

**BACIA REPRESENTATIVA EM REGIÃO DE AFLORAMENTO DO
AQÜÍFERO GUARANI**

Antônio Alves Meira Neto¹; Davi de Carvalho Diniz Melo²; Edson Cezar Wendland³

Resumo – Este artigo teve por objetivo realizar uma revisão bibliográfica dos trabalhos técnico-acadêmicos cuja área de estudo tenha sido a bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, tendo em vista sua importância pelo fato de apresentar características representativas típicas da região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, um dos mais importantes aquíferos transfronteiriços do mundo. Buscou-se também identificar quais são os campos que ainda necessitam ser estudados para melhor compreender os processos que ali ocorrem. As pesquisas nessa bacia, desenvolvidas desde 1981, têm focado principalmente no balanço hídrico com intuito de melhor quantificar as fases do ciclo hidrológico com destaque para recarga do aquífero livre. Existe um vasto campo a ser explorado no que se refere ao estudo de processos erosivos na bacia e monitoramento qualitativo das águas subsuperficiais, principal fonte de abastecimento da região.

Abstract – This paper aims to render a review of the technical and academic works whose study area had been the Ribeirão da Onça basin. The relevance of this basin lays on the fact that it displays typical representative features of the outcrop zone of the Guarani Aquifer, one of the most important transboundary aquifers in the world. It has also been intended to identify which fields still need to be studied in order to better understand the ongoing processes in the area. The researches on this area have been being developed since the year of 1981 and have focused mainly on the water balance, aiming the quantification of the hydrological cycle phases, especially ground water recharge. There is a wide field to be explored concerning the study of erosive processes and quality monitoring of the subsurface water, main source of supply in that region.

Palavras-Chave – aquífero Guarani, bacia do Ribeirão da Onça.

¹ Mestrando em Hidráulica e Saneamento: Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Laboratório de Hidráulica Computacional, email: antoniomeira@usp.br;

² Mestrando em Hidráulica e Saneamento: Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Laboratório de Hidráulica Computacional, email: engdavi@usp.br

³ Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da EESC/USP, email: ew@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

Estima-se que as fontes de água subterrâneas constituam em torno de 20% do total de água utilizada globalmente (UNESCO, 2009). No Brasil, a água subterrânea também desempenha um papel de suma importância para o abastecimento humano, destacando-se a região sudeste, onde se localiza grande parte do Aquífero Guarani.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos mais importantes aquíferos transfronteiriços do mundo, abastecendo direta ou indiretamente quase 25 milhões de habitantes no Brasil. Existem mais de 2 mil poços entre 100 e 300 m perfurados no SAG, além de mais algumas centenas dos mesmos com profundidades entre 500 e 2000 no domínio confinado do aquífero (Rebouças & Amore, 2002 *apud* Barreto, 2006).

Pelo fato de seu domínio abranger uma área de cerca de 1,2 milhões de km², o SAG é de interesse de estudo de outros países latino-americanos além do Brasil, embora que seja neste país que se localize 70% de sua área. Ainda assim, tem-se em torno de 19% da área do SAG na Argentina, 6% no Paraguai e 5% no Uruguai (Rebouças & Amore, 2002).

Um dos desafios das pesquisas tem sido a estimativa da recarga neste aquífero, pois a mesma possui elevado grau de incerteza. Essa incerteza provém do fato de que, nas águas de recarga dos aquíferos, uma parte da mesma que infiltra no solo, participa do escoamento de base, enquanto que outra parcela tem a possibilidade de se deslocar para porções profundas ou confinadas. Apenas para esta última hipótese, é possível, então, que a água se transforme em recarga profunda (Gomes, 2008).

No Brasil, o SAG vem sendo estudado pelo Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. As pesquisas desenvolvidas pelo LHC são realizadas a partir do monitoramento da bacia do Ribeirão da Onça (BRO), cujas características representativas são típicas da região de afloramento do SAG no estado de São Paulo (Barreto, 2006).

Os estudos realizados na bacia do Ribeirão da Onça são, portanto, de fundamental importância para o maior entendimento do SAG. Nesse contexto, tem-se por objetivo realizar uma revisão bibliográfica dos trabalhos já realizados na bacia, destacando-se os principais resultados e buscando identificar possíveis linhas de pesquisa a serem preenchidas nas atuais pesquisas.

METODOLOGIA

Localização e climatologia da Área de Estudo

A bacia do Ribeirão da Onça está localizada entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48° de longitude oeste, a aproximadamente 1,5 km do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo (CRHEA), na região do município de Brotas.

A importância desta bacia provém do fato de estar localizada em uma região de afloramento do SAG (Figura 1).

