UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Trabalho de Graduação

Curso de Graduação em Geologia

ESTUDO DA VARIAÇÃO ISOTÓPICA E A DINÂMICA DE RECARGA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS CRISTALINO, TUBARÃO E GUARANI NAS BACIAS DO RIO PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ).

André Mauro Gomes

Dr. Didier Gastmans

Rio Claro (SP)

2021

VERSÃO CORRIGIDA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ANDRÉ MAURO GOMES

ESTUDO DA VARIAÇÃO ISOTÓPICA E A DINÂMICA DE RECARGAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS CRISTALINO, TUBARÃO E GUARANI NAS BACIAS DO RIO PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)

Relatório final apresentado à Comissão do Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para o cumprimento da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso no ano letivo de 2020.

Orientador: Dr. Didier Gastmans

Rio Claro - SP

2021

Agradecimentos

Agradeço a todos que fizeram parte em cada etapa da minha formação acadêmica, aos meus pais, Marcio e Lurdinha que me apoiaram incondicionalmente, às minhas irmãs, Elisa e Marina pelos conselhos, aos meus bons amigos pelo convívio, aprendizado e alegrias compartilhadas, aos meus tios, tias e avós pelo carinho e a Rafaela pelo companheirismo e amor.

Em uma caminhada cada pessoa que passa por nós, tem o poder de acrescentar algo em nossa bagagem, alterando o curso de nosso caminho e mudando perspectivas. Agradeço à essas pessoas que cruzaram meu caminho e acrescentaram experiências me tornando quem sou.

Agradeço a todos os companheiros de república pelo bom convívio, conselhos e amizade, tornando a vida estudantil mais fácil e agradável.

Agradeço em especial aos meus professores e orientadores, ao Prof. Dr. Didier Gastmans pelas excelentes aulas e orientações. Obrigado às pessoas colaboraram com esse trabalho me auxiliando na conclusão dessa etapa.

Muito obrigado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Universidade que me acolheu e me deu todo o apoio e ensinamentos necessários para me tornar um excelente profissional.

RESUMO

As bacias do rio Piracicaba, Capivari e Jundiaí (UGRHI-5, PCJ) são importantes afluentes do rio Tiete em uma região populosa do Estado de São Paulo, com mais de 5 milhões de habitantes, atualmente com status de alto estresse hídrico. O uso de isótopos ambientais, permitem a análise espaço-temporal em uma região, facilitando o monitoramento de águas fluviais, subterrâneas e meteóricas, evidenciando processos e efeitos de perturbações no ciclo hidrológico. Essa foi uma pesquisa exploratória com levantamento bibliográfico e documental, para relacionar a composição isotópica das águas subterrâneas das unidades aquíferas, considerando a composição isotópica de precipitação regional. Foram utilizados dados primários e secundários, referentes às razões isotópicas de águas subterrâneas e dados da rede GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), com informações meteorológicas da estação de Rio Claro, entre os períodos de fevereiro/2013 a dezembro/2017. O Sistema Aquífero Cristalino (SAC), apresentou média de -6,20‰ para o $\delta^{18}O$ e -38,05‰ para o $\delta^{2}H$, enquanto o d-excess foi de 11,59‰. O Sistema Aquífero Tubarão (SAT), apresentou média de -7,85‰ para o $\delta^{18}O$ e -52,22‰ para o $\delta^{2}H$, com d-excess de 10,59‰. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) apresentou média de -7,46‰ para o $\delta^{18}O$, -47,82‰ para o $\delta^{2}H$ e d-excess com média de 11,39‰. A precipitação apresentou como expressão da reta meteórica local, a equação $\delta^{2}H=8.34*\delta^{18}O + 15.71$. Os domínios litológicos na região das bacias PCJ são responsáveis por aspectos que interferem no caráter livre ou confinado, no relevo, na taxa de transmissividade e tipo de porosidade de cada aquífero, e, portanto, interferem diretamente na dinâmica de recarga dos sistemas aquíferos. A geomorfologia na área de estudo é dividida em Planalto Atlântico, onde afloram o embasamento cristalino e a Depressão Periférica, composta por rochas sedimentares. A dinâmica de recarga tem forte correlação com a variação da composição isotópica da água meteórica regional e da água subterrânea. Aquíferos livres e rasos, preferencialmente de recargas rápidas, tendem a ter composição isotópica mais semelhante à água meteórica atual, enquanto aquíferos confinados e profundos, tendem a ter composições isotópicas diferentes das atuais.

Palavras chave: Isótopos estáveis. Dinâmica de recarga. Relação água meteórica e águas subterrâneas.

ABSTRACT

The Piracicaba, Capivari and Jundiaí river basins (UGRHI-5, PCJ) are important tributaries of the Tiete river in a populous region of the State of São Paulo, with more than 5 million inhabitants, currently with high water stress status. The use of environmental isotopes allows spatial-temporal analysis in a region, facilitating the monitoring of fluvial, underground and meteorological waters, evidencing processes and effects of disturbances in the hydrological cycle. This was an exploratory research with bibliographic and documentary survey, to relate the isotopic composition of the groundwater of the aquifer units, considering the isotopic composition of regional precipitation. Primary and secondary data from groundwater isotopic ratios and from the GNIP network (Global Network of Isotopes in Precipitation) were used, with meteorological information from the Rio Claro station, between the periods from February / 2013 to December / 2017. The Crystalline Aquifer System (SAC), presented an average of -6.20 ‰ for δ18O and -38.05 ‰ for δ2H, while the d-excess was 11.59 ‰. The Tubarão Aquifer System (SAT), presents an average of -7.85 ‰ for δ18O and -52.22 ‰ for δ2H, with a d-excess of 10.59 ‰. The Guarani Aquifer System (SAG) showed an average of -7.46 ‰ for δ18O, -47.82 ‰ for δ2H and d-excess with an average of 11.39 ‰. The precipitation presented the equation $\delta 2H = 8.34 * \delta 18O + 15.71$ as an expression of the local meteorological line. The lithological domains in the region of the PCJ basins are responsible for aspects that interfere in the free or confined character, in the relief, in the transmissivity rate and type of porosity of each aquifer, and, therefore, directly interfere in the recharge dynamics of the aquifer systems. The geomorphology in the study area is divided into Atlantic Plateau, where the crystalline basement and the Peripheral Depression, composed of sedimentary rocks, emerge. The dynamics of recharge have a strong correlation with the variation of the isotopic composition of regional meteoric water and groundwater. Free and shallow aquifers, preferably with fast recharges, tend to have an isotopic composition more similar to current meteoric water, while confined and deep aquifers, tend to have different isotopic compositions.

Key words: Stable isotopes. Recharge dynamics. Relationship between meteoric water and groundwater.

ANDRÉ MAURO GOMES

ESTUDO DA VARIAÇÃO ISOTÓPICA E A DINÂMICA DE RECARGAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS CRISTALINO, TUBARÃO E GUARANI NAS BACIAS DO RIO PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)

Trabalho de Graduação apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Dr. Didier Gastmans (orientador)

Msc. José Cláudio Viégas Campos

Msc. Vinícius dos Santos

Rio Claro, 14 de abril de 2021.



Assinatura do aluno

Assinatura do orientador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 7
1.1 Apresentação 7
1.2 Objetivos 9
1.2.1 Objetivo geral 9
1.2.2 Objetivos específicos 9
1.3 Justificativa 9
1.4 Caracterização da área de estudo. 10
1.4.1 Caracterização Geral 10
1.4.2 Aspectos Fisiográficos 11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
2.1 Águas subterrâneas e aquíferos 13
2.2 Isótopos estáveis na hidrologia 16
2.3 Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a região de estudo. 19
2.4 Hidrogeologia Regional 21
2.4.1 Geologia Regional 21
2.4.2 Unidades hidrogeológicas 24
3 MATERIAIS E MÉTODOS 27
3.1 Dados da composição isotópica da água subterrânea 28
3.2 Dados isotópicos de precipitação 29
3.3 Aspectos hidrogeológicos 29
3.4 Elaboração dos resultados e discussão 29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 30
4.1 Composição isotópica da precipitação e das águas subterrâneas dos aquíferos 30
4.2 Mapa de composição isotópica 39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 41
6 REFERÊNCIAS 42

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Apresentação

No estado de São Paulo estão inseridas unidades hidrogeológicas que armazenam água subterrânea, aproveitada em 80% dos municípios do Estado, de forma parcial, ou total (CETESB, 2018). Diante do uso intenso e poluição dos recursos hídricos superficiais, há uma maior demanda nos recursos hídricos subterrâneos e esse cenário se agrava ainda mais com seca enfrentada durante a crise hídrica de 2014 a 2019 (CUNHA et al., 2019).

As bacias do rio Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) representam importantes afluentes do rio Tiete em uma região populosa e importante para o Estado de São Paulo, denominada Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos, a UGRHI – 5, inclusas na Política Nacional de Recursos Hídricos pela lei nº 7.663, 1991. As unidades hidrogeológicas que suportam estas bacias remetem ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC), Sistema Aquífero Tubarão (SAT) e Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Sistema de Aquífero Serra Geral.

É importante ressaltar que as bacias PCJ fornecem parte de seus recursos superficiais para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo através do Sistema Cantareira, corroborando para o status de estresse hídrico da região. Em 29/05/2017, foi publicada a Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 926, de 29 de maio de 2017, que outorga à SABESP, pelo prazo de 10 anos, o uso das vazões máximas médias mensais do Sistema Cantareira, para fins de abastecimento público de até 33 m^3/s (Agência das Bacias PCJ, 2020).

Os estudos hidrológicos com isótopos estáveis H e O, permitem a análise espaço-temporal em uma bacia, facilitando o monitoramento de águas fluviais, subterrâneas ou meteóricas e evidenciando processos e efeitos de perturbações no ciclo hidrológico, facilitando a interpretação de composições isotópicas locais e se mostrando uma boa ferramenta de gestão. (AGGARWAL et al., 2012).

São chamados isótopos estáveis as variantes de um elemento químico, diferenciados pelo número de nêutrons, com mesma quantidade de prótons e propriedades químicas iguais, sem decaimento radioativo. Os isótopos estáveis “leves”, com menos nêutrons, ocorrem em abundância muito maior que os “isótopos pesados”, com mais nêutrons (MARTINELLI, 2009).

Os isótopos estáveis de O e H, uma vez que integram moléculas da água, são usados em estudos hidrológicos e hidrogeoquímicos como elementos traços, pois se movimentam de maneira previsível pelo ecossistema. Esse aspecto permite verificar a origem, entender o movimento da água, intensidade da precipitação e compreender outros fatores que agiram sobre a água estudada (MARTINELLI, 2009). Assim, com base nos parâmetros isotópicos da molécula de água, é possível elaborar modelos de circulação atmosférica da água da chuva e água subterrânea, marcando registros temporais da origem da precipitação (GASTMANS et al., 2010). Segundo Clark e Fritz (1997), alterações na razão isotópica, ou assinatura isotópica, podem ser associadas à processos climáticos.

O uso desse tipo de análise vem se tornando cada vez mais popular com os avanços da técnica de espectrometria de absorção a laser em cavidade ressonante (WASSENAAR; COPLEN; AGGARWAL, 2014), alcançando melhor acurácia analítica. No Brasil, merecem destaques os trabalhos de Gallo e Sinelli (1980), Kimmelmann et al. (1982), Silva (1983), Gastmans (2007) e Gastmans et al. (2010).

Portanto, o presente trabalho pretende discutir aspectos de unidades hidrogeológicas aquíferas utilizando análises da composição isotópica de tais unidades, comparando-as com as composições isotópicas da precipitação na região, contribuindo assim para o arcabouço de estudos isotópicos nas bacias PCJ. Os dados primários foram coletados em campo, sendo 11 amostras dos SAG e SAC. Em relação aos dados secundários sobre a composição das águas subterrâneas, foram apresentados por Ezaki et al. (2017) e Santarosa (2020) e dados sobre a composição isotópica de precipitação foram apresentados por Santos (2019a).

Deste modo, o trabalho se propõe a responder as perguntas: Como a composição isotópica dos aquíferos selecionados e da precipitação regional podem se relacionar com a recarga dos aquíferos? Através da análise de composição isotópica, é possível afirmar que algum sistema atmosférico ou um tipo de chuva predomina na recarga dos aquíferos?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar quais os possíveis fatores que promovem a variação da composição isotópica das águas subterrâneas das unidades aquíferas Sistema Aquíferos Guarani, Tubarão e Cristalino nas bacias PCJ.

1.2.2 Objetivos específicos

- Relacionar a composição isotópica de cada unidade aquífera com a composição isotópica da precipitação nas estações chuvosas e secas.
- Produzir um mapa com a composição isotópica dos aquíferos estudados.

1.3 Justificativa

Estudos da composição isotópica de O e H são de grande utilidade em hidrogeologia, pois são eficazes nas investigações e entendimento da origem da água, de processos que atuaram sobre ela e fatores que influenciam a recarga dos aquíferos A análise sobre variações na composição pode auxiliar na exploração sustentável dos recursos hídricos, corroborando com o entendimento sobre taxas de recarga, trajetória da água, condições e interações sofridas durante a recarga do aquífero. Dessa forma, os isótopos estáveis podem ser encarados como uma ferramenta de análise para gestão, principalmente na região de estudo que vem sendo pressionada em questão a demanda hídrica (SÁNCHEZ-MURILLO; BIRKEL, 2016).

1.4 Caracterização da área de estudo.

1.4.1 Caracterização Geral

A área de estudo se situa na região sudeste do Brasil e é formada por um conjunto de bacias hidrográficas, do rio Piracicaba, rio Capivari e rio Jundiaí (PCJ), importantes afluentes do rio Tietê. As bacias PCJ, se localizam entre os meridianos 46º e 49º oeste e as latitudes 22º e 23,5º sul, têm 15.377,82 km² de extensão, com área prolongada no sentido leste-oeste por 300 km e no sentido norte-sul, 100 km. Cerca de 92% da área localiza-se no estado de São Paulo, habitada por mais de 5 milhões de pessoas, com alguns municípios com grande taxa de urbanização e desenvolvimento econômico (PROFILL-RHAMA, 2017).

