural entre os Aquífero e os dois rios principais, estabelecida através destes depósitos, não foi feita distinção das áreas de ocorrência dos aluvionares em relação à área identificada como Guarani livre ou não confinado (Figura 5).

De acordo com [2], segundo características das isolinhas de contorno estrutural de base, isópacas e piezometria, o Aquífero tem um pequeno mergulho SE-NW, com espessuras saturadas variando de 150 a 250 m. Em [5] dados de poços em regiões da área de estudo indicaram espessuras máximas do Aquífero: a NW (município de Bocaina) 229 m, a NE (município de Araraquara) 263 m e no centro-norte (município de Gavião Peixoto) 140 m. Entretanto, estimando para a UGRHI-TJ espessuras médias de 250 e 350 m, respectivamente para o Guarani livre e confinado.

### **Características das camadas confinantes e semiconfinantes**

O aquífero da base do Aquífero Guarani é constituído por diferentes litótipos, correspondentes à base da Formação Pirambóia e à Formação Corumbataí, esta última de idade paleozóica. São representadas, do topo para a base, por arenitos argilosos, siltitos arenosos, argilitos folhelhos, bancos de calcário e eventuais intercalações de lentes arenosas de diferentes níveis [23]. Esse aquífero funciona hidráulicamente como camada semiconfinante da base do Aquífero Guarani, e dependente das cargas hidráulicas entre este e o Guarani por entrada ou saída de água por drenança. Pela inexistência de valores calculados de condutividade vertical, e pela característica das rochas, que indica ser essa condutividade muito baixa, esta camada é comumente considerada como limite impermeável da base do Aquífero. [2] [3].

A camada semiconfinante do topo do Aquífero Guarani é definida pelo contorno estrutural de base da Formação Serra Geral que se comporta como uma unidade aquífera constituída por camadas

com porosidade predominantemente secundária (por fraturamento), apresentando-se litologicamente homogênea e hidraulicamente anisotrópica, com circulação em meio fraturado; é um aquífero em condições livres em toda a área estudada. À Formação Serra Geral podem ser atribuídos diversificados efeitos hidráulicos. Segundo [24], a Formação funciona como reservatórios, além de seu caráter de barreira hidráulica.

Acima do Aquífero Serra Geral, as formações do Grupo Bauru, na sua maioria Formação Adamantina, formam o Aquífero Bauru, constituindo-se no aquífero superior da seqüência, formado por camadas de porosidade primária intersticial na qual ocorrem condições livres. Os derrames basálticos superiores encontram-se, em geral, recobertos pelos sedimentos da Formação Adamantina, ao passo que os derrames inferiores são recobertos pelos arenitos intercalares. Na Serra de São Carlos ocorre a seqüência completa, da base para o topo: Aquífero Guarani, derrames basálticos inferiores, arenitos intercalados, derrames basálticos superiores e Formação Adamantina [2]. Esse pacote tem estratigrafia e espessura variável ao longo da área de estudo, compondo uma unidade hidroestratigráfica denominada de Aquífero Bauru-Basaltos.

### **Recarga e fluxo natural**

A recarga natural ocorre segundo dois mecanismos principais: por meio de infiltração direta das águas de chuva, na área de afloramento, e de forma retardada na da área confinada, por infiltração vertical (drenança) ao longo de descontinuidades das rochas do pacote confinante, onde a carga piezométrica favorece os fluxos descendentes. A disposição geral das áreas sujeitas a essas duas formas de recarga é apresentada na Figura 5. Contudo, as áreas consideradas de afloramento, apresentam comumente alguma parcela de condição mista de recarga, decorrente de camadas semiconfinantes. Tal condição é estabelecida pela presença intercalada de rochas basálticas fraturadas da Formação Serra Geral e os arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia (arenitos intercalados) [3] [10]. Fora das zonas de afloramento do Aquífero Guarani encontram-se, regiões onde o nível da superfície potenciométrica é superior ao topo dos reservatórios sedimentares, invertendo o fluxo descendente sobre o aquífero, como verificado na área de estudo, próximo ao reservatório de Ibitinga. [2] conclui que as áreas de recarga encontram-se definidas graças à ocorrência conjunta de pluviosidade elevada associada a solos permeáveis, aos gradientes topográficos e à direção de inclinação das camadas geológicas. Na região de Ribeirão Preto, reconhecida por possuir características hidrogeológicas semelhantes as da área de estudo [3], foi realizado um balanço hídrico utilizando-se dados de investigações isotópicas, e em seguida verificado por um modelo computacional simplificado, obtendo-se valores de recarga efetiva do Aquífero Guarani em torno de 17% da pluviometria, para as regiões de aquífero livre, e 5% para as regiões de aquífero confinado [25].