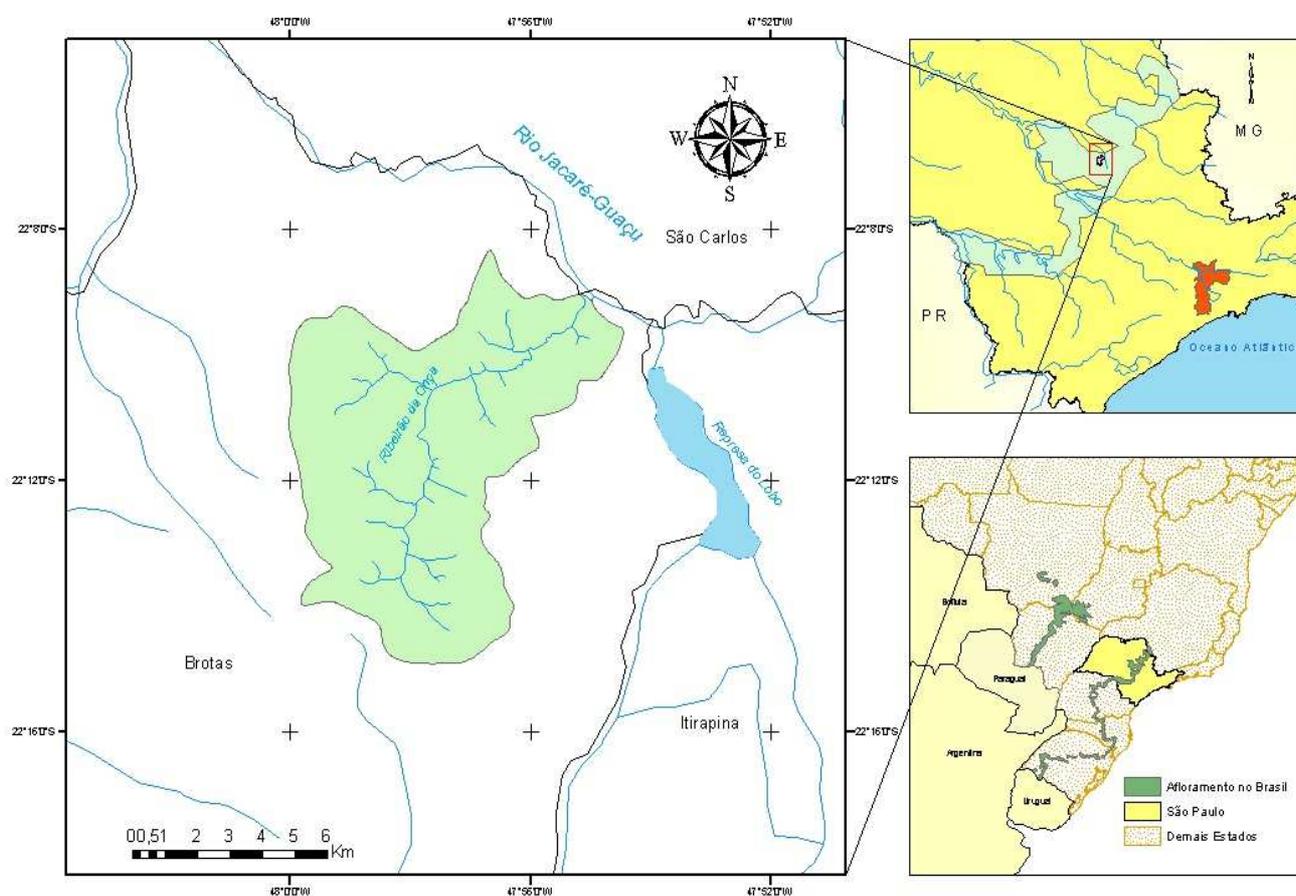


Figura 1 - Bacia do Ribeirão da Onça

Os dados climatológicos medidos no CRHEA mostram que a temperatura média anual da região é de 20,5 °C. Segundo a classificação climática de Köppen, a bacia possui clima subtropical úmido com chuvas de verão e clima subtropical úmido com inverno seco. A precipitação média anual oscila entre 1300-1400 mm.

Caracterização Física

As características físicas da bacia do Ribeirão da Onça, realizadas por Mattos *et al* (1984) e Preto Filho (1985) *apud* Pompêo (1990) são listada na Tabela 1:

Tabela 1 - Características fisiográficas da bacia do Ribeirão da Onça

Área de drenagem	65 km ²
Perímetro	42 km
Comprimento axial	11 km
Extensão do curso d'água principal	16 km
Comprimento total dos cursos d'água	55 km
Altitude máxima	840 m
Altitude mínima	640 m
Declividade média	7,6 m/km

A partir desses valores, foram calculados os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de forma (k_c): razão entre o perímetro da bacia e o perímetro de uma circunferência de área igual à área de drenagem. Quanto mais k_c se aproxima da unidade, mais a forma da bacia se aproxima da circunferência, indicando uma maior sujeição a enchentes. Para bacia do Ribeirão da Onça, obteve-se $k_c = 1,55$, indicando que a mesma é pouco sujeita a enchentes.
- Densidade de drenagem: razão entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem. Considera-se que uma bacia possui drenagem pobre se $D_d < 0,75\text{km}/\text{km}^2$ e que a mesma possui drenagem rica, ou é bem drenada, se $D_d > 0,95\text{km}/\text{km}^2$. A bacia do Ribeirão da Onça possui $D_d = 0,95\text{ km}/\text{km}^2$, concluindo-se que a mesma possui drenagem mediana.