Os restantes 8% pertencem ao Estado de Minas Gerais, onde se localizam as cabeceiras dos rios Jaguari, Camanducaia e Atibaia, na Serra da Mantiqueira, que, junto com a bacia do rio Corumbataí formam a bacia do rio Piracicaba (PROFILL-RHAMA, 2017).

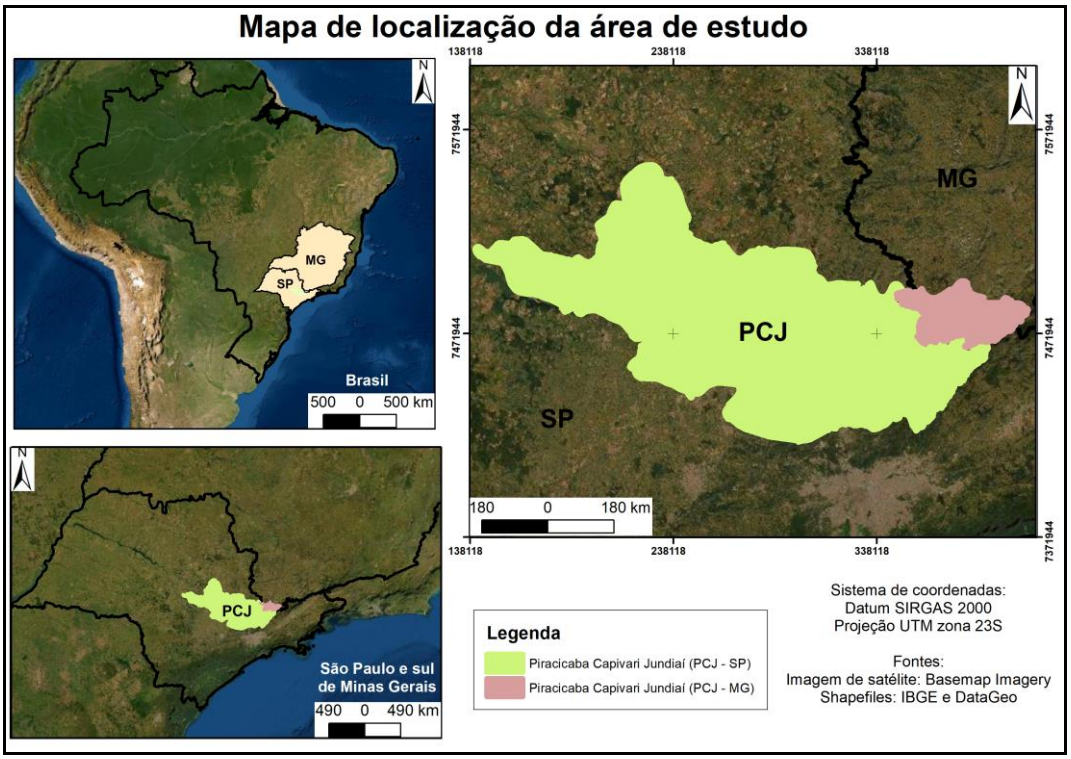
A economia da região de estudo é predominantemente voltada ao agronegócio, apresentando altas taxas de industrialização e extensas áreas urbanas, como Campinas e a Região Metropolitana de Campinas (RMC). Algumas áreas de vegetação se destacam nas cabeceiras das bacias dos rios Piracicaba e Jundiaí (Agência das Bacias PCJ, 2020).

Os principais acessos à região são as rodovias dos Bandeirantes (SP-348), Anhanguera (SP-303), Santos Dumont (SP-75), Dom Pedro I (SP-65) e Fernão Dias (BR-381). A região conta também com acesso pelo aeroporto internacional de Viracopos e uma linha-tronco da FERROBAN.

A Lei Estadual de São Paulo n° 7.663 de 1991, estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos, que divide as bacias hidrográficas paulistas em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI). A UGRHI – 05 é formada pelas bacias PCJ e atualmente se encontram em um alto nível de estresse hídrico, tanto pelas secas prolongadas que a região sudeste vem sendo submetida no período de 2014 a 2019, quanto pela crescente demanda hídrica, uma vez que além de abrigar municípios populosos, a UGRHI – 05 contribui para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) através do Sistema Cantareira, onerando ainda mais e colocando a região das bacias PCJ em um estado de alerta (Agência das Bacias PCJ, 2020).

A região das bacias PCJ é representada na figura 1, abaixo:

Figura 1: Localização das bacias PCJ.



Fonte: Compilação do autor.

1.4.2 Aspectos Fisiográficos

Segundo dados do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias PCJ de 2020, pela classificação de Koeppen, o clima da região é caracterizado como Cwa com características de verões quentes e úmidos, com temperaturas maiores que 22°C e inverno seco (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). A região é classificada como de clima subtropical e a média de precipitação varia entre 1.300 a 1.500 mm/ano. A estação chuvosa se concentra nos meses de outubro a abril e a estação seca se concentra nos meses entre maio e setembro.

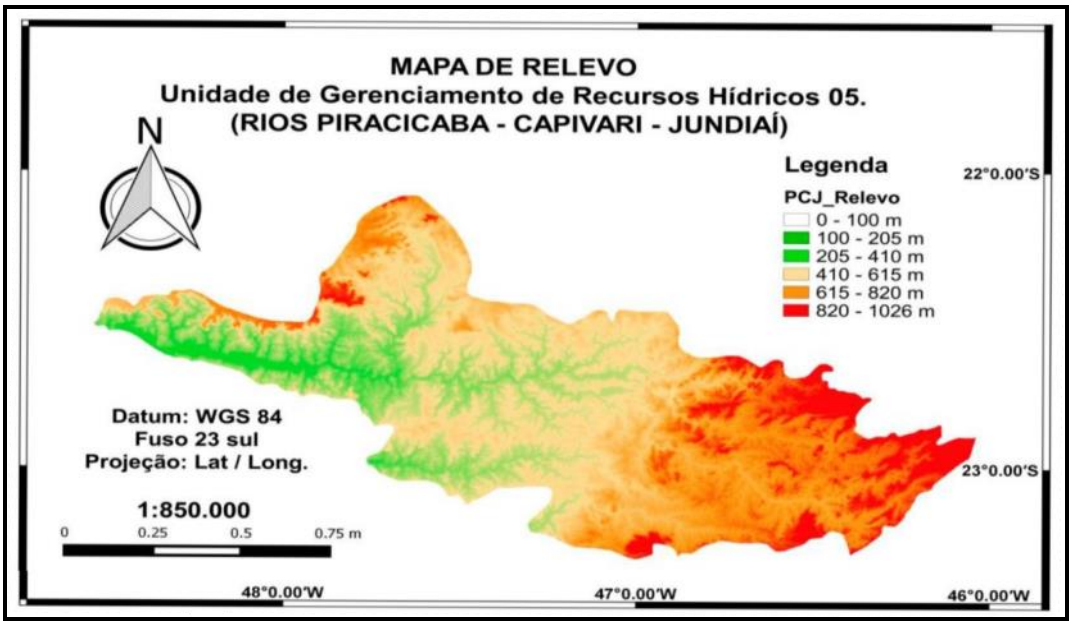
O regime de precipitação da região de estudo é influenciado por sistemas atmosféricos que atuam de maneira cíclica ao longo do ano com períodos mais acentuados e períodos mais brandos, marcando bem as estações verão quente e chuvoso e inverno frio e seco. Durante o

verão, são mais atuantes a Zona de Convergência intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Alta da Bolívia (AB) e a Baixa do Chaco (BC), enquanto no inverno são atuantes as Frentes Frias (FFs) e Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (SANTOS, 2019b).

Durante o verão, a região de estudo é submetida aos processos de recirculação de vapor da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), ocasionando grande disponibilidade de umidade atmosférica e consequentemente precipitação em larga escala, empobrecendo a composição isotópica, enquanto que no inverno, as incursões de Frentes Frias (FF) e movimentos de advecção diminuem a disponibilidade de umidade, ocorrendo chuvas do caráter convectivo, enriquecendo a composição isotópica da água meteórica (SANTOS, 2019b).

Segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, elaborado pelo IPT (1981), o relevo das bacias PCJ apresentam altitudes variando de 400 a 2.000 metros acima do nível do mar, com predominância das feições médias entre 400 e 600 metros. São divididas em três compartimentos geomorfológicos com características de revelo distintas em razão das diferentes naturezas litológicas que compõe cada compartimento. A Figura 02 exibe um mapa altimétrico da região de estudo.

Figura 2: Altimetria das bacias PCJ.



Adaptado de Celeri et al., (2019).

O Planalto Atlântico, situado a leste, caracterizado pelo embasamento cristalino; a Depressão Periférica, composta por sedimentos, localizada na porção centro-oeste das bacias PCJ; e as Cuestas Basálticas, estas no extremo oeste da região. Avançando em sentido a NW, tem-se o reverso das cuestas e o Planalto Ocidental.

Na Depressão Periférica, porção oeste das bacias PCJ, estão inseridas rochas sedimentares do Paleozoico, responsáveis pelo relevo marcado pelas terras baixas e colinas, com altitude variando entre 600 e 650 m (MILANI, 2004).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Águas subterrâneas e aquíferos

As águas subterrâneas representam um importante recurso hídrico se apresentando em função de seu arcabouço hidrogeológico. Segundo a CETESB (2018), 80% dos municípios do Estado de São Paulo utilizam pelo menos em parte, águas subterrâneas para o abastecimento. Vários estudos hidroquímicos sobre os aquíferos paulistas foram realizados por diversos autores como Barison, (2003); Ezaki et al., (2017); Ezaki et al., (2020); Gastmans, (2010); Gastmans et al., (2017).

Segundo Fernandes e Costa (2001), aquíferos são formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água subterrânea, com produtividade hídrica correspondente a taxa de recarga.

A água subterrânea é aquela água armazenada em sub superfície, abaixo da zona não saturada, em rochas reservatório ou solos com espaços vazios entre os poros. As rochas armazenadoras são chamadas aquíferos e são diferenciadas quanto ao tipo porosidade que apresentam (IRATANI; EZAKI, 2009). O período em que a água subterrânea permanece em uma unidade hidrogeológica é denominado tempo de residência e seu fluxo se inicia na recarga e termina na descarga da água subterrânea, fora do sistema do aquífero. Por esse processo, a água subterrânea abastece outros corpos d’água como lagos e rios (MEYBOOM, 1961; SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

Aquitardes são unidades hidrogeológicas com porosidade suficiente para armazenar água, mas sem conectividade para permitir fluxo, apresenta baixa permeabilidade e baixa capacidade de transmissão de água. São comumente formados por folhelhos, argilitos, siltitos, filitos e xistos, rochas sedimentares e metassedimentares que armazenam, mas não apresentam transmissividade efetiva (MIDÕES; FERNANDES; COSTA, 2001).

Os aquíferos podem ser unidades do domínio sedimentar, compostas de rochas granulares, onde a porosidade se faz presente nos vazios entre os grãos dos sedimentos sendo denominada porosidade primária e estimada pelo índice de vazios da rocha reservatório. O fluxo da água subterrânea é relacionado com a conectividade dos poros da rocha, ou do arranjo de seus vazios, refletindo em parâmetros como vazão e permeabilidade e taxa de transmissividade (QUARESMA, 2004).

Os aquíferos também podem ser do tipo fraturado, ou cristalino, constituídos de rochas magmáticas, metamórficas e vulcânicas basálticas, onde a água é armazenada por meio de fissuras, fraturas e falhas. Nesse caso a porosidade é relacionada com a conectividade e densidade de fraturas, denominada porosidade secundária, que possibilita o fluxo de água. A capacidade de armazenamento desse tipo de aquífero é proporcional a espessura de abertura das fissuras e conexão uma com as outras fraturas formando um tipo de aquífero pouco constante e uniforme (QUARESMA, 2004).

Ainda existem aquíferos do tipo cársticos, formados por dissolução de rocha calcária, com importantes volumes de água. Nesse estudo, focaremos nos aquíferos do tipo granular e cristalino. Para entender a dinâmica dos aquíferos, é necessário conhecer as outras unidades aquíferas e suas funções (MIDÕES; FERNANDES; COSTA, 2001).

Zona de recarga é a região em que a água meteórica ou fluvial, tem acesso ao aquífero, seja pela infiltração no solo ou diretamente sobre as rochas armazenadoras. Segundo Healy (2010) recarga é o fluxo descendente de água que consegue atingir o nível freático, somando volume de água subterrânea nos aquíferos. Uma grande parcela da água infiltrada é evaporada, o excedente hídrico pode gerar escoamento superficial, alimentar algum corpo de água superficial como lagos, açudes e rios, ou ser armazenado no solo e então uma fração infiltra até um aquífero.

Ainda, de acordo com Healy (2010), a recarga ocorre de maneira facilitada em locais onde o solo tem granulometria grossa, com alta permeabilidade, e ocorre de maneira dificultada em

área com o solo de granulometria fina, onde a transmissividade é reduzida, drenando menos água e permanecendo mais tempo na zona não saturada, submetida a evapotranspiração.

Segundo Sophoclepous (2002), a variação das taxas de recarga e descarga em um aquífero estão relacionadas às características climáticas, topográficas e geológicas. As condições topográficas influenciam na distribuição do fluxo da água infiltrada e consequentemente na dinâmica de recarga e descarga do aquífero. Vertentes íngremes tendem a ter menor infiltração e maior escoamento superficial, enquanto superfícies planas, com deficiência de drenagem tendem a permitir a infiltração de um volume maior de água, o mesmo caso ocorre com planícies de inundação e depressões, mesmo que sutis. Segundo Healy (2010), as características geológicas também influenciam características de condutividade hidráulica do aquífero, tais como capacidade de armazenamento, porosidade e transmissividade de fluxo.

As taxas de recarga e descarga de um aquífero interferem na capacidade de abastecer um rio ao longo da estação seca, definindo resiliência hídrica, uma vez que uma descarga contínua de água subterrânea nos rios permite manter a manutenção da fauna, flora e uso antrópico de mananciais. Assim, o processo de descarga é a conexão entre os processos hidrológicos e subterrâneos e geram a maior parte do fluxo na maioria dos rios, influenciando na perenidade dos rios (BATISTA, 2018).

