

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz De Queiroz”**

Caracterização isotópica dos componentes do ciclo hidrológico em quatro sub-bacias pertencentes à bacia do rio Piracicaba (SP)

Carlos Eduardo Beduschi

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2008**

Carlos Eduardo Beduschi
Engenheiro Ambiental

Caracterização isotópica dos componentes do ciclo hidrológico em quatro sub-bacias
pertencentes à bacia do rio Piracicaba (SP)

Orientador:
Prof. Dr. LUIZ ANTONIO MARTINELLI

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ecologia Aplicada

Piracicaba
2008

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Beduschi, Carlos Eduardo

Caracterização isotópica dos componentes do ciclo hidrológico em quatro sub-bacias pertencentes à bacia do rio Piracicaba (SP) / Carlos Eduardo Beduschi. - - Piracicaba, 2008.

97 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Aquíferos 2. Bacia hidrográfica 3. Ciclo hidrológico 4. Isótopos estáveis 5. Rio Piracicaba 6. Variação isotópica I. Título

CDD 551.483

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus queridos pais,

Adelbar e Valderez,

OFEREÇO

À toda minha família, de sangue e de fé,

DEDICO

***“Into the sea all the rivers go and yet the sea is never filled,
and still to their goal the rivers go”***

(The Jerusalem Bible, citado por Gat, 1996)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli pela oportunidade, orientação e conhecimento compartilhado.

Ao Prof. Dr. Jorge Marcos de Moraes pela oportunidade, orientação, paciência e incentivo, em todos os sentidos, muito valiosos para toda a vida.

Ao Prof. Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto pela oportunidade, orientação, amizade, paciência e pelos “toques” para a vida toda.

À Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), pelo suporte financeiro para realização das campanhas de campo, e pelas análises laboratoriais.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de bolsa de estudos, indispensável à execução deste trabalho.

Aos amigos e companheiros Carlos Zacchi Neto, João Marcelo Elias, Ricardo Petrini, Rodrigo Campanha, Paulo Felipe, pela amizade, colaboração, incentivo e inúmeras conversas em busca de um objetivo em comum.

À minha amiga e companheira, Elizabethe, pela paciência, dedicação, apoio, sugestões, correções, e noites em claro juntos 😊.

A todos do laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP, que de alguma forma colaboraram ou acrescentaram para a realização deste trabalho, em especial, Caio, Bruno, Edmar, Gabi, Simone, Henrique, Jadson, Joba, Urso, Caramelo, Quindim, Sérgio, Vânia, Nei, Talita, Simoni, Natalia, Helen, Rodrigão, Tatiana, Fátima, Sandra, Uwe, Bruno, Eráclito, Eduardo, Michela, Zé Mauro, Yoko, Plínio, Jana, Luís Ricardo.

Aos técnicos do Laboratório de Ecologia Isotópica, Xanda, Gustavo, Fabiana, Geraldo e Tonica, pelas dicas e pelo apoio no campo e no laboratório.

Ao Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, em especial ao Prof. Pablo, pelo empréstimo do equipamento de perfuração.

Ao Laboratório de Solos da Escola de Engenharia de Piracicaba, em especial ao Prof. Paulo, Gustavo e Digão, pela ajuda na caracterização e análise granulométrica dos solos.

Aos proprietários das terras rurais onde se localizavam as estações de coletas e amostragens, pelas portas abertas e espaço cedido.

À Mãe Natureza, pela generosidade, beleza e sabedoria, que a todos acolhe independente de nossos atos e ações.

Aos meus queridos pais pelo amor, carinho, suporte e compreensão, sem os quais não poderia ter chegado até aqui.

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 DESENVOLVIMENTO.....	14
2.1 Revisão Bibliográfica.....	14
2.1.1 Isótopos estáveis da molécula de água.....	14
2.1.2 Escoamento de base (fluxo de base), tempo de residência médio (TRM) e o uso de isótopos em estudos hidrológicos.....	18
2.1.3 Comportamento hidrológico na bacia do rio Piracicaba.....	23
2.2 Material e Métodos.....	24
2.2.1 Área de Estudo.....	24
2.2.2 Modelo conceitual das vertentes estudadas.....	26
2.2.3 Sub-áreas de estudo selecionadas e algumas características.....	27
2.2.4 Discussões e testes de possíveis materiais dos tubos de revestimento e instalação dos poços de monitoramento do aquífero livre.....	34
2.2.5 Coletas mensais e quinzenais de água superficial, subterrânea e da precipitação.....	36
2.2.6 Metodologia Analítica.....	38
2.2.7 Determinação do tempo de residência médio da água (TRM).....	40
2.2.8 Dados de precipitação e vazão do período estudado.....	41
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.1 Variação do nível freático nas vertentes estudadas.....	54
3.2 Composição dos isótopos estáveis nas sub-bacias estudadas.....	58
4 CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS.....	85
ANEXO.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre valores de ^{18}O e δD de amostras de água de chuva (AIEA)...	17
Figura 2 - Localização da bacia do rio Piracicaba e seus principais rios formadores.....	26
Figura 3 - Modelo conceitual das vertentes estudadas.....	26
Figura 4 - Localização das subáreas de estudo dentro da bacia do Piracicaba.....	27
Figura 5 - a) Vista do ponto de coleta do rio Jaguarí e b) Vertente selecionada e poço doméstico (à direita) de coleta de água subterrânea, Morungaba, SP.....	28
Figura 6 - Vista geral de parte da sub-bacia de estudo e b) Vertente selecionada e poços de água subterrânea, Joaquim Egídio, SP.....	30
Figura 7 - Vista geral de parte da sub-bacia de estudo e b) Trecho final da vertente selecionada e poço de coleta de água subterrânea, Piracicaba, SP.....	31
Figura 8 - Vista de cima da vertente de estudo selecionada e b) Poço de coleta de água subterrânea, ESALQ, Piracicaba, SP.....	32
Figura 9 - a) Ponto de amostragem do rio Corumbataí e b) Vista de cima da vertente de estudo, rio Corumbataí, Piracicaba, SP.....	33
Figura 10 - a) Trado manual e b) Trado mecânico.....	35
Figura 11 - a) Coletor de precipitação composta desmontado e b) Coletor posicionado dentro da caixa térmica.....	38
Figura 12 - Curva obtida através do método de Dupla Massa para checar a consistência dos dados da estação D4 044, através da série histórica de 1986 a 2003..	42
Figura 13 - Totais mensais de precipitação (mm) para diferentes municípios da bacia do Piracicaba.....	44
Figura 14 - Hidrógrafa do rio Jaguari para o período de agosto de 2005 a abril de 2007, e precipitação diária para o período de agosto de 2005 a fevereiro de 2003.....	46
Figura 15 - Vazão estimada do ribeirão das Cabras no momento de coleta (agosto de 2005 a abril de 2007) e precipitação diária (agosto de 2005 a fevereiro de 2007.....	47
Figura 16 - Hidrógrafa do rio Atibaia no período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária no período de agosto de 2005 a fevereiro de 2007.....	49

Figura 17 - Vazão do ribeirão dos Marins na hora da coleta para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária para o período de agosto de 2005 a abril de 2007.....	50
Figura 18 - Hidrógrafa do rio Corumbataí para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária para o período de agosto de 2005 a abril de 2007.....	52
Figura 19 - Hidrógrafa do rio Piracicaba para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária para o período de agosto de 2005 a abril de 2007.....	53
Figura 20 - Variação média mensal do NA (m) nas vetentes do Jaguari, Cabras, Marins, Piracicaba e Corumbataí, e precipitação acumulada nos meses de agosto de 2005 a abril de 2007.....	57
Figura 21 - Sazonalidade da precipitação nas sub-bacias estudadas.....	61
Figura 22 - Efeito de quantidade (amount effect) da composição isotópica da precipitação nas subáreas A, B, C e D para o período de setembro de 2005 a março de 2007.....	62
Figura 23 - Variação da composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ para o período de agosto de 2005 a março de 2007 dos rios Jaguari, Atibaia, Corumbataí e Piracicaba e dos ribeirões Cabras e Marins.....	67
Figura 24 - Variação da concentração do $\delta^{18}\text{O}$ nas águas do rio Piracicaba (período: agosto de 2005 a março de 2007).....	67
Figura 25 - Variação do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea não confinada nas vertentes do rio Jaguari, ribeirão das Cabras, ribeirão dos Marins, rio Corumbataí e rio Piracicaba.....	72
Figura 26 - Valores de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e LML no Jaguari, Cabras e Atibaia.....	77
Figura 27 - Valores de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e LML no Marins, Corumbataí e Piracicaba.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação do NA (m) nos poços de monitoramento das sub-bacias estudadas.....	55
Tabela 2 - Média ponderada do $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e volume acumulado (mm) da precipitação composta nas sub-bacias A, B, C e D.....	59
Tabela 3 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão (Desv. Pad.) e número de amostras (n) do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “ d ” da precipitação (período: setembro de 2005 a março de 2007).....	60
Tabela 4 - Valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “ d ” das águas superficiais (período: agosto de 2005 a março de 2007) na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.....	66
Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$ e excesso de deutério (“ d ”) dos diferentes pontos de amostragem de água subterrânea não confinada na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.....	70
Tabela 6 - Valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ (precipitação, poços e nascentes) e suas amplitudes (A), TRM (meses e anos) e n amostral.....	80

RESUMO

Caracterização isotópica dos componentes do ciclo hidrológico em quatro sub-bacias pertencentes à bacia do rio Piracicaba (SP)

Este projeto teve como objetivo investigar a variação isotópica do oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e do hidrogênio (δD) de aquíferos subterrâneos rasos (não confinados) em quatro regiões onde foram definidas transecções, partindo do canal principal em direção ao topo da vertente. As transecções foram estabelecidas no gradiente topográfico encontrado, em quatro sub-bacias ao longo da bacia hidrográfica do rio Piracicaba. Esta região possui uma população de aproximadamente 3,5 milhões de habitantes e uma economia baseada na agricultura e na indústria. Baseando-se em estudos anteriores sobre a variação isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ e δD das águas das chuvas e dos rios (Martinelli et al. 2004), onde foi identificada uma sazonalidade nos dados e variações possivelmente associadas à utilização da água em áreas urbanas (uso industrial), os estudos foram estendidos para as fontes de águas subterrâneas (fluxo de base) para o canal principal (rio Piracicaba). A sazonalidade definida por um verão chuvoso (novembro – abril) e inverno seco (maio – outubro) foi coberta com amostragens mensais (final do período seco de 2005; período chuvoso de 2005-2006 e seco de 2006) e quinzenais (período chuvoso 2006-2007) das águas da chuva, de poços rasos, nascentes e rios que drenam as sub-bacias estudadas. Os valores do $\delta^{18}\text{O}$ e do δD encontrados na precipitação acumulada entre coletas nas sub-áreas apresentaram maiores variações (extremos; $\delta^{18}\text{O}$ médio de $-0,4$ a $-13,0\text{‰}$) quando comparados aos valores das águas superficiais ($\delta^{18}\text{O}$ médio de $-5,1$ a $-9,2\text{‰}$) e subterrâneas ($\delta^{18}\text{O}$ médio de $-6,9$ a $-7,1\text{‰}$), sendo que as últimas (poços rasos e nascentes) apresentaram variações ainda menores ao longo do período estudado. A precipitação e o escoamento de base possuem composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ relativamente distintas, uma vez que a média ponderada da precipitação ($-8,6\text{‰}$ observada para o período estudado) foi diferente dos valores médios encontrados nas águas subterrâneas não confinadas ($-7,0\text{‰}$ em média). O escoamento superficial para o canal principal (rio Piracicaba) teve seu valor isotópico influenciado pela precipitação no período das chuvas (podendo apresentar variações dentro deste período), caso contrário, os sinais isotópicos das águas superficiais seriam mais semelhantes aos sinais isotópicos encontrados no fluxo de base, caracterizando a contribuição deste na manutenção das menores vazões. Contudo, observou-se que o valor médio do $\delta^{18}\text{O}$ de todos os rios e ribeirões estudados ($-5,7\text{‰}$) foi cerca de $1,2\text{‰}$ mais enriquecido do que o valor médio dos poços e nascentes ($-6,9\text{‰}$), no período seco. As amplitudes do $\delta^{18}\text{O}$ encontradas na precipitação e água subterrânea não confinada foram utilizadas em estimativas do tempo de residência médio da água no aquífero livre como uma primeira aproximação.

Palavras-chave: Bacia do rio Piracicaba; Caracterização; Fluxo de base, Monitoramento; Variação isotópica, $\delta^{18}\text{O}$, δD .

ABSTRACT

Isotope characterization of the hydrologic cycle components in four sub-basins of the Piracicaba river basin (SP)

This project had the objective to investigate the oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) isotopic variation of shallow unconfined aquifers in four regions, in transects defined from the river to the limit of the drainage area. The transects were established within a topographical gradient in four sub-catchments of the Piracicaba river hydrographic basin. The population in this basin is almost three and a half millions inhabitants and an economy based on agriculture and industry is responsible for about 10% of the total Brazilian gross production. Based on a well documented isotopic variation of rainwater and river water done previously (Martinelli et al. 2004), where data seasonality and a possible variation related to water use in urban areas were identified, the studies were extended to the groundwater (baseflow) sources to the major channel (Piracicaba river) of the basin. The seasonality defined by a wet summer (november – april) and a dry winter (may – september) was covered with monthly (end of dry season of 2005; rainy season of 2005-2006 and dry season of 2006) and every two weeks sampling (rainy season 2006-2007) of rain water, shallow wells, springs and surface water (rivers) that drain the studied sub-basins. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD individual values of composite precipitation in the studied sub-areas presented higher variation (extreme values; mean $\delta^{18}\text{O}$ from $-0,4$ to $-13,0\text{‰}$) when compared to the values found for surface water (mean $\delta^{18}\text{O}$ from $-5,1$ to $-9,2\text{‰}$) and groundwater (wells and springs; mean $\delta^{18}\text{O}$ from $-6,9$ a $-7,1\text{‰}$), being the values of groundwater almost constant within the studied period. Precipitation and baseflow have relative different isotopic composition of $\delta^{18}\text{O}$, once the weighted average of precipitation ($-8,6\text{‰}$ observed for the whole studied period) is different from the average values found for unconfined groundwater ($-7,0\text{‰}$ in average). Values of surface runoff to the main channel (Piracicaba river) were similar to those found in precipitation in the rainy season (presenting variations within this period), otherwise, the isotopic signals of surface water were rather more similar to those found in baseflow, characterizing the contribution of baseflow in the lower flows. However, average value of $\delta^{18}\text{O}$ of all rivers and streams studied ($-5,7\text{‰}$) were about $1,2\text{‰}$ more enriched than the average value of wells and springs ($-6,9\text{‰}$) in the dry season. The amplitudes of $\delta^{18}\text{O}$ found in precipitation and groundwater were used as a first approximation to estimate mean residence time of unconfined groundwater.

Keywords: Piracicaba basin; Characterization; Baseflow; Monitoring; Isotopic variation $\delta^{18}\text{O}$, δD .

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Piracicaba é uma das regiões mais desenvolvidas do país responsável por cerca de 10% do produto bruto primário brasileiro (MARTINELLI et al., 2004). Os rios e ribeirões são as principais fontes de água de grande parte dos núcleos urbanos pertencentes a essa região, além do freqüente uso de poços e nascentes como principal fonte de água nas áreas rurais. O uso da água nessa bacia é intenso e as previsões futuras são de escassez devido principalmente ao crescimento populacional desordenado e a progressiva deterioração na qualidade de seus recursos hídricos (COMITÊ PCJ, 2007).

Essa bacia possui essencialmente duas regiões com características topográficas bastante distintas: a porção leste mais acidentada e a região central dominada por terras baixas e topografia mais plana. As diferenças na topografia definem aspectos particulares no sistema de drenagem de cada região da bacia, mudando de uma densa rede de drenagem na região leste, para uma menor densidade de canais na parte central e oeste (BALLESTER et al., 2001). Os padrões topográficos e diferentes regimes de precipitação ao longo da bacia podem determinar diferenças importantes no tempo de residência da água nos diversos compartimentos do sistema, definidos genericamente como: água subterrânea rasa (aqüífero freático), água subterrânea profunda (aqüífero confinado), e água do solo.

A bacia supracitada vem sendo investigada através de vários projetos científicos, incluindo estudos biogeoquímicos (MARTINELLI et al., 2002), hidrológicos (PELLEGRINO et al., 2001; MORAES et al., 1998, 2003; SCHULER, 2000; GUANDIQUE et al., 2004; entre outros) e processos de mudança do uso da terra (BALLESTER et al., 2001, OMETTO, 2001). Martinelli et al. (2004), analisando a distribuição dos isótopos da molécula da água (D e ^{18}O) nas águas das chuvas e dos principais rios sugeriram a utilização da composição isotópica para monitorar a situação hidrológica na bacia.

A composição química da água é essencialmente o resultado da interação entre a água e o solo ao longo do tempo (SKLASH e FARVOLDEN, 1979; HALDORSEN et al., 1997; KENDALL e McDONNELL, 1996; ASANO et al., 2002). Desta forma, determinar as origens em escala temporal e espacial dos componentes do escoamento,

e conseqüentemente o tempo de residência da água no sistema de drenagem, é essencial para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica em uma bacia de drenagem.

Adicionalmente, um completo entendimento sobre as interligações entre os diferentes compartimentos do ciclo hidrológico é essencial para uma melhor conservação e manejo dos recursos hídricos da bacia do rio Piracicaba.

Com isto, o objetivo proposto no presente estudo foi avaliar a importância da água subterrânea como fonte de água para os principais rios da bacia, caracterizando sua dinâmica temporal e espacial pelo uso dos isótopos estáveis da molécula da água.

Para alcançar este objetivo monitorou-se a precipitação, a água subterrânea não confinada, o escoamento de base em quatro áreas e o escoamento superficial em seis regiões da bacia do rio Piracicaba.

As hipóteses levantadas neste trabalho foram: (i) a precipitação e o escoamento superficial possuem composições isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e δD) semelhantes; (ii) a precipitação e o escoamento de base possuem composições isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e δD) significativamente diferentes; (iii) a composição isotópica do lençol freático varia ao longo de uma toposequência; (iv) o tempo de residência da água no lençol freático modifica a composição isotópica deste compartimento.

O presente estudo se inseriu no projeto “Base Flow Study At Piracicaba River Basin, South East Brazil”, financiado pela “Agência Internacional de Energia Atômica” (AIEA) como parte do Coordinate Research Program (CRP) “Isotopic age and composition of streamflow as indicators of groundwater sustainability”, com bolsa de Mestrado concedida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Proc. FAPESP nº 04/12169-0).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Isótopos estáveis da molécula de água

Os isótopos de determinado elemento químico são caracterizados por seus diferentes números de massa e mesmo número atômico (igual número de prótons e diferente número de nêutrons). De acordo com Gat (1981), o termo *isótopos* foi introduzido por Soddy (1913) para nuclídeos que ocupavam a mesma posição na tabela periódica, mas que se diferenciavam nas propriedades nucleares. No caso das moléculas de água, os isótopos estáveis do elemento hidrogênio são o H (hidrogênio) e ^2H (conhecido como deutério, comumente representado por D); já para o oxigênio os isótopos estáveis são o ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O . Desta forma, as possíveis espécies isotópicas estáveis da água podem ser: H_2^{16}O , HD^{16}O , D_2^{16}O , H_2^{17}O , HD^{17}O , D_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{18}O e D_2^{18}O (GAT, 1981).

Normalmente, os isótopos estáveis da molécula de água utilizados em estudos ambientais e hidrológicos são o ^{18}O e o ^2H . A relação entre o isótopo mais raro (mais pesado) e o mais abundante (mais leve) é expressa pela composição isotópica (R):

$$R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \quad \text{ou} \quad R = \frac{D}{H} \quad (1)$$

O desvio da razão R , com relação a um padrão define a notação “ δ ‰” (delta por mil), que é expressa da seguinte maneira:

$$\delta = \left\{ \frac{R_{amostra} - R_{padr\tilde{a}o}}{R_{padr\tilde{a}o}} \right\} * 1000 \quad (2)$$

O oceano, sendo o maior reservatório de água e por ser relativamente homogêneo, foi escolhido como o padrão de referência para a escala δ (delta) do oxigênio e do hidrogênio (CRAIG, 1961). O padrão internacional atualmente utilizado para o oxigênio (^{18}O) e hidrogênio (D) é o Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW), uma mistura de água de cinco oceanos, de composição isotópica (R) $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=0,002000520$, para o oxigênio, e $D/H=0,00015576$, para o hidrogênio. Valores

positivos do δ significam um enriquecimento em relação ao padrão, enquanto valores negativos representam um empobrecimento.

O estudo do ciclo natural dos isótopos estáveis da água na natureza se confunde com o estudo do próprio ciclo hidrológico. O ciclo da água é basicamente regido por dois fenômenos físicos: a condensação e a evaporação (MARTINELLI et al., em prep.). A radiação solar é responsável pela evaporação das águas dos oceanos, mares, lagos ou rios. A condensação é a passagem de água do estado de vapor para líquido, que ocorre na atmosfera, mais especificamente nas nuvens, podendo sofrer influências das massas de ar, altitude e da topografia (ODUM, 1988). Mudanças da composição isotópica da água dentro do ciclo hidrológico provêm uma assinatura reconhecível, relacionando essas águas às diferentes fases do ciclo (GAT, 1996).

Na maioria das vezes, observa-se que mudanças de fase da água levam a um fracionamento isotópico. Ou seja, uma das fases ficará isotopicamente mais leve (empobrecida), enquanto a outra ficará isotopicamente mais pesada (enriquecida). Na condensação, o fracionamento isotópico é dependente da temperatura, sendo que quanto menor a temperatura, maior será o fracionamento (GAT, 1981). Os fracionamentos isotópicos que acompanham a evaporação do oceano e águas superficiais e o processo contrário, de formação de chuvas, exemplificam as mudanças mais notáveis. Como resultado, as águas meteóricas (precipitação) têm menores concentrações de isótopos pesados ^{18}O e ^2H , em relação às águas oceânicas, sendo que a água remanescente em sistemas que sofrem evaporação, como lagos, é relativamente enriquecida (GAT, 1996), enquanto as águas do solo e de subsuperfície “herdam” as características isotópicas das águas meteóricas, apresentando pouca alteração, exceto quando resultado da mistura de águas com diferentes composições (i.e., mistura da água da chuva com água de sistemas que sofrem evaporação) (YUTSEVER e GAT, 1981). Segundo Gat (1996), durante a passagem através dos aquíferos (temperatura ambiente), a composição isotópica da água é uma propriedade conservativa. Porém, sob altas temperaturas e interações com a matriz rochosa, a água pode ter sua composição alterada.

Dansgaard (1964) identificou quatro parâmetros relacionados ao grau de empobrecimento nos valores isotópicos da precipitação: (i) o “efeito de altitude”,

caracterizado por valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mais leves com o aumento da altitude, devido à redução da temperatura; (ii) o “efeito de continentalidade” (distância da costa), caracterizado por valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mais leves pelo deslocamento das massas de ar para o interior do continente, sofrendo sucessivos processos de evaporação e condensação, ficando cada vez mais leves, bem como a provável mistura que a massa de água sofre ao se mover em direção ao interior do continente recebendo vapor d’água de composição isotópica mais leve, decorrente dos processos evaporativos continentais; (iii) o “efeito de latitude”, caracterizado por valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mais leves na medida em que as latitudes aumentam, associados basicamente às diferenças de temperatura e; (iv) o “efeito de quantidade” (amount effect), caracterizado por valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mais leves quanto maiores forem as quantidades precipitadas, ou seja, ocorre um efeito inverso em relação ao volume de chuva. As principais causas do efeito de quantidade podem estar associadas: com uma maior quantidade de água sendo condensada, haveria um resfriamento mais elevado nas nuvens, aumentando o valor do fracionamento isotópico entre a chuva e o vapor de origem; na época seca há uma maior intensidade de troca isotópica com o ar atmosférico, enriquecendo isotopicamente as gotas de chuva; na época seca as gotas de chuva podem sofrer evaporação no percurso até o chão, ficando assim mais enriquecidas (MARTINELLI et al., em prep.).

De acordo com Craig (1961), citado por Gat (1996), foi observado que desde as medidas mais antigas das abundâncias isotópicas, amostras de águas naturais são empobrecidas nos isótopos pesados. A maneira usual de apresentar os dados isotópicos de amostras de água é em diagrama de δD versus $\delta^{18}\text{O}$. Desta forma, uma correlação entre o empobrecimento do deutério e do oxigênio 18 em águas naturais foi estabelecida. A linha de tais amostras em δ -espaço foi definida como:

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 (\text{‰}) \quad (3)$$

Essa linha é conhecida como a Linha Meteórica Global (Global Meteoric Water Line (GMWL) (CRAIG, 1961, citado por GAT 1996). As amostras de chuva coletadas nos mais diferentes locais do globo caem sobre essa reta (Figura 1).

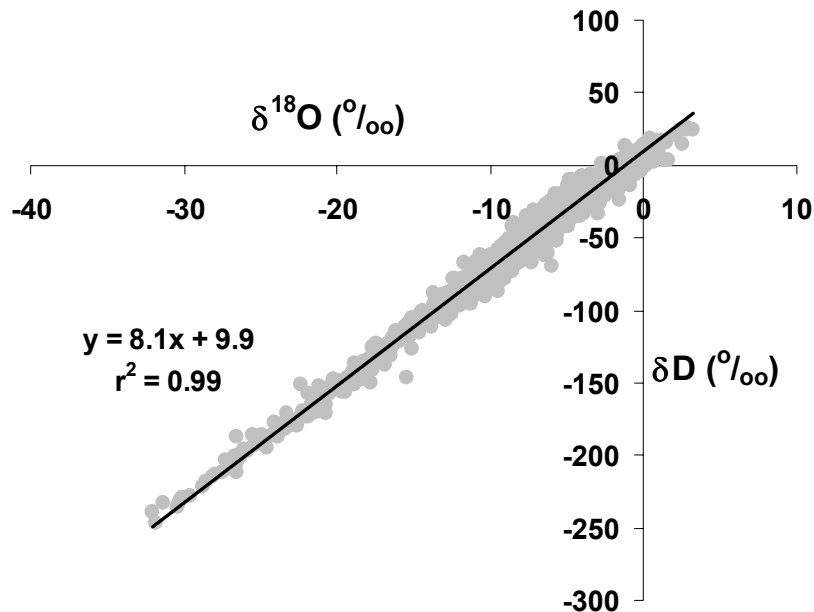


Figura 1 - Relação entre valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD de amostras de água de chuva coletadas em vários locais do mundo de 1978 a 2001 pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Fonte: Martinelli et al., em preparação

Graficamente essa equação representa uma reta de inclinação igual a 8, sendo o intercepto com o eixo Y igual a 10. O fato de a GMWL ter intersecção próxima de 10 significa que a evaporação nos oceanos ocorre em condições de não equilíbrio. Caso nenhum processo altere a composição isotópica da chuva depois de formada, a sua composição isotópica variará em cima da reta meteórica mundial (MARTINELLI et al., em prep.).