Uso do Solo

O solo da bacia do Ribeirão da Onça é preponderantemente ocupado pelo plantio de eucaliptos (Figura 2). Outras culturas predominantes são: citros, cana-de-açúcar e soja. Tem-se na bacia o uso exclusivo de solo para fins agrários e pecuários.

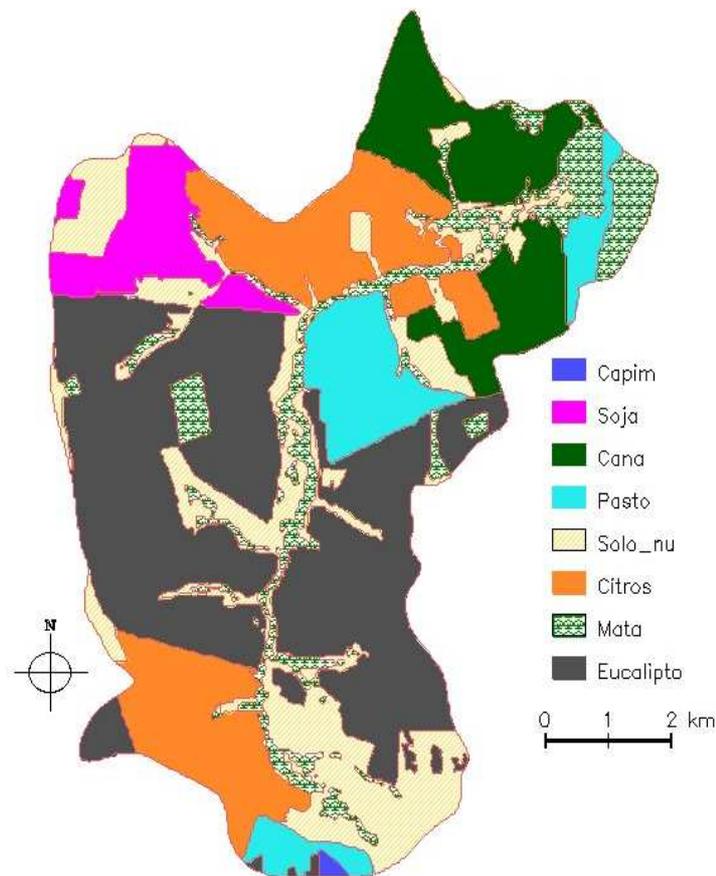


Figura 2 - Mapa de uso do solo (adaptado de TANIKAWA & MANZIONE, 2010)

Coleta de dados

Dados climatológicos, tais como pluviosidade, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar entre outros, são coletados no CRHEA.

O monitoramento do nível estático (NE) do aquífero livre é feito quinzenalmente com um medidor de nível com sinal sonoro em 23 poços. Em seis desses poços, é feita a medição automática do NE a cada 12 horas com uso de *divers*. Os poços monitorados estão distribuídos em áreas de diferentes culturas, tais como cana-de-açúcar, citros, eucalipto e mata ciliar.

A vazão do rio Ribeirão da Onça também é medida quinzenalmente, utilizando molinete hidrométrico associado ao método da seção média enquanto os valores diários de vazão são obtidos por meio de linígrafo.

Nesta seção tem-se instalado um linígrafo para coletar automaticamente e continuamente o nível de água do rio. Seus dados são averiguados pelas leituras de uma régua linimétrica localizada no mesmo local.

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica teve como intuito listar todos os trabalhos científicos cuja área de estudo foi a bacia do Ribeirão da Onça, destacando as metodologia adotadas, bem como os

principais resultados. Iniciou-se a pesquisa nas principais bases de dados bibliográficas das áreas de engenharias. Paralelamente, pesquisou-se no acervo de teses e dissertações da Biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Com o intuito de propiciar uma melhor visão do panorama dos trabalhos realizados, são listados cronologicamente na Tabela 2 os trabalhos realizados na bacia do Ribeirão da Onça.