A perturbação de processos climáticos, desestabiliza o regime de chuvas, ocasionando períodos chuvosos ou longos períodos de seca, afetando a recarga e descarga, uma vez que muitos aquíferos dependem de uma chuva mais intensa para uma recarga mais efetiva de água subterrânea. A resiliência hídrica de uma bacia, é um parâmetro de interesse para a gestão pública, fazendo do monitoramento da taxa de recarga algo importante principalmente para possibilitar uma rápida resposta. Perturbações na resiliência hídrica podem se relacionar com intervenções antrópicas ou eventos que causam oscilações no regime de chuvas e irregularidades nos ciclos sazonais alterando taxas de recarga de aquíferos (KIM; JACKSON, 2012; DOBLE; CROSBIE, 2017).

Atualmente, muitos municípios, inclusive parte considerável dos municípios das bacias PCJ, utilizam água subterrânea para seu abastecimento, sendo sua demanda cada vez maior (Agência bacias PCJ, 2020).

2.2 Isótopos estáveis na hidrologia

Isótopos estáveis são átomos de um mesmo elemento químico diferenciados pelo número de nêutrons já que possuem o mesmo número de elétrons, conferindo as mesmas propriedades químicas, mas com diferenças nas propriedades físicas. Na natureza, vários elementos têm dois ou mais isótopos estáveis e durante os processos naturais a abundância de isótopos em um corpo pode ser variável (MARTINELLI, 2009).

Isótopos ambientais são elementos utilizados para compreender os fenômenos que influenciam a composição isotópica de moléculas encontradas com facilidade em determinado ambiente. No ciclo hidrológico as análises de isótopos ambientais, hidrogênio e oxigênio (^{1}H, ^{2}H, ^{16}O, ^{17}O e ^{18}O) são amplamente utilizadas, em razão das 9 combinações isotópicas que podem formar na molécula de água, sendo as mais comuns: $^{1}H^{1}H^{16}O$, $^{1}H^{2}H^{16}O$, $^{1}H^{1}H^{18}O$ (COOK, 2020).

O ciclo hidrológico é um sistema dinâmico, onde os membros desse sistema, águas subterrâneas, superficiais e vapor na atmosfera, são influenciados pela radiação solar que movimenta as moléculas de água através de fenômenos como a evaporação e precipitação. Os isótopos Deutério, ou ^{2}H e ^{18}O são considerados traçadores ideais pela presença na molécula de água e fornecerem informações sobre sua origem e a variação da intensidade dos processos que a movimentam (MARTINELLI, 2009).

Estudos isotópicos têm avançado e se difundido com a modernização da instrumentação, capacidade de processamento dos dados, implementação de aparelhos mais sofisticados e com melhor acurácia, capazes de avaliar a composição isotópica com mais precisão. Isso permitiu que a distribuição espacial e temporal da razão isotópica fosse estudada e utilizada para compreender processos na natureza e investigar impactos antrópicos (MARTINELLI, 2009).

No Brasil, os estudos hidrológicos pioneiros foram realizados na bacia amazônica entre as décadas de 1970 a 1990 (MATSUI et al., 1972, 1976; SALATI et al., 1979;), enquanto que atualmente, a maioria dos estudos são voltados para águas subterrâneas (SILVEIRA; CARDOSO, 2002).

Estudos hidrológicos recentes vem sendo realizados no estado de São Paulo amparados pelos isótopos estáveis, como a caraterização hidrogeoquímica do aquífero Tubarão (EZAKI et al., 2011, 2014, 2017, 2020), Bauru (STRADIOTO, 2015) e Serra Geral (GASTMANS; MENEGÁRIO; HUTCHEON, 2017); análise da interação da água superficial e subterrânea na

bacia do Jacaré-Pepira (BATISTA et al., 2018) e no estudo sobre as variações espaciais e sazonais na composição isotópica da precipitação nas regiões central e oriental do Brasil (SANTOS et al., 2019b).

Assim, através do estudo do conteúdo isotópico da precipitação pode-se estimar a fonte de umidade que origina a chuva e aos sistemas atmosféricos que comandam todo o processo (GIMENO et al., 2010). Segundo Risi et al. (2013) por exemplo, a água evaporada da superfície terrestre nos trópicos é mais enriquecida em isótopos pesados do que a água evaporada do oceano.

A variação da composição isotópica de uma massa de água ocorre durante os processos de evaporação e condensação, e é principalmente motivada pelas diferenças de massas entre os isótopos, onde os isótopos pesados preferem permanecer no meio líquido em um processo de evaporação ou passar no estado gasosos para o líquido em uma precipitação. Assim, as variações nas razões isotópicas de $^{2}H/^{1}H$ $^{18}O/^{16}O$ são resultados de processos que promovem o fracionamento isotópico como a evaporação e condensação (COOK, 2020).

Os fatores que podem influenciar a composição isotópica, estão relacionados com a temperatura, quantidade de precipitação, origem do vapor, tipo de chuva e outros que são governados pelas condições climáticas e geográficas causando processos de fracionamento isotópico (AGGARWAL et al., 2016; GASTMANS et al., 2017).

Para facilitar a forma de expressar as razões isotópicas, foi adotada a notação delta (δ) para representar a razão de um isótopo em relação a um padrão mundial. Foi convencionado como padrão mundial a relação isotópica de uma mistura de diversas amostras de água oceânica ao redor do mundo, denominada *Vienna Standar Mean Ocean* (VSMOW). Também foi adotado, para expressar a composição isotópica, multiplicar os resultados por mil (‰) (CRAIG, 1961; DANSGAARD, 1964).

Um grande banco de dados das composições isotópicas da precipitação é armazenado e fornecido pela GNIP através do banco de dados da IAEA (*International Atomic Energy Agency*) onde é possível acessar dados da composição de isótopos ambientais como ^{18}O, ^{2}H, ^{3}H e dados meteorológicos como precipitação, temperatura e umidade relativa de todas as regiões do planeta.

Craig (1961), notou, em seus estudos, que os valores de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ na precipitação se relacionavam na equação (2):

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

Esta reta é denominada Reta Meteórica Global (GMWL - *Global Meteoric Water Line*), e é estabelecida como um parâmetro nos estudos hidrológicos (MOOK et al., 2000). A partir desta equação, as composições isotópicas das precipitações locais, podem ser relacionadas pela Reta Meteórica Local (LMWL –*Local Meteoric Water Line*) e a junção de várias retas locais do mundo, pode representar em uma única reta a média global das composições isotópicas da precipitação.

A utilização de uma GMWL nos estudos de composição isotópica demanda a observação da inclinação da reta meteórica gerada pela plotagem das médias das composições isotópicas da precipitação de um local, obtidas em um período de tempo.

Dansgaard (1964), observa que as variações isotópicas estão relacionadas a alterações de parâmetros climáticos ligados com a temperatura (*temperature effect*), quantidade de precipitação (*amount precipitation*), umidade e origem das massas de ar. Observando comportamentos de retas meteóricas, chamou de "excesso de deutério" ou "*d-excess"* intersecção da reta com gráfico, que se altera pela inclinação da GMWL. O "*d-excess*" pode ser representado pela equação (3):

$$d = \delta^{2}H - 8*\delta^{18}O\ (3)$$

O valor de *d-excess* pode revelar atuação de importantes fatores sobre o corpo d'água analisado. Para chuva, em caso de excesso de deutério superior a 10, é indicativo que a precipitação é gerada de vapores oriundos de processos reevaporativos, enquanto que valores inferiores a 10 indicam que o corpo d'água foi submetido a processos evaporativos mais intensos. Para água subterrânea, valores inferiores a 10 indicam processos evaporativos durante a recarga (SANTAROSA, 2020).

Estudos recentes demonstram outros processos responsáveis pela variação do *d-excess*, como a supersaturação, a reevaporação e os diferentes tipos de chuva como as convectivas e estratiformes (RISI et al., 2013; AGGARWAL et al., 2016; SANTOS et al., 2019b).

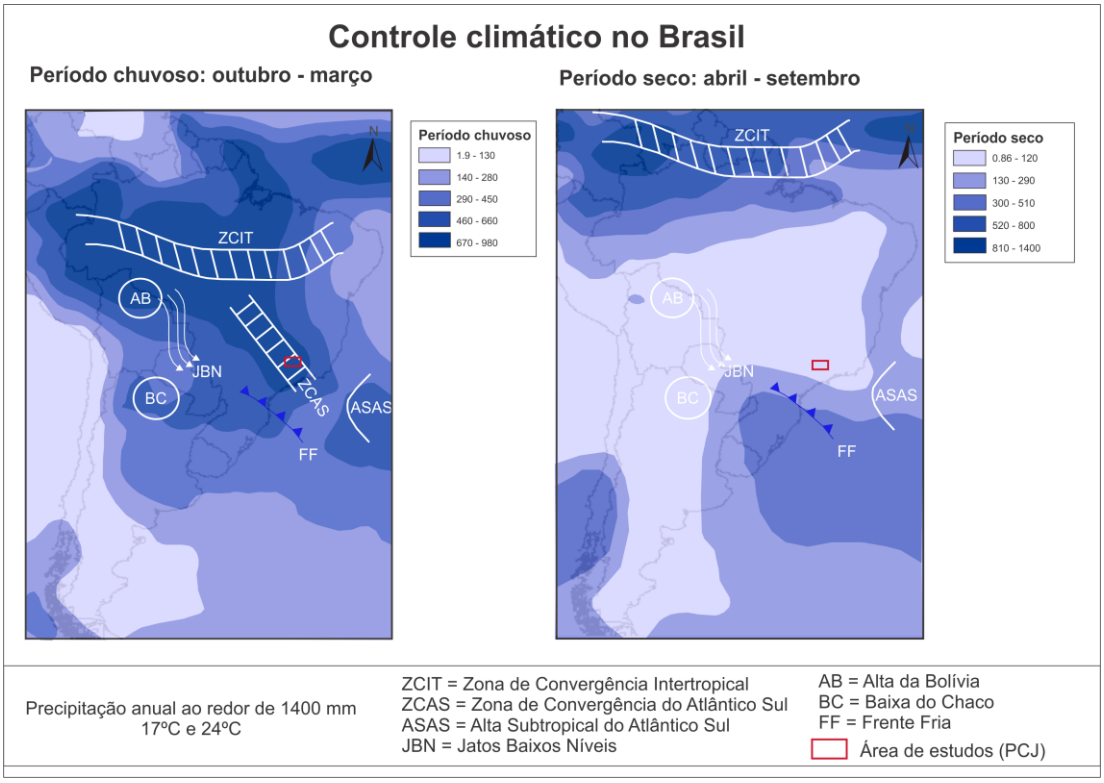
A influência da latitude no conteúdo isotópico é observada na distribuição latitudinal do conteúdo de O^{18} no globo terrestre, uma vez que a precipitação é mais enriquecida nos trópicos e mais empobrecida nos polos, devido a diminuição da temperatura do ar (ROZANSKI; ARAGUÁS-ARAGUÁS; GONFIANTINI, 1993).

A altitude tende a causar empobrecimento isotópico, associado a mudança de temperatura enquanto a massa de ar é governada pelos processos de formação de chuva orográfica (WINNICK et al., 2014). O efeito da continentalidade assume que áreas costeiras apresentam precipitação com composição isotópica similares ao oceano, cujo composição isotópica é 0. No interior do continente a umidade tem composição isotópica mais empobrecida, isso porque, durante o transporte das nuvens e recirculação de umidade para o interior do continente ocorre o empobrecimento do vapor remanescente (WINNICK et al., 2014).

2.3 Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a região de estudo.

A região de estudo, localizada no sudeste do país, com clima em faixa de transição entre tropical e subtropical e com sistemas extratropicais controlados pela dinâmica da frente polar. As precipitações são resultantes dos sistemas atmosféricos associados às zonas de baixas pressões equatoriais e de baixas pressões subpolares, onde atuam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Massas de ar Equatorial, Tropical, Polares e às Frentes Frias (FLANTUA et al., 2016). A Figura 8 mostra os sistemas atmosféricos atuantes sobre a região de estudo (SANTOS et al., 2019a).

Figura 3: Mapa Sistemas Atmosférico atuantes no Sudeste (bacias PCJ em destaque)



Fonte: Adaptado de Gastmans (2017).

A ZCAS, é o principal sistema atmosférico de precipitação durante o verão no Sudeste do Brasil, principalmente entre dezembro e fevereiro (KODAMA, 1992; REBOITA et al., 2010). É uma extensa faixa de orientação noroeste-sudeste, intensamente nebulosa e úmida e se estende desde o sul da Amazônia em direção ao litoral sudeste, até o Atlântico Sul. Se forma devido a ação conjunta entre ASAS, com transporte de umidade do oceano ao continente e incursões de frentes frias oriundas do sul do Brasil e grande volume de umidade proveniente da região amazônica.

Os sistemas frontais, são caracterizados pelo encontro de duas massas de ar com diferenças bruscas de temperatura. As FFs, atuam de forma constante na região sudeste, transportando massa de ar fria e seca durante todo o ano.

As FF substituem o ar quente levando a queda de temperatura e geração de chuva intensa e de curta duração e durante o verão, passam pelo sudeste brasileiro atuando em processos de convecção e precipitação em conjunto com a ZCAS. No inverno, quando são mais intensas, as

FFs podem atingir a região da Amazônia, levando à friagens e geadas no interior do Brasil (GASTMANS et al., 2017).

A convergência dos ventos alísios do hemisfério sul e norte nas zonas de baixas pressões equatoriais formam uma faixa denominada ZCIT, acumulando umidade, com intensa nebulosidade, gerando precipitação e tempestades com trovoadas. Ano longo do ano, a ZCIT se desloca e o volume de vapor transportado da região amazônica para a região sudeste depende da localização dessa faixa durante o verão.

A Alta da Bolívia (AB) e o sistema chamado Baixa do Chaco (BC), durante o verão, contribuem no transporte de umidade e calor da região amazônica corroborando para a geração da ZCAS causando instabilidade e atividade de convecção na região sudeste do Brasil

A ASAS, é um sistema de alta pressão localizada no Oceano Atlântico que influência no regime de precipitação da região sudeste. Ao longo do ano, esse sistema se desloca no sentido oeste-leste aproximadamente através do paralelo 30° de latitude. Durante o verão, esse sistema se localiza na posição mais distante, a leste da costa do Brasil, enquanto que no inverno se localiza próximo à costa do Brasil. Atua como bloqueio na formação das chuvas, podendo ser responsável por secas no sudeste do país (GASTMANS et al., 2017).