Os dados isotópicos da precipitação marinha, coletados pela AIEA em estações localizadas em ilhas e embarcações marinhas, mostraram que o vapor da água sobre o oceano não é uniforme e que um valor isotópico médio para a precipitação marinha é $\delta^{18}\text{O} = -3\text{‰}$ e $\delta\text{D} = -14\text{‰}$ (GAT, 1996). De acordo com o mesmo, na medida em que o ar marinho move-se ao longo da costa e para dentro dos continentes, as diferentes parcelas de ar parecem se misturar e homogeneizar, resultando em precipitação que está proximamente alinhada ao longo da GMWL.

Através das concentrações do $\delta^{18}\text{O}$ e δD do vapor d'água atmosférico e da precipitação, Salati et al. (1979) identificaram que a fonte primária de vapor d'água para a bacia Amazônica é proveniente do Oceano Atlântico (valores isotópicos enriquecidos), sendo levado pelos ventos alísios. Porém, de acordo com os mesmos, dados isotópicos do vapor atmosférico comparados ao total de precipitação indicam um mecanismo de reciclagem interna do vapor d'água, isto é, a chuva cai, evapora-se, condensa-se e precipita-se novamente, numa sequência de ciclos.

Dansgaard (1964) nomeou o intercepto da GMWL com o eixo Y de "deuterium excess" (excesso de deutério), representado pela letra "d". O excesso de deutério ("d") é calculado através da fórmula a seguir:

$$"d" = \delta\text{D} - 8 * \delta^{18}\text{O} \quad (4)$$

O valor "d" pode ser interpretado como a intersecção de um ponto no diagrama δD versus $\delta^{18}\text{O}$ que obrigatoriamente teria uma inclinação igual a 8. Valores do excesso de deutério maiores que 10 seriam indicativos da presença de uma água que já tenha passado por processos sucessivos de evaporação (MARTINELLI et al., em prep.). Segundo Martinelli et al. (1996), todos os valores do excesso de deutério da precipitação na Região Norte do Brasil são maiores que 10. De acordo com os mesmos, esse fato se deve à imensa área coberta por água na região Amazônica sujeita à evaporação, não somente rios, lagos e planícies inundáveis, mas também devido à grande quantidade de água que fica retida por interceptação nas copas das árvores. Para a bacia do Rio Piracicaba, o excesso de deutério da precipitação medido entre os anos de 1997 e 1998 apresentaram valores ligeiramente acima da GMWL, variando de $14,4 \pm 0,8\text{‰}$ (estação seca) a $12,2 \pm 0,6\text{‰}$ (estação chuvosa) (MARTINELLI et al., 2004).

2.1.2 Escoamento de base (fluxo de base), tempo de residência médio (TRM) e o uso de isótopos em estudos hidrológicos

A água em córregos possui dois componentes principais: escoamento rápido de superfície e subsuperfície, associados a eventos de precipitação; e escoamento de

base, que define a água que entra no corpo superficial lentamente, por fontes variadas, e que mantém a vazão entre eventos de entrada de água pela atmosfera (DINGMAN, 2002). O escoamento de base geralmente procede do aquífero freático contendo água com menos de 50 anos de idade, profundidades entre 10 e 100m (SEILER e LINDNER, 1995) e entra no rio através de seu dique e pelo fundo do leito (WITTENBERG e SILVAPALAN, 1999), bem como através do afloramento na superfície do solo (nascentes). A vazão de base pode também derivar da drenagem de lagos ou áreas alagadas e ainda contribuir para o escoamento rápido. O escoamento de base em rios pode aumentar ou diminuir com a distância rio abaixo, dependendo da distribuição das zonas de recarga e descarga e fontes junto aos rios. Os aquíferos freáticos afetam diretamente a flutuação da vazão dos rios, fazendo com que rios ou córregos que recebem quantidades significativas de escoamento de base tenham variabilidade temporal da vazão relativamente baixa, provendo uma fonte de água mais estável (SEIBERT et al., 2003). Em termos de disponibilidade de recurso para consumo, o escoamento de base é considerado um integrador descritivo da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos de uma bacia hidrográfica (KENDALL e COPLEN, 2001).

O escoamento de base, portanto, é reconhecido como uma variável importante de diagnóstico na parametrização de modelos climáticos e hidrológicos (DÖLL et al., 2003). No entanto, há a necessidade de estudos mais aprofundados sobre como mudanças neste escoamento modificarão a dinâmica da água em bacias hidrográficas de maior escala, já que em grande parte os estudos associados ao escoamento de base contemplam micro bacias (IAEA, 2004). Questões como qualidade e disponibilidade de água, estabilidade ecológica e riscos à saúde humana estão diretamente relacionadas a um diagnóstico consistente da disponibilidade hídrica (IAEA, 2004). Na Conferência do Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas em 1992 no Rio de Janeiro (Eco 92), foi adotado um plano de ação (Agenda 21) que identificou o conhecimento hidrológico como base para tomada de decisão.

Dentro deste contexto a definição do tempo de residência da água em um reservatório subterrâneo é de suma importância (ALLEY et al., 1999). O tempo de residência médio (TRM), ou “idade” da água na bacia, é o tempo médio que a água

gasta no solo antes de atingir um determinado ponto (MALOSZEWSKI e ZUBER, 1982). Estimativas do TRM da água subterrânea são indispensáveis para o entendimento dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, além de auxiliarem na compreensão da susceptibilidade à contaminação da água subterrânea e no entendimento do movimento de contaminantes através do aquífero, desde áreas de recarga até pontos de descarga em nascentes, córregos e lagos (PHILLIPS et al., 1999). Os TRMs também regulam o potencial de decaimento dos contaminantes e o tempo de resposta da melhoria das práticas de manejo possivelmente adotadas, sendo ainda necessários para a caracterização de processos biogeoquímicos em subsuperfície (REDDY et al., 2006).

Muitas bacias hidrográficas dependem do compartimento de água subterrânea como principal fonte de água para abastecimento, assinalando mais uma vez a importância do TRM. Água potável em bacias rurais muitas vezes é proveniente de água subterrânea superficial (poços domésticos e nascentes) que deveria ter um TRM suficiente para garantir características adequadas e remoção de patógenos. A avaliação de possíveis impactos à qualidade da água subterrânea decorrente de disposição de resíduos necessita de estimativas precisas do TRM. Por exemplo, para a localização de um aterro sanitário é necessário a compreensão do tempo de residência médio da água subterrânea naquele sistema. Além disso, são extremamente importantes em pequenas bacias que possuem fossas sépticas e sumidouros, que utilizem intensivamente agro-químicos (pesticidas e fertilizantes), ou onde a água subterrânea não confinada (poços e nascentes) é utilizada como fonte de água potável (REDDY et al., 2006).

Os isótopos estáveis ^{18}O e ^2H , e mais raramente os isótopos radioativos ^3H e ^{35}S , têm sido o principal suporte nos últimos anos para estimar o TRM da água existente em bacias de drenagem (McGUIRE et al., 2002), nascentes (MALOSZEWSKI et al., 2002), vertentes (ASANO et al., 2002) ou água subterrânea (MALOSZEWSKI et al., 1996). Estas aproximações são tipicamente baseadas nos modelos de distribuição do tempo de residência apresentados por Kreft e Zuber (1978), Maloszewski e Zuber (1982), e Zuber (1986^a). Muitas aplicações da hidrologia isotópica são relativas a estudos de curto período e eventos individuais de precipitação (storm events), os quais

tentam estabelecer a importância dos vários caminhos hidrológicos que contribuem para o escoamento superficial como resposta a eventos de precipitação (HOOPER e SHOEMAKER, 1986; McDONNELL et al., 1991; NEAL et al., 1997). Mais recentemente, diversos estudos do comportamento isotópico em períodos maiores de tempo, como os de um ou mais anos hidrológicos, foram publicados (UNNIKRISHNA et al., 1995; VITVAR e BALDERER, 1997; SOULSBY et al., 2000; MARTINELLI et al., 2004; REDDY et al., 2006). Estes estudos plurianuais apresentam vantagens, tais como a percepção de variabilidades interanuais nos processos hidrológicos e meios de estimar o tempo de residência médio da água em importantes compartimentos hidrológicos (MALOSZEWSKI et al., 1983; RAMSPACHER et al., 1992). Pode-se citar também, estudos que utilizaram a composição isotópica da água para estudar o escoamento de córregos, investigar a dinâmica sazonal da água do solo, e caracterizar o escoamento decorrente de derretimento de neve na primavera (DINCER, 1968; GAT, 1981; KENDALL e McDONNELL, 1998; KENDALL e DOCTOR, 2004)

Segundo Reddy et al. (2006), a caracterização do movimento e distribuição da água nos diferentes compartimentos hidrológicos é essencial para entender o destino e transporte de constituintes solúveis num sistema água superficial/subterrânea. De acordo com o mesmo autor, aplicações da composição isotópica e sua variação sazonal, utilizadas como ferramentas para descrever a distribuição da água em uma bacia, empregam a observação de que as composições isotópicas das águas superficiais e subterrâneas variam sazonalmente em resposta a variação da composição isotópica sazonal da precipitação.

O ^{18}O é um ótimo traçador para caracterizar processos hidrológicos por ser um constituinte natural da molécula de água e o $\delta^{18}\text{O}$ pode ser confiavelmente medido e facilmente amostrado nos diferentes compartimentos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Dados isotópicos plurianuais da precipitação (input), água superficial e subterrânea, em áreas de pesquisa bem instrumentadas, podem auxiliar significativamente na compreensão do movimento e distribuição da água nos diferentes compartimentos hidrológicos (REDDY et al. 2006).

Diferentes autores discutiram o uso e aplicação do $\delta^{18}\text{O}$ para estudos dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas (DINCER, 1968; SALATI et al., 1979;

GAT, 1981; GONFIANTINI, 1986; KENDALL e DOCTOR, 2004; SOULSBY et al., 2000). Craig (1961) compilou o conteúdo isotópico na água de chuva, de rio e subterrânea, e demonstrou o efeito do enriquecimento evaporativo e interações água-rocha nos desvios da composição isotópica da água do rio e da água da linha meteórica global (GMWL). Essa informação e metodologia foram integradas em pesquisas ao longo do eixo longitudinal de rios de maior escala, permitindo a identificação de águas de recarga isotopicamente enriquecidas devido a efeitos evaporativos em lagos, córregos, canais de drenagem e áreas de várzea (McKENNA et al., 1992; SIMPSON e HERCZEG, 1991), além de águas isotopicamente alteradas pelo uso em irrigação, especialmente em áreas áridas (FRIEDMAN et al., 1992). Schlosser et al., (1988) demonstraram o uso de ^3H e ^3He , e Ellins et al., (1990) mostraram o uso de ^{222}Rn para estudar a fuga de água do rio para o aquífero freático e definir as zonas de retirada e infiltração ao longo do eixo longitudinal dos rios. Solomon et al., (1993) utilizaram a razão entre $^3\text{He}/^3\text{H}$ para identificar as velocidades de recarga e tempo de residência da água recarregada em zonas onde o escoamento de base do rio flui para o aquífero adjacente. Analogamente, a fonte e tempos de residência de infiltração da água subterrânea para córregos foram avaliados com o uso de clorofluorcarbonos por Modica et al., 1998.

Diversos estudos documentaram aumentos de recargas em aquíferos freáticos localizados em áreas desenvolvidas (FOSTER et al., 1998), isto devido a vazamentos nos dutos de água de abastecimento e galerias pluviais (LERNER, 2002), além de lixiviamento de áreas de tratamentos sépticos (SHERLOCK et al., 2002). Essas descobertas aparentemente contradizem a visão comum de bacias urbanas como fontes de elevado escoamento rápido em áreas impermeáveis (HIRSCH et al., 1990) e indicam uma necessidade substancial de investigações mais abrangentes dos processos em bacias desenvolvidas. Diferentes estudos proveram informações da contribuição do nitrato da precipitação e da nitrificação microbológica (BURNS e KENDALL, 2002), da denitrificação microbológica em aquíferos freáticos (BÖTTCHER et al., 1990), do vazamento de fossas sépticas e resíduo animal (ARAVENA et al., 1993), e do nitrogênio natural do solo em fertilizantes e resíduos (KREITLER e BROWNING, 1983). Isótopos de solutos como o ^{87}Sr e o ^{210}Pb se tornaram ferramentas para identificação da evolução e origem das águas do rio através da investigação das

reações do intemperismo ao longo dos caminhos da água dentro da bacia hidrográfica (BULLEN et al., 1992; BULLEN et al., 1996).

A expansão de aplicações isotópicas em uma variedade de processos relacionados à bacia hidrográfica, mostra que na natureza nenhum dos isótopos ambientais conhecidos é capaz de responder todas as questões per se, ou seja, cada um possui vantagens e limitações em comparação aos outros. Em consequência, tendências recentes indicam um crescimento contínuo em estudos multi-isotópicos. Segundo Soulsby et al. (2000) estudos multi-isotópicos de períodos mais longos (superiores a um ano hidrológico) ainda são necessários para uma melhor compreensão dos processos envolvidos no movimento da água e poluentes em uma bacia hidrográfica, podendo ser utilizados como uma ferramenta de gerenciamento.

2.1.3 Comportamento hidrológico na bacia do rio Piracicaba

A análise dos dados de precipitação em termos espaciais na bacia do rio Piracicaba foi tema de alguns estudos. Cristofolletti (1991), objetivando uma regionalização da precipitação sobre a bacia do Piracicaba, fez o traçado de isolinhas, do seu desvio padrão e coeficiente de variação. Através dessas cartas o autor procurou fazer a separação em regiões homogêneas quanto a esses parâmetros, embora essa amplitude de variação dos dados não fosse muito grande. Prochnow (1981) utilizou o método de Thiessen como forma de espacializar e estimar a lâmina média de água, porém não elaborou mapas de isoietas. Pellegrino (1995), além da distribuição espacial da precipitação calculou a evapotranspiração, através de um balanço hídrico e estudou as variações temporais dos parâmetros hidrometeorológicos. Moraes et al. (1997, 1998) estudaram as variações temporais dos componentes do ciclo hidrológico e realizaram uma análise de intervenção, onde mostraram que existe uma diminuição estatística significativa da vazão dos rios Atibaia, Jaguari e Piracicaba, de 24 %, 52% e 21 %, respectivamente, devido à retirada de água pelo Sistema Cantareira para o abastecimento da Grande São Paulo. Groppo et al. (2001), mostraram através da análise de tendências temporais, que existe uma diminuição estatisticamente significativa nas vazões médias desses rios, enquanto a precipitação do mesmo período aumentou.

Schuller et al. (2000) trabalharam com modelagem hidrológica nas cabeceiras do Rio Corumbataí. Nesse mesmo rio, Salati (1996) realizou um diagnóstico ambiental sintético e da qualidade da água como subsídio para o planejamento regional. A qualidade da água em toda a bacia do rio Piracicaba foi abordada em estudo de Martinelli et al. (1999).

Martinelli et al. (2004) utilizaram a composição isotópica do oxigênio e do hidrogênio para caracterizar os processos hidrológicos (precipitação e escoamento de rios) na bacia do Piracicaba. Esses autores identificaram uma sazonalidade da precipitação ao longo do ano, onde valores maiores dos isótopos da chuva foram medidos na estação seca e valores menores na estação chuvosa. Os mesmos também identificaram uma sazonalidade nas águas superficiais (principais rios da bacia), sendo o valor isotópico dessa componente do ciclo hidrológico influenciado pela precipitação no período das chuvas. Através da análise do excesso de deutério (“*d*”) das amostras de água dos rios, os mesmos identificaram uma alteração na composição isotópica dessas águas devido a atividades antropogênicas (uso industrial). Decorrente dos resultados obtidos, os autores sugerem o uso dos isótopos estáveis da água no monitoramento hidrológico desta bacia hidrográfica, nos seus diferentes compartimentos.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba (12.400 km²) está localizada na região sudeste do Brasil, entre as latitudes de 22° e 23° Sul (Figura 2). Possui três sub-bacias principais: do rio Jaguari (3400 km²), do rio Atibaia (3000 km²) e a do rio Piracicaba (5000 km²), formado pela junção dos dois primeiros. Essa bacia apresenta uma extensão da ordem de 370 km, desde suas cabeceiras na Serra da Mantiqueira, em Minas Gerais, até sua foz. O rio Piracicaba tem em média 50m de largura e sua bacia ocupa 4,7% do total ocupado pelo conjunto das oito zonas hidrográficas existentes no Estado de São Paulo (DAEE, 1986), sendo um dos principais afluentes do rio Tietê. A variação na hidrógrafa do rio geralmente acompanha a sazonalidade observada nas

chuvas, sendo geralmente as menores vazões observadas entre julho e agosto enquanto as maiores ocorrem de dezembro a janeiro (MORAES et al., 1997).

As indústrias e grande parte da população estão concentradas na porção central da bacia. As pastagens (45%) e cultura da cana-de-açúcar (30%) dominam a ocupação do solo, sendo que as esparsas áreas de vegetação nativa (10%) são encontradas ao leste, basicamente associadas às diferenças topográficas encontradas (MARTINELLI et al., 2004). Essa região apresenta características socioambientais semelhantes à de grandes regiões metropolitanas do país, podendo caracterizar-se pelo elevado grau de urbanização, elevada densidade demográfica, com problemas relacionados à disposição de lixo urbano e industrial, poluição atmosférica, contaminação dos recursos hídricos e do solo, entre outros.

De acordo com a CETESB, a bacia abastece 43 municípios dentro do estado de São Paulo, sendo que em 33 deles são utilizadas águas superficiais, em 4, mananciais subterrâneos e em 3, sistema misto. Os rios da bacia recebem efluentes industriais, além dos efluentes domésticos de 40 municípios, dos quais somente 13 possuem algum sistema de tratamento de esgoto.

Segundo Del Grande, Rezende e Rocha (2003), a bacia abrange uma área que por Decreto Estadual é classificada como Área de Proteção Ambiental de Piracicaba. Os usos da água na região caracterizam-se pelo abastecimento público, recepção de efluentes domésticos e industriais, bem como irrigação. Considerando o uso público, a bacia do Piracicaba é responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Campinas e parte da Grande São Paulo (Sistema Cantareira).

Abaixo, a Figura 2 apresenta a localização da bacia hidrográfica do rio Piracicaba.

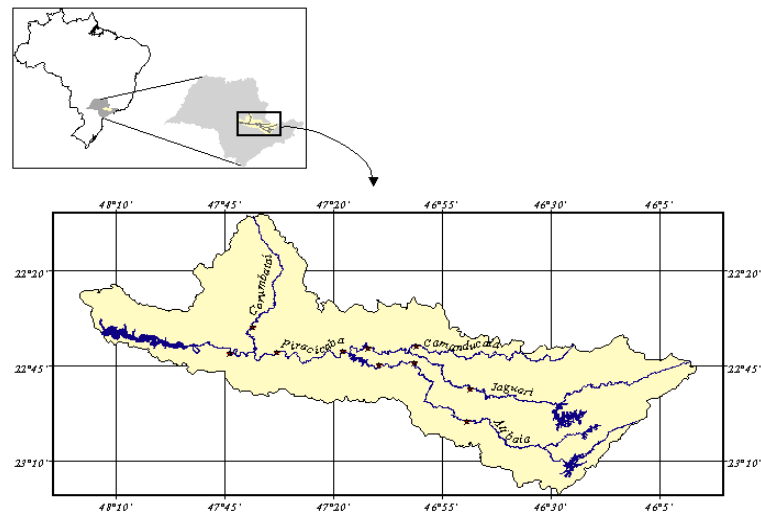


Figura 2 - Localização da bacia do rio Piracicaba e seus principais rios formadores (rios Jaguaré e Atibaia)

2.2.2 Modelo conceitual das vertentes estudadas

A abordagem escolhida em primeira instância empregaria transecções que partem da cota alta da área de drenagem em direção ao canal do rio, com no mínimo três poços por vertente localizados: a) próximo ao canal, b) interflúvio e c) próximo ao divisor de águas da área de drenagem, representados pelo modelo conceitual da Figura 3. No caso da existência de poços domésticos, estes foram usados como estações de amostragem, de outra forma, poços foram perfurados. Em decorrência das dificuldades encontradas na perfuração dos poços de monitoramento (descritas abaixo), não foi possível a execução do modelo conceitual para todas as vertentes que compõem o presente estudo.

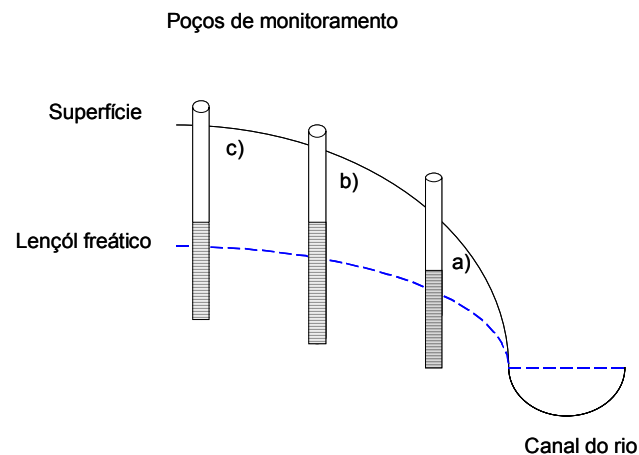


Figura 3 - Modelo Conceitual das vertentes estudadas

2.2.3 Sub-áreas de estudo selecionadas e algumas características

A distribuição dos poços (Figura 4) é descrita a seguir:

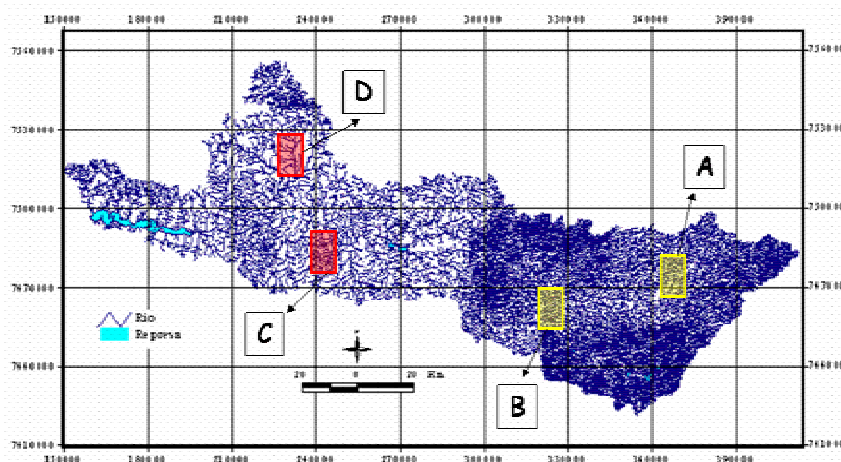


Figura 4 - Localização das sub-áreas de estudo dentro da bacia do Piracicaba

Sub-área (A), transecção do rio Jaguari (cidade de Morungaba)

Localizada na porção superior da bacia do rio Piracicaba, esta é caracterizada por uma paisagem mais acidentada e uma menor pressão dos núcleos urbanos no ambiente. Os principais usos do solo são as pastagens (60%), cultivo de cana-de-açúcar e as plantações florestais (10%). Esparsas e pequenas áreas de vegetação nativa estão associadas à topografia mais acidentada. A vazão média do rio Jaguari é de cerca de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a precipitação média anual fica em torno de 1600mm (SIGRH – DAEE). A geologia regional é representada por rochas do Pré-Cambriano do Complexo Amparo (i.e. biotita gnaisses, quartzitos) e suítes graníticas indiferenciadas (i.e granitos e granitóides polidiápricos) (Mapa Geológico do Estado de São Paulo – IPT, 1981). Os principais tipos de solo encontrados na região são os argissolos e os latossolos. O solo da vertente estudada foi identificado como argissolo, com horizontes A de textura média argilosa (30% de argila), AB e Bt de textura argilosa (50 a 60% de argila). A cobertura vegetal das áreas adjacentes à vertente estudada apresenta pequenos fragmentos de vegetação nativa, talhões de banana e eucalipto e áreas de pastagem. A pastagem

sem manejo é o uso do solo na vertente estudada. Nesta vertente, realizou-se o monitoramento em 3 poços. O poço JAG a), tinha 3,5m de profundidade, e foi perfurado com trados manual e mecânico, tendo sido esta perfuração concluída em junho de 2006. O poço da posição b) (JAG b) foi escolhido dentre os vários poços domésticos existentes na bacia. Apresentava profundidade de 7,5 m, diâmetro de 1,2 m, e era revestido com manilhas de concreto. Decorrente da existência de uma camada de impedimento (a aproximadamente 5 m de profundidade), o poço da posição (c) não pôde ser finalizado com o equipamento disponível (trado mecânico). Desta forma, optou-se por adotar um segundo poço doméstico, já existente na vertente, como estação de coleta (posição c) - JAG c). O poço incorporado tinha 10 m de profundidade, diâmetro de 1,2 m, e era revestido com manilhas de concreto. Convém ressaltar que a tampa desse poço era vedada, impedindo a medição do nível da água (NA) em relação à superfície do terreno. A Figura 5 mostra uma vista do rio Jaguari (a) e a vertente de estudo na área (b).