Tabela 2 - Relação de trabalhos cronologicamente ordenados

Autor(es)	Tipo	Título
Contin Neto (1981)	Relatório (DNAEE)	Interação rio aquífero
Davino (1984)	Relatório (FAPESP)	Considerações hidrogeológicas preliminares sobre a Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça, São Carlos, SP
Mattos et al (1984)	Relatório (FAPESP)	Relações Hidrológicas e Hidrometeorológicas em Bacia Experimental na Região de Afloramento do Aquífero Botucatu
Preto Filho (1985)	Relatório (FAPESP)	Implementação de uma Bacia Experimental para Estudos Hidrológicos e Hidrometeorológicos
Contin Neto (1987)	Tese de doutorado	Balanço Hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do Aquífero Botucatu
Pompeu (1990)	Tese de doutorado	Balanço Hídrico da zona não saturada do solo da bacia do Ribeirão da Onça
Queiroz (1991)	Dissertação de mestrado	Propagação de cheias: aplicação do modelo de onda cinemática ao Ribeirão da Onça
Milani (1992)	Dissertação de mestrado	Análise da interação rio-aquífero em bacias hidrográficas e desenvolvimento de modelo numérico tridimensional
Arantes (2003)	Dissertação de mestrado	Emprego de infiltrômetro na caracterização da interação rio e aquífero
Barreto (2006)	Dissertação de mestrado	Balanço Hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do monitoramento hidrogeológico em bacia representativa
Wendland et al. (2007)	Artigo	Water Balance in the Guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring
Gomes (2008)	Dissertação de mestrado	Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do ribeirão da onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada
Barreto (2009)	Paper	Estimativa da evapotranspiração a partir da variação de nível estático de aquífero
Homobono (2009)	Dissertação de mestrado	Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani
Maldonado (2009)	Dissertação de mestrado	Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Interação rio aquífero - Contin Neto (1981)

Conforme o próprio título indica, esse relatório teve por objetivo estudar a interação entre o rio Ribeirão da Onça e o Aquífero Botucatu, atualmente chamado de Aquífero Guarani. Nesse estudo, foi feita pela primeira vez a separação do escoamento básico do escoamento superficial direto através da análise do hidrograma do rio.

Considerações hidrogeológicas preliminares sobre a Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça, São Carlos, SP - Davino (1984)

Davino (1984) fez o levantamento das características hidrogeológicas da bacia do Ribeirão da Onça. A respeito da geologia, o trabalho mostra que a bacia está, em sua maioria, sobre pacote de arenitos Botucatu e sobre o complexo Botucatu-diabásico na região do exutório. Sobre a hidrogeologia, concluiu-se, a partir de medidas de parâmetros físico-químicos de amostras de água da bacia e medidas de eletroresistividade, que existem dois aquíferos: um freático e, mais abaixo, o Aquífero Guarani propriamente dito.

Relações Hidrológicas e Hidrometeorológicas em Bacia Experimental na Região de Afloramento do Aquífero Botucatu - Mattos *et al.* (1984); Implementação de uma Bacia Experimental para Estudos Hidrológicos e Hidrometeorológicos - e Preto Filho (1985)

Esses trabalhos tratam da caracterização fisiográfica da bacia do Ribeirão da Onça, conforme descrito no item Área de Estudo.

Balanço Hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do Aquífero Botucatu - Contin Neto (1987)

O objetivo dessa tese foi realizar, em uma seção da bacia do Ribeirão da Onça, o balanço hídrico na superfície de uma região não saturada da bacia e na parte saturada do aquífero livre. Para tanto, foram utilizados dados de precipitação, vazão do curso d'água e níveis em poços piezométricos semi-penetrantes no aquífero freático.

Os dados pluviométricos foram coletados em pluviógrafos de registro contínuo. Mediu-se, a partir da calibração de uma curva-chave, a vazão através de régua linimétrica instalada numa estação fluviográfica. O nível do aquífero freático foi medido com linígrafos de rios, adaptados para efetuar os registros continuamente, instalados em quatro poços. Utilizando amostras de solo próximo a um dos poços, foram estimados valores de condutividade hidráulica, taxa de infiltração e porosidade.

O balanço hídrico foi efetuado para uma porção da bacia de comprimento unitário ao longo do rio e para um intervalo de tempo de um dia. Como resultados do trabalho, o autor quantificou as parcelas referentes à:

- ✓ escoamento direto (1,2% do precipitado);
- ✓ infiltração (98,8% da precipitação);
- ✓ evapotranspiração e variação da umidade do solo (80,45% do infiltrado);
- ✓ recarga do aquífero (19,55% da infiltração e 35,47% da variação total do volume armazenado);
- ✓ escoamento básico (56,28% da recarga do aquífero mais a variação do volume armazenado).

Outras constatações feitas pelo autor são referentes à correlação entre a precipitação e a recarga no período chuvoso, curva-chave na seção monitorada, interação rio-aquífero, entre outros.

Balanço Hídrico da zona não saturada do solo da bacia do Ribeirão da Onça Pompeu (1989)

Neste estudo, foi realizado um balanço hídrico na zona não saturada do solo. O balanço foi feito partir de medições de umidade relativa do solo a profundidades diferentes para 14 pontos espalhados pela BRO, obtidas por sondas de nêutrons, aliado à medições de precipitação e estimativas da evapotranspiração. Através do balanço hídrico e do monitoramento da vazão, chegou-se à estimativa de que 8% da precipitação representaria a recarga do aquífero freático.