A primavera indica o início da estação chuvosa, quando se começa a atuação da AB e da ZCAS, a temperatura começa a subir assim como os índices pluviométricos. No outono, entretanto, as massas polares são mais atuantes, ocasionando incursões de FFs, causando quedas bruscas de temperatura assim como os índices pluviométricos (REBOITA et al., 2010).

2.4 Hidrogeologia Regional

2.4.1 Geologia Regional

Segundo Milani et al. (1998), a Bacia Sedimentar do Paraná é uma grande bacia intracratônica sul-americana, desenvolvida completamente sobre crosta continental. Ao longo de mudanças de ambientes deposicionais, a bacia foi preenchida por rochas sedimentares e também submetida a enormes manifestações de vulcanismo fissural, resultando em uma sucessão de derrames através de um sistema de diques e soleiras de lavas básicas (MACHADO, 2005).

As bacias PCJ se localizam na borda centro-leste da Bacia do Paraná, ocupando uma área alongada de leste-oeste. Suas nascentes estão localizadas na porção oeste da bacia, onde se insere o embasamento cristalino, no contexto da Província Estrutural Mantiqueira (MILANI, 2004). Esse sistema é marcado por um conjunto de falhas traçados em direção oeste-leste controlados por cisalhamentos datados do Ciclo Brasiliano durante a evolução do Neoproterozoico na América do Sul (900-520 Ma), como a Zona de Cisalhamento Camanducaia, Extrema e outras, variando de E-W a NE, segundo (CARNEIRO, 2001).

O embasamento cristalino é objeto de estudo desse trabalho e é constituído por rochas ígneas e metamórficas como migmatitos, granitos e granitóides, gnaisses, granulíticas, anfibolíticos e também por rochas básicas xistificadas. De acordo com o IPT (1981), impõe um relevo caracterizado por topos de morros convexos, densidade de drenagem elevada e vales profundos com vertentes íngremes, onde se predominam o escoamento superficial e processos de escorregamento e erosão laminar, gerando sulcos e ravinas.

A partir da metade das bacias PCJ o domínio geológico passa a ser sedimentar, no contexto de interior da Bacia do Paraná e nesse estudo são abordados o Grupo Itararé e Grupo São Bento.

Segundo Milani et al. (2004), o Grupo Itararé é representado por rochas sedimentares paleozoicas, sobreposto a Formação Furnas ou diretamente no embasamento cristalino e seu topo faz contato erosivo com a Formação Tatuí. Segundo Soares e Landim (1973), o ambiente deposicional do Grupo Itararé se relaciona com a ação de geleiras em períodos de glaciação no Permo-Carbonífero, e a incursões marinhas, gerando litotipos como folhelhos, argilitos, diamictitos e arenitos quartzosos, feldspáticos e arcoseanos, imaturos e mal selecionados, com intercalações de siltitos.

O Grupo Itararé recobre grandes extensões nas Bacias PCJ, com grande continuidade em área. Na sua porção aflorante, segundo o DAEE (1982), pode atingir cerca de 800 m, intercalada com soleiras de rocha básica da Formação Serra Geral.

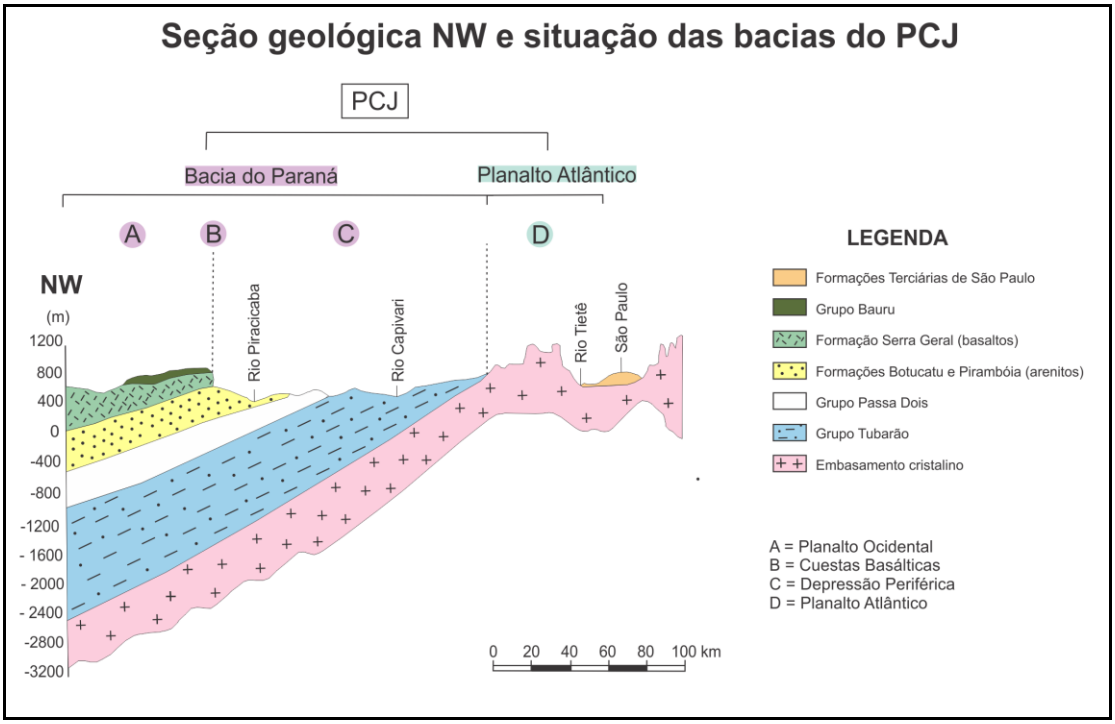
O Grupo São Bento é composto pela Formação Pirambóia, Formação Botucatu e Serra Geral. Segundo Milani et al. (2004), a Formação Pirambóia tem idade Triássica e é representada por arenitos de granulação média a fina, localmente grossos ou conglomeráticos, depositados em ambiente fluvio-lacustre e eólico. Como estrutura sedimentar apresentam estratificação plano-paralela, com lâminas ricas em argila ou silte.

A Formação Botucatu está presente nas bacias PCJ recoberta por basaltos da Formação Serra Geral e é sobreposta a Formação Pirambóia, (IPT, 1981). Tem idade Jurássico-Cretáceo, gênese em ambiente eólico, com estratificação cruzada de grande porte e estratificação acanalada. Constitui-se quase inteiramente de arenitos de granulação fina a média, com boa seleção de grãos foscos de alta esfericidade, apresentando corpos de arenitos conglomeráticos na base (MILANI et al., 2004).

A Formação Serra Geral é composta por rochas magmáticas efusivas e intrusivas básicas. Ocorrem em grande volume em Paulínia, Sumaré e Hortolândia, na Depressão Periférica. São rochas com alta resistência mecânica e química, além de forte coesão dos constituintes minerais. As rochas básicas são mais comuns na região oeste da bacia PCJ, intercaladas com as rochas sedimentares do Paleozoico, com formas de soleiras e diques (MACHADO, 2005).

A Figura 4 representa uma seção geológica da região de estudo, exibindo as formações geológicas ocorrentes, que determinam aspectos hidrogeológicos locais.

Figura 4. Esquema de recarga dos aquíferos na região PCJ.

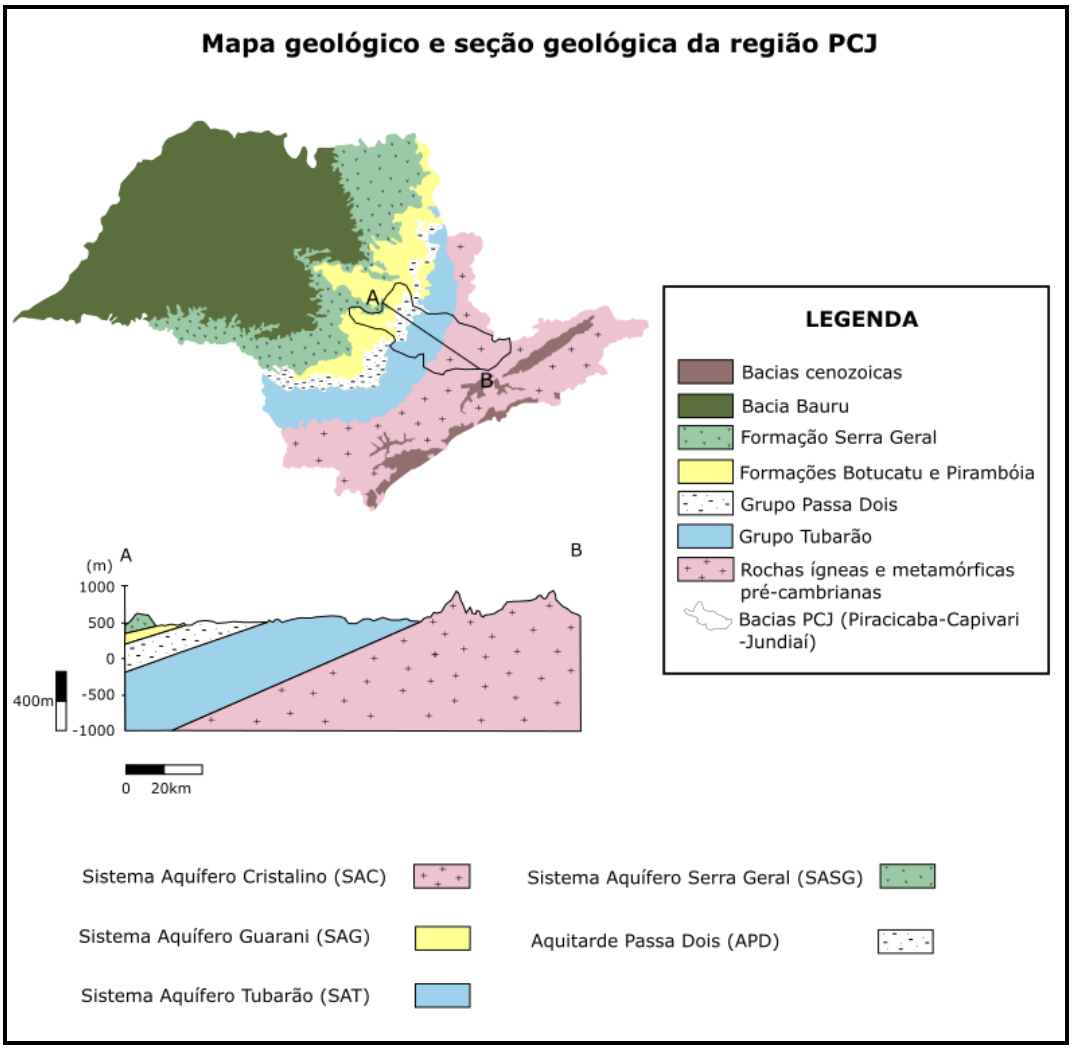


Fonte: Adaptado de Irrigat, 2005.

2.4.2 Unidades hidrogeológicas

Em relação às águas subterrâneas, as bacias PCJ apresentam os seguintes sistemas de aquíferos, com diferentes regimes de recarga e descarga: Sistema Aquífero Cristalino (SAC), Sistema Aquífero Tubarão (SAT), Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), além de outra unidade hidrogeologica importante, o aquitarde Passa Dois (APD), constituída majoritariamente de rochas pelíticas impedindo a conexão entre o SAG e SAT (Figura 01) . Observa-se na Figura 5, que a presença APD impede a conexão do SAG e SAT.

Figura 5. Seção geológica da área de estudo e sistema de aquíferos na região PCJ.



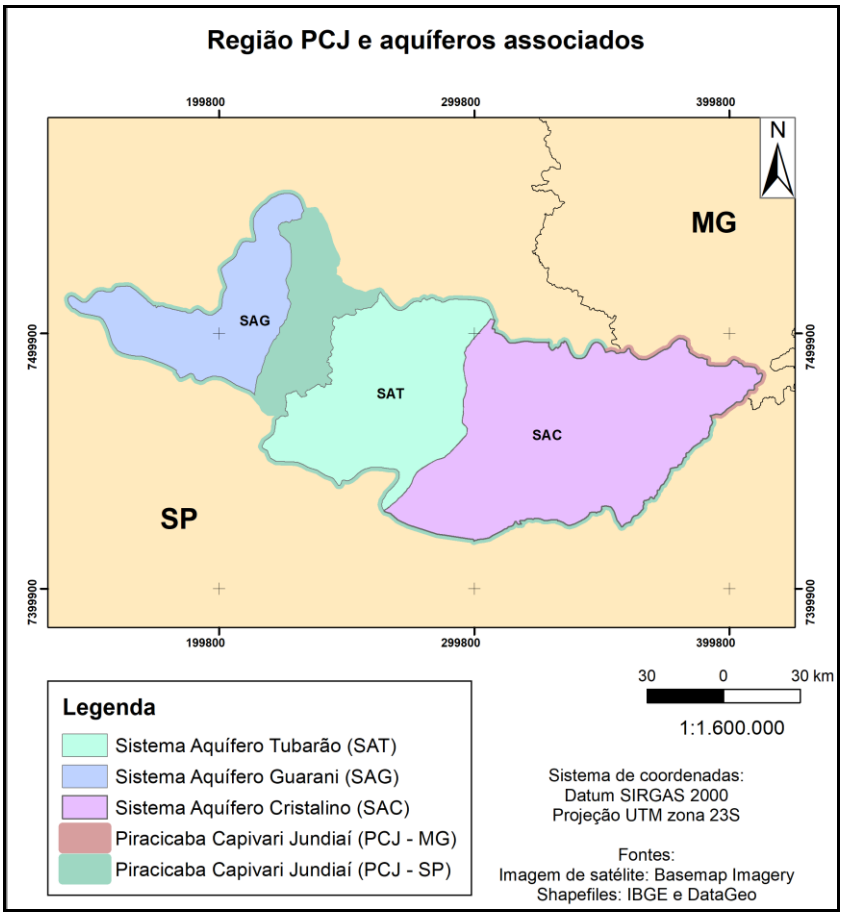
Adaptado de Ezaki (2016)

O desenvolvimento geológico onde estão inseridas as bacias PCJ gerou um arcabouço capaz de armazenar águas subterrâneas. O domínio cristalino e domínio sedimentar refletem dois compartimentos hidrogeológicos com base em suas propriedades hidráulicas como porosidade e permeabilidade. São eles o aquífero fraturado ou cristalino, representado pelo Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e os aquíferos granulares, representados pelo Sistema Aquífero Tubarão (SAT) e Sistema Aquífero Guarani (SAG) (CAMPOS, 1993).