(a)

(b)

Figura 5 - a) Vista do ponto de coleta do rio Jaguari e b) Vertente selecionada e poço doméstico (à direita) de coleta de água subterrânea, Morungaba, SP (22°51' S; 46°47' W)

Sub-área (B), transecção do ribeirão das Cabras (sub-bacia do Cabras)

A transecção de poços localizava-se na fazenda Santa Mônica (22° 53' S; 46° 52' W), em Joaquim Egídio, sub-distrito de Campinas, SP. Essa sub-bacia possui uma área de aproximadamente 54 km² (bacia do ribeirão das Cabras), precipitação média anual

de 1.400mm, topografia acidentada, apresenta os argissolos e latossolos como os solos predominantes regionalmente. O solo da vertente estudada foi caracterizado como latossolo vermelho amarelo, com horizontes subsuperficiais de textura argilosa (variando de 51 a 60% de argila). A geologia regional também é representada por rochas do Pré-Cambriano do Complexo Amparo (i.e. gnaisses, quartzitos) e suítes graníticas indiferenciadas (i.e., granitos e granitóides polidiátricos, entre outras). O comprimento do curso principal (tributário do Atibaia) é de aproximadamente 20,7 km. Agricultura perene (2,7%), plantações florestais (7,0%), vegetação nativa (3,0%) e pastagens (69,7%) são os principais usos da terra na região (OMETTO, 2001). Na vertente estudada o uso da terra atual é a pastagem sem manejo. Nas áreas adjacentes, observam-se pequenos fragmentos de vegetação nativa e talhões de eucalipto. Decorrente da não existência de poços domésticos nas áreas próximas à vertente escolhida para estudo, três poços de monitoramento foram perfurados, nas posições da Figura 3. Os poços das posições a) (CAB a) e b) (CAB b) têm 3 e 6,5m de profundidade, respectivamente, e suas perfurações foram concluídas em outubro de 2005. O poço da posição c) (CAB c) precisou ser aprofundado (de 12 para 15m; sendo esta perfuração finalizada em junho de 2006) por não apresentar água. Entretanto, este poço apresentou grande quantidade de lama, tornando impossível a realização das amostragens. Assim, optou-se pela coleta de água de uma nascente natural, localizada próximo à vertente de estudo, para comparação do sinal isotópico da água desta com a água encontrada nos 2 poços acima citados (CAB a) e CAB b). A Figura 6 mostra uma vista geral de parte da bacia de estudo (a) e a vertente selecionada (b).



Figura 6 - a) Vista geral de parte da sub-bacia de estudo e b) Vertente selecionada e poços de coleta de água subterrânea, Joaquim Egídio, SP (22°53' S; 46°52' W).

Sub-área (C), transecção do ribeirão dos Marins (sub-bacia do Marins)

A bacia do Marins foi escolhida por apresentar estudos já realizados nesta área (MORETTI, 2001; CASAGRANDE, 2005), permitindo um melhor entendimento do ciclo hidrológico regional. Essa transecção está localizada na parte oeste e menos acidentada da bacia do rio Piracicaba, na bacia do ribeirão dos Marins (área de 58,5 km²). Essa sub-bacia possui uma típica composição da ocupação do solo dessa região, sendo 35% de cana-de-açúcar, 37% de pastagens, 12% de vegetação nativa, 10% de área urbanizada e 5% de plantações florestais (CASAGRANDE, 2005). A precipitação média anual é de cerca de 1300mm. O comprimento do canal principal é de 22,3 km. A geologia regional é representada por rochas do Paleozóico (Grupo Passa Dois – Formação Corumbataí) e Mesozóico (Formação Pirambóia - IPT 1981). Os argissolos e neossolos caracterizam os solos predominantes da região (CASAGRANDE, 2005). O solo da vertente estudada foi identificado como argissolo (gleissolo) de cor acinzentada e textura média argilosa nos horizontes subsuperficiais (de 27 a 30% de argila). Nessa vertente, foram perfurados os poços das posições a) e b) (MAR a) e MAR b), que tiveram suas perfurações ao longo da vertente concluídas em setembro de 2005, e apresentavam 3,3 e 6,5 m de profundidade, respectivamente. O poço da posição c) (MAR c) era um poço doméstico já existente, com 12m de profundidade, 1,2m de diâmetro e revestimento com tijolos. Devido à escavação de mais um poço doméstico

pelo proprietário do sítio em questão (deslocado para o lado esquerdo em relação ao anterior), cuja conclusão ocorreu em novembro de 2006, o mesmo foi incorporado como estação de amostragem deste projeto (MAR d). Este poço tinha 18m de profundidade, 1,20m de diâmetro e era revestido com tijolos. A Figura 7 apresenta a vista geral de parte da bacia de estudo (a) e vertente escolhida (b).



Figura 7 - a) Vista geral de parte da sub-bacia de estudo e b) Trecho final da vertente selecionada e poço de coleta de água subterrânea, Piracicaba, SP (22°46' S; 47°42' W)

Transecção do rio Piracicaba

Decorrente da necessidade de treinamento e prática para a utilização do trado mecânico, optou-se pela instalação de uma transecção de poços de monitoramento em uma vertente do rio Piracicaba. Esta vertente localizava-se na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), próxima das coordenadas 22° 41' S; 47° 34' W (ponto de coleta rio Piracicaba). A precipitação média anual nesta região é de cerca de 1300mm (série histórica estação meteorológica ESALQ/USP). Os solos regionais são representados principalmente por latossolos. Os usos da terra nas áreas adjacentes à vertente estudada são caracterizados por pastagem, talhões de citrus e eucaliptos. A cobertura vegetal do terço final da vertente de estudo é composta por alguns indivíduos arbóreos nativos e exóticos. Nesta vertente, considerada adicional às demais vertentes de estudo, foram perfurados 2 poços: na posição a) (PIR a), concluído em janeiro de 2006, com profundidade de 6,5m; e b) que apresentava profundidade de

16m, mas que não teve sua perfuração concluída, devido à existência de uma camada de impedimento (provavelmente um matacão). Desta forma, este poço teve que ser abandonado, não fazendo, então, parte da rede de poços de monitoramento. A Figura 8 mostra a vista de cima da vertente selecionada (a) e o poço de coleta perfurado (b).



Figura 8 - a) Vista de cima da vertente de estudo selecionada e b) Poço de coleta de água subterrânea, ESALQ, Piracicaba, SP (22° 41' S; 47° 34' W)

Sub-área (D), transecção do rio Corumbataí (sub-bacia do Corumbataí)

Diversos estudos já foram realizados nessa região e descreveram a cobertura do solo, a biogeoquímica e fontes de poluentes (SALATI, 1996; MORAES et al., 1999; SCHULER, 2000) encontrados nessa bacia, que possui uma área de aproximadamente 1.620km², o comprimento do canal principal (rio Corumbataí) tem cerca de 110 km, sua vazão média é de cerca de 25 m³/s (SIGRH) e a precipitação média anual é aproximadamente 1.390mm (SIGRH – D4 035). Os solos predominantes são caracterizados pelos argissolos, latossolos e litólicos e os usos da terra predominantes são as pastagens (43%), a cana-de-açúcar (26%), as vegetações nativas (11%) e as plantações florestais (7,5%) (VALENTE, 2001). A geologia regional é representada por rochas do Grupo Tubarão, das Formações Corumbataí, Tatuí e Itararé (IPT, 1981). O solo da vertente estudada foi identificado como cambissolo háplico, com altas frações de cascalho (de 40 a 60%) nos horizontes mais superficiais e textura variando de arenosa (10% de argila) a média argilosa (30% de argila).

Em decorrência das dificuldades encontradas na perfuração dos poços das outras bacias supracitadas, optou-se pela não perfuração dos poços de monitoramento nesta vertente selecionada. Porém, utilizando a abordagem direta com moradores ou proprietários de terras locais, identificou-se a existência de dois poços domésticos e uma nascente numa mesma vertente. O poço da posição a) (COR a) era localizado nos limites da Estação de Captação de Água do Capim Fino (SEMAE - Piracicaba), com profundidade total de 8,75m, 1,2m de diâmetro e revestimento feito com tijolos. O poço da posição b) (COR b) apresentava profundidade total de 9,5m, 1,2m de diâmetro e revestimento também com tijolos. A nascente (COR c), adotada para comparação dos valores isotópicos encontrados nos poços, localizava-se na mesma vertente, deslocada para o lado direito em relação aos poços, indo da cota mais baixa para a mais alta do terreno. Os dois poços e a nascente encontravam-se na porção final dessa sub-bacia. A Figura 9 mostra o ponto de coleta do rio Corumbataí (a) e a vista da vertente selecionada (b).



a)



b)

Figura 9 - a) Ponto de amostragem do rio Corumbataí e b) Vista de cima da vertente de estudo selecionada (Rio Corumbataí, Piracicaba, SP)

2.2.4 Discussões e testes de possíveis materiais dos tubos de revestimento e instalação dos poços de monitoramento do aquífero livre

Foram realizados vários testes de materiais que poderiam ser utilizados como tubos de revestimento para os poços de monitoramento. Dentre os materiais testados cita-se: tubos de PVC e tubos que usam material reciclável (tubopet). O objetivo desta etapa foi avaliar uma possível contaminação do material de revestimento dos poços nas determinações a serem realizadas. Assim, foram realizadas algumas análises químicas da água em contato com o material, no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP.

Os tubos com material reciclável (tubopet) foram escolhidos por representarem cerca de metade do custo financeiro quando comparados aos tubos convencionais de PVC e por não apresentarem qualquer tipo de contaminação nos principais componentes químicos a serem avaliados neste estudo.

Foram perfurados nove poços para monitoramento e coleta de água subterrânea não confinada. As perfurações foram realizadas com trado manual rotativo (cuba de 100 mm de diâmetro). O equipamento constituía-se de uma cuba de 100 mm de diâmetro para perfuração; uma cuba de 100 mm de diâmetro para limpeza final (quando se atingia o aquífero não confinado); e diversas extensões de tubos de ferro com 1/2" (meia polegada) de diâmetro e 1,5 m de comprimento. Para as perfurações foram necessárias, no mínimo, três pessoas. O trado manual é um bom equipamento quando se trata de poços com pouca profundidade (4 a 6 m) e em solos que não apresentem camadas de impedimento, fragmentos de rocha e/ou matacões; no entanto mostrou-se limitado para muitas das perfurações realizadas neste projeto, devido a quebras (ferramenta de perfuração e luvas de conexão), ou à existência de camadas de impedimento, entre outras.

Em decorrência das dificuldades encontradas, passou-se a utilizar um trado mecânico, em colaboração com o Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP. O trado mecânico era composto por ferramentas de perfuração de diferentes tamanhos (i.e., cubas de 50 e 100mm de diâmetro; ferramentas com formato específico para camadas de empedimento), extensões de tubos de ferro com 3m de comprimento, 1" (uma polegada) de diâmetro e aproximadamente 5 kg de peso cada;

guia da haste de perfuração que é posicionada no solo; guia externa para apoio da haste; e um conjunto motor estacionário de 3,5 HP acoplado a um sistema de redução, responsáveis pela rotação de todo o sistema (ferramenta de perfuração e hastes extensoras). Para as perfurações foram necessárias, no mínimo, três pessoas. Quando os poços apresentam profundidades maiores que 8m, o conjunto ferramenta de perfuração + hastes extensoras fica muito pesado e longo, dificultando os trabalhos. A Figura 10 mostra alguns destes equipamentos, utilizados nas perfurações dos poços.



Figura 10 - a) Trado manual ao atingir o aquífero freático e b) Trado mecânico (conjunto motor estacionário/redutor de velocidade posicionados sobre a haste de perfuração)

O revestimento dos poços perfurados seguiu a recomendação dos testes e foram utilizados tubos de material reciclado (tubopet) ou tubos de PVC. Na parte inferior do poço colocou-se um pré-filtro com areia (cristais de quartzo) com granulometria composta (tamanhos 6 e 7) visando diminuir a entrada de sedimentos na água a ser coletada. Selos hidráulicos (vedação com concreto) foram posicionados a meia profundidade e na superfície de cada poço, para impedir o escoamento de águas superficiais pela lateral do tubo de revestimento e a conseqüente contaminação da água subterrânea (seguindo orientações da NBR 13895, “Construção de poços de monitoramento e amostragem”, da ABNT, de Junho de 1997).

No total foram amostrados 12 poços: 3 na vertente do rio Jaguari (1 perfurado e 2 domésticos); 2 na vertente do Cabras (2 perfurados); 4 na vertente dos Marins (2 perfurados e 2 domésticos); 1 na vertente do rio Piracicaba (1 perfurado); 2 na sub-

bacia do Corumbataí (2 poços domésticos); e 2 nascentes (uma nascente na sub-bacia do Cabras e uma nascente na sub-bacia do Corumbataí).

2.2.5 Coletas mensais e quinzenais de água superficial, subterrânea e da precipitação

Métodos amostrais

Águas superficiais

As coletas de águas superficiais foram realizadas nos rios Jaguari (22°51' S; 46°47' W), Atibaia (22°54' S; 46°57' W), Corumbataí (22°40' S; 47°40' W) e Piracicaba (22°41' S; 47°34' W), e nos ribeirões Cabras (22°53' S; 46°52' W) e Marins (22°46' S; 47°42' W), de agosto de 2005 a março de 2007, totalizando 30 coletas. As amostras de água para análises isotópica e físico-química foram coletadas no meio do canal e abaixo da superfície, com auxílio de uma garrafa de Niskin. Imediatamente após a coleta, frações de 250ml foram separadas, acondicionadas à baixa temperatura (4°C) e levadas ao laboratório para as análises pertinentes.

Águas subterrâneas

As amostras de águas subterrâneas para análises isotópica e química foram coletadas com o auxílio de um Bailer, em diferentes períodos. Para os poços MAR a), MAR b) e MAR c), as coletas foram realizadas entre outubro de 2005 e março de 2007 (26 amostras) e para o poço doméstico incorporado às estações de coleta, MAR d), as coletas foram realizadas entre outubro de 2006 e março de 2007, totalizando 11 amostras. Nos poços JAG b), CAB a) e CAB b), as coletas ocorreram de novembro de 2005 a março de 2007, gerando 24 amostras, no total. O poço JAG a) foi coletado de julho de 2006 a março de 2007, totalizando 15 amostras, enquanto o JAG c) foi coletado entre outubro de 2006 e março de 2007 (10 amostras). As coletas da nascente CAB c) foram realizadas entre outubro de 2006 e março de 2007 (10 amostras). Já no poço PIR a) as coletas aconteceram de janeiro de 2006 a março de 2007, sendo 21 amostras, no total. Finalmente, os poços (COR a) e COR b) e a nascente (COR c) do

Corumbataí foram coletados de dezembro de 2006 a março de 2007, totalizando 9 amostras cada.

Antes da coleta em cada poço, o Bailer era lavado com detergente neutro (concentração de 10%), enxaguado (5 vezes) com água deionizada para descontaminação orgânica, lavado com ácido clorídrico (concentração de 10%) e enxaguado (5 vezes) novamente água deionizada para descontaminação inorgânica.

Os poços domésticos que possuem sistema de bombeamento de água foram coletados após o funcionamento da bomba por alguns minutos.

Imediatamente após a coleta, frações de 250ml foram separadas, acondicionadas à baixa temperatura (4°C) e levadas ao laboratório.

A distância da superfície do terreno até o nível do lençol freático foi medida antes da coleta, nos poços onde isso foi possível (alguns poços domésticos possuem suas tampas lacradas).

Água da chuva

O fracionamento isotópico do oxigênio e hidrogênio das águas ocorre essencialmente por processos físicos de mudanças de fase da água. Deste fato, veio a necessidade de se desenvolver um coletor de água de chuva que tenha nenhuma ou mínima perda de volume por evaporação. As coletas compostas de precipitação (chuva acumulada entre coletas) foram realizadas com o auxílio de um galão de 10L, que possui um funil acoplado à sua tampa e uma extensão acoplada ao funil que vai até a parte inferior do galão (fundo), diminuindo assim, a superfície de evaporação. O conjunto foi colocado dentro de uma caixa térmica para diminuir variações de temperatura e luminosidade incidente. O tipo de coletor utilizado é recomendado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Quatro coletores deste tipo foram instalados nas quatro sub-bacias de estudo, próximos às transecções de poços. Os coletores mencionados são mostrados na Figura 11.



Figura 11 - a) Coletor de precipitação composta desmontado e b) Coletor posicionado dentro da caixa térmica

As amostras de água da precipitação composta para análises isotópicas foram coletadas após a homogeneização do conteúdo do galão coletor, acondicionadas em frascos de polietileno de 60 ml, evitando a presença de bolhas e armazenadas ao abrigo de luz e calor. Após a amostragem do conteúdo do galão coletor, o mesmo era lavado com água deionizada.

A partir de dezembro de 2006, foram efetuadas coletas quinzenais das águas superficiais, subterrâneas e da precipitação, para uma melhor caracterização das variações dos sinais isotópicos no período chuvoso. As coletas quinzenais se estenderam até março de 2007.

2.2.6 Metodologia Analítica

Determinação das variáveis de campo

Para as águas superficiais e subterrâneas, foram determinadas, em campo, as seguintes variáveis: concentração de oxigênio dissolvido (OD) (mg/L e %) e temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), ambas com equipamento YSI, modelo 58; pH, com equipamento Orion, modelo 250A; e condutividade elétrica da água, com equipamento Amber Science, modelo 2052.

Isótopos estáveis

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ foram obtidos através da razão isotópica do oxigênio, sendo que para tal utilizou-se a técnica de equilíbrio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (Socki et al. 1999). Em laboratório, 1ml de cada amostra de água foi acondicionado em recipiente vedado, onde se injetou uma quantia equivalente de CO_2 puro. A amostra permaneceu em atmosfera saturada em CO_2 por um período de 48hs, à temperatura constante (25°C). A hidratação do CO_2 na amostra fez com que o oxigênio 18 da água (^{18}O) fosse incorporado ao CO_2 (conforme equação 5), fazendo com que o gás, após purificação em linha de vácuo, pudesse ser analisado através do sistema de duplo “inlet” do espectrômetro de massas (Modelo Delta Plus, Finnigan MAT, Bremen, Germany), pela razão de massas 46/45.



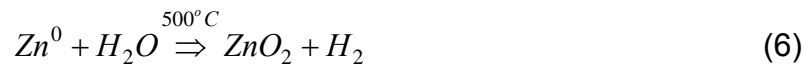
Assim foram realizadas análises do $\delta^{18}\text{O}$ para a precipitação, águas superficiais e subterrâneas para as coletas efetuadas no período compreendido entre agosto de 2005 e março de 2007.

Foram determinadas as composições isotópicas do $\delta^2\text{H}$ em 180 amostras das águas da chuva, superficiais e subterrâneas, em colaboração com a USP de São Paulo e a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

O critério utilizado para selecionar esse lote de amostras foi sugerido pelo Professor Doutor Joel R. Gat (Weizmann Institute of Science, comunicação pessoal). Cerca de 40% das determinações foram realizadas para as águas da chuva, 35% para as águas superficiais e 25% para as águas subterrâneas das diferentes sub-bacias estudadas. Convém ressaltar que foram selecionadas amostras das diferentes estações do ano, com o intuito de identificar a sazonalidade deste parâmetro.

A análise do δD foi realizada com a redução da água à H_2 (gás hidrogênio) pela ação do zinco metálico segundo a Equação 6. Foram utilizados nesta reação 35mg de Zn^0 para cada 1 μl de água (para análise no espectrômetro de massas Delta E (Finnigan MAT, Bremen, Germany) são necessários 3 μl de água). O Zn era acondicionado em uma ampola de 50ml, livre de contato com o ar atmosférico, preenchida com argônio (Ar). A amostra de água era colhida em um capilar calibrado de 3 μl , em atmosfera de

nitrogênio (N₂), o qual era inserido em um tubo Pyrex de 2ml (15cm x 0.225cm de raio), contendo 105mg de Zn⁰. A seguir o tubo era conectado ao sistema de vácuo e imerso em nitrogênio líquido (-196°C), para retirada da atmosfera de N₂ presente no tubo (a reação deve ocorrer em vácuo). Após selado, o tubo era levado a uma mufla para ser queimado por 2 horas à 500°C.



2.2.7 Determinação do tempo de residência médio da água (TRM)

De acordo com Gat (1981), o ¹⁸O é um bom traçador para caracterizar processos hidrológicos, pois pode ser medido confiavelmente nos diferentes compartimentos.

Segundo diferentes autores (LEOPOLDO et al., 1992; SOULSBY et al., 2000; REDDY et al., 2006; IAEA, 2007), se as curvas de entrada (precipitação) e de saída (água do córrego ou poço) forem consideradas, em uma primeira aproximação, como funções seno, e uma distribuição exponencial do TRM da água subterrânea for assumida, a variação sazonal do $\delta^{18}O$ segue uma expressão generalizada da equação (7) dessa função seno, representada por:

$$\delta^{18}O = \delta^{18}O \text{ médio} + A \text{ seno}((2\pi t/b) + c) \quad (7)$$

onde o $\delta^{18}O$ médio (‰) é a média anual do $\delta^{18}O$ (chuva; rio ou água subterrânea); A (‰) é a amplitude sazonal do $\delta^{18}O$ (extremos máximo e mínimo); b representa o período do ciclo sazonal (i.e. 365 dias); t é o tempo (dias); e c (radianos) refere-se ao tempo de resposta (“*phase lag*”) ou o tempo do pico anual dos valores de ¹⁸O

Desta forma, tempos de residência médios (TRM) no sistema de água subterrânea não confinada podem ser estimados usando-se A , supondo-se que: o sistema hidrológico está em equilíbrio dinâmico (“*steady-state*”); a água de infiltração (chuva) mistura-se imediatamente com a água do solo (STEWART e McDONNELL, 1991); e que há uma distribuição exponencial dos tempos de residência da água no sistema de água subterrânea (McGUIRE et al., 2002; citados por REDDY et al., 2006). Esse modelo de mistura completa, ou de equilíbrio dinâmico, é uma aproximação do

TRM que foi aplicada para água do solo (próxima da superfície que contribui com o escoamento superficial em eventos de precipitação) e em aquíferos não confinados (DeWALLE et al., 1997; MALOSZEWSKI e ZUBER, 1982; citados por REDDY et al., 2006). Segundo os mesmos autores, o uso de um modelo de mistura completa para a interpretação da variação sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ das águas subterrâneas pode ser adotado devido à sua relativa simplicidade e aplicações já realizadas por outros autores. Com base nessas suposições, uma tentativa de estimativa do TRM da água subterrânea não confinada, como uma primeira aproximação, foi feita através da equação (8) a seguir:

$$TRM = K^{-1} ((A/A_p)^2 - 1)^{0,5} \quad (8)$$

onde TRM é o tempo de residência médio (meses); A é a amplitude sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ do componente resultante (água subterrânea não confinada, nesse estudo); A_p é a amplitude sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ do componente de entrada (precipitação); e K^{-1} (radianos meses⁻¹) é um fator de conversão ($K = 2\pi/12$) (IAEA, 2007).

Ressalta-se a necessidade de estudo isotópico de período prolongado (para se ter conhecimento das possíveis variações interanuais) e de estudos mais detalhados das reais características físicas e do comportamento hidrológico em subsuperfície, para estimativas mais adequadas e precisas do TRM de determinada região.

2.2.8 Dados de precipitação e vazão do período estudado

Os dados de precipitação diária e vazão média diária, atualizados, foram obtidos junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE - enviados por e-mail pelos respectivos responsáveis). As informações apresentadas neste estudo basearam-se nos períodos de agosto de 2005 a abril de 2007 (Vazões) e agosto de 2005 a fevereiro de 2007 (Precipitação).

As alturas pluviométricas consideradas foram obtidas dos seguintes postos pluviométricos do DAEE: D3-069 (município de Itatiba), D3-052 (Pedreira), D3-046 (Morungaba), D4-044 (Campinas), D4-004 (Americana), D4-016 (Rio Claro), D4-035 (Analândia); e da Estação Meteorológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP – Piracicaba).

Para analisar a consistência das séries pluviométricas, ou seja, comprovar a homogeneidade dos dados disponíveis num posto com relação às observações registradas em postos vizinhos foi feito o uso do Método de Dupla Massa. Esse método foi desenvolvido pelo Geological Survey / USA e serve apenas para séries mensais ou anuais. Tal método consiste em selecionar os postos de uma região, acumular para cada um deles os valores mensais, e plotar em um gráfico do sistema cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto a consistir. Obtêm-se, então, a média das precipitações mensais acumuladas em diferentes postos da região, cuja série formada é usada para comparação. Se os valores acumulados dos postos vizinhos forem proporcionais aos do posto a consistir, os pontos se alinharão segundo uma única reta (TUCCI, 1993), o que pode ser observado na Figura 12.

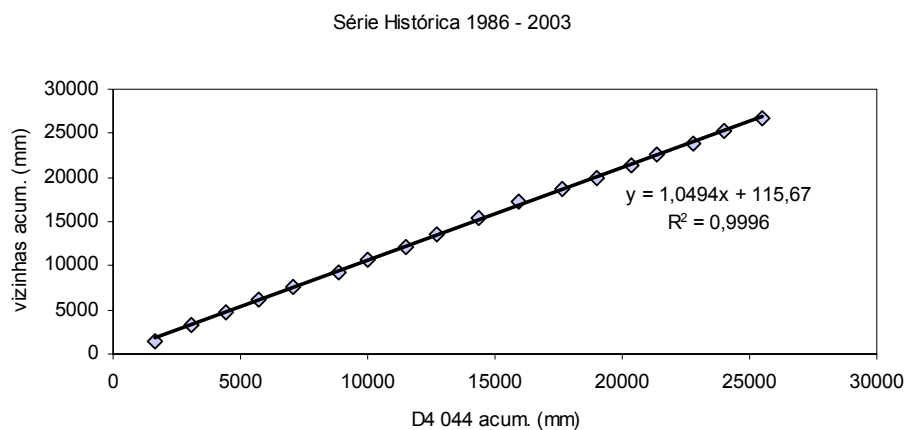


Figura 12 - Curva obtida através do método de Dupla Massa para checar a consistência dos dados da estação D4 044, através da série histórica de 1986 a 2003 (Fonte: SIGRH)

Os postos fluviométricos pertencentes à rede de monitoramento do DAEE utilizados foram: 3D-009 (rio Jaguari), localizado no município de Morungaba; 3D-006 (rio Atibaia), localizado em Campinas; e 4D-007 (rio Piracicaba), localizado em Piracicaba. As vazões referentes ao rio Corumbataí foram obtidas junto à estação de captação de água do Capim Fino (SEMAE), também localizada em Piracicaba. Já para o ribeirão das Cabras, a vazão foi medida no momento da coleta com o uso de um molinete. No Ribeirão dos Marins, as vazões no momento da coleta foram obtidas

através da leitura da régua em um vertedor tipo V, instalado por Moretti (2001) para estudos hidrológicos anteriormente efetuados nesta bacia.

Aspectos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba

A análise dos dados de precipitação em termos espaciais na bacia do rio Piracicaba foi tema de alguns estudos (CRISTOFOLETTI, 1991; PROCHNOW 1981; PELLEGRINO, 1995). Esses estudos observaram a existência de variabilidade dos volumes precipitados no mesmo período e ao longo do ano dentro dos limites desta bacia hidrográfica. Como mencionado anteriormente, os regimes anuais de precipitação podem variar de 1700mm (cabeceira da bacia) a 1300mm (porção final).