Os níveis piezométricos registrados em [3] revelam uma tendência regional do fluxo subterrâneo de SE-NW, em direção à calha do Rio Tietê, e secundariamente em direção ao vale dos principais rios (Rio Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira). Segundo [2], esses vales, cuja influência sobre o Aquífero diminui de SE-NW, constituem-se verdadeiros drenos do Aquífero ao Rio Tietê. Esse interflúvio sugere uma indiferenciação do Aquífero na região próxima aos exutório das duas bacias. Finalmente, pela observação dos níveis piezométricos, sugere a ocorrência de fluxo subterrâneo lateral, no sentido N-S (em direção ao vale do Rio Jacaré-Guaçu), entre Araraquara e Ibitinga.

### Características Hidrodinâmicas

Dados de características hidrodinâmicas do Aquífero Guarani, sistematizados para a região das duas bacias de estudo, foram sistematizados em [2] [3] [5]. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os valores obtidos, respectivamente em cada um dos trabalhos. Foram investigados valores de condutividade hidráulica K, transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S), porosidade efetiva ( $\eta$ ) e capacidade específica (Q/s).

**Tabela 4** - Características hidrodinâmicas do Aquífero Guarani, segundo [3].

UNIDADE GEOLÓGICA	CARACTERÍSTICA HIDRODINÂMICA			
	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /d)	$\eta$ (%)	S (-)
FORMAÇÃO BOTUCATU	3,5	200 a 540	25	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>
FORMAÇÃO PIRAMBÓIA	2 a 3	300	15 a 20	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>

**Tabela 5** - Características hidrodinâmicas do Aquífero Guarani, segundo [2].

CARACTERÍSTICA HIDRODINÂMICA	VALOR (máximo)	VALOR (mínimo)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
K (m/s)	15,2	0,04	2,4	2,4
T (m <sup>2</sup> /d)	2 a 3	17,0	118,2	113,5
Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)	5,0	0,16	0,9	0,9