A litologia onde se inserem as sub bacias Atibaia, Camanducaia, Jaguari e Jundiaí é representada por rochas do embasamento cristalino por mais de 70% de sua extensão. Cerca de 50% da área das sub-bacias do Corumbataí e Piracicaba estão sobre o Sistema Aquífero Guarani (SAG), enquanto quase 70% da sub-bacia do Capivari está sobre estratos do Grupo Tubarão.

Os sistemas aquíferos abordados nesse estudo são apresentados pela figura 6, abaixo:

Figura 6. Localização da região das bacias PCJ e sistemas aquíferos estudados



Fonte: Compilação do autor.

O Sistema Aquífero Cristalino tem como substrato as rochas do embasamento da borda leste da Bacia do Paraná, como granitos, migmatitos, gnaisses e xistos, frequentemente com estruturas como falhas e fraturas relacionadas à vários eventos geológicos durante o Pré-Cambriano (MILANI et al., 2004). As fissuras criadas por falhas geológicas em eventos tectônicos e ampliadas pelo intemperismo geram porosidade e permeabilidade secundária, permitindo o armazenamento e fluxo de água (CAMPOS, 1993).

O comportamento hidrológico do SAC permite recarga rápida e associada a precipitação recente, além da recarga indireta, promovida por afluxos de rios e barragens por exemplo (ENGELBRECHT, 2017). De acordo com o IPT (1984), o relevo dessa região é caracterizado com topos convexos, elevada densidade de drenagem e vales profundos. Com encostas íngremes, predominam os processos de escorregamentos, como o escoamento superficial da água, que é bastante acelerado e contribui para processos erosivos laminares ocasionando sulcos e ravinas.

Na porção oeste das bacias PCJ está presente o SAT, que tem como reservatório unidades do Grupo Itararé. A litologia desta unidade aquífera é composta por sedimentos finos influenciando no comportamento hidrogeológico e promovendo baixas taxas de transmissividade. O SAT apresenta fluxo subterrâneo governado pela porosidade granular de rochas sedimentares, com grande descontinuidade estrutural que influencia o movimento da água (COOK, 2020).

O Sistema de Aquíferos Guarani (SAG) também inserido na porção das Bacias PCJ correspondente à Depressão Periférica, apresenta largura irregular, se ampliando ao longo das grandes drenagens. Tem como rocha reservatório os arenitos da Formação Piramboia e da Formação Botucatu (DAEE, 2005).

O SAG é de grande importância para milhões de pessoas, e o entendimento da dinâmica do seu ciclo hidrológico se justifica por abranger 4 países da América do Sul em seus 1.087.000 Km^2 de área: Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Além de sua grande extensão, recebe destaque pelo seu enorme volume de água 37.000 km^3 que em grande parte é potável e abastece importantes cidades como Ribeirão Preto (DAEE, 2005).

Na tabela 1 são exibidos aspectos hidrológicos acerca dos sistemas aquíferos estudados:

Tabela 1. Taxas de dados hidrológicos de cada sistema aquífero (SAG, SAT e SAC).

SIS. AQ.	LITOLOGIA	OCORRÊNCIA	CAP. ESP.
SAG	Arenitos de granulação média das Formações Pirambóia e Botucatu	Granular, homogêneo, regionalmente livre na porção aflorante, predominantemente confinado	Média de 4,50 $m^3/h/m$
SAT	Siltitos argilitos, folhelhos, diamictitos, arenitos muito finos a conglomeráticos e ritmitos	Granular, localmente fissurado, heterogêneo, confinado a semiconfinado	Média de 0,30 $m^3/h/m$
SAC	Metamórficas e ígneas, gnaisse, xisto, migmatitos, granitos maciços ou foliados	Fissural, fraturado, heterogêneo, livre a semiconfinado	Valores de 0,018 a 0,50 $m^3/h/m$

Sis, Aq: Sistema Aquífero; Cap. Esp: Capacidade Específica. Aspectos hidrogeológicos dos sistemas aquíferos estudados. Adaptado de DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005; QUAGGIO ET AL., 2018; Oda et al., 2012; Stradioto, 2016.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consiste em uma pesquisa exploratória com levantamento bibliográfico e documental, reunindo dados qualitativos e quantitativos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009), com a finalidade de encontrar possíveis fatores que influenciam a composição isotópica das águas subterrâneas das unidades aquíferas Sistema Aquíferos Guarani, Tubarão e Cristalino nas bacias PCJ.

Para esse estudo, foram consideradas a Reta Meteórica Global e local para comparação entre as composições isotópicas e valores de *d-excess*, a fim da verificação de processos evaporativos. Foi relacionado as razões isotópicas médias de cada aquífero com as razões isotópicas das precipitações em épocas chuvosas e secas para comparação da variação espaço temporal.

Para isso, foi elaborado um mapa de *isoscapes* através da interpolação das composições das águas subterrâneas. Se trata de uma ferramenta útil no monitoramento de bacias ou de

regiões, facilitando a comparação das composições em um determinado espaço e determinado intervalo temporal.

As análises das razões isotópicas (δ) de água subterrânea e de chuva dos trabalhos consultados, foram realizadas por Espectroscopia a Laser de Cavidade Oca (*Cavity Ring Laser Spectroscopy*) no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP. A razão isotópica corresponde a relação entre isótopos pesados (^{2}H e ^{18}O) e leves (^{1}H e ^{16}O) e é comparada ao padrão internacional VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), representada na notação *per* mil (‰).

3.1 Dados da composição isotópica da água subterrânea

Os dados de composição isotópica das unidades hidrogeológicas aquíferas das bacias PCJ foram provenientes dos trabalhos de Ezaki (2017) e Santarosa (2020) e estão dispostos em anexo. As informações secundárias das composições isotópicas das águas subterrâneas para os demais aquíferos foram reunidas por meio de consulta de dados bibliográficos (SANTAROSA 2020; SANTOS et al., 2019, EZAKI et al., 2017).

As composições isotópicas do SAT foram apresentadas nos estudos de Ezaki (2017), são 72 amostragens realizadas durante o período de março de 2015 a maio de 2016, na porção central do estado de São Paulo abrangendo a área de estudo.

Foram coletadas 06 amostras de SAC e 05 amostras do SAG em fevereiro de 2019, totalizando onze amostras coletadas após um período de purga do poço, bombeando a água estagnada no sistema. As amostras foram filtradas em campo com filtro de seringa de acetato celulose 0,45 μm e armazenada em garrafas de vidro âmbar de 30 ml em que o ar foi removido para evitar evaporação e armazenadas a 5ºC até a análise.

Foram executadas coletas de amostras de água dos aquíferos nas bacias PCJ, utilizando poços de abastecimento público com mais de 80 metros de profundidade para locais abastecidos com água subterrânea do SAG, além de poços do SAC que foram somados a dados disponíveis de estudos anteriores. Foram coletadas duas amostras por poço e armazenadas em frascos de 50ml e tampadas de forma a evitar ar dentro do recipiente. Este procedimento evitou a evaporação de uma fração do conteúdo da amostra promovendo uma diferenciação isotópica no sistema ar-água dentro dos frascos.

3.2 Dados isotópicos de precipitação

Foram considerados os fatores atmosféricos e os dados da composição isotópica da precipitação apresentados por Santos et al. (2019a) para a execução desse trabalho. Tais dados, foram obtidos através da rede GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), de agência internacional de Energia Atômica (IAEA). Os dados são estação de Rio Claro estão dispostos em anexo, dos períodos de fevereiro/2013 a dezembro/2017 e são considerados representativos pela estação se localizar na porção central da área de estudos. A expressão da reta meteórica local utilizada foi representada pela equação (1):

$$\delta^{2}H=8.34*\delta^{18}O + 15.71 \quad (1)$$

3.3 Aspectos hidrogeológicos

Foi realizado o levantamento bibliográfico sobre os aspectos hidrogeologicos e suas relações com a variação da composição isotópica das águas subterrâneas. Adicionalmente, foi estudado os fatores que agem sobre a composição isotópica da precipitação, no verão e inverno, comparando a precipitação das duas estações com a composição das águas subterrâneas.

3.4 Elaboração dos resultados e discussão

Por fim, com os dados secundários reunidos foram elaborados gráficos e tabelas no Microsoft Excel e com base na revisão bibliográfica, discutiu-se a relação entre: isótopos estáveis de O e H na água subterrânea e suas relações com o ciclo hidrológico; os sistemas atmosféricos atuantes na região sudeste do Brasil e a hidrogeologia das unidades aquíferas Sistema Aquífero Cristalino (SAC), Sistema Aquífero Tubarão (SAT) e Sistema Aquífero Guarani (SAG).

O mapa de *isoscapes* foi elaborado utilizando o software ArcGis. Primeiramente estabeleceu-se o sistema de coordenadas no projeto: Córrego Alegre, UTM zona 23S, de acordo com as localizações dos pontos de coleta de amostras. Foi inserida uma tabela elaborada no Excel, contendo as coordenadas X e Y de cada amostra e também os valores de $\delta^{18}O$ para cada uma destas. Também foi delimitada a área onde seria realizada a interpolação, levando em conta

o *shapefile* da PCJ (o mesmo utilizado em outros mapas que aqui serão apresentados) após exportação. Com todos os ajustes prontos, foi realizada a interpolação com a ferramenta IDW – Interpolação peso pelo inverso da distância (*Spatial Analyst Tools – Interpolation – IDW*).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões estão divididos em torno dos objetivos que esse trabalho se propõe.

4.1 Composição isotópica da precipitação e das águas subterrâneas dos aquíferos

Para os dados obtidos do banco de dados da GNIP, os valores médios ponderados de composição isotópica da precipitação mensal se mostraram com grande amplitude na estação de Rio Claro (2013 a 2017), para $\delta^{18}O$ variaram entre -10,76‰ até -0,32‰, e para $\delta^{2}H$, de -75,60‰ até 18,80‰, os valores de *d-excess* de 8,48% até 21,36%. Para os períodos mais úmidos (outubro a março) a média ponderada de $\delta^{18}O$ foi de -5,91‰ e para $\delta^{2}H$ de -33,74‰. Durante o período mais seco (abril a setembro), os valores da média ponderada de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ foram, respectivamente -3,44‰ e -12,30‰, enquanto os valores de *d-excess* foram respectivamente 13,67% no período chuvoso e 14,85% no período seco. A representação da LMWL (*Local Meteoroligic Water Line*) é exibida em figura 6 e pode ser expressa pela equação 04:

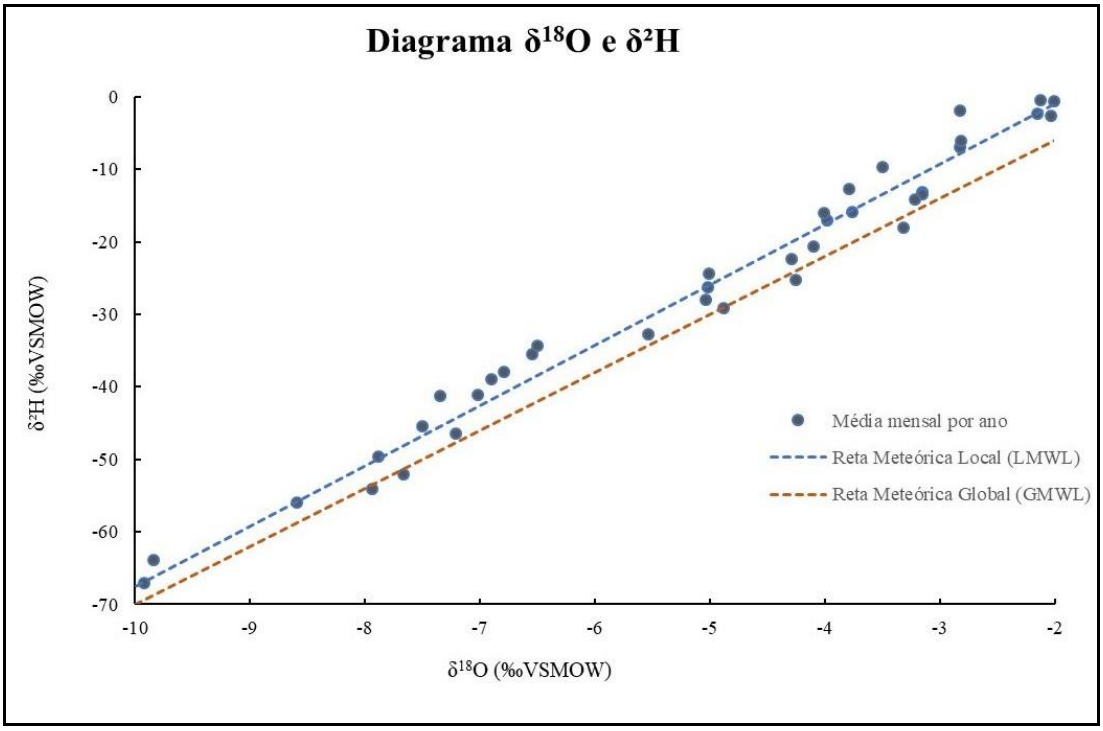
$$\delta^{2}H = 8,32*\delta^{18}O + 15,69 \quad (04)$$

A equação 05, apresentada por Santos et al. (2019a) para representar a LMWL foi:

$$\delta^{2}H = 8,05*\delta^{18}O + 13,08 \quad (05)$$

A variação entre as duas retas se deve à utilização de dados de outras estações no trabalho de Santos (2019a).