Para visualização da variabilidade das precipitações ao longo do ano, foram efetuadas as somatórias dos totais de precipitação mensal para os anos de 2005 e 2006 e para os meses de janeiro e fevereiro de 2007 (dados disponibilizados pelo DAEE). Os totais mensais dos postos acima mencionados podem ser visualizados na Tabela A1 (Anexo A). Apesar de existirem falhas dos dados diários e mensais para alguns postos pluviométricos, a variabilidade dos volumes precipitados pode ser observada no gráfico de barras da Figura 13, onde os volumes acumulados nas cidades de Morungaba, Campinas e Piracicaba estão sendo comparados. Nota-se que os volumes precipitados nos meses de janeiro de 2005 (450mm) e janeiro de 2007 (440mm) na cidade de Campinas são significativamente maiores que os precipitados para o mesmo período na cidade de Piracicaba (239mm em 2005 e 259mm em 2007), sendo os volumes acumulados em Morungaba intermediários (340mm em 2005 e 352mm em 2007). Em janeiro de 2006, o volume acumulado registrado na cidade de Morungaba (366mm) foi maior que os volumes acumulados registrados em Campinas e Piracicaba (264mm e 225mm, respectivamente). Observa-se também, que independente do ano, as três cidades comparadas apresentaram os maiores volumes acumulados no mês de janeiro. Percebe-se que, com exceção da cidade de Morungaba (67mm em junho de 2005 e 61mm em julho de 2006), os valores acumulados nos meses de junho, julho e agosto de 2005 e 2006 foram menores que 50mm, sendo que o menor volume acumulado em Campinas ocorreu em julho de 2005 (6mm) e em Piracicaba, em maio de 2006 (0mm). Os volumes acumulados no período seco de 2006

(maio a outubro) foram 45, 57 e 51% menores que os volumes acumulados no mesmo período em 2005, nas cidades de Morungaba, Campinas e Piracicaba, respectivamente. Os volumes acumulados nos anos de 2005 e 2006 foram 1613 e 1620mm, 1585 e 1290mm e 1080 e 1214mm, nas cidades de Morungaba, Campinas e Piracicaba, respectivamente. Outras considerações podem ser feitas observando-se a Figura 13 e a Tabela A1 (Anexo). Os postos que apresentaram falhas nos dados são: D3-069 (falhas nos meses de março e junho de 2006), D4-004 (falhas nos meses de fevereiro, março, outubro e novembro de 2005; e janeiro e fevereiro de 2007), D4-016 (meses de novembro de 2005, setembro e novembro de 2006 e fevereiro de 2007) e D4 035 (meses de setembro e novembro de 2006 e fevereiro de 2007).

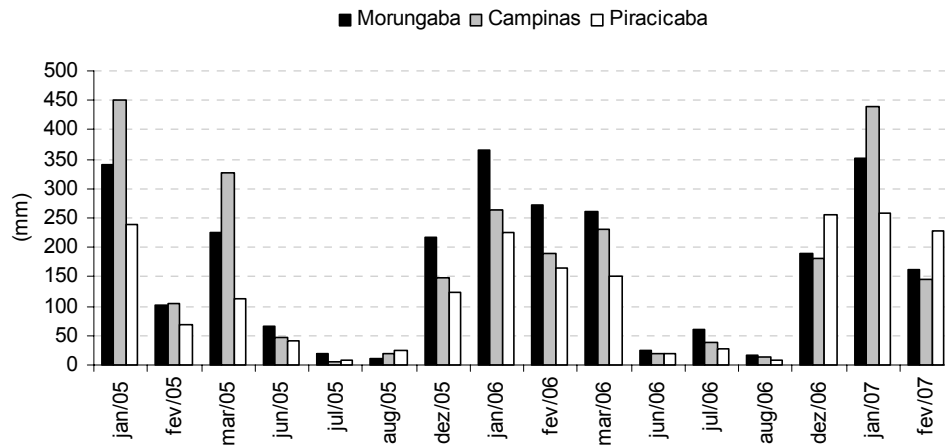


Figura 13 - Totais mensais de precipitação (mm) para diferentes municípios da bacia do Piracicaba

A seguir são apresentados os dados pluviométricos e fluviométricos das sub-bacias estudadas, a fim de demonstrar as avaliações, bem como o comportamento e a variação dos mesmos ao longo deste estudo.

Precipitação e vazão (Rio Jaguari) na região de Morungaba

A precipitação média anual, com base em séries históricas de precipitação (1986 a 2003 – SIGRH) na bacia hidrográfica do rio Jaguari, apresenta valores da ordem de 1600 mm. A Tabela A2 (Anexo) apresenta os totais mensais, os valores diários máximos, e o número de dias com chuva no mês, para o período deste estudo no município de Morungaba (22°53' S; 46°47' W), SP.

Em agosto de 2005 observa-se o menor total mensal (12,3mm), sendo de 4,4mm, a maior precipitação diária registrada neste mês. O mês de janeiro de 2006 apresentou 17 dias com chuva, o maior total mensal (365,7mm), sendo de 68mm a maior precipitação diária registrada. Os meses de outubro de 2005, fevereiro e março de 2006 apresentam valores máximos diários bem próximos (60,5, 61,5 e 68,8mm, respectivamente). No mês de maio de 2006 foi registrado o menor número de dias com chuva (5 dias), enquanto o mês de fevereiro de 2006 apresentou o maior período chuvoso (23 dias). Os valores acumulados da precipitação entre as coletas de amostras, para a sub-bacia do Jaguari, foram obtidos através dos dados diários desta estação.

A vazão média do rio Jaguari, tendo como base séries históricas (1988 a 1998 – SIGRH), é da ordem de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. As menores descargas são observadas entre julho e agosto, enquanto as maiores são registradas em dezembro e janeiro (Moraes et al., 1998; observações feitas no presente estudo). As vazões médias diárias no município de Morungaba ($22^\circ 51' \text{ S}$; $46^\circ 46' \text{ W}$), SP, referem-se ao período deste estudo e ao posto acima mencionado, que apresentou descontinuidade nos dados diários de vazão ao longo do mês (valores inexistentes). Por isso, fez-se a regressão linear das variações médias diárias da vazão do posto 3D-009 com o posto 4D-001, localizado a jusante no rio Jaguari, no município de Cosmópolis ($22^\circ 39' \text{ S}$; $47^\circ 12' \text{ W}$), SP. Essa correlação, cujo R^2 foi de 0,8, permitiu a correção dos dados inexistentes do posto 3D-009.

As vazões diárias máximas e mínimas, e a vazão média dos meses que compreendem o período estudado podem ser visualizadas na Tabela A2 (Anexo). Observa-se a vazão diária máxima ($94 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) do período estudado no mês de fevereiro de 2006 (estação chuvosa de 2005-2006), sendo a vazão média de aproximadamente $31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a mínima de aproximadamente $11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no mesmo mês. Na estação chuvosa de 2006-2007, a vazão máxima ($56,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) foi registrada no mês de janeiro de 2007, sendo as vazões média e mínima no mesmo mês de $24,3$ e $9,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. As vazões mínimas registradas em todo período estudado ocorreram no início (novembro de 2006, vazão mínima de $5,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e no final (abril de 2007, vazão mínima de $5,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) da estação chuvosa 2006-2007.

A Figura 14 apresenta a hidrógrafa do rio Jaguari, para a cidade de Morungaba. Observando os dados, notam-se respostas da vazão aos eventos de precipitação relativamente rápidas, sugerindo contribuições significativas do escoamento superficial na descarga deste rio. Maiores volumes acumulados na estação chuvosa 05/06 refletem os maiores picos de vazão também neste período.

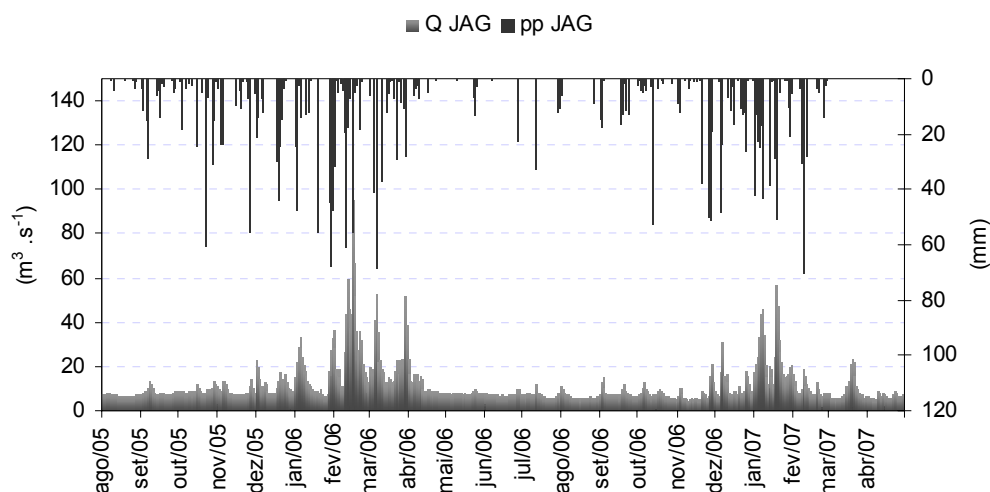


Figura 14 - Hidrógrafa do rio Jaguari (vazões médias diárias em m^3s^{-1} , cinza claro, eixo inferior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária (mm - cinza escuro, eixo superior) para o período de agosto de 2005 a fevereiro de 2007

Precipitação e vazão na região da sub-bacia do ribeirão das Cabras

Os valores precipitados apresentados referem-se ao município de Campinas (D4-044 – 22°53' S; 47°05' W), SP.

Os totais mensais, valores diários máximos, e o número de dias com chuva estão apresentados na Tabela A3 (Anexo A). Observa-se para o mês de maio de 2006 apenas 3 dias com chuva, resultando no menor total mensal (7 mm), sendo a maior precipitação diária registrada de 3,6mm. O mês de janeiro de 2007 apresentou, em 13 dias chuvosos, o maior total mensal (440mm, 177mm a mais que o total registrado em janeiro de 2006, que foi o mês que apresentou o maior número de dias com chuva – 15 dias), sendo de 72mm a maior precipitação diária registrada (no mesmo período do ano de 2006 este valor foi de 56mm). Os meses de outubro de 2005, fevereiro e março de 2006 apresentaram valores máximos diários de 60,5mm, 46,9mm e 49,6mm,

respectivamente. Os meses de agosto de 2005, junho e agosto de 2006 registraram o menor número de dias com chuva (2 dias cada).

As vazões do ribeirão das Cabras para o período de estudos aqui apresentadas, (Tabela A3 - Anexo) foram estimadas através da medição da velocidade do fluxo deste ribeirão com o uso de um molinete e obtenção da seção correspondente para o cálculo da área por onde passa esse fluxo. Com a velocidade do fluxo (m s^{-1}) e área da seção (m^2), obteve-se a vazão estimada (m^3s^{-1}) na data da coleta. Valores inexistentes de vazão para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2005 e novembro e dezembro de 2006 são decorrentes da ausência do equipamento de medição de fluxo.

Utilizando os dados diários de precipitação (posto D4-044) e vazão estimada no momento da coleta de amostra de água superficial, foi possível plotar as variações de vazão do ribeirão das Cabras, em Joaquim Egídio, São Paulo (Figura 15).

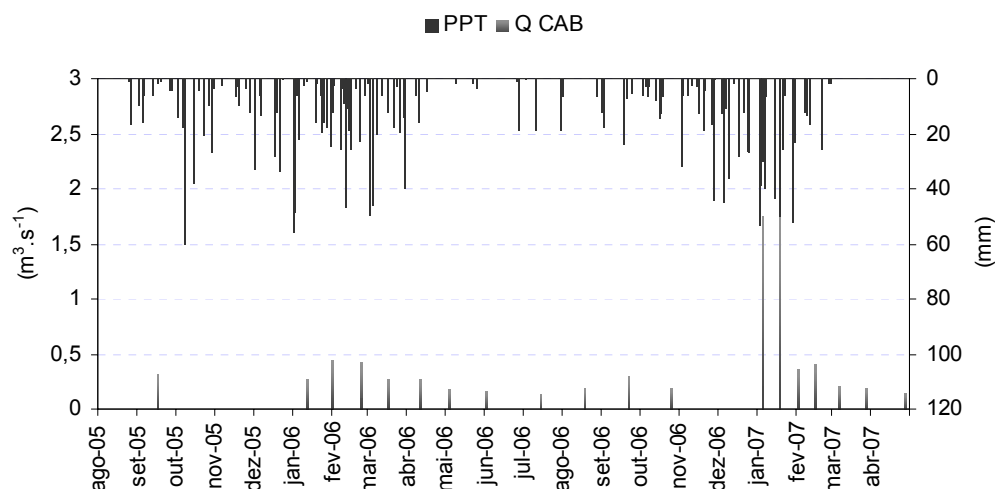


Figura 15 - Vazão estimada (m^3s^{-1} – cinza claro, eixo inferior) do ribeirão das Cabras no momento da coleta (agosto de 2005 a abril de 2007) e precipitação diária (mm – cinza escuro, eixo superior – agosto de 2005 a fevereiro de 2007)

Observa-se pouca variação na vazão do ribeirão das Cabras ao longo do período medido, com exceção dos meses de janeiro e fevereiro de 2007, mostrando a grande influência da precipitação na vazão deste ribeirão. Isto pode estar relacionado com o fato da vazão ser registrada apenas no momento da coleta, dado que medidas de vazão efetuadas diariamente mostrariam com maior detalhe a contribuição do

escoamento superficial na vazão deste ribeirão. Contudo, é possível perceber a sazonalidade também encontrada nos rios maiores (Jaguari, Piracicaba, Atibaia), sendo as menores vazões observadas em junho e julho de 2006, e as maiores nos meses de janeiro e fevereiro de 2006 e de 2007. Foi possível notar através das observações feitas no campo e dos dados gerados, que as respostas nas mudanças do volume escoado após períodos de precipitação com grande intensidade é mais rápida no ribeirão que nos rios maiores, e que o retorno para menores volumes escoados também ocorre mais rapidamente, como já observado em outros estudos (Jorge Marcos de Moraes, CENA/USP, comunicação pessoal).

Precipitação e vazão na região do ponto de coleta do rio Atibaia

O ponto de coleta do rio Atibaia está relativamente próximo à vertente do ribeirão das Cabras, desta forma, as considerações relativas à pluviosidade para a sub-bacia B também representam o que ocorre na região de amostragem do rio Atibaia. O total precipitado, a maior chuva e os dias com chuva são apresentados na Tabela A4 (Anexo).

A vazão média do rio Atibaia, tendo como base séries históricas (1993 a 2003 – SIGRH), é da ordem de $31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A sazonalidade observada na descarga do rio acompanha a sazonalidade observada na precipitação. As menores descargas são geralmente observadas entre julho e setembro, enquanto as maiores são registradas em dezembro e janeiro (Moraes et al. 1998). As vazões diárias, máximas e mínimas, e a vazão média deste rio, no município Campinas ($3\text{D}-006 - 22^{\circ}54' \text{ S}; 46^{\circ}57' \text{ W}$), SP, nos meses que compreendem o período estudado, podem ser visualizadas na Tabela A4 (Anexo A).

Observa-se a vazão diária máxima ($132 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) no mês de março de 2006, sendo a vazão média de aproximadamente $34 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a mínima de aproximadamente $16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o mesmo mês. O mês de agosto de 2005 apresentou vazão máxima de $11,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto a vazão máxima de agosto de 2006 foi de $16,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A vazão mínima registrada em todo período ocorreu em agosto de 2006 ($6,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Utilizando os dados diários de precipitação (posto D4-044) e vazão (posto 3D-006), foi possível traçar a hidrógrafa (Figura 16) do rio Atibaia, antes de chegar ao município de Campinas.

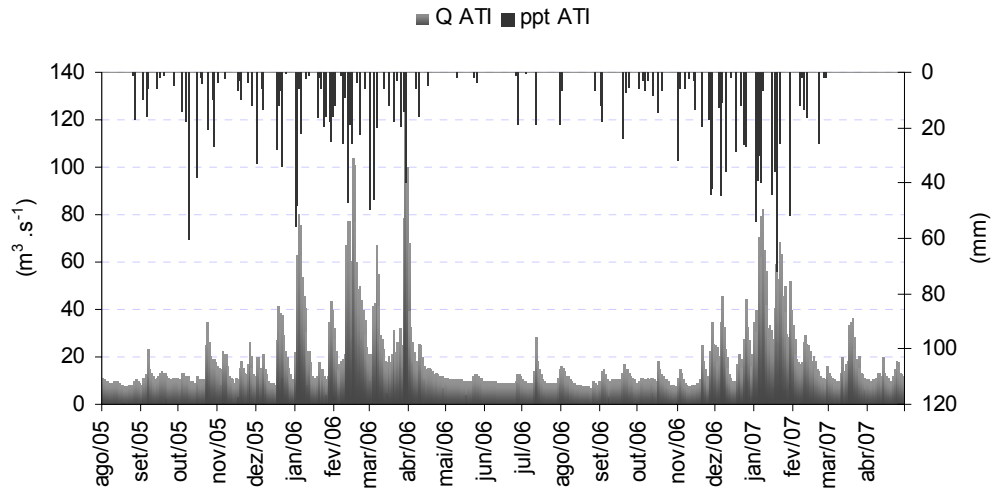


Figura 16 - Hidrógrafa do rio Atibaia (vazões médias diárias em m^3s^{-1} , cinza claro, eixo inferior) no período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária (mm - cinza escuro, eixo superior) no período de agosto de 2005 a fevereiro de 2007

Precipitação e vazão da sub-bacia do ribeirão dos Marins

A pluviometria para o período estudado foi obtida através dos dados de precipitação da Estação Meteorológica da ESALQ/USP, Departamento de Ciências Exatas, Piracicaba, SP (Tabela A5 – Anexo). As considerações pertinentes serão apresentadas mais abaixo, no sub-item “Pluviometria e vazão em Piracicaba”, por serem áreas próximas e terem a mesma fonte dos dados.

As vazões do ribeirão dos Marins, referentes à área de drenagem do terço superior dessa sub-bacia, foram obtidas através de um vertedor tipo V, instalado para estudos hidrológicos realizados por Moretti (2001). A leitura da régua foi feita no momento da coleta. Posteriormente, o valor lido foi plotado na curva chave gerada para o período de 1999 e 2000, tendo desta forma o fluxo deste ribeirão. As vazões médias mensais no momento da coleta encontram-se na Tabela A5 – Anexo.

A Figura 17 mostra a vazão do Ribeirão dos Marins na hora da coleta no período de agosto de 2005 a abril de 2007. Devido aos eventos ocorridos em fevereiro de 2006

e janeiro de 2007, a escala do gráfico dificulta a visualização das vazões obtidas nos diferentes dias de coleta. Contudo, também é possível perceber as maiores vazões acompanhando a sazonalidade das chuvas, ou seja, de dezembro a fevereiro, enquanto os menores valores são registrados no período de maior estiagem.

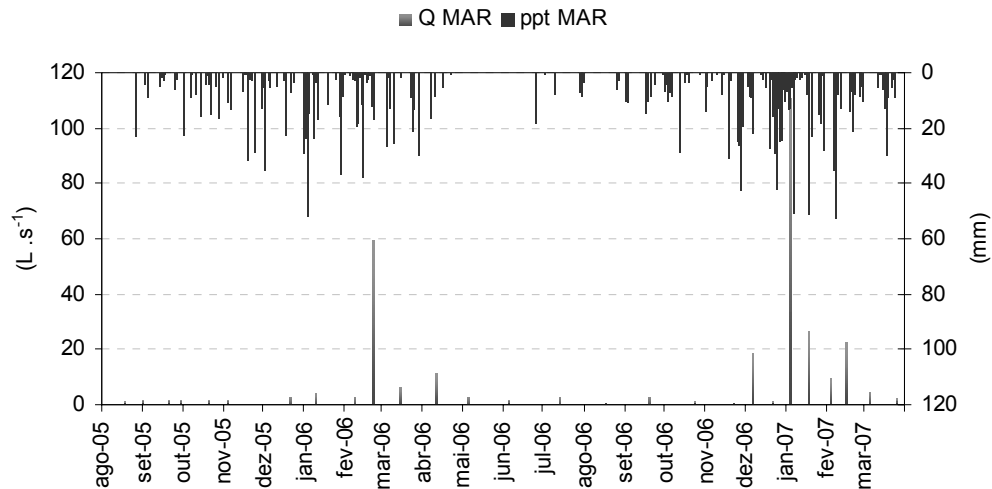


Figura 17 - Vazão do ribeirão dos Marins na hora da coleta (vazões em $L\ s^{-1}$, cinza claro, eixo inferior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária (mm – cinza escuro, eixo superior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007

Interpretando a hidrógrafa observa-se que há uma grande amplitude entre as vazões mínima (22 de novembro de 2006) e máxima (4 de janeiro de 2007) registradas, com diferença entre elas de 110,5 L/s. Essa variação deve-se principalmente à distribuição de eventos de precipitação, entretanto, a resposta rápida pode também ser consequência do uso do solo, que engloba vários fatores que contribuem com esse cenário. A impermeabilização e compactação do solo devido às atividades agropecuárias e urbanização, resultam em baixo índice de infiltração de água da chuva, principalmente durante os meses de cheia (novembro a abril), aumentando o escoamento superficial (rápido) da água e reduzindo a infiltração no solo para alimentar o lençol freático. Esse processo pode ter como consequência a diminuição do escoamento de base, podendo aumentar a amplitude entre as vazões máximas e mínimas.

Precipitação e vazão da bacia do Corumbataí

Os dados referentes às alturas pluviométricas mensais para a bacia do rio Corumbataí podem ser visualizados na Tabela A1 (Anexo), volumes precipitados nos municípios de Rio Claro e Analândia. Tais dados não foram abordados com maiores detalhes, pois apresentam falhas.

A vazão média do rio Corumbataí, com base em séries históricas (1976 a 2004 – SIGRH), é da ordem de $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A sazonalidade observada na descarga do rio acompanha a sazonalidade observada na precipitação. As menores descargas são observadas entre julho e setembro, enquanto as maiores são registradas em dezembro e janeiro. As vazões médias diárias são provenientes da estação de Captação do Capim Fino (SEMAE, Piracicaba), localizada no município de Piracicaba ($22^{\circ}38' \text{ S}$; $47^{\circ}40' \text{ W}$), SP. As vazões diárias máximas e mínimas, e a vazão média dos meses podem ser visualizadas na Tabela A6 (Anexo). Observa-se a vazão diária máxima ($197,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) no mês de janeiro de 2007, sendo a vazão média de aproximadamente $78,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a mínima de aproximadamente $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para este mês. A menor vazão máxima ($7,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) foi registrada no mês de julho de 2006. Porém, foi no mês de setembro de 2006 que a menor vazão mínima ($3,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) ocorreu.

Utilizando os dados da Estação Meteorológica da ESALQ/USP, com caráter ilustrativo, a Figura 18 mostra as sazonalidades encontradas nas chuvas e na vazão do rio Corumbataí. Como mencionado anteriormente, as maiores vazões podem ser observadas nos meses de dezembro a fevereiro, bem como as maiores precipitações. Observa-se, também, a grande amplitude entre as vazões máximas e mínimas (cerca de $194 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), que podem estar associadas a diferentes fatores, como os diferentes tipos de solo, conservação, e uso e ocupação dos mesmos.

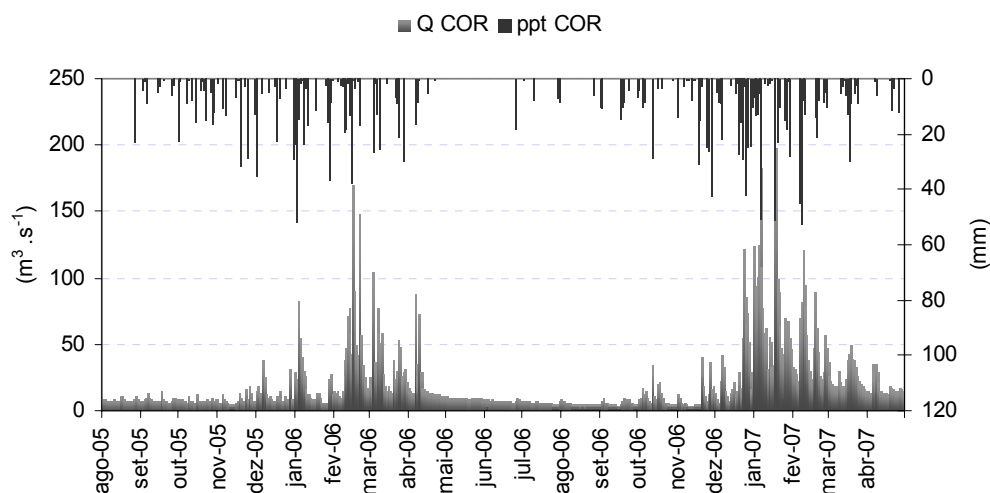


Figura 18 - Hidrógrafa do rio Corumbataí (vazões médias diárias em m^3s^{-1} , cinza claro, eixo inferior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária (mm - cinza escuro, eixo superior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007

Precipitação e vazão em Piracicaba

A pluviometria para o período foi obtida a partir dos dados da Estação Meteorológica da ESALQ/USP, Departamento de Ciências Exatas, localizada no município de Piracicaba ($22^{\circ}42' \text{ S}$; $47^{\circ}38' \text{ W}$), SP.

Os totais mensais, valores diários máximos, e o número de dias com chuva desta estação estão representados na Tabela A7 (Anexo). Observa-se para o mês de maio de 2006 o menor total mensal (0 mm). O mês de janeiro de 2007 apresentou 21 dias com chuva e o maior total mensal (259mm, 34mm a mais que o total registrado em janeiro de 2006), sendo a maior precipitação diária registrada no valor de 51mm (em janeiro de 2006, o maior total diário foi de 52mm). Os meses de agosto de 2005, maio, junho e agosto de 2006 registraram o menor número de dias com chuva (3, 0, 1 e 3 dias, respectivamente), enquanto os meses de dezembro de 06 e janeiro de 2007 apresentaram o maior período chuvoso (21 dias).