Propagação de cheias: aplicação do modelo de onda cinemática ao Ribeirão da Onça Queiroz (1991)

Queiroz (1991) aplicou o modelo da onda cinemática em um trecho do curso d'água principal da bacia do Ribeirão da Onça para simular a propagação de cheias neste rio. Segundo o autor, a relevância desse trabalho estaria pautada no fato de que, até então, os trabalhos de modelagem com propagação de cheias não eram, em sua maioria, testados com dados reais. Propôs-se então, utilizar dados coletados em campo durante as cheias ocorridas para desenvolver o trabalho.

Para aplicação do modelo numérico, foi realizada a discretização do trecho de rio estudado em oito seções espaçadas de 550 m a 3.000 m. Os dados de vazão e nível de água no rio foram

obtidos com uso de micro-molinete, linígrafo e régua linimétrica. A partir dos dados levantados, foram ajustadas curvas-chave.

Adotou-se o método das diferenças finitas (MDF) em esquema implícito para solução das equações de escoamento não permanente. Para resolução numérica do modelo da onda cinemática, foi desenvolvido um programa computacional em FORTRAN.

Através da análise dos resultados, o autor verificou a aplicabilidade, segundo o critério proposto por Ponce, do modelo da onda cinemática ao trecho do Ribeirão da Onça. Esse critério afirma que o modelo da onda cinemática é aplicável quando: $\frac{T \cdot S_0 \cdot V_0}{y_0} \geq 171$, onde T = período da onda, S_0 = declividade do fundo do canal, V_0 = velocidade média do escoamento uniforme e y_0 = profundidade do estado uniforme. Conclui-se também que o modelo utilizado reproduziu com boa aproximação as variações de níveis decorrentes das cheias registradas no período de estudo.

Análise da interação rio-aquífero em bacias hidrográficas e desenvolvimento de modelo numérico tridimensional - Milani (1992)

Os objetivos estabelecidos em Milani (1992) são:

- ✓ desenvolver um modelo matemático tridimensional que permita analisar a interação rio-aquífero e o processo de recarga do aquífero livre em uma bacia qualquer, considerando as dimensões do domínio, a geometria irregular dos contornos, o contorno superior livre, condições particulares, curvas de níveis do terreno, escala temporal e especificações da superfície freática;
- ✓ obter otimização de tempo de processamento e memória principal, com vista na implementação do modelo em equipamento com restrição de memória;
- ✓ obter estado permanente, baseando-se na hipótese de Dupuit, quando a bacia é submetida à recarga;
- ✓ analisar os efeitos no cálculo da altura piezométrica da superfície livre do contorno superior, causados pelo incremento ou retirada de células ativas e não ativas do reticulado traçado sobre o domínio dessa bacia, com ou sem recarga.

A bacia do Ribeirão da Onça serviu como base para o desenvolvimento desse trabalho, no qual foram desenvolvidos estudos hidrodinâmicos de grande escala.

O modelo desenvolvido baseia-se na equação da continuidade e na Lei de Darcy e foram utilizados, nas discretizações das equações diferenciais, esquemas de diferenças finitas centrado (derivadas espaciais) e progressivo (derivada temporal). Para aplicação do esquema de diferenças finitas na bacia do Ribeirão da Onça, algumas hipóteses tiveram de ser tomadas, tais como considerar que fluxo é nulo nos limites de contorno laterais e de fundo.

Para solução do sistema de equações lineares decorrentes da aplicação do MDF, utilizou-se o método iterativo de Gauss-Seidel, adaptando-o devido às particularidades dos limites dos contornos irregulares e dos limites dos contornos inferiores e superiores.

A verificação do modelo desenvolvido consta de dois estágios. No primeiro, aplicou-se o modelo para simular fluxos em diversos e hipotéticos. No segundo estágio, utilizou-se o modelo para simular o fluxo de águas subterrâneas na bacia do Ribeirão da Onça.

Emprego de infiltrômetro na caracterização da interação rio e aquífero - Arantes (2003)

A proposta principal nesse trabalho é estudar o escoamento de água na interação rio-aquífero no Ribeirão da Onça, através da análise da variação temporal da taxa de troca por meio de infiltrômetros instalados no leito de três seções do rio. Propõe-se ainda, instalar poços para monitoramento do nível freático na vizinhança do rio, de forma a caracterizar o padrão transversal do escoamento na seção transversal.

Os dados hidrometeorológicos foram obtidos a partir da estação climatológica instalada no CRHEA. Os dados de vazão em uma das seções na seção 2 foram obtidos a partir de uma curva-chave ajustada após cinco medições de vazão com molinete.

Foram realizados ensaios de campo com a finalidade de quantificar a interação rio-aquífero nas três seções monitoradas. Para tanto, três infiltrômetros foram construídos utilizando 2 tambores de 200 litros e uma lata de óleo de 20 litros.

A condutividade hidráulica no leito do rio Ribeirão da Onça foi determinada com uso de mini-piezômetros e através da análise granulométrica. Ambos os métodos resultaram em valores de K de mesma ordem de grandeza.