Figura 6. Diagrama $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ para a Reta Meteórica Local e Reta Meteórica Global



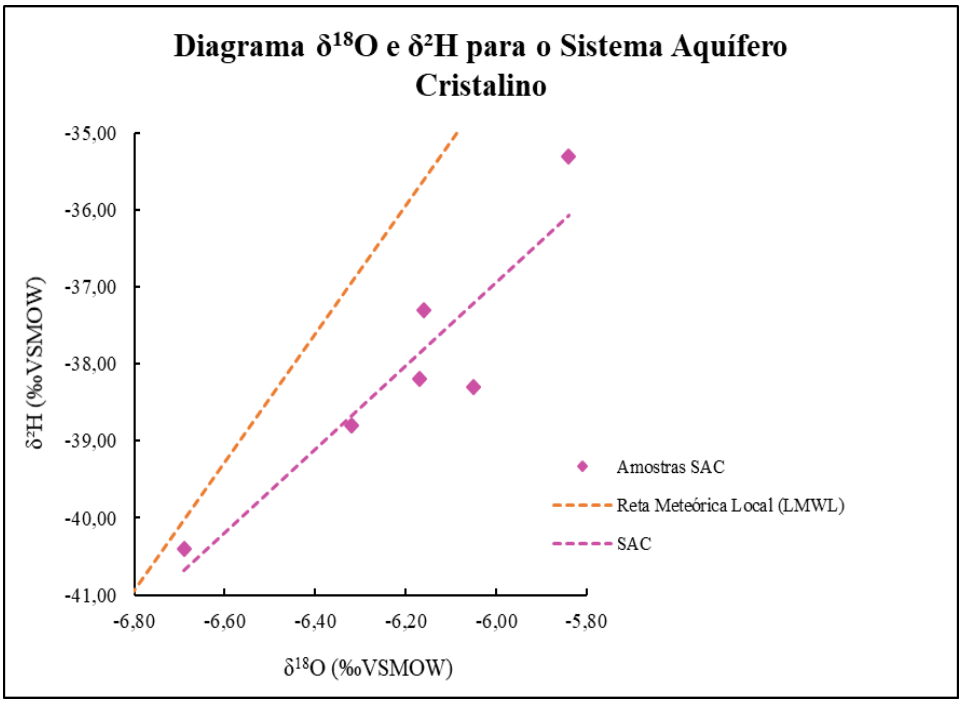
Fonte: Adptado de GNIP e SANTOS (2019a).

A Reta Meteórica Local (LMWL) se mostrou superior e ligeiramente mais inclinada que a Reta Meteórica Global (GMWL), como apresentado na figura 2, com valor de *d-excess* de 14,24. É notável uma distribuição bimodal na reta, sendo possível correlacionar as precipitações no período úmido com as mais empobrecidas enquanto as composições isotópicas mais enriquecidas se concentram nos períodos secos. Segundo Santos et al. (2019a), isso é consequência da maior ação da evaporação durante o período seco, quando a umidade relativa do ar é baixa e também da maior atuação das FFs, enquanto no período úmido, a umidade relativa do ar é alta, e o efeito quantidade não permite que a evaporação promova o enriquecimento isotópico na gota de chuva da precipitação.

A composição isotópica das águas subterrâneas do SAC variou de -6,69‰ a -5,84‰ para $\delta^{18}O$ e -40,40‰ e -35,30‰ para o $\delta^{2}H$, com média de -6,20‰ para $\delta^{18}O$ e -38,05‰ para o $\delta^{2}H$ e *d-excess* com média de 11,59.

A reta composta pela assinatura isotópica do SAC é inferior a LMWL, indicando uma tendência de composição isotópica mais pesada em relação a precipitação (Figura 7). É possível observar a forte variação na inclinação.

Figura 7. Diagrama $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ para a Reta Meteórica Local e o Sistema Aquífero Cristalino

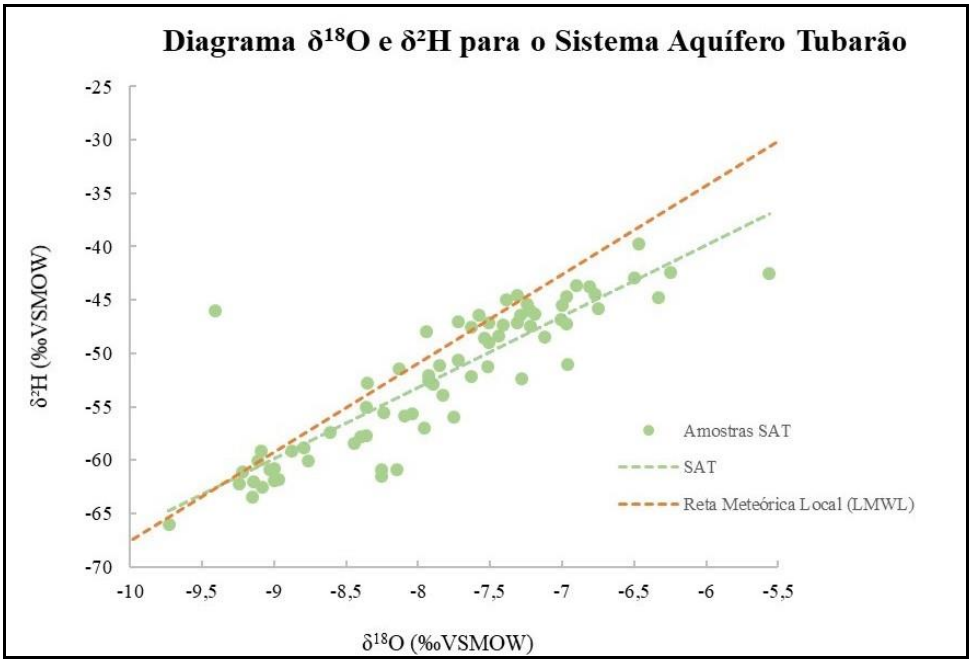


Fonte: Adaptado de GNIP e SANTAROSA (2020).

A composição isotópica das águas subterrâneas do SAT variou de -9,73‰ a -5,56‰ para $\delta^{18}O$ e -66,02‰ e -42,40‰ para o $\delta^{2}H$, com média de -7,85‰ para $\delta^{18}O$ e -52,22‰ para o $\delta^{2}H$ e *d-excess* variando com média de 10,59.

A reta composta pela assinatura isotópica do SAT é inferior a LMWL, indicando uma tendência de composição isotópica mais pesada em relação a precipitação (Figura 8). É possível observar a ligeira variação na inclinação.

Figura 8. Diagrama $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ para a Reta Meteórica Local e Sistema Aquífero Tubarão

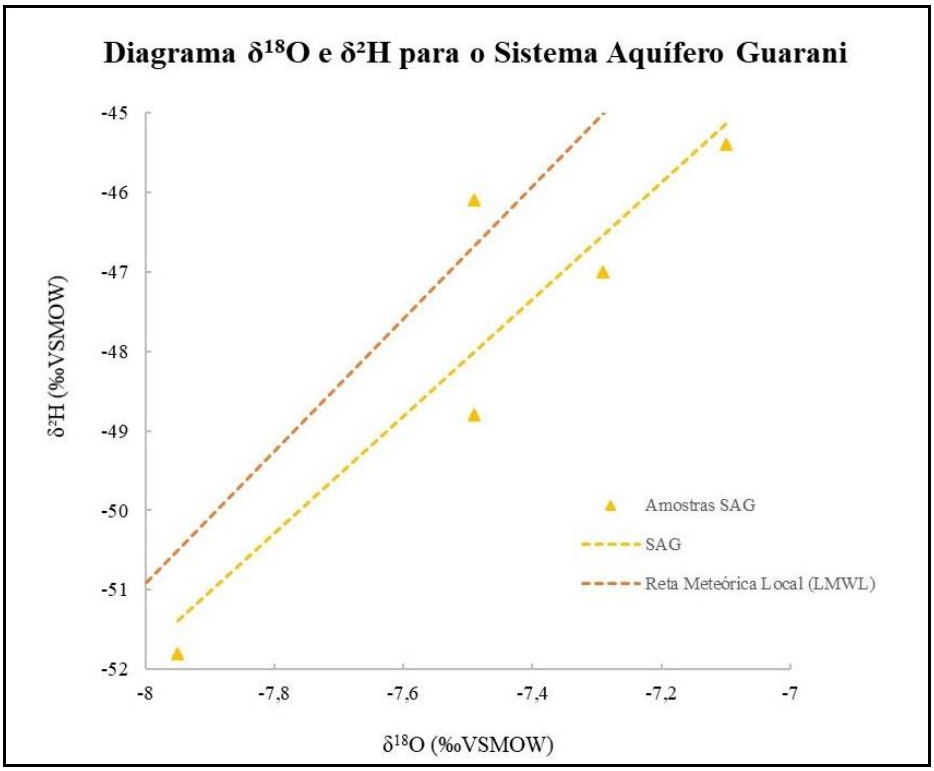


Fonte: Adaptado de GNIP e SANTAROSA (2020).

A composição isotópica das águas subterrâneas do SAG variou de -7,95‰ a -7,10‰ para $\delta^{18}O$ e -51,80‰ e -45,40‰ para o $\delta^{2}H$, com média de -7,46‰ para $\delta^{18}O$ e -47,82‰ para o $\delta^{2}H$ e *d-excess* variando com média de 11,39.

A reta composta pela assinatura isotópica do SAG é inferior a LMWL, indicando uma tendência de composição isotópica mais pesada em relação a precipitação (Figura 9). É possível observar a ligeira variação na inclinação.

Figura 9. Diagrama $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ para a Reta Meteórica Local e Sistema Aquífero Guarani



Fonte: Adptado de GNIP e SANTAROSA (2020).

A composição isotópica dos aquíferos é mais empobrecida que a composição isotópica da precipitação tanto no período úmido quanto no período seco.

O SAC é caracterizado por um sistema de recarga baseado na interconexão de fraturas em relevos de vertentes íngremes, onde é acumulado pouco solo. A infiltração da água meteórica é rápida e em volume reduzida, sendo pouco exposta a evaporação. O fenômeno mais influente nesse caso, tanto a precipitação quanto a água subterrânea, são a chuva orogênica recentes (SANTAROSA, 2020), ocasionada pela redução de temperatura em altitudes maiores e consequentemente a menor capacidade de absorver umidade leva a precipitação. É um importante fator de fracionamento, empobrecendo o vapor remanescente e gerando água de recarga com valores enriquecidos.

O valor de *d-excess* médio obtido, 11,59, é o maior obtido, mostrando maior evaporação na água de recarga. Considerando o sistema de rápida recarga, podemos relacionar o a recarga com as chuvas convectivas.

Em relação aos aquíferos sedimentares, mais ao interior das bacias, tem em suas zonas de recarga sob importantes rios cujo nascentes se localizam no contexto geológico da Província Mantiqueira. Somado a composição isotópica fluvial, a composição das águas subterrâneas no Domínio Sedimentar é influenciada pela composição isotópica da chuva local e as características do sistema aquífero (SANTAROSA, 2020). A taxa de infiltração da água meteórica no solo depende da permeabilidade (HEALY, 2010), sendo essa maior no SAG, composto predominantemente por rochas arenosas enquanto o SAT, com litologia variada. É composto de um sistema complexo, com porções mais arenosas, siltosas, argilosas e conglomeráticas.

Os aquíferos do SAT são do tipo semiconfinados e confinados, com pouca conectividade, baixas taxas de transmissão e vazão. Também são caracterizados pela maior profundidade, indicando que em geral, a água subterrânea do SAT é mais antiga em comparação ao SAG. As águas subterrâneas do SAT, podem então representar a composição isotópica de uma precipitação mais antiga que a atual. O SAT, que possui uma baixa taxa de transmissividade devido a sua litologia variada, com abundância de rochas pelíticas, de granulometria fina, intercaladas com lentes de arenito e diamictitos, apresentam menor taxa de descarga e consequentemente baixa capacidade de armazenamento. Desse modo, a evaporação pode atuar por mais tempo na água infiltrada, enriquecendo a porção de recarga, devido ao maior tempo de fracionamento isotópico (HEALY, 2010).

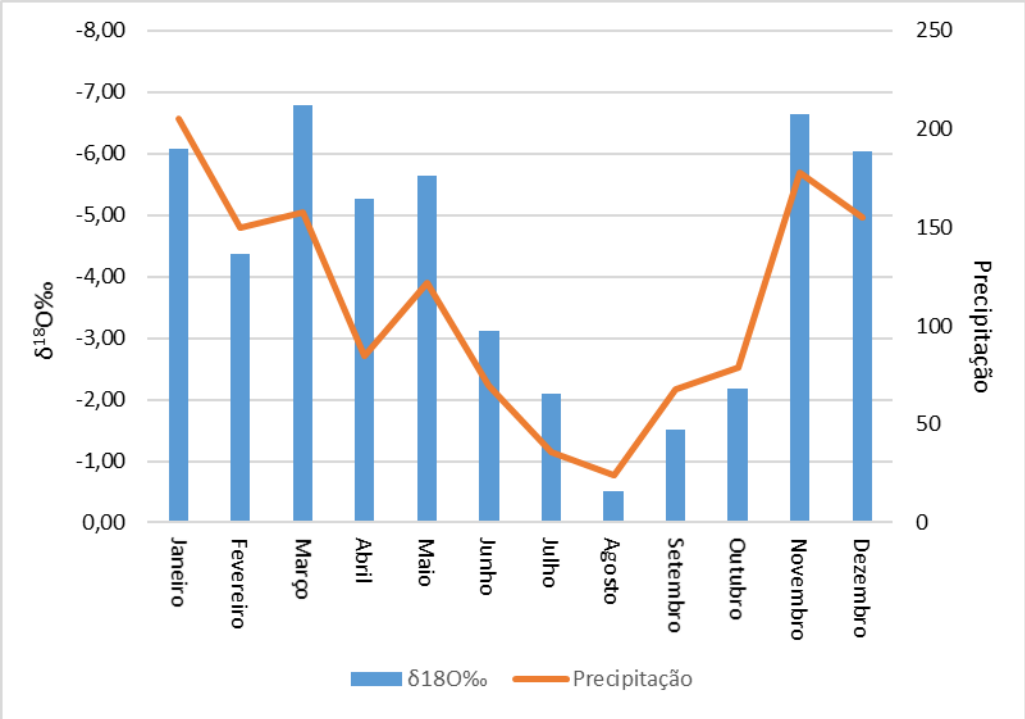
O SAG, caracterizado pela alta transmissividade, predominantemente composto por rochas sedimentares, de alta infiltração, gerando solos permeáveis que favorecem a recarga, permitindo menor tempo de exposição à evaporação até que a água meteórica penetre no aquífero (DAAE; IG; IPT; CPRM, 2005). Desse modo, a água meteórica permanece por pouco tempo em exposição a evaporação, ou seja, o fracionamento isotópico atua por menos tempo que no SAT, e por mais tempo que a recarga SAC.