A vazão média do Piracicaba, tendo como base séries históricas (1993 a 2003 – SIGRH), é da ordem de $90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o período chuvoso e cerca de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para período de estiagem. A sazonalidade observada na descarga do rio acompanha a sazonalidade observada na precipitação. As menores descargas ocorreram entre julho

e setembro, enquanto as maiores são registradas em dezembro e janeiro (MORAES et al., 1998). As vazões diárias máximas e mínimas, e a vazão média no período para o município de Piracicaba (22°40' S; 47°46' W), SP, podem ser visualizadas na Tabela A7 (Anexo). A vazão diária máxima ($548 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) foi observada no mês de janeiro de 2007, sendo a vazão média de aproximadamente $273 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a mínima em torno de $16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o mesmo mês. O mês de setembro de 2006 apresentou a menor vazão máxima registrada ($63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), e no mês de novembro de 2006 ocorreu a menor vazão mínima ($18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Observa-se grande amplitude entre as vazões mínima (novembro de 2006) e máxima (janeiro de 2007) registradas para o período do presente estudo, sendo a diferença entre as duas de cerca de $530 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Essa grande variação nos extremos máximos e mínimos pode estar associada às ações antrópicas (características do uso da terra), ausência de vegetação nativa significativa em toda bacia do Piracicaba, bem como às diferenças entre alturas pluviométricas registradas para o período.

Plotando-se as chuvas diárias da Estação Meteorológica ESALQ/USP em relação às vazões médias diárias, obteve-se a hidrógrafa do rio Piracicaba (Figura 19). Observa-se uma falha nos dados de vazão no mês de novembro de 2005.

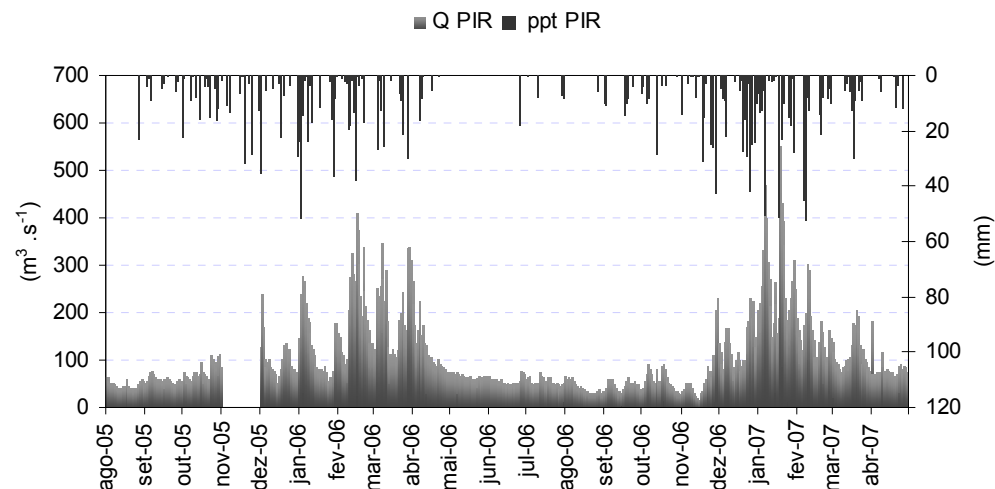


Figura 19 - Hidrógrafa do rio Piracicaba (vazões médias diárias em m^3s^{-1} , cinza claro, eixo inferior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007 e precipitação diária (mm – cinza escuro, eixo superior) para o período de agosto de 2005 a abril de 2007

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variação do nível freático nas vertentes estudadas

Quando a água da chuva chega ao solo, ocorrem principalmente dois processos: a infiltração, onde a água adentra pelos espaços porosos do solo, podendo compor as zonas não saturada e saturada; e o escoamento superficial, quando a água "escoa" pela superfície do terreno. A água infiltrada no solo subdivide-se numa parcela que se acumula na sua parte superior, e pode voltar à atmosfera por evapotranspiração, e a outra que caminha em profundidade (percolação), podendo compor o fluxo de base. Tanto o escoamento superficial como o escoamento subterrâneo não confinado, eventualmente alimentarão corpos hídricos superficiais.

As profundidades médias do nível da água (NA – em metros) encontradas para todos os poços, em relação à superfície do terreno, podem ser observadas na Tabela 1. A não medição do nível freático para os poços JAG c), MAR c) e MAR d) está associada ao fato desses poços terem suas tampas lacradas com concreto por seus proprietários.

A maior variação do NA entre os poços foi observada na vertente do rio Jaguari (JAG b). No início das medições, o NA se encontrava a 6,94m de profundidade em relação à superfície, chegando a uma profundidade mínima de 3,56m no mês de fevereiro de 2006. A variação total observada para este poço foi de aproximadamente 4m, sendo que no mês de novembro de 2006 foi observada a máxima profundidade do lençol (7,9m) dentro do período. No caso do poço JAG a), a variação total medida foi de 2,11m, sendo as profundidades máximas e mínimas do NA 3,45 e 1,34m, nos meses de novembro de 2006 e janeiro de 2007, respectivamente.

Na vertente do ribeirão das Cabras, as variações observadas para os poços CAB a) e CAB b) foram 2,3 e 1,38m, respectivamente. As profundidades mínimas e máximas no CAB a) foram 0,8 e 3,13m para os meses de janeiro de 2007 e setembro de 2006, respectivamente, e no CAB b) esses valores foram de 4,94m, em fevereiro de 2007, e 6,31m, em novembro de 2006.

As variações observadas na vertente do Marins para os poços MAR a) e MAR b) foram de 1,14m e 1,77m, respectivamente. Os níveis máximos e mínimos foram de 2,32 e 1,18m para o MAR a) e 5,33 e 3,57m para o MAR b).

Na vertente do rio Piracicaba (poço PIR a), a variação total do NA foi de 2,59m, sendo a profundidade máxima registrada em setembro de 2006 (5,78m) e a mínima em março de 2007 (3,19m).

Para os poços COR a) e COR b) as variações totais foram de 0,89 e 0,83m, respectivamente. Para o COR a), as profundidades máximas e mínimas foram registradas em abril e janeiro de 2007, respectivamente; já para o COR b), a profundidade máxima foi registrada em março de 2007 e a mínima em janeiro de 2007. As diferenças nos picos do NA podem estar associadas ao uso doméstico mais intensivo do COR b) por seus proprietários.

Tabela 1 - Variação do NA (m) nos poços de monitoramento das sub-bacias estudadas

Data	JAG a)	JAG b)	CAB a)	CAB b)	MAR a)	MAR b)	PIR a)	COR a)	COR b)
	NA (m)								
Out-05	-	-	-	-	1,80	4,98	-	-	-
Nov-05	-	6,94	2,54	5,97	1,71	4,85	-	-	-
Dez-05	-	5,47	2,32	5,97	1,71	4,72	-	-	-
Jan-06	-	4,91	2,18	5,89	1,69	4,63	5,45	-	-
Fev-06	-	3,56	1,84	5,62	1,57	4,57	4,82	-	-
Mar-06	-	3,89	2,09	5,58	1,59	4,46	4,64	-	-
Abr-06	-	4,55	2,05	5,64	1,36	4,07	4,70	-	-
Mai-06	-	5,12	2,55	5,76	1,60	4,99	5,09	-	-
Jun-06	-	5,52	2,74	5,93	1,84	5,12	5,30	-	-
Jul-06	3,26	6,08	2,88	6,10	1,91	5,19	5,49	-	-
Ago-06	3,42	5,82	2,98	6,22	2,13	5,32	5,76	-	-
Set-06	3,31	6,34	3,13	6,25	1,93	5,24	5,78	-	-
Out-06	3,43	7,09	2,93	6,25	1,92	5,23	5,76	-	-
Nov-06	3,45	7,91	3,07	6,31	2,14	5,33	5,71	-	-
Dez-06	1,72	6,27	1,92	5,98	1,74	4,83	5,41	5,65	-
Jan-07	1,34	4,58	0,80	5,35	1,40	3,87	4,16	5,32	7,00
Fev-07	1,59	4,24	1,87	4,94	1,18	3,57	3,5	5,41	7,21
Mar-07	2,46	5,61	2,40	5,61	1,52	4,02	3,19	5,85	7,83
Abr-07	2,8	5,91	2,52	6,13	2,32	4,68	4,4	6,20	7,47
extremos e variação total (m)									
prof. máx.	3,45	7,91	3,13	6,31	2,32	5,33	5,78	6,20	7,83
prof. Mín.	1,34	3,56	0,80	4,94	1,18	3,57	3,19	5,32	7,00
variação	2,11	4,35	2,34	1,38	1,14	1,77	2,59	0,89	0,83

(-) valores inexistentes

Valores do NA mais próximos à superfície na estação chuvosa 2006-2007 nas vertentes do Cabras, Marins, Piracicaba e Corumbataí confirmam o maior volume precipitado (maior recarga do lençol) neste período quando comparados aos valores encontrados na estação chuvosa de 2005-2006 (com exceção da vertente do Corumbataí, que não foi monitorada nas chuvas 2005-2006). Já para a vertente do rio Jaguari, os maiores volumes precipitados foram registrados na estação chuvosa 2005-2006.

As variações médias mensais do NA (m) e as precipitações acumuladas nos meses de agosto de 2005 a abril de 2007 podem ser visualizadas na Figura 20.

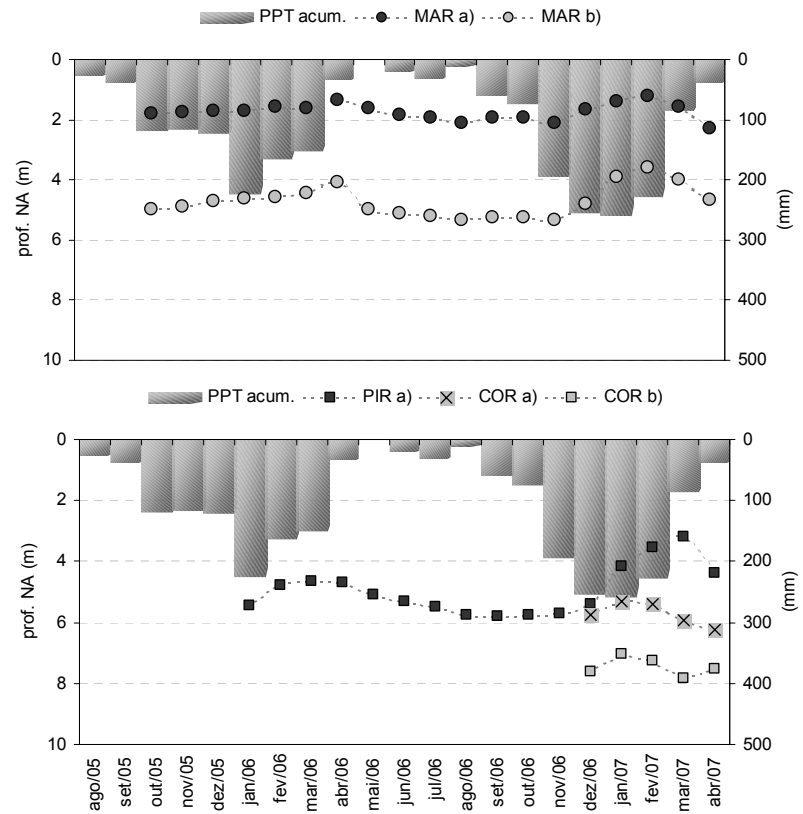
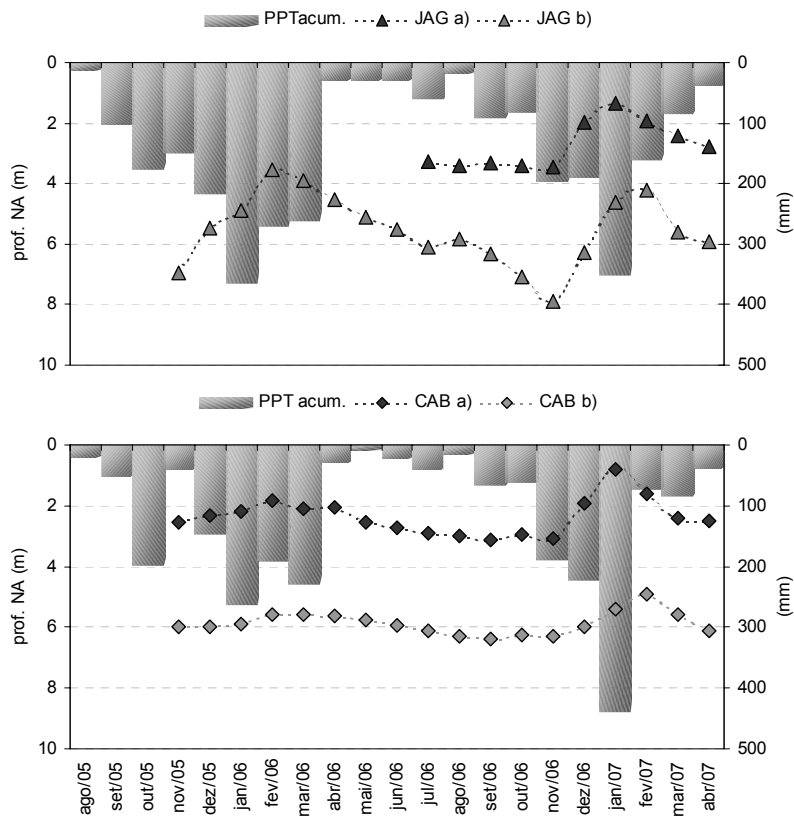


Figura 20 - Variação média mensal do NA (m) nas vertentes do Jaguarí (JAG a) e JAG b), Cabras (CAB a) e CAB b), Marins (MAR a) e MAR b), Piracicaba (PIR a) e Corumbataí (COR a) e COR b), e precipitação acumulada (PPT acum.) nos meses de agosto de 2005 a abril de 2007

3.2 Composição dos isótopos estáveis nas sub-bacias estudadas

Mudanças das composições isotópicas da água nos diversos compartimentos e componentes do ciclo hidrológico fornecem uma assinatura reconhecível, relacionando tais águas às diferentes fases do ciclo. O fracionamento isotópico que acompanha a evaporação do oceano e outras águas superficiais e o processo inverso da formação de chuva são responsáveis por essas mudanças. Como resultado, as águas das chuvas são empobrecidas em ^2H e ^{18}O em relação às águas oceânicas, sendo que as águas remanescentes em sistemas evaporativos, como lagos, plantas, e água do solo são relativamente enriquecidas. Durante a passagem através dos aquíferos, a composição isotópica da água é uma propriedade essencialmente conservativa em temperatura ambiente. Tais características permitem que os isótopos da água sejam utilizados como traçadores em estudos ambientais, sendo suas variações previsíveis conforme estes elementos circulam pelas componentes do ciclo hidrológico (GAT, 1996).

Composição isotópica da precipitação

Os valores individuais do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação acumulada entre coletas (mensais ou quinzenais) nas sub-áreas estudadas apresentaram maiores variações (extremos) quando comparados aos valores individuais das águas superficiais e subterrâneas. A média ponderada (Tabela 2) das concentrações isotópicas da precipitação mostra um ciclo sazonal, já exemplificado pela Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP) do conjunto de dados do Rio de Janeiro (IAEA 1992; citado por MARTINELLI et al., 2004), seguindo um ciclo de invernos secos e verões chuvosos, com valores isotópicos mais enriquecidos na estação seca. Essas variações podem ter relação direta com o tipo de precipitação (i.e., chuvas convectivas locais, chuvas provenientes de frente fria) e com o volume precipitado no período (JOEL R. GAT, Weizmann Institute of Science; comunicação pessoal).

As médias ponderadas do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação nas sub-bacias A, B, C e D encontradas no presente estudo apresentaram grande similaridade nas estações das chuvas 2005-2006, seca 2006 e das chuvas 2006-2007. Nota-se que o volume acumulado da precipitação na bacia A, nas chuvas 2005-2006 (1463 mm), foi maior que o volume acumulado nas chuvas 2006-2007 (974 mm), porém, as médias ponderadas

do $\delta^{18}\text{O}$ são praticamente as mesmas ($-9,0$ e $-9,1\text{‰}$). Na área B as médias registradas para as chuvas 2005-2006 e 2006-2007 foram $-8,5$ e $-9,0\text{‰}$, respectivamente, sendo a diferença dos volumes acumulados nos diferentes períodos igual a 80 mm (1091 mm e 971 mm, respectivamente). Já para as áreas C e D, a estação das chuvas 2006-2007 registrou volumes acumulados (957 e 1024 mm, respectivamente) ligeiramente maiores que a estação das chuvas 2005-2006 (925 e 945 mm, respectivamente), sendo as médias nos diferentes períodos também muito próximas ($-8,9$ (C) e $-10,1\text{‰}$ (D) nas chuvas 2005-2006; e $-8,5$ (C) e $-10,1\text{‰}$ (D) nas chuvas 2006-2007). Na estação seca 2006, as médias ponderadas do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação encontradas nas áreas A, B, C e D foram de $-3,8$, $-3,4$, $-2,8$ e $-2,6\text{‰}$, respectivamente.

Tabela 2 - Média ponderada do $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e volume acumulado (mm) da precipitação composta nas sub-bacias A (JAG), B (CAB), C (MAR) e D (COR)

período		JAG (A)	CAB (B)	MAR (C)	COR (D)
chuvas 05/06	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-9,0	-8,5	-8,9	-10,1
out/05 - abr/06	ppt (mm)	1463	1091	925	945
seca 06	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-3,8	-3,4	-2,8	-2,6
mai - set/06	ppt (mm)	214	145	109	190
chuvas 06/07	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-9,1	-9,0	-8,5	-10,1
out/06 - mar/07	ppt (mm)	974	971	957	1024
Total	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-8,4	-8,3	-8,4	-9,3
out/05 - mar/07	ppt (mm)	2651	2207	1991	2159

As concentrações do $\delta^{18}\text{O}$ encontradas nas amostras individuais da precipitação composta, apresentaram extremos (máximo e mínimo) de $-0,3\text{‰}$ a -13‰ , de $-1,0\text{‰}$ a $-12,4\text{‰}$, de $-1,1\text{‰}$ a -13‰ e de $-0,2\text{‰}$ a $-13,0\text{‰}$ para as sub-bacias A, B, C e D, respectivamente. Já para o $\delta^2\text{H}$, os valores medidos variaram de $+11,7$ a $-92,4\text{‰}$, de $+9,7$ a $-86,7\text{‰}$, de $+1,7$ a $-99,7\text{‰}$ e de $+9,5$ a $-102,9\text{‰}$ nas respectivas sub-bacias. Tais concentrações, quando comparadas as águas superficiais e subterrâneas, confirmam a maior amplitude do sinal isotópico das moléculas de água da precipitação.

Como ocorre com o $\delta^{18}\text{O}$, os valores do $\delta^2\text{H}$ mais empobrecidos foram geralmente registrados durante a estação chuvosa, e os mais enriquecidos durante a estação seca. Os valores do excesso de deutério (“*d*”) encontrados nas amostras da precipitação composta variaram de 7,1 a 20,2‰ (n= 15), de 8,6 a 24,1‰ (n= 15), de 4,6 a 16,7‰ (n= 13) e de 5,9 a 17,8‰ (n= 12) nas sub-bacias A, B, C e D, respectivamente. Os dados apresentam grande similaridade, como era esperado, pois são regiões próximas, e estão dentro da ordem de grandeza apresentada pelos autores a seguir citados. Os valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e o *n* amostral (*n*) do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “*d*” são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão (Desv. Pad.) e número de amostras (*n*) do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “*d*” da precipitação (período: setembro de 2005 a março de 2007)

	Média	Máximo	Mínimo	Desv. Pad.	<i>n</i>
	(‰)				
Precipitação Jaguari					
$\delta^{18}\text{O}$	-8,4*	0,1	-13,8	3,9	26
$\delta^2\text{H}$	-38,5	11,7	-92,4	35,8	15
<i>d</i>	15,1	20,2	7,1	3,8	15
Precipitação Cabras					
$\delta^{18}\text{O}$	-8,3*	-0,4	-13,8	4,0	26
$\delta^2\text{H}$	-36,4	9,7	-86,7	35,5	15
<i>d</i>	15,8	24,1	8,6	5,1	15
Precipitação Marins / Piracicaba					
$\delta^{18}\text{O}$	-8,4*	-1,1	-14,7	4,2	25
$\delta^2\text{H}$	-39,0	1,7	-99,7	34,7	13
<i>d</i>	12,5	16,7	4,1	4,2	13
Precipitação Corumbataí / Piracicaba					
$\delta^{18}\text{O}$	-9,3*	-0,2	-14,3	4,1	28
$\delta^2\text{H}$	-26,8	9,5	-102,9	37,8	12
<i>d</i>	12,8	17,8	5,9	3,3	12

(*) média ponderada de todo período estudado

Pode-se observar na Figura 21, onde as composições do $\delta^{18}\text{O}$ dos volumes acumulados entre coletas da precipitação nas sub-bacias A (JAG), B (CAB), C (MAR) e D (COR) estão sendo comparadas, que há uma coerência espaço-temporal nos dados. Nota-se também, que os valores empobrecidos do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação foram registrados no período chuvoso (dezembro de 2005 a março de 2006 e de dezembro de 2006 a fevereiro de 2007), enquanto os valores enriquecidos foram medidos nos

períodos mais secos (de setembro a outubro de 2005 e de maio a outubro de 2006), confirmando observações feitas por Martinelli et al. (2004) e Leopoldo et al. (1992). Na escala da bacia do Piracicaba como um todo, estes valores podem ser controlados principalmente pelo transporte de massas de ar de grande escala ao invés de situações meteorológicas locais (MARTINELLI et al., 2004).

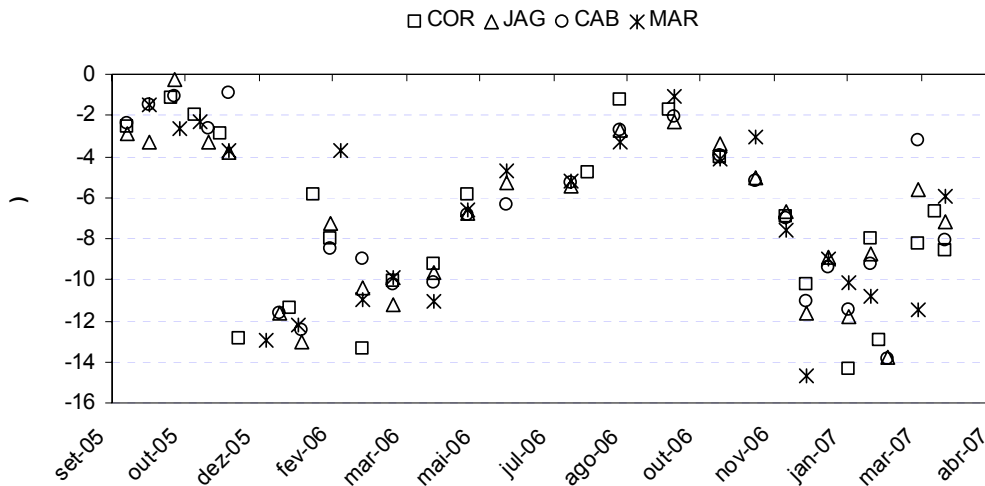


Figura 21 - Sazonalidade do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação nas sub-bacias estudadas (setembro de 2005 a março de 2007)

De acordo com Dansgaard (1964), o “efeito de quantidade” (amount effect) é caracterizado por valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mais leves quanto maiores forem às quantidades precipitadas. Como mencionado no subitem 2.1.1, as principais causas do efeito de quantidade podem estar associadas: (i) com uma maior quantidade de água sendo condensada, haveria um resfriamento mais elevado nas nuvens, aumentando o valor do fracionamento isotópico entre a chuva e o vapor de origem; (ii) na época seca há uma maior intensidade de troca isotópica com o ar atmosférico, enriquecendo isotopicamente as gotas de chuva; (iii) na época seca as gotas de chuva podem sofrer evaporação no percurso até o chão, ficando assim mais enriquecidas (MARTINELLI et al., em prep.).

Como mostrado na Figura 22, o efeito de quantidade da precipitação (DANSGAARD, 1964), para o período de setembro de 2005 a março de 2007, nas subáreas A, B, C e D geralmente apresentam valores empobrecidos (mais leves) quando os volumes acumulados entre coletas são maiores. Porém, nota-se também grandes volumes acumulados com composição isotópica relativamente enriquecida. Tal resultado pode estar associado ao fato dos volumes serem compostos, englobando diferentes eventos de precipitação com características distintas (i.e. vários eventos de pequena intensidade ao invés de um evento de grande intensidade), podendo, assim, mascarar os eventos isolados de chuva. Visto que eventos de maior intensidade podem causar enchentes nos limites da bacia, esse fato pode refletir na composição isotópica das águas superficiais (MARTINELLI et al., 2004).

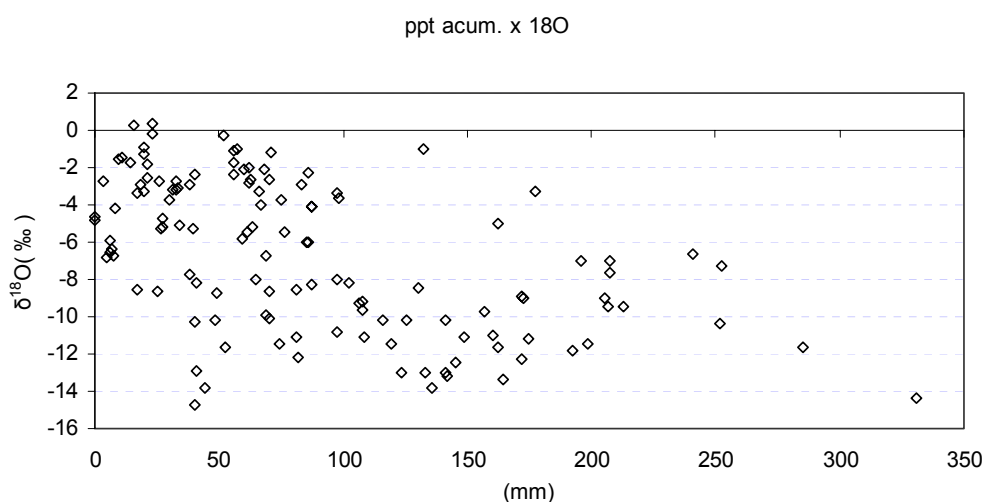


Figura 22 - Efeito de quantidade (amount effect) da composição isotópica da precipitação nas subáreas A, B, C e D para o período de setembro de 2005 a março de 2007

Os valores isotópicos individuais dos eventos diários de precipitação, encontrados para os dados anteriormente gerados na bacia do Piracicaba (MARTINELLI et al., 2004), período de março de 1996 a novembro de 1998, apresentaram grandes amplitudes para o $\delta^{18}\text{O}$, variando de +2,5‰ a -18,6‰. A variação do excesso de deutério da precipitação encontrada no mesmo estudo foi de +5,0 a +22,0‰. Os valores individuais do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ estão localizados ligeiramente

acima da GMWL, uma vez que o valor médio do “*d*” da precipitação para todo o período estudado foi de $+11,2 \pm 0,6\text{‰}$ (MARTINELLI et al., 2004), ligeiramente menor que o valor ($+14,1 \pm 4,1\text{‰}$) encontrado neste estudo, no período de setembro de 2005 a março de 2007. De acordo com esses autores, os valores isotópicos mais enriquecidos na estação seca são acompanhados por um valor de excesso de deutério ligeiramente maior ($d = +13,2\text{‰}$ comparado ao $+11,0\text{‰}$ no período de maior precipitação, em média) indicando que a evaporação das gotas da precipitação pode não ter sido um fator importante neste caso. Segundo os mesmos, os valores δ da precipitação na estação seca apresentam maior variabilidade do que os da estação chuvosa no tempo e espaço. Uma variabilidade relativamente grande de ano a ano em Piracicaba, por exemplo, pode estar associada com as quantidades de chuva, sendo que na seca de 1996 (abril a agosto = 105 mm) o $\delta^{18}\text{O}$ médio foi de $-4,1\text{‰}$, mudando para $\delta^{18}\text{O} = -7,0\text{‰}$ na seca de 1997 (245 mm) e voltando para $\delta^{18}\text{O} = -3,5\text{‰}$ em 1999 (190 mm).