**Tabela 6** - Características hidrodinâmicas do Aquífero Guarani, segundo [5].

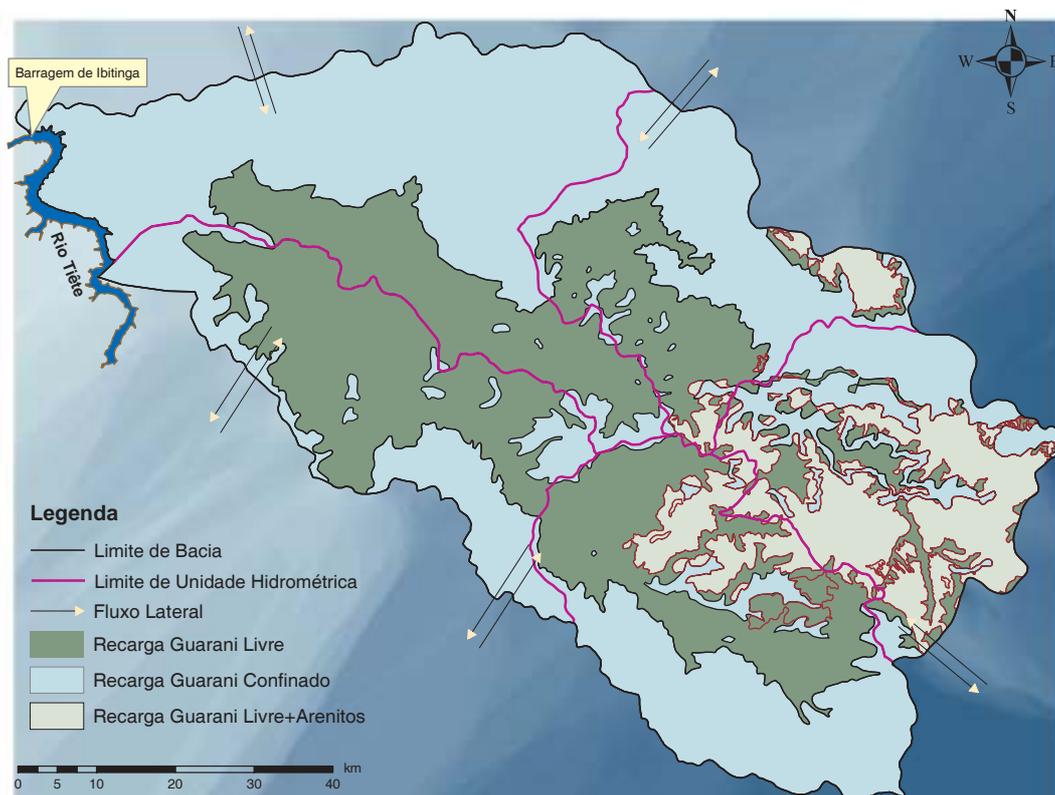
CONDIÇÃO DE CONFINAMENTO	CARACTERÍSTICA HIDRODINÂMICA		
	T (m <sup>2</sup> /d)	$\eta$ (%)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)
Livre)	15,2	0,04	2,4
Confinado	2 a 3	17,0	118,2

## MODELO CONCEITUAL

Quantificar quaisquer dos processos hidrológicos ocorrentes nas bacias requer o uso de simplificações, que são comumente estabelecidas nos modelos conceituais. Sua utilização é imprescindível na formulação de modelos matemáticos, sobretudo nos modelos numéricos, onde costumam ser mais explícitas. Teoricamente, quanto mais próximo for o modelo conceitual das situações de campo, mais preciso será o modelo numérico [26]. Assim, o equilíbrio entre essa proximidade e a complexidade numérica dela decorrente, estabelece a qualidade final do modelo conceitual.

O modelo conceitual proposto para as bacias objeto de estudo é direcionado à construção de modelo computacional de fluxo subterrâneo, sobretudo para estimar a recarga do Aquífero Guarani. Assim, a coleta de dados e demais informações relacionadas às bacias visou dar subsídios a estabelecer as unidades hidroestratigráficas, o balanço hídrico e o sistema de fluxo. Visando isto, e com base no conjunto de dados e informações obtidos, foram propostas as seguintes simplificações ilustradas, em plano, na (Figura 6):

- a) devido às características de isotropia do Aquífero Guarani, semelhança hidrogeológica entre as Formações Botucatu e Pirambóia e entre as características hidrogeológicas do Aquífero no âmbito das duas bacias, optou-se por considerar o Aquífero como uma unidade hidroestratigráfica geral, limitada periféricamente pelo contorno da soma das duas bacias, inferiormente pelas cotas de contorno estrutural de base da Formação Pirambóia e superiormente pelas cotas de topo da Formação Botucatu;
- b) considerando-se as principais formas de recarga vertical do Aquífero, foram estabelecidas 3 regiões de recarga, dividindo a unidade hidroestratigráfica geral. Elas correspondem às regiões onde o Guarani apresenta-se livre, semiconfinado pelo Aquífero Bauru-Basaltos, ou aflorante contendo arenitos intercalados. A cada uma dessas regiões pode-se atribuir um valor diferente de taxa de recarga correspondente a um percentual da pluviometria local;
- c) pela associação descrita entre pluviometria e recarga, foram consideradas as regiões definidas como unidades hidrográficas pelo [5], no total de 5, servindo como referência de pluviometria média local. Assim a interseção das regiões dos itens (b) e (c) divide a unidade hidroestratigráfica geral em um total de 13 regiões de diferentes taxas de recarga, dependentes da formação geológica e pluviometria;
- d) como fluxo de saída são consideradas: as taxas de exploração dos poços georeferenciados, penetrantes no Guarani (Figura 5); as descargas dos rios principais no Rio Tietê, a partir da identificação do fluxo de base nos fluviogramas (Figura 5); o fluxo subterrâneo na região do exutório das bacias, obtido pelo modelo numérico, quando da aplicação de condição de contorno de 1º tipo (carga constante) na região do exutório.