A dinâmica dos sistemas atmosféricos, e outros fatores presentes nos trópicos, tornam mais complexo o entendimento das correlações de variações de $\delta^{18}O$, uma vez que a simples relação da precipitação e temperatura não são suficientes para explicar os processos que governam tais variações (DANSGAARD, 1964; SÁNCHEZ-MURILO; BIRKEL, 2016; GASTMANS, 2017).

A reta meteórica local encontrada por Santos (2019), indica forte influência de recirculação de vapor transportada pelos sistemas atmosféricos. Durante o verão, a atmosfera

permanece mais úmida, associado a recirculação da umidade oriunda da região amazônica, carregada pela ZCAS, que geram longas e volumosas precipitações quando entram em contato com as FF, resultado em precipitação de composição isotópica empobrecida e com menor valor de d excess; uma vez que durante o período de maior ação da ZCAS, a umidade atmosférica influência o fator de fracionamento na precipitação. O valor de d excess é maior quando a precipitação ocorre em atmosfera mais árida (inverno, período seco), promovendo o fracionamento isotópico maior do que em uma atmosfera úmida (verão, período úmido). A Figura 10 a seguir, mostra a variação de volume de precipitação por $\delta^{18}O‰$:

Figura 10: Variações mensais de volume de chuvas e $\delta^{18}O‰$ na Estação Meteorológica de Rio Claro



Fonte: GNIP (média ponderada 2014-2017).

Em geral, a precipitação regional é oriunda de vapores transportados principalmente pela ZCAS, com contribuições de várias regiões da América do Sul, como região amazônica. Bolívia e Paraguai.

Além do efeito de continentalidade, efeitos de altitude também atuam no fracionamento isotópico. O revelo onde ocorre o SAC recebe precipitação orogênica, como demonstrado por Santos (2019b)

Os aquíferos granulares, SAT e SAG se localizam na porção central para a foz das bacias, regiões de relevo mais ameno, favorecendo a infiltração nas zonas de recarga em solos mais espessos e tornando a evapotranspiração nessa região mais abundante.

Na estação seca, o volume de precipitação é menor, é mais rara e a umidade relativa do ar é reduzida, gerando água meteórica mais enriquecida, enquanto no período úmido, com precipitações volumosas, constantes e umidade relativa do ar alta, a água meteórica é empobrecida. A tabela 2 mostra as variações das médias e o *d- excess* da precipitação de verão e inverno e as médias dos sistemas aquíferos.

Tabela 2. Média ponderada da composição isotópica de $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ e *d-excess* da precipitação.

	$\delta^{18}O$ ‰ (média)	$\delta^{2}H$ ‰ (média)	*d-excess %* (média)
Período úmido	-5,91	-33,74	13,75
Período seco	-3,44	-12,30	14,85
SAC	-6,20	-38,05	11,59
SAT	-7,85	-52,22	10,59
SAG	-7,46	-47,82	11,39

A natureza litológica e a configuração dos sistemas aquíferos influenciam nos processos de recarga e consequentemente no fracionamento isotópico em sub superfície, ou mesmo em superfície. As composições isotópicas de todos os sistemas aquíferos se aproximaram da composição da água meteórica do período úmido.

O SAC, com recarga rápida, pouco solo e porosidade fissural apresenta composição isotópica mais próxima da precipitação no período úmido com variação na ordem de 4,7% e *d-excess* variando 18%.

Os aquíferos de porosidade granular, como o SAT e o SAG, possuem uma dinâmica de recarga diferente do SAC, e são capazes de armazenar um volume muito superior que com maior taxa de recarga, uma vez que se localizam em regiões mais planas e são formados por rochas sedimentares.

O SAT na área de estudo se encontra tanto na condição semi confinada quanto confinada, e em profundidades majoritariamente superior a 200 metros, variando até 400 metros,

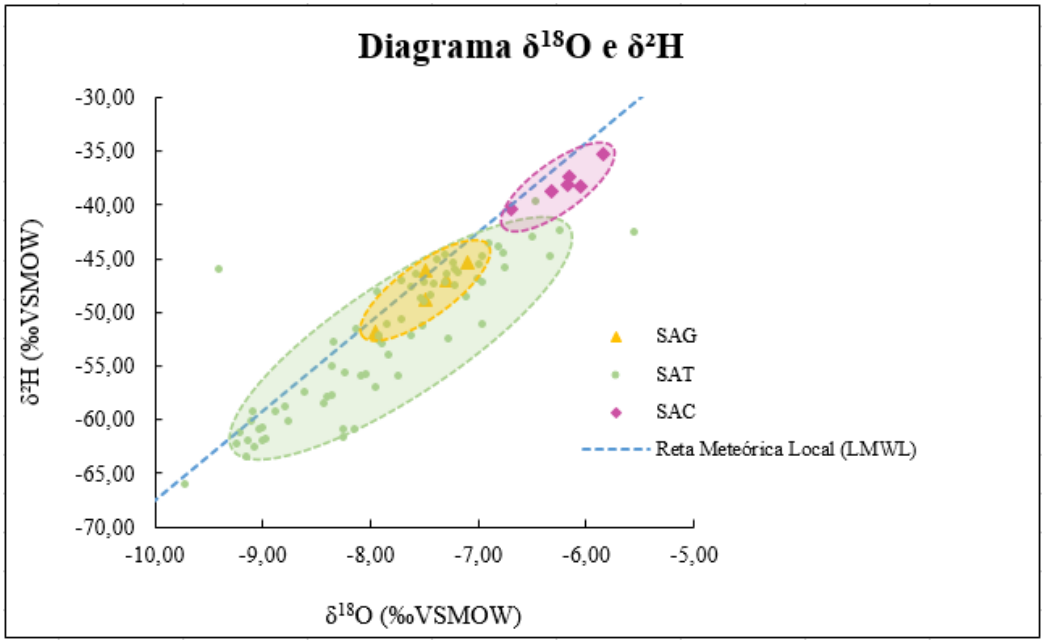
preservando composição isotópica de águas mais antigas, enquanto o SAG se encontra majoritariamente na condição livre e em profundidades inferiores a 200 metros, armazenando águas relativamente mais jovens.

A heterogeneidade litológica do SAT, além de sua maior profundidade, preserva águas mais antigas em seu sistema confinado a semi confinado, com composições isotópicas mais empobrecidas.

As condições de recarga do SAG permitem à uma assinatura isotópica das águas subterrâneas ligeiramente mais semelhantes às águas meteóricas, sendo mais empobrecida que a precipitação atual.

Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre a natureza hidrogeológica, levando em consideração as condições de recarga, e a variação isotópica dos diferentes aquíferos e a água de precipitação. A Figura 11 resume os resultados obtidos para cada aquífero comparando à reta meteórica local.

Figura 11: Diagrama $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ para os aquíferos da PCJ



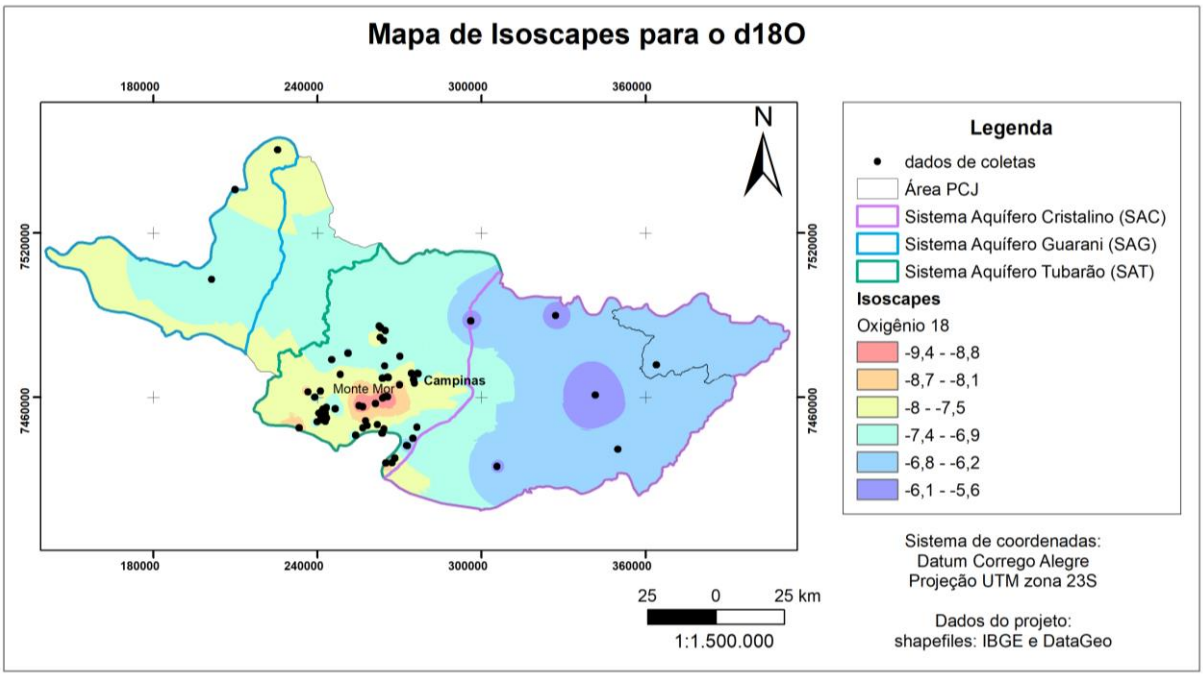
Fonte: Adptado de GNIP e SANTAROSA (2020).

4.2 Mapa de composição isotópica

Foi confeccionado um mapa da variação da composição isotópica das águas subterrâneas estudadas, o mapa de *isocapes.* Essa ferramenta possibilita observar a variação mais acentuada nas águas do SAC em relação aos aquíferos granulares. Esse fato pode ser explicado pelo relevo dominante na região do SAC submetido ao efeito de altitude, onde a chuva orográfica é submetida a menor evaporação, assim como a água que infiltra a zona de recarga, atravessando pequena espessura de solo. Diferentemente, na região mais plana da bacia e mais exposta a evaporação, seja pela maior temperatura ou pela maior quantidade de vegetação e organismos no solo mais espesso, o SAT e SAG apresentam valores de $\delta^{18}O‰$ e $\delta^{2}H‰$ mais empobrecidos.

Além do efeito da maior temperatura, devemos levar em conta a profundidade e o tipo de recarga de cada aquífero granular. Entretanto, ao se observar o mapa de *isoscapes*, notamos que a região de Monte Mor apresenta valores mais empobrecidos, enquanto a região de Campinas, bem próxima e abastecida pelo mesmo sistema aquífero apresenta valores mais enriquecidos. Esse fato pode revelar o uso excessivo da água subterrânea na região de Campinas, levando a mistura de água de aquíferos causada pela superexplotação e também pode demonstrar uma região onde o SAT é confinado, em Monte Mor, e uma região onde é semi confinado, em Campinas. A Figura 12 exibe o mapa de *Isoscapes*:

Figura 12: Mapa de *Isocapes*



Fonte: Confeccionado pelo autor (2021).

O mapa de composição isotópica, *isoscapes*, permite observar o padrão da assinatura das águas subterrâneas do SAC e um empobrecimento no SAT e um ligeiro enriquecimento no SAG. Mapas como este, podem ser uma ferramenta útil para o monitoramento de recursos hídricos, quando utilizado com dados suficientes para indicar uma assinatura isotópica padrão permitem observar ao longo do tempo variações na composição que podem estar associadas ao uso excessivo do aquífero, fazendo com que o ciclo recarga e descarga seja afetado, sendo abastecido por aguas fluviais ao invés de promover a descarga nos rios. Ou então, como observado por Santarosa (2020), efeitos negativos na vazão e no armazenamento mínimo levaram ao enriquecimento e menores valores de *d-excess*, indicando efeitos de evaporação pela ação antropogênica promovido por barramentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correlação dos resultados obtidos, a luz da hidrogeologia revela que a natureza do aquífero e sua dinâmica de recarga tem forte relação com a variação da composição isotópica da água meteórica regional. Aquíferos livres e rasos, preferencialmente de recargas rápidas, tendem a ter composição isotópica mais semelhante à água meteórica atual, enquanto aquíferos confinados e profundos, tendem a ter composições isotópicas diferentes das atuais.

Através da correlação das águas subterrâneas, dos sistemas estudados, com a água de precipitação do período úmido e seco, é possível perceber que estas se assemelham a composição isotópica de chuvas de verão, indicando que a maior parte da recarga é realizada por chuvas convectivas oriundas de vapores retrabalhados, sob efeito da continentalidade com composição isotópica mais empobrecida, e no caso do SAC, influenciado por efeito de altitude.

Os objetivos que este trabalho se propôs foram alcançados. Foi possível correlacionar as variações das composições isotópicas das águas subterrâneas com aspectos ligados a litologia dos respectivos sistemas aquíferos. Tais aspectos são refletidos no relevo, na forma de recarga, na taxa de transmissividade e na natureza livre, semi ou confinada do aquífero. Desse modo, dados isotópicos de águas subterrâneas se mostras ferramentas eficientes para avaliar variações no ciclo hidrológico, como implementação de barramentos, uso excessivo de águas subterrâneas, monitoramento de águas superficiais, despejo de efluentes e alterações no clima, que são fatores capazes de provocar oscilações no equilíbrio recarga e descarga dos aquíferos.