Através de estudo realizado nas micro-bacias que drenam os córregos dos Búfalos e Paraíso, localizados no estado de São Paulo (período de 1984 a 1987), Leopoldo et al. (1992) registraram concentrações isotópicas do $\delta^{18}\text{O}$ variando de $+2,3\text{‰}$ a $-16,3\text{‰}$ nos eventos de precipitação, sendo a média ponderada de todo período $-6,0\text{‰}$. Esses autores observaram uma diferença nos valores médios anuais desse parâmetro, atribuindo-a à quantidade precipitada. Os valores médios anuais do $\delta^{18}\text{O}$ registrados foram $-4,8\text{‰}$ em 1984 (753 mm), $-6,5\text{‰}$ em 1985 (1031 mm), $-6,4\text{‰}$ em 1986 (1499 mm) e $-5,9\text{‰}$ em 1987 (1495 mm). Observa-se que o ano de 1984 apresentou a média mais alta do ^{18}O de todos os anos e o menor volume total. Os mesmos mencionam que geralmente os valores empobrecidos do $\delta^{18}\text{O}$ foram observados na estação chuvosa (novembro a abril), enquanto os enriquecidos foram encontrados na estação seca (maio a outubro). O estudo citado não apresentou valores de $\delta^2\text{H}$ e “*d*”, porém, os dados do $\delta^{18}\text{O}$ apresentados estão dentro da ordem de grandeza encontrada nos estudos realizados na bacia do rio Piracicaba, sendo que os mesmos foram utilizados no cálculo do TRM das águas subterrâneas nas áreas dos córregos estudados por Leopoldo et al., 1992.

Entre 1995 e 1998 nas montanhas Cairngorm, Escócia, Soulsby et al. (2000) encontraram grandes variações nos valores do $\delta^{18}\text{O}$ nos eventos de precipitação de

inverno (neve; de $-4,5$ a $-20,9\text{‰}$) e nas chuvas de verão (de $-2,5$ a $-16,0\text{‰}$). Segundo os autores, os eventos de entrada de água exibem diferenças sazonais claras, sendo a precipitação de inverno (média= $-8,8\text{‰}$) significativamente empobrecida no $\delta^{18}\text{O}$ quando comparada com as chuvas de verão (média= $-6,8\text{‰}$). Diferenças anuais nas composições médias do $\delta^{18}\text{O}$ das precipitações observadas nesse estudo estão também associadas aos volumes anuais acumulados.

Os valores do $\delta^{18}\text{O}$ encontrados para amostras de precipitação, no período de 1990 a 1993, nas áreas de cabeceira do rio Shingobee, centro-norte de Minnesota, EUA, variaram de -5 a -25‰ (REDDY et al., 2006). De acordo com esses autores, o $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação varia sazonalmente, e a maioria dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ das águas meteóricas desse estudo ficaram entre -8 a -18‰ , sendo a média ponderada da precipitação em 1991 de $-10,9\text{‰}$ e no ano de 1992 de $-9,9\text{‰}$. Os mesmos enfatizam que a variação sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação encontrada nesse estudo foi maior que as variações encontradas nas águas superficiais e subterrâneas. Esses autores também não apresentaram valores de $\delta^2\text{H}$ e “ d ” da precipitação nos seus estudos, porém, utilizaram as amplitudes anuais do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação como uma das componentes no cálculo do TRM das águas superficiais e subterrâneas.

Convém ressaltar que todos os autores supracitados enfatizam a sazonalidade das precipitações e suas maiores amplitudes quando comparadas às águas superficiais e subterrâneas. Os extremos mais negativos do $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação registrados por Soulsby et al. (2000) e Reddy et al. (2006) estão associados ao clima temperado das regiões estudadas, ou seja, temperaturas mais baixas proporcionam um maior fracionamento na condensação.

Composição isotópica das águas superficiais

Para as águas superficiais, os dados do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ do presente estudo apresentaram variações menores, quando comparadas às da precipitação, mostrando também uma coerência espaço-temporal, que pode ser visualizada na Figura 23. Nota-se que os rios e ribeirões apresentaram variações no sinal isotópico ao longo da mesma estação do ano, sugerindo uma maior ou menor contribuição das águas das precipitações nas vazões dos rios no momento da coleta.

Os valores do $\delta^{18}\text{O}$ registrados para o rio Jaguari (JAG), ribeirão das Cabras (CAB), rio Atibaia (ATI), ribeirão dos Marins (MAR), rio Corumbataí (COR) e rio Piracicaba (PIR) variaram de $-5,3\text{‰}$ a $-8,7\text{‰}$, de $-5,1\text{‰}$ a $-8,9\text{‰}$, de $-5,3\text{‰}$ a $-9,3\text{‰}$, de $-3,6\text{‰}$ a $-11,0\text{‰}$, de $-4,6\text{‰}$ a $-11,8\text{‰}$ e de $-4,2\text{‰}$ a $-10,6\text{‰}$, respectivamente. Já os valores médios e desvios padrão do $\delta^2\text{H}$ das águas desses corpos hídricos foram $-30,0 \pm 25,8\text{‰}$, $-41,2 \pm 6,8\text{‰}$, $-42,2 \pm 11,5\text{‰}$, $-36,4 \pm 13,6\text{‰}$, $-46,5 \pm 14,1\text{‰}$, $-41,4 \pm 15,2\text{‰}$, respectivamente. As menores amplitudes dos valores do ^{18}O e do ^2H das águas superficiais quando comparadas às amplitudes encontradas na precipitação confirmam observações feitas anteriormente (LEOPOLDO et al., 1992; SOULSBY et al., 2000; MARTINELLI et al., 2004; REDDY et al., 2006, entre outros). Os valores mais pesados do ^2H foram observados para as águas do rio Jaguari, ribeirão dos Marins e rio Piracicaba. Os valores do excesso de deutério variaram de $+1,5$ a $+12,7\text{‰}$ no JAG, de $+3,5$ a $+13,4\text{‰}$ no CAB, de $+4,8$ a $+15,3\text{‰}$ no ATI, de $+3,5$ a $+16,8\text{‰}$ no MAR, de $+3,9$ a $+23,21\text{‰}$ no COR, e de $+2,8$ a $+15,2\text{‰}$ no PIR. De forma geral os rios analisados apresentaram o menor “*d*” no mês de dezembro de 2005, confirmando observações feitas por Martinelli et al. (2004). Segundo estes autores, os valores mais divergentes estão associados à eventos de inundação que ocorrem no início da estação chuvosa e são caracterizados por valores isotópicos enriquecidos e menores valores de “*d*”, o que pode estar associado à descarga de reservatórios superficiais de água parcialmente evaporada. Os valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “*d*” das águas superficiais encontrados neste estudo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e “d” das águas superficiais (período: agosto de 2005 a março de 2007) na bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Água superficial	Estação seca (ago – out/05 e mai – out/06)			Estação chuvosa (nov/05 – abr/06 e nov/06 – mar/07)		
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	“d”	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	“d”
	(‰)					
JAG	-6,1 ±0,6	-36,5 ±5,3	9,7 ±1,8	-7,4 ±0,8	-47,7 ±9,4	8,3 ±4,7
CAB	-6,3 ±0,8	-37,4 ±4,0	9,6 ±2,5	-7,3 ±0,7	-46,1 ±8,8	6,3 ±3,5
ATI	-6,0 ±0,4	-34,7 ±3,8	8,5 ±0,1	-7,5 ±1,0	-49,0 ±14,0	8,4 ±6,0
MAR	-4,9 ±0,9	-31,1 ±7,0	6,0 ±1,3	-7,7 ±1,6	-41,8 ±21,8	21,1 ±22,4
COR	-6,2 ±0,7	38,5 ±5,1	8,4 ±2,7	-8,2 ±1,6	53,6 ±17,1	11,7 ±8,0
PIR	-5,4 ±1,0	-32,9 ±5,7	7,8 ±2,5	-7,5 ±1,3	-51,2 ±18,0	8,6 ±5,4

Apesar das diferenças dos volumes escoados nos diferentes corpos hídricos, a composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ de todos é similar ao longo dos períodos e pode ser observada na Figura 23. Observa-se, que os valores mais leves foram registrados para o ribeirão dos Marins e para o rio Corumbataí, caracterizando grande contribuição da precipitação na vazão dos mesmos no respectivo período. Os valores mais pesados foram observados também para o Marins e para o rio Piracicaba. Segundo Martinelli et al. (2004), valores enriquecidos para o rio Piracicaba podem estar associados ao uso para fins industriais da água deste rio. Já para o Marins, valores enriquecidos podem ter relação com a evaporação direta do corpo hídrico (pouca vegetação ripária remanescente; pequenas vazões no período seco; barragens no leito para uso agrícola), usos relacionados à irrigação, represamento de nascentes formadoras para formação de lagos, entre outros.

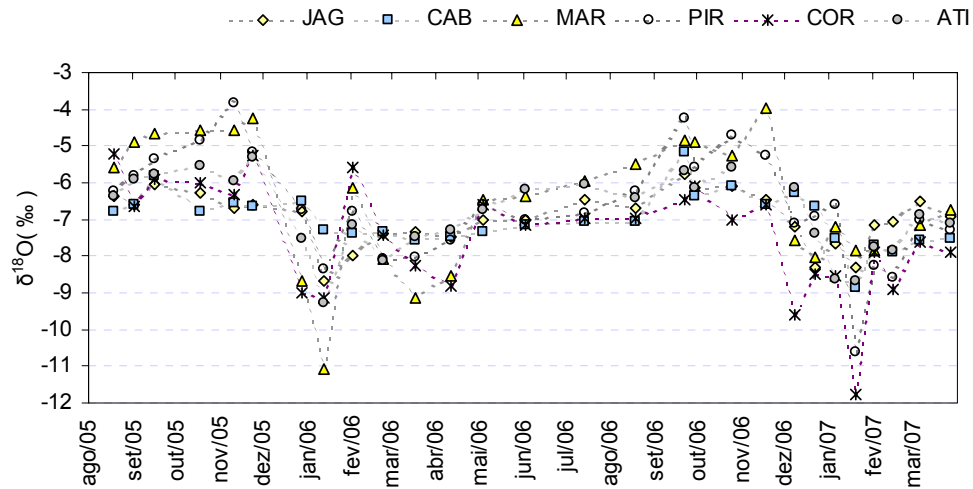


Figura 23 - Variação da composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ para o período de agosto/05 a março/07 dos rios Jaguarí (JAG), Atibaia (ATI), Corumbataí (COR) e Piracicaba (PIR) e dos ribeirões Cabras (CAB) e Marins (MAR)

A Figura 24 ilustra a variação do $\delta^{18}\text{O}$ do rio Piracicaba em relação a sua vazão, para o período que compreende os meses de agosto de 2005 a março de 2007. As maiores variações nos valores individuais do $\delta^{18}\text{O}$ neste rio foram observadas na estação chuvosa 2006-2007 (novembro a março), refletindo a maior contribuição da precipitação na vazão do mesmo.

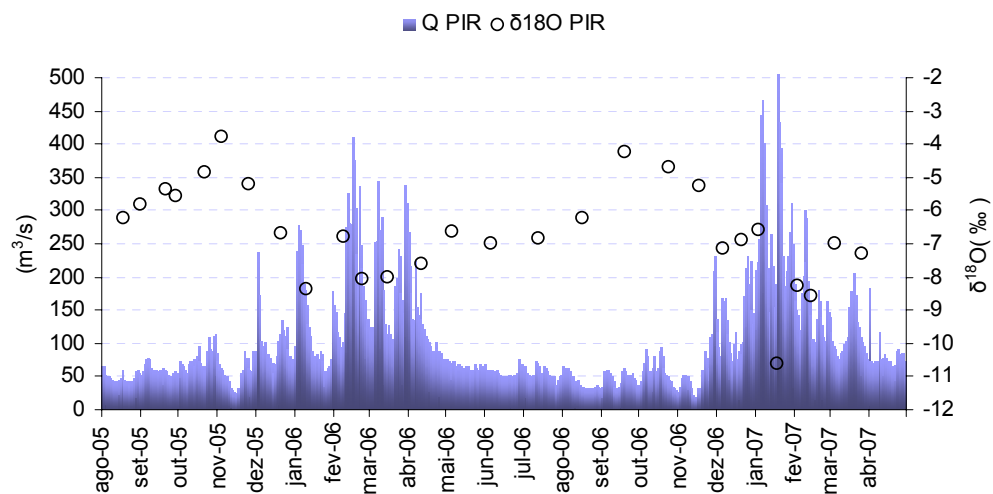


Figura 24 - Variação da concentração do $\delta^{18}\text{O}$ nas águas do rio Piracicaba (período: agosto/05 a março/07)

Os dados individuais do $\delta^{18}\text{O}$ encontrados para as águas superficiais por Martinelli et al. (2004), na bacia do Piracicaba, para o período de junho de 1995 a setembro de 1997, variaram de $-3,9\text{‰}$ a $-8,1\text{‰}$, com os valores extremos do $\delta^{18}\text{O}$ ocorrendo no início ou no final da estação chuvosa, provavelmente decorrentes de eventos de inundação. Segundo esses autores, os valores encontrados para os diferentes rios da bacia mostram uma coerência espacial marcante, sendo as amplitudes encontradas nos dados das águas superficiais bem menores que as das precipitações. A composição isotópica média encontrada para os rios da bacia no período chuvoso de tal estudo foi $\delta^{18}\text{O} = -6,03 \pm 0,5\text{‰}$ e $d = +10,95 \pm 0,6\text{‰}$. De acordo com os mesmos, a composição isotópica da água do rio relativamente estável ao longo do ano é semelhante à da precipitação na estação chuvosa, porém, com um menor valor do d (1 a 2‰) na água do rio em relação aos eventos de entrada da precipitação.

Leopoldo et al. (1992) registraram valores do $\delta^{18}\text{O}$ para os córregos dos Búfalos e Paraíso (localizados no estado de São Paulo) variando de $-2,5\text{‰}$ a $-10,1\text{‰}$ (média de $-6,3\text{‰}$) e de $-3,1\text{‰}$ a $-9,8\text{‰}$ (média de $-6,4\text{‰}$), respectivamente (período de 1984 a 1987). Os valores extremos encontrados por estes autores podem estar associados à maior frequência amostral empregada no estudo (amostragens semanais), diferenças nas dimensões e características dos corpos hídricos estudados, bem como práticas de conservação do solo, presentes em mais de 40% da área total da bacia do córrego dos Búfalos, permitindo desta forma uma maior infiltração da água da chuva no compartimento de sub-superfície. Os autores citados utilizaram a amplitude da composição isotópica do ^{18}O encontrada nas águas superficiais no cálculo do TRM da água do solo nas duas sub-bacias.

Segundo Soulsby et al. (2000) e Reddy et al. (2006) os valores do ^{18}O das águas superficiais (rios) encontrados nos seus estudos na Escócia e Estados Unidos variaram de $-8,4$ a $-10,6\text{‰}$ e de $-8,8$ a $-10,6\text{‰}$, respectivamente. De acordo com esses autores, valores médios ($-9,5\text{‰}$ e $-9,7\text{‰}$) empobrecidos das águas superficiais tanto no verão (valores ligeiramente mais enriquecidos do que no inverno, devido à contribuição das chuvas de verão que também são mais enriquecidas) quanto no inverno, são muito similares e mais próximos aos valores da precipitação de inverno (neve). Isto implica

numa maior recarga da água subterrânea pela neve derretida, onde os grandes volumes precipitados são empobrecidos em ^{18}O , dando as características isotópicas do fluxo de base dessas regiões.

Em todos os estudos citados observa-se uma menor amplitude dos isótopos das águas superficiais ao longo do ano quando comparadas aos valores das precipitações.

Composição isotópica das águas subterrâneas

No caso das águas subterrâneas, os valores do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ encontrados no presente estudo apresentaram variações ainda menores para os poços e nascentes analisados, quando comparadas às concentrações isotópicas das águas superficiais e da precipitação. Os valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$ e excesso de deutério (“d”) dos diferentes pontos de amostragem de água subterrânea não confinada na bacia hidrográfica do rio Piracicaba são apresentados na Tabela 5. Decorrente do fato das amplitudes de variação dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas subterrâneas serem pequenas, apresenta-se os valores médios e desvios padrão obtidos para os poços e nascentes no caso do ^{18}O e do “d”, e valores médios do $\delta^2\text{H}$ englobando todos os poços e nascente que representam uma mesma vertente de estudo (pequeno número de amostras analisadas).

Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$ e excesso de deutério (“d”) dos diferentes pontos de amostragem de água subterrânea não confinada na bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Estação	Estação seca (mai – out/06)		Estação chuvosa (nov/05 – abr/06 e nov/06 – mar/07)	
	$\delta^{18}\text{O}$	“d” (‰)	$\delta^{18}\text{O}$	“d”
JAG a)	-7,4 ±0,1	14,3	-7,4 ±0,2	13,6
JAG b)	-7,2 ±0,4	11,8 ±0,6	-7,3 ±0,3	14,0 ±8,4
JAG c)	-7,6 ±0,3	-	-7,7 ±0,1	13,0
CAB a)	-7,1 ±0,6	11,3 ±1,0	-7,7 ±0,6	10,2 ±4,5
CAB b)	-7,1 ±0,6	12,9 ±0,4	-7,3 ±0,3	9,5 ±3,5
CAB c)	-8,1 ±0,5	17,0	-7,8 ±0,4	12,7 ±2,1
MAR a)	-4,8 ±0,5	0,9 ±0,7	-5,3 ±0,6	-4,6
MAR b)	-5,0 ±0,5	5,1 ±2,0	-4,9 ±0,5	-2,0 ±5,8
MAR c)	-7,5 ±0,6	9,5 ±2,4	-6,8 ±0,6	5,9 ±5,7
COR a)	-	-	-7,6 ±0,3	16,9
COR b)	-	-	-7,7 ±0,4	12,2
COR c)	-	-	-7,9 ±0,3	15,4 ±2,7
PIR a)	-6,7 ±0,3	7,5 ±2,8	-7,2 ±0,3	9,9 ±6,6

Desta forma, os valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ encontrados para os poços JAG a), JAG b) e JAG c) foram $-7,4 \pm 0,2\text{‰}$, $-7,4 \pm 0,3\text{‰}$ e $-7,6 \pm 0,2\text{‰}$, respectivamente. Os valores de “d” obtidos nas estações seca e chuvosa para os poços da vertente do Jaguari são bem similares (13‰ em média). Já o valor médio do $\delta^2\text{H}$ nesta mesma vertente foi de $-44,3\text{‰}$.

Para os poços CAB a) e CAB b) e nascente CAB c), o valores medidos do $\delta^{18}\text{O}$ foram $-7,6 \pm 0,6\text{‰}$, $-7,3 \pm 0,3\text{‰}$ e $-7,9 \pm 0,5\text{‰}$, respectivamente. A variação ligeiramente maior encontrada no CAB a) em relação ao CAB b) pode estar associada à pouca profundidade do NA neste poço, sendo que desta forma, as águas provenientes da precipitação chegariam mais rapidamente até o lençol freático. Os valores médios do “d” obtidos para os poços e nascente nas estações seca (13,5‰ em média) e chuvosa (10,8‰ em média) podem ser visualizados na Tabela 5. O valor médio do $\delta^2\text{H}$ na vertente do Cabras foi de $-45,0\text{‰}$, valor este praticamente igual ao da vertente do rio Jaguari.

Nos poços MAR a) e MAR b), os valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ encontrados foram $-5,1 \pm 0,6\text{‰}$ e $-5,0 \pm 0,5\text{‰}$, já para os poços MAR c) e MAR d) os valores médios medidos foram $-7,1 \pm 0,6\text{‰}$ e $-7,1 \pm 0,5\text{‰}$, respectivamente. Em relação ao $\delta^2\text{H}$, os valores médios medidos foram $-35,7\text{‰}$ (MAR a) e b) e $-49,3\text{‰}$ (MAR c). Já para o “d”, os poços MAR a) e MAR b) apresentaram valores menores deste parâmetro tanto na estação seca ($0,9 \pm 0,7$ e $5,1 \pm 2,0$) quanto nas chuvosas ($-4,6$ e $-2,0 \pm 5,8$), porém, o n amostral reduzido prejudicou maiores considerações. Atavés do diagrama $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ (apresentado abaixo), nota-se que as águas desses poços formam uma linha de evaporação, localizada abaixo da GMWL. Tal fato pode estar associado a: (i) influência de um lago relativamente próximo, sendo que águas evaporadas remanescentes apresentam sinal isotópico mais pesado que os encontrados em águas não evaporadas; (ii) uso da água para irrigação em toda bacia; (iii) a área de recarga dos poços (a) e (b) pode ser distinta da área de recarga dos poços (c) e (d), devido à diferença de profundidade e posição dos mesmos na vertente. Porém, valores médios de $-5,0 \pm 0,5\text{‰}$ do ^{18}O e de $+6,0 \pm 1,5\text{‰}$ do “d” do ribeirão dos Marins foram registrados nas coletas efetuadas em setembro, outubro e novembro de 2005 e agosto, setembro, outubro e novembro de 2006, períodos esses com pouca precipitação, nos quais o fluxo de base é a principal componente da vazão deste ribeirão.

Uma problemática relacionada ao uso de água subterrânea não confinada para abastecimento doméstico rural, em áreas não beneficiadas pelo serviço municipal de distribuição de água, pôde ser verificada através dos resultados obtidos para o poço MAR c), no final e início dos meses de novembro e dezembro de 2006, respectivamente. Segundo o proprietário deste, devido à ausência de água no poço doméstico, decorrente de um período seco prolongado (em 231 dias, entre abril e novembro de 2006, o total de precipitação acumulado foi aproximadamente 256mm), houve o bombeamento de água do ribeirão dos Marins para o MAR c) (baixo nível do NA), sendo a composição isotópica média deste ($-7,2\text{‰}$) substituída pela composição do ribeirão ($-4,0\text{‰}$) nessas datas de amostragem (isto pode ser visualizado na Figura 21). Ressalta-se que esses valores foram excluídos do cálculo do valor médio e extremos encontrados nesse poço.

O valor médio do $\delta^{18}\text{O}$ encontrado no poço PIR a) foi de $-6,9 \pm 0,4\text{‰}$. Nos poços COR a) e COR b) e nascente COR c) os valores médios registrados foram $-7,6 \pm 0,3\text{‰}$, $-7,7 \pm 0,4\text{‰}$ e $-7,9 \pm 0,3\text{‰}$, respectivamente. É importante lembrar que os valores da vertente do Corumbataí são referentes apenas à estação chuvosa 2006-2007. O valor médio do $\delta^2\text{H}$ no poço PIR a) foi $-46,7\text{‰}$, enquanto o “d” na estação seca foi $+7,5 \pm 2,8$ e na chuvosa foi $+9,9 \pm 6,6\text{‰}$. Já nos poços COR a), COR b) e nascente (COR c), os valores médios do $\delta^2\text{H}$ e do “d” foram $-45,1\text{‰}$ e $+16,9\text{‰}$, $-46,2\text{‰}$ e $+12,1\text{‰}$, e $-48,8\text{‰}$ e $+13,5\text{‰}$, respectivamente.

A Figura 25 apresenta as variações do $\delta^{18}\text{O}$ encontradas nos poços e nascentes monitorados no presente estudo.

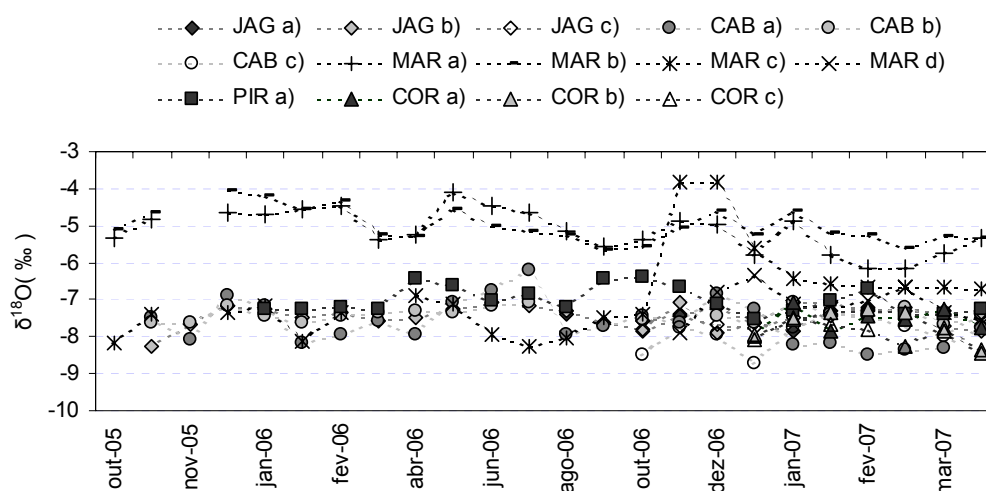


Figura 25 - Variação do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea não confinada nas vertentes do rio Jaguari (JAG a), JAG b), JAG c)), ribeirão das Cabras (CAB a), CAB b), CAB c)), ribeirão dos Marins (MAR a), MAR b), MAR c), MAR d)), rio Corumbataí (COR a), COR b), COR c)) e rio Piracicaba (PIR a)

Nota-se que os valores isotópicos médios encontrados para as nascentes (CAB c) e COR c)) são ligeiramente mais empobrecidos (mais negativos) que os valores médios encontrados para todos os outros poços. É importante lembrar que as nascentes representam o movimento dinâmico das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica (JOEL R. GAT, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel; comunicação pessoal).