**Figura 6 - Esboço do modelo conceitual**

e) a evidência de possível fluxo lateral através do contorno das bacias, apesar de difícil estimativa, deve ser considerada devido à possibilidade desse fluxo representar um componente significativo do balanço hídrico, e conseqüentemente alterar as definições de condição de contorno de 2º tipo (fluxo constante) do modelo numérico. Esta estimativa pode ser feita através da comparação entre os níveis estáticos na vizinhança do contorno da área de estudo, nas regiões dentro e fora do seu domínio.

Apenas com a aplicação do modelo conceitual no modelo numérico e a análise dos resultados obtidos e comparados com dados de campo é possível avaliar seu desempenho. Sendo normalmente um processo iterativo de ajustes e modificações do modelo conceitual, inicialmente proposto.

### **SISTEMA DE INFORMACOES GEOGRÁFICAS (SIG)**

O SIG tem sido utilizado como a forma mais adequada de gerenciamento de grandes quantidades de dados hidrológicos, por dispor de bons recursos de armazenamento, processamento e visualização. Ao mesmo tempo, dispõe de possibilidades de exportação e importação de arquivos em diversos formatos, que permitem compartilhar dados e recursos entre diferentes programas.

## Dados armazenados

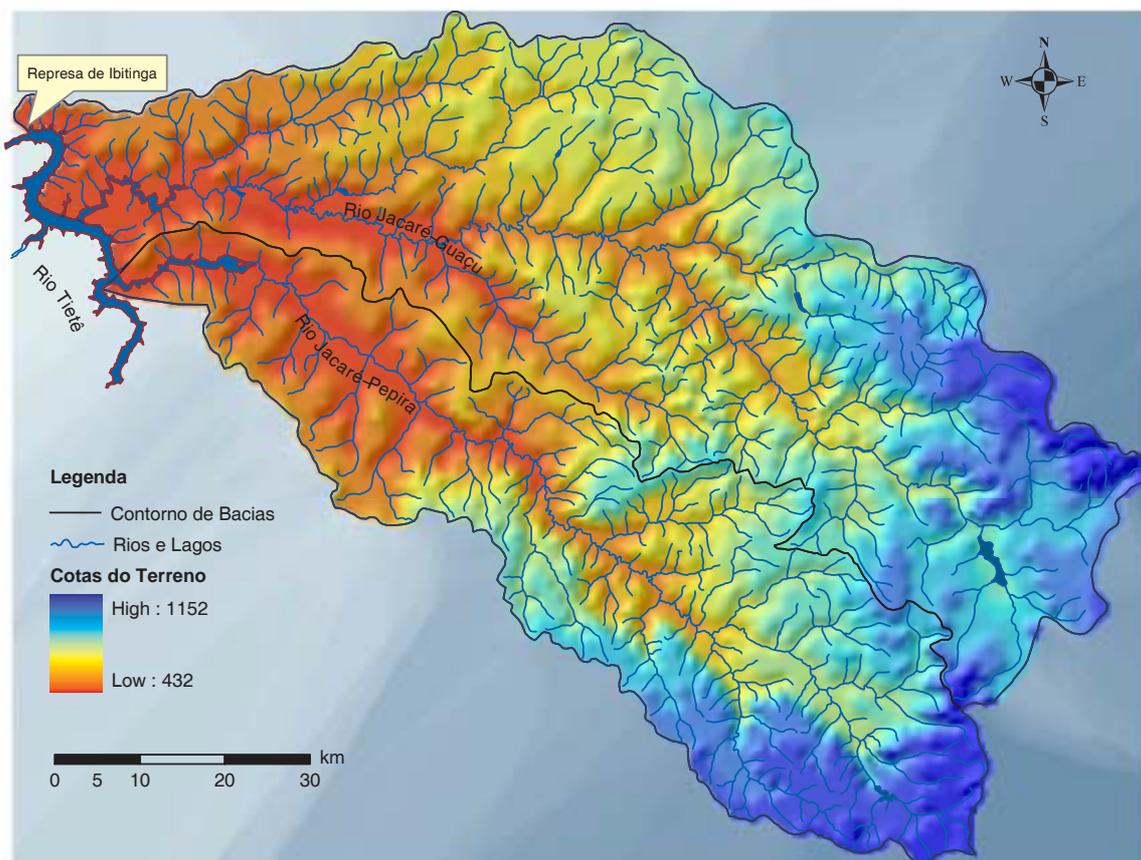
Após pesquisa bibliográfica sobre a área de estudo, foram identificadas as fontes de dados tendo como origem principalmente trabalhos do meio acadêmico e instituições governamentais de assistência e pesquisa. Neste trabalho os dados foram digitalizados, parcial ou completamente, georeferenciados e classificados nos seguintes grupos, utilizando o programa [1]:

- a) Características superficiais das bacias (fontes em escala 1:250.000, [2] [5]): i - contornos das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira; ii - fisiografia – planialtimetria, com curvas de nível espaçadas de 50 m; iii - hidrografia – sem cotas altimétricas, apenas coordenadas x,y (planimetria); iv - contornos das unidades hidrográficas; v) poços com informações construtivas, hidráulicas e hidrogeológicas parciais.
- b) Características subterrâneas do Aquífero Guarani (fonte em escala 1:100.000, [2]): i - cotas estruturais de base e isópacas da Formação Pirambóia; ii - cotas estruturais de base e isópacas da Formação Botucatu.

## Dados Processados

No processamento foram utilizadas duas técnicas com finalidades distintas: a de interpolação de dados no domínio das bacias, e a de operação de *rasters*. Na primeira, optou-se sempre pelo método de *krigagem* (ordinária) e na segunda, utilizou-se os três grupos de operadores: *aritmético*, *booleano* e *relacional*. Os arquivos tipo raster foram obtidos, convertendo-se os dados vetoriais disponíveis ou por meio de operação de *raster* no próprio programa. Os processamentos foram sumarizados da seguinte forma:

- a) Interpolações: i - cotas planialtimétricas, gerando-se o modelo digital do terreno (Figura 7); ii - cotas estruturais de base e isópacas das Formações Botucatu e Pirambóia.
- b) Operação de *rasters*: i - determinação das cotas de topo da Formação Botucatu a partir dos dados raster de sua base e espessura; ii - determinação da espessura do Aquífero Guarani a partir dos dados raster de base da Formação Pirambóia e de topo da Formação Botucatu, gerados no item anterior; iii - definição das regiões referentes à união e interseção das formações geológicas e áreas de afloramento e confinamento do Guarani; iv - determinação das espessuras confinantes do Guarani a partir dos dados raster de topo da Formação Botucatu, da planialtimetria do terreno e da região total das formações geológicas confinantes.



**Figura 7** - Superfície da área das Bacias Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira

## CONCLUSÕES

A associação entre conjunto de dados, SIG e modelo conceitual mostrou-se uma estrutura adequada, visando dar suporte à implementação de modelos numéricos de fluxo para estimativa de recarga. Como característica favorável principal, está a de permitir, agilmente, alterações no modelo conceitual a partir da flexibilidade de armazenamento, seleção e processamento de dados. O modelo conceitual proposto para as Bacias dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira tentou compatibilizar simplicidade e representatividade dos principais fenômenos hidrológicos identificados. Contudo, apenas com sua aplicação no modelo numérico e análise dos resultados obtidos, por comparação com os dados de campo, é possível avaliar seu desempenho. Este trabalho representa o estágio atual de construção de um modelo computacional, em fase de desenvolvimento, com o objetivo de estimar a recarga do Aquífero Guarani no âmbito das bacias, visando a elaboração de uma tese de doutoramento.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] ESRI *software ARCVIEW* . vs.8.3. CA, USA. Manual Arcmap, 229 p. 2002.