Os experimentos com infiltrômetros revelaram que o fluxo ocorre do aquífero para o rio, com uma diminuição do surgimento da vazão com o aumento da pluviosidade. Constatou-se que esse surgimento também é influenciado pela pressão atmosférica. Nas três seções monitoradas, a ordem da interação rio-aquífero foi a mesma, em torno de 300 mm/dia.

Com a curva-chave calibrada, obtiveram-se valores de vazão na seção 2. Constatou-se que o escoamento de base diminuiu ao longo do período de estiagem e voltou a aumentar com a chegada do período chuvoso. Esse crescimento foi atribuído ao fato de haver o aumento da área de afloramento lateral ao longo do rio e do gradiente hidráulico.

Através da análise dos níveis estáticos, conclui-se, para duas das seções de estudo, que o nível freático possui perfil côncavo na margem esquerda e convexo na direita. Na outra seção restante, o nível freático possui grande variação na vizinhança do talude acentuado, pelo fato da margem esquerda estar erodida. Com isso, concluiu-se que a existência de erosão e voçorocas nas margens em função da falta de mata ciliar provoca o rebaixamento do nível do aquífero freático.

Essa modificação seria, portanto, a causadora da mudança do perfil convexo, normalmente observado sob encostas, para côncavo.

Balço Hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do monitoramento hidrogeológico em bacia representativa - Barreto (2006)

O principal objetivo nesse trabalho foi estimar a taxa de recarga direta e profunda numa zona de afloramento do SAG relativa à área da bacia do Ribeirão da Onça, com base no balanço hídrico nesta bacia. Os objetivos secundários foram:

- Implantar uma rede de monitoramento hidrológica e hidrogeológica na bacia;
- Avaliar métodos de estimativa de evapotranspiração para uso na quantificação de recarga direta de aquíferos através de balanço hídrico;
- Quantificar a vazão numa seção de controle da bacia;
- Quantificar a interação rio-aquífero.

A estimativa da recarga direta e profunda foi feita através do método do balanço hídrico, sendo necessário, para tanto, estimar as seguintes componentes do ciclo hidrológico: precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial direto no ribeirão e escoamento de base.

O método do balanço hídrico baseia-se no princípio da conservação da massa e trata os processos hidrológicos (precipitação, vazão, infiltração, etc) como entradas e saídas de um balanço volumétrico. Esse balanço pode ser expresso por $\frac{dS}{dt} = I - O$, onde $\frac{dS}{dt}$ representa a variação do armazenamento no tempo, I são as entradas e O as saídas no sistema (bacia hidrográfica, reservatório, etc).

A recarga direta foi estimada através da variação da superfície livre do aquífero e a recarga profunda é o valor residual do balanço hídrico. Para estimar o escoamento superficial direto, utilizou-se o método do SCS (*Soil Conservation Service*) e, na estimativa da vazão de base, adotou-se um modelo de interação rio-aquífero.

A medida da precipitação foi realizada em um pluviômetro instalado próximo ao centro da bacia do Ribeirão da Onça. Estimou-se a evapotranspiração potencial através dos métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite, Tanque Classe A (FAO), Blaney-Cridlle, Hargreaves-Samani e Makkink. A evapotranspiração foi calculada pela seguinte equação: $ET = \sum_{i=1}^n (k_{ci} \cdot ETP_i \cdot Ar_i)$, onde ET é a evapotranspiração real da bacia (mm), k_{ci} é o coeficiente de cultura para a cultura i (adimensional), ETP_i é a evapotranspiração potencial para a cultura i (mm) e Ar_i é a área relativa da cultura i em relação à área total da sub-bacia (adimensional).

A precipitação anual medida foi de 1410,44 mm, estando 38% deste valor distribuído no mês de janeiro e 11% no período entre abril e setembro.

Utilizando o balanço hídrico, Barreto (2006) estimou uma recarga direta em 2005 em aproximadamente 400 mm, equivalente a 29% da precipitação. Através do mesmo método, estimou-se que a recarga profunda no mesmo ano variou entre 0 e 40 mm, correspondente a 3% do precipitado.

Conforme a Tabela 3, observa-se que os métodos utilizados para estimar a evapotranspiração forneceram resultados os mais diversos.

Tabela 3 - Comparação entre métodos

Método	Evapotranspiração na bacia (mm)	Evapotranspiração na sub-bacia (mm)
Penman-Monteith	1091,23	1081,50
Thorntwaite	944,16	935,69
Tanque Classe A	1412,94	1399,37
Hargreaves-Samani	1951,83	1933,58
Blaney-Criddle	1089,63	1078,75
Makkink	1014,40	1004,76

Dentre esses métodos, o de Thornthwaite foi o que apresentou resultados que mais se aproximam da evapotranspiração real na bacia.

Através do monitoramento do nível estático em locais com diferentes culturas, concluiu-se que, para solos cuja camada não-saturada é relativamente grande, o monitoramento quinzenal é suficiente. Em contrapartida, o monitoramento nessa mesma escala em poços onde o nível do aquífero está próximo à superfície pode não ser suficiente para representar a variabilidade temporal.