Em linhas gerais percebe-se que, com exceção dos valores médios próximos de $-5,0\text{‰}$ dos poços MAR a) e b), o valor isotópico médio do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea não confinada, nas diferentes sub-bacias do Piracicaba estudadas, fica em torno de $-7,3\text{‰}$ nos poços e $-7,9\text{‰}$ nas nascentes, valores estes ligeiramente mais pesados que a média ponderada da precipitação ($-8,5\text{‰}$) de todo o período deste estudo. Observa-se também que, com exceção dos poços MAR a) e MAR b), que apresentam composição do $\delta^2\text{H}$ mais enriquecida ($-35,7\text{‰}$), que os valores médios desse parâmetro encontrados nos poços ($-45,4\text{‰}$) e nascentes ($-48,3\text{‰}$) nas diferentes sub-bacias são semelhantes, porém, os valores médios totais das nascentes são ligeiramente mais empobrecidos.

Os valores do ^{18}O da água subterrânea não confinada encontrados por Soulsby et al. (2000), em estudo na Escócia, apresentaram variações ainda menores quando comparados aos da precipitação e água do rio. Os dados do $\delta^{18}\text{O}$ encontrados para nascentes (de $-8,9$ a $-9,7\text{‰}$) e poços (de $-8,5$ a $-9,7\text{‰}$) foram bem parecidos. De acordo com esses autores, os valores médios do fluxo de base ($-9,4\text{‰}$) tendem a estar mais próximos dos valores médios da precipitação de inverno (neve) do que da de verão (chuva), implicando em maior recarga da água subterrânea pelos volumes acumulados no inverno. Ainda de acordo com os mesmos, apesar de menores, as variações das razões isotópicas do oxigênio da água subterrânea mostram um claro padrão sazonal, com os menores valores do $\delta^{18}\text{O}$ da nascente ocorrendo durante o derretimento da neve na primavera, e os valores mais enriquecidos ocorrendo no verão. A resposta isotópica em um dos poços estudados por este grupo mostrou pouca relação com a variação encontrada nas águas do rio durante o período estudado, indicando caminhos hidrológicos de sub-superfície mais longos e/ou mais lentos, implicando em fontes distintas de águas subterrâneas e interações mais complexas de drenagem sub-superficial.

Reddy et al.(2006) registraram valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea variando de $-9,6$ a $-10,0\text{‰}$, no estudo realizado em Minesota, EUA. Esses autores afirmam que poços com pouca ou sem influência de águas de sistemas evaporativos (lagos fechados), apresentam comportamento semelhante com o comportamento do $\delta^{18}\text{O}$ do rio estudado, sendo que este último é abastecido por diferentes nascentes ao

longo de seu percurso, e apresenta uma vazão sem grandes variações ao longo do ano, por ser um rio de cabeceira. Em contraste, esses autores encontraram um poço com composição isotópica média distinta da dos outros poços e rio estudados, sendo que este último sofre influência direta de um lago fechado (entrada de água apenas pela precipitação), encontrando-se no sistema de fluxo subterrâneo recarregado com águas mais enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$. Segundo os mesmos, valores mais enriquecidos do $\delta^{18}\text{O}$, quando comparados com a média da precipitação sugerem uma mistura da recarga via precipitação direta, com valores enriquecidos de água subterrânea, em zonas de descarga de lagos, apresentando valores isotópicos intermediários às duas fontes.

Estudos realizados no delta do rio Vermelho, Vietnam (IAEA, 2007), encontraram valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea não confinada para o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2006 de $-6,5 \pm 0,5\text{‰}$ na estação chuvosa (maio a setembro) e $-11,0 \pm 2,14\text{‰}$ na estação seca (outubro a abril). Através de um modelo de mistura com duas componentes, água da precipitação (entrada) e água subterrânea (pré-evento), esses autores utilizaram a composição do $\delta^{18}\text{O}$ para estimar as porcentagens de contribuição do fluxo de base na vazão do rio, nas estações seca (69%) e chuvosa (34%). Esses autores também utilizaram as sazonalidades encontradas nas águas da chuva e do rio para calcular o TRM da água subterrânea não confinada na região estudada.

Trabalhos realizados na bacia hidrográfica do rio Souss, Marrocos (IAEA, 2007), encontraram valores do $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea não confinada de $-8,4\text{‰}$ na nascente em área montanhosa (sob influência de valores empobrecidos da precipitação devido à baixa temperatura) e de $-6,5\text{‰}$ na nascente localizada nas planícies (sofre influência de precipitação enriquecida (menor altitude e temperaturas mais altas) e de lagos existentes nas planícies). De acordo com esses autores, os dados dos isótopos estáveis indicam que o sistema de água subterrânea livre do rio Souss é altamente influenciado pela contribuição das águas de recarga das montanhas, as quais apresentam maiores volumes precipitados e menores temperaturas ao longo do ano.

Estudos realizado na bacia hidrográfica do rio Sado, região costeira de Portugal, registraram valores do $\delta^{18}\text{O}$ do aquífero livre variando de $+4,0\text{‰}$ a $-4,9\text{‰}$ (IAEA, 2007).

Os valores enriquecidos da água subterrânea sugerem influência direta de sistemas evaporativos (lagos e represas) existentes na região estudada, bem como uma possível influência, em alguns pontos, das águas oceânicas. Esses autores afirmam que os córregos e rio estão também sendo recarregados pelas represas (uso da água na agricultura e por algumas comunidades), sendo que as diferenças nos volumes precipitados nos anos de 2005 (menor chuva acumulada) e 2006 (maior acúmulo de chuva) refletem as composições isotópicas mais empobrecidas do aquífero livre no ano de 2006, sugerindo uma maior contribuição do escoamento de base nas vazões dos corpos superficiais neste último ano.

As linhas meteóricas locais (LML) e os diagramas $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ nas sub-áreas estudadas

Usando a equação da GMWL ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ (‰)) como referência, foram obtidas Linhas Meteóricas Locais (LML), estas últimas constituídas dos valores do $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ medidos para águas das precipitações compostas das diferentes sub-áreas deste estudo. As LMLs foram plotadas para as regiões que possuíam coletores de precipitação composta, sendo essas as vertentes do rio Jaguari (rio JAG; JAG a); JAG b); JAG c) e ppt JAG), do ribeirão das Cabras (rib. CAB; CAB a); CAB b); CAB c) e ppt CAB), do ribeirão dos Marins (MAR; MAR a); MAR b); MAR c) e ppt MAR) e do rio Corumbataí (rio COR; COR a); COR b) e COR c). Foram também plotados os diagramas do $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ em relação à GMWL para o rio Piracicaba e poço (rio PIR; PIR a)) e para os dados gerados no rio Atibaia (ATI).

A Figura 26 refere-se aos valores encontrados no JAG, CAB e ATI. A Figura 27 refere-se aos valores medidos no MAR, COR e PIR.

Observa-se, sem exceção, que as LMLs encontradas nas quatro diferentes áreas estudadas apresentam uma inclinação (respectivas equações nas figuras) praticamente igual à da GMWL (8), e que o intercepto com o eixo Y é ligeiramente maior (+13,5‰ em média) do que o “d” da GMWL (10), confirmando que a evaporação das gotas da chuva não é um fator relevante, contrário ao que ocorre em áreas áridas (MARTINELLI et al., 2004).

Com exceção do gráfico referente aos valores isotópicos encontrados na área do Marins (poços MAR a), MAR b) e rib. MAR) e de alguns valores referentes ao rio Piracicaba (Figura 27), que estão localizados abaixo da GMWL, formando uma linha de evaporação (indícios de influência de água evaporada remanescente), todas as outras sub-bacias apresentaram os valores do $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ distribuídos ao longo dessa linha (às vezes ligeiramente acima, às vezes ligeiramente abaixo), indicando mais uma vez, que não existe evaporação significativa nas áreas estudadas. Percebe-se também, que os valores da precipitação se distribuem ao longo da reta (extremos enriquecidos e empobrecidos do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), enquanto as águas superficiais e subterrâneas (esta última com amplitude ainda menor) se concentram em uma região da LML.

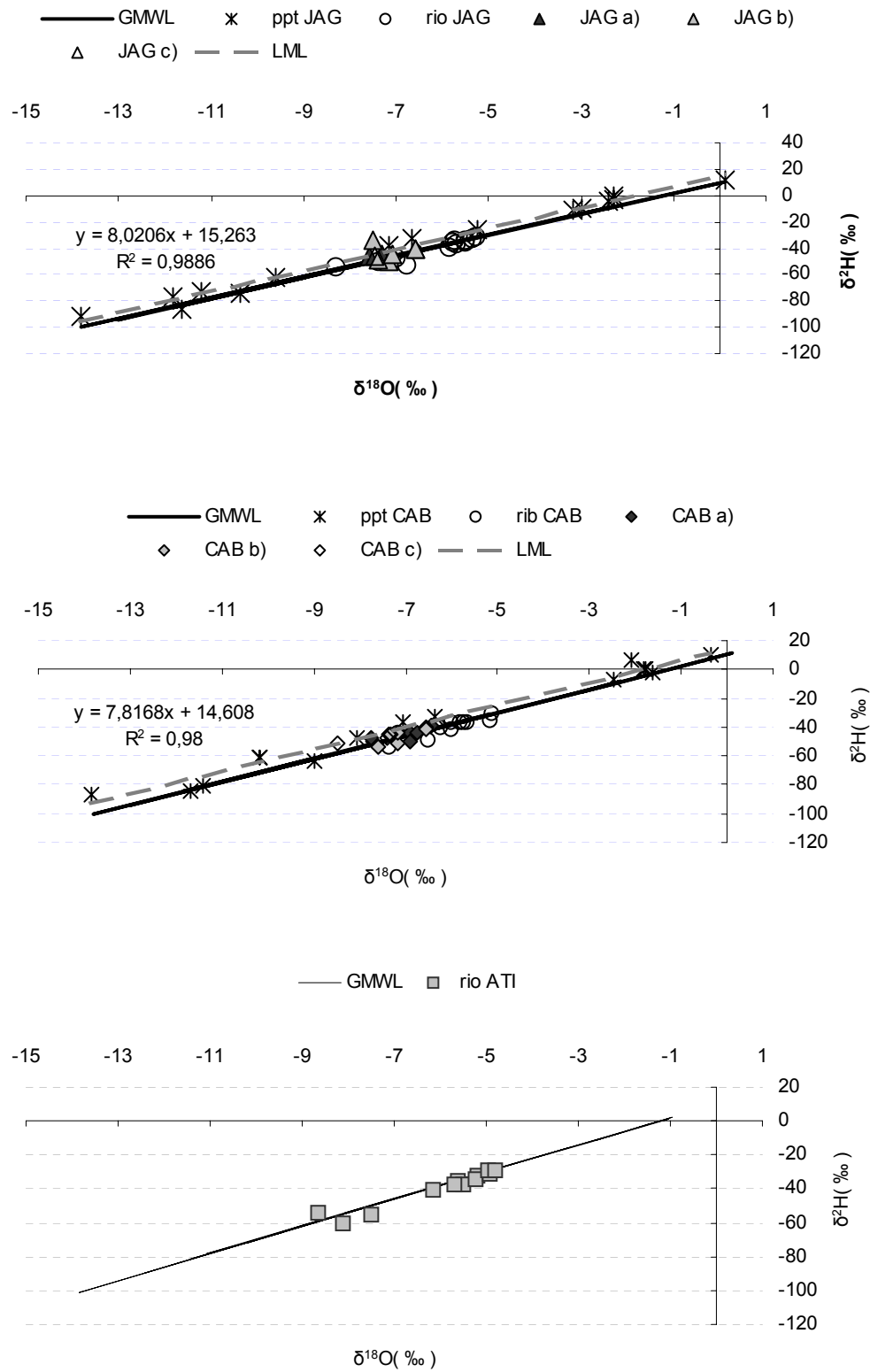


Figura 26 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e LML (reta tracejada cinza escuro) no Jaguari, Cabras e Atibaia

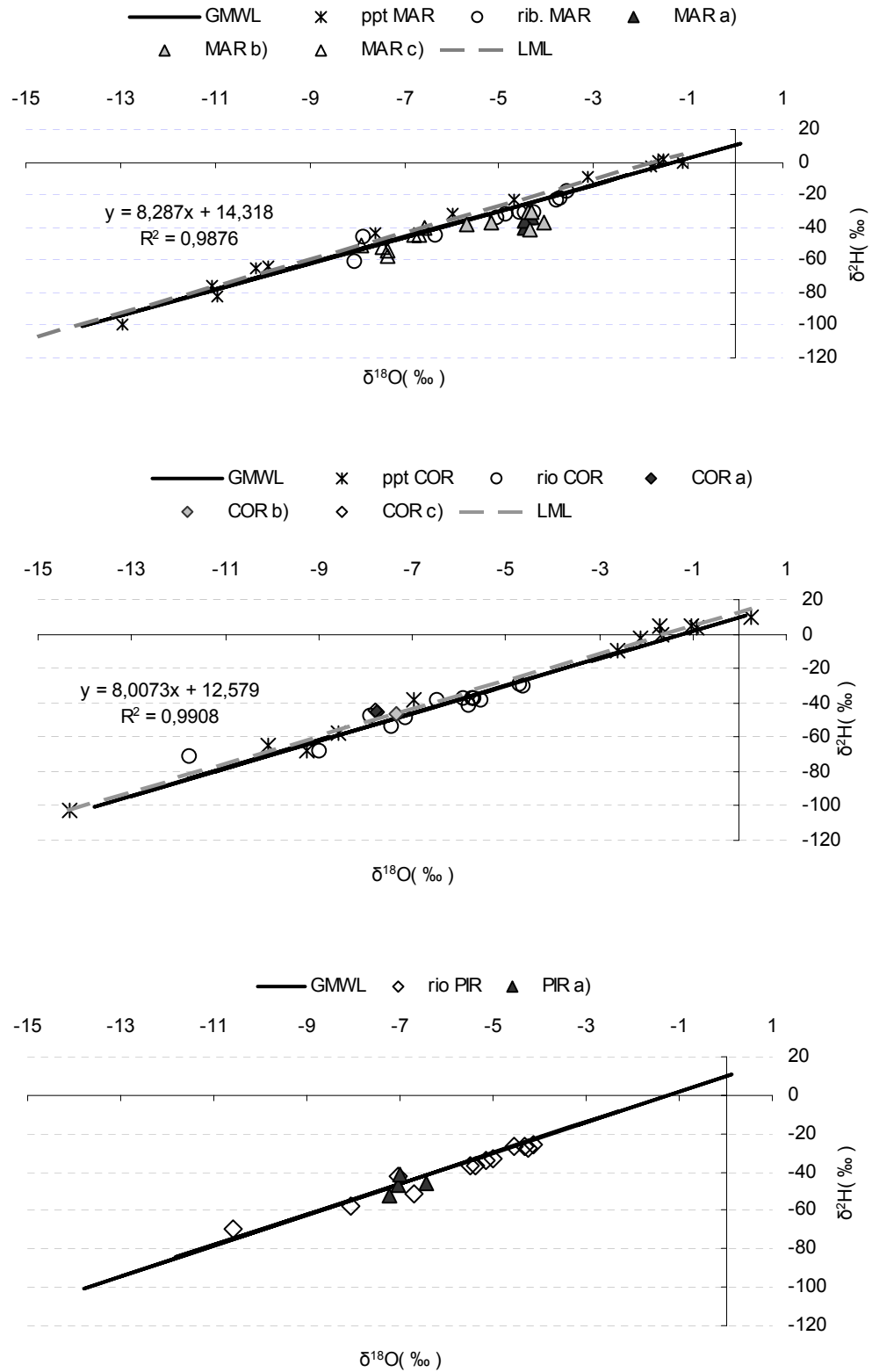


Figura 27 - Valores de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e LML (reta tracejada cinza escuro) no Marins, Corumbataí e Piracicaba

Estimativas do Tempo de Residência Médio (TRM) do aquífero livre

O $\delta^{18}\text{O}$ é um bom traçador para caracterizar processos hidrológicos por ser confiavelmente medido em diferentes compartimentos hidrológicos de uma bacia (REDDY et al., 2006). Investigações da variação sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ nesses compartimentos podem ser usadas como uma primeira aproximação na determinação do tempo de residência médio da água (SOULSBY et al., 2000). As variações sazonais do isótopo do oxigênio da precipitação são mais pronunciadas (maiores amplitudes) quando comparadas às sazonalidades das águas superficiais e subterrâneas. Essas possíveis diferenças das composições isotópicas nos diferentes compartimentos hidrológicos, ao longo dos anos, são melhor compreendidas em estudos plurianuais (TOMAS VITVAR, International Atomic Energy Agency; comunicação pessoal).

Através da equação 8, e utilizando-se as amplitudes dos valores isotópicos do $\delta^{18}\text{O}$ encontradas na água da chuva e água subterrânea não confinada (poços e nascentes), estimou-se o TRM nas diferentes vertentes deste estudo. Estes valores médios, expressos em meses e anos, referem-se a todo o período (setembro de 2005 a abril de 2007). A Tabela 6 apresenta os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e TRM encontrados.

Convém ressaltar que os diferentes autores supracitados mencionam a importância de um período de estudo maior que um ano hidrológico. Porém, decorrente do fato dos comportamentos isotópicos das águas subterrâneas nos diferentes poços e nascentes deste estudo terem sido, em geral, muito similares, optou-se por estimar o TRM, mesmo quando o n amostral tenha sido menor que 12 (um ano hidrológico).

Observa-se para a vertente do rio Jaguari uma diferença significativa dos TRMs encontrados nos diferentes poços (Tabela 6). O JAG a) encontra-se na parte mais baixa e plana da vertente, sendo que nenhuma camada de impedimento foi encontrada em sua perfuração. De acordo com o proprietário do sítio onde localizam-se os poços em questão, quando o poço doméstico JAG b) foi escavado (porção intermediária da vertente), uma camada de seixos foi encontrada em torno dos 5m de profundidade; e observou-se que a variação do NA (JAG b) ao longo do período estudado foi a maior de todas. Desta forma, sugere-se que a camada de impedimento, associada à grande variação do NA, forma lençol suspenso de fluxo sub-superficial, à meia profundidade deste poço, contribuindo com volumes maiores de água ao longo do ano, explicando

assim, o menor TRM estimado. Já para o JAG c), o maior TRM estimado pode estar associado à sua maior profundidade em relação ao autros, posição superior da vertente, e n amostral reduzido, com conseqüente não obtenção da possível amplitude de variação máxima do $\delta^{18}\text{O}$.

Tabela 6 - Valores médios do $\delta^{18}\text{O}$ (precipitação, poços e nascentes) e suas amplitudes (A), TRM (meses e anos) e n amostral

	$\delta^{18}\text{O}$	A	TRM	n
	(‰)	(‰)	anos	
Jaguari				
JAG ppt	-7,0 ±3,8	13,6	na	26
JAG a)	-7,4 ±0,2	0,6	3,4	10
JAG b)	-7,4 ±0,2	0,8	2,6	22
JAG c)	-7,6 ±0,2	0,4	5,3	8
Cabras				
CAB ppt	-6,8 ±3,9	12,9	na	26
CAB a)	-7,6 ±0,6	2,3	0,9	23
CAB b)	-7,4 ±0,2	0,6	3,4	20
CAB c)	-7,9 ±0,5	1,4	1,5	10
Marins				
MAR ppt	-7,0 ±4,1	13,6	na	24
MAR a)	-5,1 ±0,6	2,1	1,1	23
MAR b)	-5,0 ±0,5	1,6	1,3	23
MAR c)	-7,3 ±0,6	1,9	1,2	19
MAR d)	-7,1 ±0,5	1,6	1,4	9
Corumbatai				
COR ppt	-7,0 ±4,1	11,9	na	24
COR a)	-7,6 ±0,3	0,9	2,1	7
COR b)	-7,7 ±0,4	1,2	1,7	7
COR c)	-7,9 ±0,3	0,9	2,3	7
Piracicaba				
PIR ppt	-7,6 ±4,0	14,2	na	28
PIR a)	-7,3 ±0,4	1,1	2,0	20

(na) – não aplicável

Os TRMs estimados na sub-bacia do ribeirão das Cabras foram de 0,9 e 3,4 anos para os poços CAB a) e CAB b), respectivamente. Já para a nascente (CAB c), o tempo estimado foi de 1,5 anos. O menor TRM no CAB a) pode ter relação com sua pouca profundidade, posição mais plana e inferior da vertente, permitindo desta forma, uma contribuição mais significativa da chuva na sua sazonalidade anual. Analogamente, o maior TRM estimado para o CAB b) sugere também uma relação com

sua maior profundidade em relação ao anterior, posição intermediária na vertente, permitindo uma maior mistura dos eventos de entrada de água com a água do pré-evento. Já o valor intermediário encontrado na nascente (CAB c) pode estar associado ao movimento dinâmico desta componente, ocupação e uso na sua área de recarga (floresta nativa secundária), e relativa estabilidade da vazão (observada ao longo do período estudado).

Apesar das diferenças nos sinais isotópicos encontrados nos poços MAR a) e MAR b) ($-5,1 \pm 0,6\text{‰}$ e $-5,0 \pm 0,5\text{‰}$, respectivamente) em relação aos poços MAR c) e MAR d) ($-7,3 \pm 0,6\text{‰}$ e $-7,1 \pm 0,5\text{‰}$, respectivamente), as amplitudes encontradas nos mesmos são parecidas (valor médio de $1,8\text{‰}$), caracterizando TRMs muito semelhantes. Apesar de não ser significativa a diferença do menor TRM estimado para o MAR c) (1,2 ano) quando comparado ao MAR b) (1,3 ano) e MAR d) (1,4 ano), esta pode estar associado à uma possível infiltração de água de escoamento superficial (período chuvoso), devido aos aumentos significativos e repentinos da condutividade elétrica (variações de 350 a $600 \mu\text{S cm}^{-1}$) e concentrações de nitrato (variações de 30 a 200 mg L^{-1}) observadas nessa água em algumas coletas efetuadas nos períodos chuvosos. Convém ressaltar que este poço localiza-se relativamente próximo de uma pocilga e de um estábulo para ovinos, sendo estas as possíveis fontes de contaminação. Esse registro reforça a problemática relacionada ao uso de água de poços e nascentes para abastecimento doméstico rural, em áreas não beneficiadas pelo serviço de distribuição de água municipal.

Enfatiza-se que o monitoramento da água subterrânea não confinada na vertente do rio Corumbataí foi referente apenas à estação chuvosa 2006-2007, sendo desta forma o n amostral para estimativa do TRM igual a 7. Os valores estimados para os poços COR a), COR b) e nascente (COR c) foram 2,1, 1,7 e 2,3 anos, respectivamente. O menor TRM estimado no COR b) pode ter relação com seu uso doméstico diário; porém, o n amostral reduzido e possíveis erros analíticos (maiores que $0,3\text{‰}$) na determinação do $\delta^{18}\text{O}$ podem influenciar essas estimativas. O TRM estimado para o poço PIR a) foi de 2,0 anos, valor bem parecido com os valores estimados na vertente do Corumbataí.

Se as possíveis variações interanuais das amplitudes observadas nos diferentes estudos já citados forem levadas em consideração, os resultados estimados através da metodologia empregada serão diferentes. Baseando-se no fato que as amplitudes encontradas na precipitação anual, e suas possíveis respostas no aquífero livre, podem ter relação direta com o volume acumulado (geralmente um maior volume acumulado apresenta composição isotópica mais leve), os TRMs estimados podem variar anualmente.

Utilizando metodologia similar à empregada no presente estudo, Soulsby et al. (2000), em estudo realizado na Escócia, entre março de 1995 e março de 1998, estimaram o TRM de 2,3 anos para uma nascente. Entretanto, o TRM estimado através da variação da vazão de base do córrego (composição isotópica do córrego no período de menor vazão) foi > 5 anos. De acordo com esses autores, a área superficial de recarga, o tipo de solo e o aumento da área de contribuição da bacia, permitem uma mistura mais efetiva da água da precipitação com a água do solo, sustentando fluxos com composição isotópica relativamente constante por períodos prolongados.

Reddy et al. (2006), em estudo realizado, durante os anos de 1994 e 1997, em uma microbacia na região de Dakota, EUA, utilizando também a função senoidal de amplitudes (MALOSZEWSKI e ZUBER, 1982), estimaram TRMs para a água subterrânea superficial e água subterrânea mais profunda em 1,5 e 16 anos, respectivamente. Segundo esses autores, as grandes diferenças nos TRMs estimados podem significar complexas interações dos fluxos subterrâneos. Os mesmos sugerem uma possível mistura de água nova (eventos de precipitação) e água velha (águas confinadas); bem como possíveis influências dos fluxos subterrâneos provenientes de lagos (sistemas evaporativos) que podem alterar a composição isotópica da água subterrânea não confinada. Esses mesmos autores utilizaram a mesma metodologia para estimar o TRM de um lago aberto existente na área estudada.

Na tentativa de estimar o TRM nas microbacias dos córregos dos Búfalos e Paraíso, SP, Leopoldo et al. (1992) utilizaram o modelo de mistura completa proposto por Herrmann e Stichler (1981), muito similar ao empregado neste estudo. Esses autores esclarecem que: *“Quanto maior a mistura, maior a atenuação da amplitude, com conseqüente diminuição do valor A”*. Levando em consideração os resultados

obtidos pelos mesmos, os valores de A da precipitação nas águas dos córregos do Búfalos (0,41) e Paraíso (0,36) resultaram em TRMs de 0,36 e 0,42 ano, respectivamente, nos reservatórios de sub-superfície dessas microbacias (caracterizadas com solos arenosos e com alta permeabilidade). Diferentes volumes acumulados ao longo do período estudado foram registrados. As diferenças nas amplitudes anuais implicam em diferenças nos TRMs estimados (LEOPOLDO et al., 1992).

Nos estudos realizados no delta do rio Vermelho, Vietnam (IAEA, 2007), no período entre janeiro de 2004 e dezembro de 2006, utilizando o mesmo modelo aqui empregado, porém com amplitudes médias anuais da precipitação e do rio, o TRM estimado para os reservatórios de sub-superfície foi de 4,8 anos. Esses estudos também utilizaram as sazonalidades encontradas nas águas da chuva e dos poços para estimar as porcentagens de contribuição do fluxo de base nas estações seca e chuvosa.