- [2] CORRÊA, U. M. P. *Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Paulo, 2 vol., 107 p. 1995.
- [3] DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO – DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas: Região Administrativa nº 6, Ribeirão Preto*. São Paulo: v. 4, 1974.
- [4] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. São Paulo. 2v. IPT Monografias, 6. Publicação 1 184, 2v. 1981.
- [5] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *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, 2003.
- [6] SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E. et al. *Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná*. In: 28º CSBG, Porto Alegre – RS. Anais, p. 229-236. 1974.
- [7] MATOS, S.L.F. de. *O contato entre o Grupo Passa Dois e a Formação Pirambóia na borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo*. São Paulo. 110p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1995.
- [8] SOARES, P. G. *Divisão Estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo*. Rev. Bras. Geol. v.10, p. 177-175, 1975.
- [9] DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. *Os aquíferos Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo: novos mapas de isóbatas do topo, espessura e nível d'água*. São Paulo, 1998.
- [10] ALMEIDA, F.F.M.; BARBOSA, O. *Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM. Boletim 143, 1953.
- [11] FERNANDES, L.A. *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1998.
- [12] SOARES, P. C. et al. *Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru*. Revista Brasileira de Geociências, v.10, n.3, p.177-185, 1980.
- [13] COTTAS, L.R., BARCELOS, J.H. *Novas considerações sobre a geologia da região de Itaqueri da Serra*. In: Simpósio Regional de Geologia, 3, Curitiba. Atas... Curitiba: SBG. v. 2, p. 70-76, 1981.
- [14] PONÇANO, W.L. et al. *A Formação Itaqueri e depósitos correlatos no Estado de São Paulo*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Salvador. Anais, Salvador : SBG. v.4, p. 1339-1350, 1982.

- [15] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Geologia das folhas Campinas (SF.23-Y-A) e Ribeirão Preto (SF.23-V-C)*. São Paulo. IPT. Relatório 31 723, 1993.
- [16] MELO, M. S. de. *A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenoica na Depressão Periférica Paulista*. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências – USP, São Paulo, 1995.
- [17] SANT’ANNA NETO, J. L. *As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica*. Tese de Doutorado – Geografia, FFLCH/ USP, São Paulo, 1995.
- [18] PENMAN, H. L. *Evaporation: an introductory survey*. Netherlands. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.4, p.9-29, 1956.
- [19] THORNTHWAITE, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, New York, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.
- [20] WENDLAND, E.; CUNHA, A. T. *Estimativa experimental da taxa de recarga para a Zona de Afloramento do Aquífero Guarani, na região de São Carlos - SP*. Rev. Bras. Rec. Híd. v.1, p.1-12, 2003.
- [21] MATOS, I. S. *Aplicação de um modelo de balanço hídrico na Bacia do Rio Jacaré-Guaçu*. Dissertação de Mestrado – EESC, USP, São Paulo, 1987.
- [22] THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance*. Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, v8, n.1, p.104, 1985.
- [23] PIUCI, J.; DINIZ, H. N. *Conhecimento do Aquífero Botucatu na Cidade de Araraquara – SP*. Revista do Instituto Geológico. v.6, p.23-44, 1985.
- [24] ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; GIUSTI, D. A.; ROSTIROLA, S. P.; FERREIRA, F. J. F.; BITTENCOURT, A. V. L. *Sistema Aquífero Guarani – Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das águas subterrâneas*. Águas Subterrâneas, São Paulo. v.17, v.91-111, 2003.
- [25] SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SMA. *Um exemplo de solução integrada para a criação de áreas de proteção de captações destinadas ao abastecimento público com usos de modelos de sustentabilidade e sistemas avançados de suporte de tecnologia de informação*. Relatório 11.04.04. São Paulo, 2004.
- [26] ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego, USA: Academic Press. 381 p. 1992.