As medições de vazão se mostraram coerentes com os valores observados em anos anteriores e estimou-se que o escoamento de base equivale a 30% do total precipitado na bacia. Devido a modificações na seção de monitoramento após eventos chuvosos de maiores intensidades e bombeamento à jusante desta seção, os dados registrados pelo linígrafo não foram confiáveis, levando a concluir da necessidade de outros métodos de estimativa de vazão.

Através do método da variação da superfície potenciométrica, estimou-se a recarga direta para cinco valores de porosidade útil, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Estimativas de recarga

$S_y=10\%$	$S_y=13\%$	$S_y=15\%$	$S_y=20\%$	$S_y=25\%$
313,26 mm	407,24 mm	469,9 mm	626,53 mm	783,16 mm

Water Balance in the Guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring Wendland et al. (2007)

Neste trabalho, o objetivo foi estudar a infiltração e os mecanismos de recarga em zona de recarga do Aquífero Guarani. O estudo baseou-se na evapotranspiração, no monitoramento hidrogeológico e no balanço hídrico na bacia experimental do Ribeirão da Onça.

Foram utilizados os métodos do balanço hídrico e da Flutuação da Superfície Livre (WTF – *Water Table Fluctuation*) para estimar as recargas diretas e profundas. No método do balanço hídrico, as entradas são dadas pela recarga direta, calculada pelo método WTF, e as saídas são vazão de base e recarga profunda. No método WTF, a recarga direta é calculada como sendo o produto do rendimento específico pelo gradiente hidráulico.

Estimaram-se a recarga profunda e a variação de armazenamento subterrâneo a partir da análise da flutuação do nível estático. Para estimar a recarga direta, adotou-se a hipótese de que a recessão do nível freático obedece a uma função potencial. Calculou-se a recarga direta pela diferença entre o nível freático e o nível indicado pela curva de recessão extrapolada em um determinado período. O escoamento de base foi estimado através de uma função mista (linear e exponencial). A vazão foi medida com uma régua graduada e monitorada continuamente com um linígrafo.

Os resultados indicam que em média o volume de água no aquífero livre diminuiu ao longo do ano de estudo. Estimou-se que a infiltração em 2005 foi de 350 mm, enquanto que a recarga profunda, estimada pelo método do balanço hídrico, foi de 3,5% da precipitação (1410 mm). Pelo método WTF, a recarga direta variou entre 313 mm e 407 mm, equivalente a 22 – 29% da precipitação.

Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do ribeirão da onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada Gomes (2008)

A taxa de recarga profunda da Bacia do Ribeirão da Onça, por sua vez correspondente à contribuição da Bacia ao Aquífero do Guarani foi estimada por Gomes (2008). O autor realizou o balanço hídrico da zona saturada da Bacia, contabilizando a recarga direta pelo método WTF (*Water Table Fluctuation*). Para esse estudo foram utilizados seguintes dados hidrológicos para um período de 3 anos (2004 a 2007): Precipitação, vazão no exutório da Bacia e variação do nível de 9 poços. Através de ensaios em laboratório foram obtidos valores para o rendimento específico para o solo da Bacia. Como resultado foram encontrados valores de recarga profunda entre 1 e 2,4% do valor precipitado.

Estimativa da evapotranspiração a partir da variação de nível estático de aquífero Homobono (2008)

O principal objetivo deste estudo foi analisar a influência de eventos de precipitação e de características do solo nas variações do nível d'água de 11 poços localizados na Bacia do Ribeirão da Onça.

Com o auxílio de técnicas estatísticas de agrupamento, análise de séries temporais e análises de correlação, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Agrupamento de poços com características semelhantes;
- Definição dos períodos de elevação e declínio;
- Investigação sobre a sazonalidade das precipitações e variações do nível d'água;
- Análise da relação entre a dinâmica da precipitação e a variação dos níveis d'água;
- Investigação sobre a defasagem entre os eventos de precipitação e a elevação do N.A nos poços analisados.

Foram utilizados dados de precipitação da Estação Climatológica CRHEA-USP e dados de nível d'água de 12 poços espalhados pela Bacia referentes ao período de outubro de 2004 a setembro de 2008.

Os agrupamentos resultantes refletiram as características dos cultivos do solo, evidenciando a influência da porosidade e do coeficiente de evapotranspiração nos processos de movimentação da água subterrânea. Atenção especial deve ser dada ao entendimento de tais relações para as culturas de eucalipto, uma vez que os poços inseridos em tal meio não apresentaram as mesmas características de sazonalidade e autocorrelação que os outros poços.

Através da análise da correlação entre a variação do N.A, corrigida pela porosidade da região do poço, e a precipitação acumulada em períodos de elevação, a autora chegou à conclusão de que o processo de variação do N.A para os poços mais profundos parece ter uma correlação exponencial com os eventos de precipitação, uma vez que para poços mais rasos essa correlação parece ser linear. Foi verificada também uma defasagem de 10 a 20 dias entre os eventos de precipitação e elevação do nível.