Através das análises dos sinais isotópicos determinados nesse estudo, foi possível constatar que o escoamento de base alimenta os cursos da água durante o período de seca, sendo os valores isotópicos médios medidos para a água subterrânea semelhantes aos valores médios observados nos rios e ribeirões. Já no período chuvoso, a água da precipitação pode ter influência significativa nas vazões dos rios e ribeirões estudados, sendo que isso pode ser observado também através dos sinais isotópicos.

4 CONCLUSÕES

A escala espaço-temporal utilizada no estudo mostrou-se satisfatória para atingir os objetivos desse trabalho, sendo que foram monitoradas duas estações chuvosas e uma seca.

De acordo com os objetivos, apesar da não concretização do modelo conceitual (Figura 3) para todas as vertentes, o monitoramento e a caracterização da composição isotópica do fluxo de base, das águas superficiais e da precipitação foram realizados, bem como a sazonalidade da composição isotópica dessas componentes do ciclo hidrológico foi confirmada (águas superficiais e precipitação) ou determinada (água subterrânea não confinada).

As águas da precipitação apresentaram maiores amplitudes quando comparadas às águas superficiais e subterrâneas, sendo a amplitude das últimas ainda menores. Os sinais isotópicos apresentaram sazonalidade nos dados para todas as componentes do ciclo hidrológico monitoradas neste estudo.

Considerando as hipóteses, a precipitação e o escoamento de base possuem composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ relativamente distintas, uma vez que a média ponderada da precipitação ($-8,6\text{‰}$ observada para todo período estudado) é diferente dos valores médios encontrados nas águas subterrâneas não confinadas ($-7,0\text{‰}$ em média).

Ainda de acordo com o esperado, o escoamento superficial para o canal principal (rio Piracicaba) tem seu valor isotópico correspondente ao da precipitação no período das chuvas (podendo apresentar variações dentro deste período), ou em decorrência de eventos de precipitação isolados de maior intensidade que influenciem significativamente as vazões dos rios e ribeirões. Caso contrário, os sinais isotópicos das águas superficiais seriam semelhantes aos sinais isotópicos encontrados no fluxo de base, caracterizando a contribuição deste na manutenção das menores vazões. Deve-se ressaltar que o $\delta^{18}\text{O}$ nos rios Jaguari, Atibaia e Corumbataí e no ribeirão das Cabras foram muito semelhantes ($-6,2\text{‰}$ em média) no período seco, sendo os valores registrados no ribeirão dos Marins e no rio Piracicaba no mesmo período cerca de $1,0\text{‰}$ mais enriquecido ($-5,2\text{‰}$ em média).

A hipótese inicial de que a composição isotópica do lençol freático é distinta ao longo de uma transecção, partindo do canal principal em direção ao divisor de águas da área de drenagem, não foi confirmada.

A variável $\delta^2\text{H}$ e o consequente “*d*” apresentaram-se como um forte auxílio nas considerações e interpretações dos dados isotópicos.

Amplitudes sazonais do $\delta^{18}\text{O}$ utilizadas na estimativa do TRM da água subterrânea não confinada mostraram variações de 0,9 a 5,3 anos. O valor médio do TRM estimado em todas as sub-bacias foi de 2,0 anos. Esses valores podem ser interpretados como TRM relativamente curto, mostrando que um período seco prolongado pode comprometer a sustentabilidade dos corpos d’água estudados.

Limitações do uso da variação sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ para determinar o TRM podem estar associadas a: valores da componente de entrada de água no sistema (precipitação) compostos (chuva acumulada entre coletas); à precisão analítica necessária na determinação do $\delta^{18}\text{O}$ para o período de interesse; períodos longos de informações necessários para os diferentes compartimentos hidrológicos do sistema.

REFERÊNCIAS

ALLEY, W.M.; REILLY, T.M.; FRANKE, O.L. **Sustainability of ground-water resources**. Denver: US Geological Survey, 1999. 79 p. (U.S. Geological Survey. Circular, 1186).

ARAVENA, R.; EVANS, M.L.; CHERRY, J.A. Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from septic systems. **Groundwater**, Dublin, v. 31, p. 180-186, 1993.

ASANO, Y.; UCHIDA, T.; OHTE, N. Residence times and flowpaths of water in steep unchanneled catchments, Tanakami, Japan. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 261, p. 173-192, 2002.

BALLESTER, M.V.R. et al. Análise integrada de bacias de drenagem utilizando Sistemas de Informações Geográficas e biogeoquímica de águas superficiais: a bacia do rio Piracicaba (São Paulo). In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A.F.M. (Ed.). **Conceito de bacias hidrográficas: teoria e aplicações**. Ilhéus: Editora Editus, 2001. cap. 11.

BÖTTCHER, J. et al. Using isotope fractionation of nitrate-nitrogen and nitrate-oxygen for evaluation of microbial denitrification in a sandy aquifer. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 114, p. 413-424, 1990.

BULLEN, T.D.; KRABBENHOFT, D.P.; KENDALL, C. Kinetic and mineralogic controls on the evolution of groundwater chemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, v. 60, p. 1807-1821, 1996.

BURNS, D.A.; KENDALL, K. Analysis of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ to differentiate NO_3^- sources in runoff at two watersheds in the Catskill Mountains of New York. **Water Resources Research**, Washington, v. 38, p. 9.1-9.12, 2002.
doi:10.1029/2001WR000292.

CASAGRANDE, C.A. **Diagnóstico ambiental e análise temporal da adequabilidade do uso e cobertura do solo na bacia do ribeirão dos Marins, Piracicaba – SP**. 2005. 136 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CHRISTOFOLETTI, A.L.H. **Estudo sobre a sazonalidade da precipitação na bacia do Piracicaba (SP)**. 1991. 238 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. In: **Relatório de “situação dos recursos hídricos” das bacias**

hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (2004/2006). São Paulo, 2007.

CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric Waters. **Science**, Washington, v. 133, p. 1702-1708, 1961.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Plano global dos recursos hídricos da bacia do rio Piracicaba - 2^a.etapa.** Blumenau: Tecnosan, 1986. v. 2.

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, Copenhagen, v. 16, p. 436-468, 1964.

DEL GRANDE, M.; REZENDE, M.O.O.; ROCHA, O. Distribuição de compostos organoclorados nas águas e sedimentos da bacia do rio Piracicaba, SP, Brasil. Instituto de Química de São Carlos, USP; Departamento de ecologia e biologia evolutiva, UFSCar, São Carlos, SP. **Química Nova**, São Paulo, v. 26 n. 5, p. 678-686, 2003.

DINCER, T. The use of oxygen-18 and deuterium concentrations in the water balance of lakes. **Water Resources Research**, Washington, v. 4, n. 6, p. 1289-1306, 1968.

DÖLL, P.; KASPAR, F.; LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 270, p. 105-134, 2003.

DINGMAN, S.L. **Physical hydrology**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 646 p.

ELLINS, K.K.; ROMAN-MAS, A.; LEE, R. Using ²²²Rn to examine groundwater/surface discharge interaction in Rio Grande, De Manati, Puerto Rico. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 115, p. 319-341, 1990.

FOSTER, S.; LAWRENCE, A.; MORRIS, B. **Groundwater in urban development**. Washington, DC, 1998. 55p. (World Bank Technical Paper, 390).

FRIEDMAN, I. Stable Isotope compositions of waters in southeastern California: Part I, modern precipitation. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 97D, p. 5795-5812, 1992.

GAT, J.R. Lakes. In: GAT, J.R.; GONFIANTINI, R. (Ed.). **Stable isotope hydrology**. Vienna: IAEA, 1981. p. 203-222. (Technical Report Series, 210.)

GAT, J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, Palo Alto, v. 24, p. 225-262, 1996.

- GONFIANTINI, R. Environmental isotopes in lake studies. In: FRITZ, P.; FONTES, J. (Ed.). **Handbook of environmental isotope geochemistry**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1986. p. 113-167.
- HALDORSEN, S. et al. Environmental Isotopes as tracers in catchments. In: SAETHER, O.M.; CARITAT, P. (Ed.). **Geochemical processes weathering and groundwater recharge in catchments**. Rotterdam: Brookfield, 1997. p. 185-206.
- HIRSCH, R.M. The influence of man on hydrologic systems. In: WOLMAN, M.G.; RIGGS, H.C. (Ed.). **Surface water hydrology**. Boulder: Geological Society of America, 1990. p. 329-359.
- HOOPER, R.P.; SHOEMAKER, C.A. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. **Water Resources Research**, Washington, v. 22, p. 1444-1454, 1986.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo. 1981.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopic Age and Composition of Streamflow as Indicators of Groundwater Sustainability. **3rd Research Coordination Meeting**. Vienna, Austria, 2007.
- KENDALL, C.; MCDONNELL, J.J. (Ed.). **Isotope tracers in catchment hydrology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1998. 872 p.
- KENDALL, C.; COPLEN, T.B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. **Hydrological Process**, Chichester, v. 15, p. 1363-1393, 2001.
- KENDALL, C.; DOCTOR, D.H. Stable isotope applications in hydrologic studies. In: DREVER, J.I. (Ed.). **Surface and ground water, weathering and soils**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 319-364. (Treatise on Geochemistry, 5).
- KREFT, A.; ZUBER, A. On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. **Chemical Engineering Science**, London, v. 33, p. 1471-1480, 1978.
- KREITLER, C.W.; BROWNING, L.A. Nitrogen-isotope analysis of groundwater nitrate in carbonate aquifers: natural sources versus human pollution. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 61, p. 285-301, 1983.
- LEOPOLDO, P.R.; MARTINEZ, J.C.; MORTATTI, J. Estimation using ¹⁸O of the residence time in small watersheds. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Isotope techniques in water resources development**. Vienna: IAEA, 1992. P. 75-84.
- LERNER, D.N. Identifying and quantifying urban recharge: a review. **Hydrogeology Journal**, Reston, v. 10, p. 143-152, 2002.

- MALOSZEWSKI, P.; ZUBER, A. Determining the turnover time of ground-water systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 57, p. 207-231, 1982.
- MALOSZEWSKI, P. et al. Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 66, p. 319-330, 1983.
- MALOSZEWSKI, P.; ZUBER, A. **Manual on mathematical models in isotope**. Vienna: IAEA, 1996. 107 p. (IAEA. TECDOC, 910).
- MALOSZEWSKI, P. et al. Identifying the flow systems in a karstic-fissure-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 256, p. 48-59, 2002.
- MARTINELLI, L.A. et al. Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon Basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 183, n. 3/4, p. 191-204, 1996.
- MARTINELLI, L.A. et al. Hydrology and water quality in the Piracicaba River basin, São Paulo state, Brazil. In: MC CLAIN, M.E. (Ed.). **The ecohydrology of South American rivers and wetlands**. Wallingford: IAHS Press, 2002. chap. 9, p. 159-176. (Special Publication, 6).
- MARTINELLI, L.A. et al. The Piracicaba River basin: Isotope hydrology of a tropical river basin under anthropogenic stress. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, Oxfordshire, v. 40, n. 1, p. 45-56, 2004.
- MARTINELLI, L.A. et al (Ed.). **Isótopos Estáveis em Estudos Ambientais** (em preparação).
- McDONNELL, J.J.; STEWART, M.K.; OWENS, I.F. Effects of catchment scale subsurface mixing on stream isotopic response. **Water Resources Research**, Washington, v. 27, p. 3065-3073, 1991.
- McGUIRE, K.J.; DeWALLE, D.R.; GBUREK, W.J.; Evaluation of mean residence time in subsurface waters using oxygen-18 fluctuations during drought conditions in the mid-Appalachians. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 261, p. 132-149, 2002.
- McKENNA, S.A. et al. A Stable Isotopic Study of Bank Storage Mechanisms in the Truckee River Basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 134, p. 203-219, 1992.
- MODICA, E.; BUXTON, T.H.; PLUMMER, L.N. Evaluating the source and residence times of groundwater seepage to streams, New Jersey Coastal Plain. **Water Resources Research**, Washington, v. 34, p. 2797-2810, 1998.

MORAES, J.M. et al. Trends in hydrological parameters of a southern Brazilian watershed and its relation to human-induced changes. **Water Resources Management**, Dordrecht, v. 12, p. 295-311, 1998.

MORAES, J.M. et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo hidrológico topmodel em condições sub-tropicais. Estudo de caso: Bacia do Rio Corumbataí, Analândia, São Paulo. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 4., Coimbra, 1999. **Anais...** Coimbra: APRH, 1999. 1 CD-ROM.

MORAES, J.M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de modelos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

MORETTI, L.R. **Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais**. 2001. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

NEAL, C. et al. Acid neutralization capacity measurements in surface and groundwaters in the upper River Severn, Plynlimon: from hydrograph splitting to water flow pathways. **Hydrology and Earth Systems Science**, Katlenburg-Lindau, v. 3, p. 687-696, 1997.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

OMETTO, J.P.H.B. **Efeito das mudanças de uso do solo e efluentes domésticos sobre a composição química da água e a comunidade de macroinvertebrados bentônicos em duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na bacia do rio Piracicaba (SP)**. 2001. 82p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PELLEGRINO, G.Q. **Análise espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio Piracicaba**. 1995. 117p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

PELLEGRINO, G.Q. et al. Análise espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 125-135, 2001.

PHILLIPS, S.W.; FOCAZIO, M.J.; BACHMAN, L.J. **Discharge, nitrate load, and residence time of ground water in the Chesapeake Bay watershed**. Reston: US Geological Survey, 1999. 6 p. (Fact Sheet FS – 150).

PROCHNOW, M.C.R. **A qualidade das águas na bacia do rio Piracicaba**. 1981. 168p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 1981.

RAMSPACHER, P. et al. The recharge of large springs from a carbonate aquifer near Innsbruck applying environmental tracers. In: HÖTZEL, H.; WERNER, A. (Ed.). **Tracer hydrology**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1992. p. 251-257.

REDDY, M.M. et al. Characterization of surface and ground water $\delta^{18}\text{O}$ seasonal variation and its use for estimating groundwater residence times. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 20, p. 1753-1772, 2006.

SALATI, E.; DALL'OLLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. **Water Research**, **15(5)**: 1250-1258. 1979.

SALATI, E. **Análise ambiental sintética e qualidade de água do rio Corumbataí (SP) como subsídio para o planejamento regional integrado da Bacia de drenagem do rio Corumbataí**. 1996. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

SCHLOSSER, P. et al. Tritium/ ^3He dating of shallow groundwater. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 89, p. 353-362, 1988.

SCHULLER, A.E. et al. Análise da Representatividade Física dos Parâmetros do Topmodel em uma Bacia de Meso Escala Localizada nas Cabeceiras do Rio Corumbataí, São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 5, n.25, p.5-25, 2000.

SEIBERT, J. et al. Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis. **Water Resources Research**, Washington, v. 39, p. 2.1-2.9, 2003. doi:10.1029/2002WR001404.

SEILER, K.P.; LINDNER, W. Near-surface and deep groundwaters. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 165, p. 33-44, 1995.

SHERLOCK, M. et al. Physical controls on septic leachate movement in the vadose zone at the hillslope scale, Putnam County, New York, USA. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 16, p. 2559-2575, 2002.

SIMPSON, H.J.; HERCZEG, A.L. Stable isotopes as an Indicator of Evaporation in the River Murray, Australia. **Water Resources Research**, Washington, v. 27, p. 1925-1935, 1991.

SKLASH, M.G.; FARVOLDEN, R.N. The role of groundwater in storm runoff. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 43, p. 45-65, 1979.

SOCKI, R. A. C. S.; ROMANEK, E. K.; GIBSON. On-line technique for measuring stable oxygen and hydrogen isotopes from microliter quantities of water. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 71, p. 2250-2253, 1999.

SODDY, F. The radioelements and the periodic law. **Chemistry News**, Chevy Chase, v. 107, p. 97, 1913.

SOLOMON, D.K. et al. A validation of the $^3\text{H}/^3\text{He}$ method for determining groundwater recharge. **Water Resources Research**, Washington, v. 29, p. 2951-2962, 1993.

SOULSBY, C. et al. Isotope hydrology of the Allt a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland: implications for hydrological pathways and residence times. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 14, p. 747-762, 2000.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: ABRH; EDUSP, 1993. 943 p.

UNNIKRISHNA, P.V.; McDONNELL, J.J.; STEWART, M.L. Soil water isotope residence time modelling. In: TRUDGILL, S.T. (Ed.). **Solute modelling in catchment systems**. Chichester: Wiley, 1995. p. 237-260.

VITVAR, T.; BALDERER, W. Estimation of mean residence times and runoff generation by stable isotope measurements in a small prealpine catchment. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 12, p. 787-796, 1997

WITTENBERG, H.; SILVAPALAN, M. Watershed groundwater balance stimulation using streamflow recession analysis and baseflow separation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 219, p. 20-33, 1999.

ZUBER, A. Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. In: FRITZ, P.; FONTES, J.C. (Ed.). **Handbook of environmental isotope geochemistry**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 1-59.

ANEXO

Tabela A1 - Pluviometria mensal (mm) de algumas cidades da bacia do rio Piracicaba

Pluviometria na bacia hidrográfica do rio Piracicaba								
Cidade	Morungaba	Itatiba	Pedreira	Rio claro	Analândia	Campinas	Americana	Piracicaba
mês-ano	(mm)							
jan-05	340	232	301	370	382	450	397	239
fev-05	102	142	114	99	129	104	-	68
mar-05	224	236	197	248	250	327	-	112
abr-05	17	38	25	47	29	31	50	31
mai-05	183	149	148	94	85	169	113	164
jun-05	67	41	68	47	28	47	40	43
jul-05	19	30	11	2	5	6	3	8
ago-05	12	11	13	9	13	18	10	24
set-05	104	96	72	36	72	50	49	35
out-05	178	163	173	77	75	198	-	119
nov-05	150	109	103	-	21	38	-	117
dez-05	217	223	213	169	212	147	135	122
jan-06	366	203	133	127	225	264	244	225
fev-06	272	264	180	299	296	191	280	165
mar-06	262	-	193	269	104	229	239	152
abr-06	27	9	19	59	35	27	24	32
mai-06	27	17	2	11	14	7	2	0
jun-06	26	-	26	11	11	20	17	19
jul-06	61	72	39	17	17	39	25	28
ago-06	17	0	20	13	13	14	13	9
set-06	92	80	84	-	-	66	55	60
out-06	84	69	118	119	119	62	133	75
nov-06	196	149	268	-	-	191	142	195
dez-06	190	165	166	277	277	-	99	255
jan-07	352	299	380	173	173	440	-	259
fev-07	162	47	59	-	-	147	-	228

(-) valores inexistentes

Tabela A2 - Vazões (m^3s^{-1}) médias, máximas e mínimas para o posto 3D-009 (rio Jaguari) e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- posto D3-046

Vazões rio Jaguari 3D-009																					
mês	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
ano	/05	/05	/05	/05	/05	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06
(m^3/s)																					
Média	7,4	8,8	9,6	9,4	12,1	14,9	31,6	21,8	11,8	8,4	7,7	7,5	6,7	8,4	7,8	8,0	11,4	24,3	10,1	9,5	6,9
Máxima	8,6	13,9	13,6	14,2	22,8	33,4	94,5	52,8	24,0	9,7	10,1	12,3	11,2	15,1	12,8	21,4	31,3	56,6	19,2	24,0	9,5
Mínima	6,8	7,6	8,3	7,4	8,2	7,1	11,4	12,4	7,9	7,7	6,9	5,9	5,7	6,7	5,7	5,0	6,9	9,7	7,0	5,7	5,5
Precipitação Morungaba D3-046																					
(mm)																					
Total	12.3	103.7	177.7	150.3	216.6	365.7	271.6	262.1	26.5	24.1	26.4	60.5	16.7	92.3	83.8	196.3	190	352.4	161.6	-	-
Maior	4.4	28.5	60.5	56	44	68	61.5	68.8	7.2	13.6	22.6	33	9	18	52.4	51.5	48.5	51	70.3	-	-
Número de dias com chuva																					
Dias	16	22	19	14	13	17	23	22	19	5	23	19	11	15	16	15	18	22	15	-	-

Tabela A3 - Vazões (m^3s^{-1}) na momento da coleta do ribeirão das Cabras e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- posto D4-044

Vazões ribeirão das Cabras (momento da coleta)																					
mês	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
ano	/05	/05	/05	/05	/05	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06
(m^3/s)																					
	0,33	-	-	-	0,28	0,45	0,43	0,27	0,28	0,19	0,17	0,14	0,21	0,31	0,20	-	-	1,75	0,40	0,21	0,15
Precipitação Campinas D4-044																					
(mm)																					
Total	18	50	198	38	147	264	191	229	27	7	20	39	14	66	62	191	224	440	74		
Maior	17	16	61	12	34	56	47	50	16	4	19	19	7	24	15	44	45	72	26		
Número de dias com chuva																					
Dias	2	8	10	6	10	15	13	11	3	3	2	3	2	5	8	13	12	13	7		

Tabela A4 - Vazões (m^3s^{-1}) médias, máximas e mínimas para o posto 3D-006 (rio Atibaia) e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- posto D4-044

Vazões rio Atibaia 3D 006																					
mês	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
ano	/05	/05	/05	/05	/05	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06
(m^3/s)																					
Média	9,4	12,6	14,8	15,3	18,1	27,7	44,2	34,8	19,4	10,8	9,9	11,8	9,5	11,9	10,9	13,9	22,3	46,5	19,1	16,7	12,8
Máxima	11,1	23,3	34,9	26,5	41,3	80,2	103,3	132,5	67,8	13,0	13,1	28,6	16,8	17,2	18,6	34,8	45,6	82,1	33,4	36,2	20,1
Mínima	8,0	8,6	9,2	9,6	8,8	10,4	14,6	16,3	11,7	9,9	9,0	9,0	6,9	9,4	7,9	7,9	10,1	20,3	10,6	9,6	9,7
Precipitação Campinas D4-044																					
(mm)																					
Total	18	50	198	38	147	264	191	229	27	7	20	39	14	66	62	191	224	440	74	-	-
Maior	17	16	61	12	34	56	47	50	16	4	19	19	7	24	15	44	45	72	26	-	-
Número de dias com chuva																					
Dias	2	8	10	6	10	15	13	11	3	3	2	3	2	5	8	13	12	13	7	-	-

Tabela A5 - Vazões ($L s^{-1}$) médias mensais do ribeirão dos Marins no momento da coleta e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- Estação Meteorológica ESALQ.

Vazões ribeirão dos Marins (momento da coleta)																					
mês	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	
ano	/05	/05	/05	/05	/05	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06	/06
(L/s)																					
	1,46	1,6	1,93	2,29	3,36	4,02	3,409	6,855	11,5	3,36	1,93	2,8	0,9	3,36	1,33	0,61	10,2	68,9	16,2	3,57	
Precipitação Estação Meteorológica da ESALQ																					
(mm)																					
Total	23,6	35,2	119	117	122	225	164,8	151,5	31,7	0,1	18,6	28,1	9,4	60,3	74,9	195	255	259	228	85,9	
Maior	23,4	9,1	22,6	31,8	35,3	51,9	38	30	16,6	0,1	18,6	8,4	6,1	14,6	29	42,8	42	51,5	52,4	30,3	
Dias	3	12	17	12	13	17	19	14	7	1	1	5	3	10	12	16	21	21	13	13	

Tabela A6 - Vazões (m^3s^{-1}) médias, máximas e mínimas para o posto 4D-021(rio Corumbataí) e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- Estação Meteorológica ESALQ.

mês ano	Vazões rio Corumbataí																				
	ago /05	set /05	out /05	nov /05	dez /05	jan /06	fev /06	mar /06	abr /06	mai /06	jun /06	jul /06	ago /06	set /06	out /06	nov /06	dez /06	jan /06	fev /06	mar /06	abr /06
	(m^3/s)																				
Média	8,4	8,7	8,3	8,4	12,8	19,6	42,4	33,8	20,7	10,1	7,8	6,5	5,4	6,1	10,0	10,1	28,5	78,6	47,6	26,5	18,1
Máxima	11,5	15,6	12,1	19,4	38,6	82,7	158,1	104,6	88,6	11,1	9,7	7,8	9,3	10,8	34,6	41,5	122,7	197,8	120,7	50,3	36,0
Mínima	7,4	6,8	6,3	5,0	7,2	6,0	9,8	14,6	11,1	9,5	6,4	5,2	4,4	3,6	4,5	3,5	7,0	30,8	21,9	15,5	13,3
	Precipitação Estação Meteorológica da ESALQ																				
	(mm)																				
Total	24	35	119	117	122	225	165	152	32	0,1	19	28	9,4	60	75	195	255	259	228	86	36
Maior	23	9,1	23	32	35	52	38	30	17	0,1	19	8	6,1	15	29	43	42	51,5	52,4	30	12
	Número de dias com chuva																				
Dias	3	12	17	12	13	17	19	14	7	1	1	5	3	10	12	16	21	21	13	13	10

Tabela A7 - Vazões (m^3s^{-1}) médias, máximas e mínimas para o posto 4D-007(rio Piracicaba) e total mensal, maior precipitação diária (mm) e dias com chuva no mês para o período de agosto de 2005 a abril de 2007- Estação Meteorológica ESALQ.

mês ano	Vazões rio Piracicaba 4D-007																				
	ago /05	set /05	out /05	nov /05	dez /05	jan /06	fev /06	mar /06	abr /06	mai /06	jun /06	jul /06	ago /06	set /06	out /06	nov /06	dez /06	jan /06	fev /06	mar /06	abr /06
	(m^3/s)																				
Média	49,4	60,9	77,8	*	100,1	127,4	208,1	191,4	125,1	67,5	58,2	56,3	43,0	48,7	58,3	64,3	130,8	273,2	156,2	115,6	81,5
Máxima	65,4	78,7	114,6	*	237,7	277,0	409,7	345,1	267,1	76,7	77,7	74,1	66,4	63,3	94,4	233,1	233,1	548,6	302,1	206,9	183,3
Mínima	40,9	51,2	54,7	*	55,2	57,7	91,3	102,9	75,6	59,3	50,2	38,9	31,7	32,6	30,3	18,6	72,0	146,7	101,3	76,7	65,9
	Precipitação Estação Meteorológica da ESALQ																				
	(mm)																				
Total	23,6	35,2	119	117	122	225	164,8	151,5	31,7	0,1	18,6	28,1	9,4	60,3	74,9	195	255	259	228	85,9	36,4
Maior	23,4	9,1	22,6	31,8	35,3	51,9	38	30	16,6	0,1	18,6	8,4	6,1	14,6	29	42,8	42	51,5	52,4	30,3	12,1
	Número de dias com chuva																				
Dias	3	12	17	12	13	17	19	14	7	1	1	5	3	10	12	16	21	21	13	13	10