Como recomendações propostas no estudo estão o estudo das correlações entre variações do N.A e outros processos físicos com a infiltração, aprofundamento do entendimento da influência das culturas no processo de variação do N.A e por fim um monitoramento contínuo dos demais fenômenos envolvidos no balanço hídrico.

Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça - Maldonado (2009)

Em estudos anteriores na BRO já havia sido notada a necessidade da adoção de um método preciso e que também coletasse valores de forma contínua do escoamento superficial na Bacia em questão.

Nesse estudo, o autor procurou analisar diferentes metodologias de quantificação da vazão através da instalação de uma seção de medição na calha do curso principal. As técnicas empregadas foram as seguintes: linígrafo, molinete, vertedor e bueiro. Também foi testada a viabilidade de um aparelho de medição de velocidade (Flo-Tote3, ou FT3) junto ao método das isotáquias.

Foram feitos testes em laboratório para se analisar o funcionamento dos equipamentos, além dos ensaios na Bacia. Entre as soluções propostas figuravam em primeiro plano a utilização de equações da hidráulica auxiliadas por medições de altura d'água feitas por um linígrafo e o método das isotáquias, auxiliado por medições de velocidade feitas pelo FT3. A conclusão que se chegou foi que esta última alternativa se apresentou viável para a medição das vazões na BRO.

CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados alguns dos trabalhos já realizados na Bacia do Ribeirão da Onça. Como discutido, esta bacia localiza-se por completo numa área de recarga do aquífero do Guarani, cuja importância estratégica como um grande reservatório de água subterrânea de fronteiras internacionais faz com que seja necessário um aprofundamento cada vez maior de seu comportamento. Os estudos hidrológicos realizados na a BRO se tornam, portanto, ferramentas fundamentais para este melhor entendimento.

Entre os estudos já realizados, figuram inicialmente as tentativas de quantificar cada elemento do ciclo hidrológico para a Bacia, através de balanços hídricos, tanto superficiais, quanto da região não saturada. Também foram realizados estudos de orientação mais ligada ao campo da hidráulica fluvial, embora o principal foco dos mesmos tenha se voltado, desde então, às águas subterrâneas.

Com o desenvolvimento de novas técnicas para as análises, foram realizados balanços hídricos baseados em novas metodologias sendo estes caracterizados por uma maior preocupação em se estimar as recargas tanto para o aquífero livre quanto para o profundo, o Guarani propriamente dito.

O crescente interesse em se estudar a BRO trouxe consigo a utilização de metodologias mais complexas, o que acarretou na necessidade de se quantificar as variáveis hidrológicas com maior

precisão. Reflexo disto é o aumento do número de poços perfurados na Bacia e também no desenvolvimento de técnicas mais confiáveis para a medição das vazões líquidas no curso principal.

Uma questão merecedora de destaque por vários autores é a relação existente entre os processos de recarga e o uso do solo na bacia. Foi verificado que a presença de diferentes cultivos resulta em diferentes grandezas de recarga e defasagens do nível d'água nos poços monitorados. Neste aspecto atenção especial foi dada à cultura de Eucaliptos, cujos resultados de análises destoam dos demais, indicando uma necessidade de estudos específicos para áreas com tal cultura. Este ponto é, portanto, merecedor de atenção nos próximos estudos a serem realizados na Bacia.

Destaca-se também a necessidade de desenvolvimento de pesquisas referentes ao monitoramento qualitativo das águas subsuperficiais, principal fonte de abastecimento da região, bem como do estudo de processos erosivos na bacia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, E. J. (2003). “*Emprego de infiltrômetros na caracterização da interação entre rio e aquífero*”. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

BARRETO, C.E.A.G. (2006) *Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos-SP.

CONTIN NETO, D. (1987) *Balanço hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do aquífero Botucatu*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

GOMES, L. H. (2008) *Determinação da recarga profunda na bacia piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico na zona saturada*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos-SP.

GOUVÊA, T. H. (2009). “*Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani*”. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

MALDONADO, L. H. (2009) *Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos-SP.

MILANI, D. M. (1992) *Análise da interação rio-aquífero em bacias hidrográficas e desenvolvimento de modelo numérico tridimensional* . Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

POMPÊO, C. A. (1989) *Balanço hídrico da zona não-saturado solo na Bacia do Ribeirão da Onça*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

QUEIROZ, O. M. (1991) *Propagação de cheias: aplicação do modelo onda cinemática ao Ribeirão da Onça-SP*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)- EESC/USP São Carlos-SP.

TANIKAWA, D. H. MANZIONE, R. L. (2010) *Análise temporal do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica em área de recarga do Aquífero Guarani*. Relatório Final - UNESP, Ourinhos/SP (Mapa de uso do solo).

UNESCO (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOME, L. H. (2007). “*Water Balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring*”. *Journal of Hydrology* 342, pp. 261 – 269.