A utilização do mapa de *isoscapes* permite a identificação do sistema aquífero de qual as amostras de águas subterrâneas são oriundas, possibilitando o seu uso no monitoramento de aquíferos e estabelecendo um padrão regional que facilita a visualização e entendimento da variação isotópica através de um tempo determinado.

6 REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P. K. et al. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. Nature Geoscience, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016.

AGGARWAL, P. K. et al. Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. Geophysical Research Letters, v. 39, n. 11, p. 1–6, 2012.

BARISON, M.R. Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do sistema aquífero Bauru no estado de São Paulo. Tese de doutorado – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 2003

BATISTA, L. V. et al. Influência das águas subterrâneas na manutenção da vazão do rio em área de recarga do sistema Aquífero Guarani (SAG). Águas Subterrâneas, 2018.

BROOKS, J. Renée et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. Nature Geoscience, v. 3, n. 2, p. 100-104, 2010.

CAMPOS, H. C. N. S. Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do estado de São Paulo. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 1993.

CETESB, C. A. do E. de S. P. Relatório de Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo, 2018.

CELERI, M. J. Geotecnologias aplicadas aos recursos hídricos, mapeamento de declividade e relevo: Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Piracicaba, Capivari e Jundiaí–05/PCJ. Geografia em Atos (Online), v. 1, n. 9, p. 37-50, 2019.

CLARK, I.; FRITZ, P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press, Boca Raton, p. 343, 1997.

COOK, P. Introduction to Isotopes and Environmental Tracers as Indicators of Groundwater Flow / Peter Cook - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

CPRM, S. G. do B. Mapa Geológico e Litoestratigráfico do Estado de São Paulo: escala 1:750.000.

CRAIG, H. Isotopic Variations in Meteoric Waters. Science (New York, N.Y.), [s. l.], v. 133, n. 3465, p. 1702–3, 1961.

CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. Atmosphere, v. 10, n. 11, 2019.

DAEE/ IG/ IPT/CPRM. 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. São Paulo. São Paulo: DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG- Instituto Geológico, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 3 v. (mapa e CD-ROM).

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436–468, 1964.

DOBLE, R.C.; CROSBIE, R.S. Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. Hydrogeol J. 25, p. 3-23, 2017.

ENGELBRECHT, B.Z. Modelo Conceitual de Circulação de água subterrânea em aquífero cristalino no município de Itu/SP. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista, 2017.

EZAKI, S. Hidrogeoquímica dos Aquíferos Tubarão e Cristalino na Região de Salto (SP). São Paulo, 180 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2011.

EZAKI, S. et al. Estudo Hidroquímico E Isotópico Das Águas Subterrâneas Na Porção Central Do Aquífero Tubarão, Estado De São Paulo – Resultados Preliminares. Águas Subterrâneas, n. March, 2017.

EZAKI, S. et al. Geochemical evolution, residence times and recharge conditions of the multilayered Tubarão aquifer system (State of São Paulo–Brazil) as indicated by hydrochemical, stable isotope and 14C data. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2020.

FLANTUA, S. G. A. et al. Climate variability and human impact in South America during the last 2000 years: synthesis and perspectives from pollen records. Climate of the Past, v. 12, n. 2, p. 483-523, 2016.

GALLO, G.; SINELLI, O., Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto. Rev. Bras. de Geoc., SBG 10, p. 29-140, 1980

GASTMANS, D. et al. Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). Journal of Hydrology, v. 535, p. 598–611, 2016.

GASTMANS, D. et al: Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil, Isotopes in Environmental and Health Studies v.53, 2017.

GASTMANS, D., Chang, H.K. & Hutcheon, I. Stable isotopes (2H,18O and 13C) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil).Hydrogeol J.18, 1497–1513, 2010.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e curso de Graduação Tecnológica. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIMENO, L. et al. On the origin of continental precipitation. Geophysical Research Letters, v. 37, n. 13, p. 1–7, 2010

HALDER, Janine et al. The Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR): integration of water isotopes in watershed observation and riverine research. Hydrology and Earth System Sciences, v. 19, n. 8, p. 3419-3431, 2015.

HEALY, R. W. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

IAEA/WMO. Global Network of isotopes in precipitation. The GNIP Database. Accessible at: http://www.iaea.org/water, 2021.

IPT, Mapa geomorfológico do estado de São Paulo, 1981.

IRITANI, M.A.; ODA, G.H.; EZAKI, S.; VARNIER, C.L. Delimitação de áreas de proteção das águas subterrâneas no Município de Capivari (SP). Revista do Instituto Geológico, 30(1/2): 1-18, 2009.

KENDALL, Carol; COPLEN, Tyler B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. Hydrological processes, v. 15, n. 7, p. 1363-1393, 2001.

KIM, J.H.; JACKSON, R.B. A global Analysis of Groundwater Recharge for vegetation, climate and soils. Vadose Zone Journal, v. 11, n. 1, 2012.

KIMMELMANN E SILVA, A.A.; REBOUÇAS, A.C.; SANTIAGO, M.M.F.; SILVA, R.B.G. Isotopic study of the Botucatu Aquifer System in the Brazilian Portion of the Parana Basin. In: Isotope Hydrology Investigations in Latin America, p. 51-71, 1982.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.

LEONARD, I. W.; TYLER, B. C.; PRADEEP, K. Aggarwal Environmental Science & Technology 48 (2), 1123-1131, 2014.

MACHADO, F. B. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. 2005. xx, 193 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2005.

MARTINELLI et al. Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis/ Luiz A. São Paulo: Ophicina de Textos, 2009.

MATSUI, E.; SALATI, E.; BRINKMANN, W.L.F.; FRIEDMAN, I. Vazões relativas dos rios Negro e Solimões através das concentrações de 18O. Acta Amaz, v. 2, n. 3, p. 31-46, 1972.

MATSUI, E., VILLA NOVA, N.A., SALATI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. Acta Amaz, v. 6, n. 2, p. 215-228, 1976.

MEYBOOM, P. Estimating ground-water recharge from stream hydrographs. Journal of Geophysical Research, v. 66, n. 4, p. 1203, 1961.

MAANTESSO-NETO, V. et al. (Ed.). Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Editora Beca, 2004.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Ocidental. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Novembro de 2015, p. 255, vol. 2, 1998.

MOOK, W. G. et al. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. v. I, 2000.

MIDÕES, C.; FERNANDES, J.; COSTA, C. G. Água subterrânea: conhecer para proteger e preservar. LNEG 2001.

PCJ, A. das bacias. Relatório da situação dos recursos hídricos 2020: UGRHI 5 bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PROFILL – RHAMA. Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 a 2020: Relatório 2 – Diagnóstico Tomo I. 396 p. 2017.

QUARESMA, J. E. Lei de Darcy e aquíferos. Laboratório de hidráulica computacional, 2004.

REBOITA, M.S.; GAN, M. A.; ROCHA, R.P. da AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. Rev. Bras. Meteorol, n 25, p. 185–204, 2010.

RECKERTH, A. et al. Long-term data set analysis of stable isotopic composition in German rivers. Journal of Hydrology, v. 552, p. 718-731, 2017.

RISI, C. et al. Can we determine what controls the spatio-temporal distribution of dexcess and 17O-excess in precipitation using the LMDZ general circulation model? Climate of the Past, v. 9, n. 5, p. 2173–2193, set. 2013.

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition (18O and D) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. J. Geophys. Res. Atmos. 113, 1–12, 2008.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climate change in continental isotopic records, v. 78, p. 1-36, 1993.

SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. Water resources research, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, 1979.

SÁNCHEZ-MURILLO, R. et al. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica: An Analysis of Historic GNIP Records. v. 2013, n. October, p. 226–240, 2013.

SÁNCHEZ-MURILLO, R. et al. Baseflow recession analysis in the inland Pacific Northwest of the United States. Hydrogeology Journal, v. 23, n. 2, p. 287–303, 2015.

SÁNCHEZ-MURILLO, R.; BIRKEL, C. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. Geophysical Research Letters, [s. l.], v. 43, n. 10, p. 5060–5069, 2016.

SÁNCHEZ-MURILLO, R., Durán-Quesada, A.M., Birkel, C., Esquivel-Hernández, G., Boll, J. Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16. Hydrol. Process. 31, 956–967, 2017.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Water resources situation at piracicaba, capivari and jundiaí watersheds using a dynamic systems model. Engenharia Agricola, v. 29, n. 4, p. 578–590, 2009.

SANTAROSA, L.V. Impactos antropogênicos e climáticos nos processos hidrológicos: uma abordagem múltipla sobre o papel das águas subterrâneas na resiliência hídrica das bacias PCJ e TJ. 116 p. Tese de Doutoramento – Instituto e Geociências e Ciências Exatas – UNESP-Rio Claro, 2020.

SANTOS, V. dos et al. Variabilidade da Composição Isotópica da Precipitação na Região Central do Estado de São Paulo. Águas Subterrâneas, v. 33, n. 2, p. 171– 181, 2019a.

SANTOS, V. dos et al. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. Journal of Hydrology, v. 579, 1 dez. 2019b.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002.

SILVA, J. A. F. da. Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da região do canal do Jurubatuba. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

SILVA, R.B.G. Estudo hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese de doutorado em geologia – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 133, 1983.

SILVEIRA, C. S.; DA SILVA JÚNIOR, G. C. O uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos no Brasil: uma resenha crítica. Anuário do Instituto de Geociências, v. 25, p. 25-43, 2002.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: 27º Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju. Anais, v. 1, p. 243-256, 1973.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 52–67, 2002.

STRADIOTO, M. R.; CHANG, H. K. Aquífero Bauru No Estado De São Paulo. v. 34, n. 3, p. 411–422, 2015.

WERNICK, E.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, BB de. As regiões de dobramentos nordeste e sudeste. Sociedade Brasileira de Geologia, v. 309, p. 2493-507, 1978.

WINNICK, Matthew J. et al. Quantifying the isotopic 'continental effect'. Earth and Planetary Science Letters, v. 406, p. 123-133, 2014.

ANEXOS

Dados de isótopos de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ e d-excess:

Sistema Aquífero Tubarão (SAT)			
Municípios	**$\delta^{18}O$ (‰)**	**$\delta^{2}H$ (‰)**	***d-excess***
Rafard	-8,76	-60,07	10,01
Salto	-7,51	-47,09	12,99
Mombuca	-6,77	-44,5	9,66
Capivari	-6,33	-44,75	5,89
Monte Mor	-9,14	-62	11,12
Salto	-7,51	-48,97	11,11
Elias Fausto	-7,83	-53,88	8,76
Rafard	-8,44	-58,46	9,06
Elias Fausto	-7,12	-48,46	8,5
Rafard	-9	-61,93	10,07
Monte Mor	-9	-60,79	11,21
Salto	-9,73	-66,02	11,82
Salto	-7,93	-52,07	11,37
Mombuca	-7,29	-46,4	11,92
Salto	-8,09	-55,85	8,87
Monte Mor	-8,97	-61,83	9,93
Rafard	-8,04	-55,7	8,62
Indaiatuba	-7,01	-46,86	9,22
Salto	-9,03	-60,89	11,35
Capivari	-7,75	-55,93	6,07
Capivari	-6,96	-51,08	4,6
Capivari	-8,25	-60,87	5,13
Capivari	-7,28	-52,4	5,84
Capivari	-8,25	-61,56	4,44
Rafard	-5,56	-42,48	2
Monte Mor	-9,22	-61,1	12,66
Capivari	-8,4	-57,8	9,4
Capivari	-8,15	-60,87	4,33
Rafard	-7,72	-50,6	11,16
Indaiatuba	-6,47	-39,7	12,06
Hortolândia	-7,22	-47,5	10,26
Sumaré	-7,31	-47,1	11,38
Sumaré	-7,58	-46,4	14,24
Nova Odessa	-7,24	-45,4	12,52
Americana	-7	-45,5	10,5

Itu	-6,25	-42,4	7,6
Itu	-6,5	-42,9	9,1
Americana	-7,9	-52,9	10,3
Elias Fausto	-7,41	-47,3	11,98
Tietê	-6,97	-47,2	8,56
Americana	-6,97	-44,7	11,06
Hortolândia	-7,54	-48,6	11,72
Elias Fausto	-7,52	-51,2	8,96
Elias Fausto	-9,15	-63,5	9,7
Hortolândia	-7,44	-48,4	11,12
Monte Mor	-9,41	-46	29,28
Itu	-7,22	-46	11,76
Tietê	-7,94	-48	15,52
Rafard	-7,63	-52,2	8,84
Tietê	-8,35	-52,8	14
Porto Feliz	-7,63	-47,6	13,44
Capivari	-8,36	-57,7	9,18
Rafard	-9,09	-59,2	13,52
Rafard	-8,36	-55	11,88
Santa Bárbara D'Oeste	-6,81	-43,8	10,68
Santa Bárbara D'Oeste	-6,75	-45,8	8,2
Monte Mor	-8,79	-58,8	11,52
Hortolândia	-7,96	-57	6,68
Tietê	-7,72	-47	14,76
Monte Mor	-9,08	-62,5	10,14
Elias Fausto	-7,85	-51,1	11,7
Sumaré	-6,9	-43,6	11,6
Mombuca	-8,13	-51,5	13,54
Monte Mor	-8,88	-59,2	11,84
Mombuca	-8,61	-57,4	11,48
Capivari	-7,19	-46,3	11,22
Porto Feliz	-7,93	-52,6	10,84
Capivari	-7,39	-45	14,12
Sumaré	-7,31	-44,6	13,88
Americana	-8,24	-55,6	10,32
Porto Feliz	-9,24	-62,2	11,72
Porto Feliz	-9,11	-60,12	12,76

Sistema Aquífero Cristalino (SAC)			
Municípios	**$\delta^{18}O$ (‰)**	**$\delta^{2}H$ (‰)**	***d-excess***
Jundiaí	-6,17	-38,2	11,16
Bom Jesus dos Perdões	-6,32	-38,8	11,76
Monte Alegre do Sul	-6,16	-37,3	11,98
Jaguariúna	-6,05	-38,3	10,1
Extrema/MG	-6,69	-40,4	13,12
Bragança Paulista	-5,84	-35,3	11,42
Sistema Aquífero Guarani (SAG)			
Municípios	**$\delta^{18}O$ (‰)**	**$\delta^{2}H$ (‰)**	***d-excess***
Analândia	-7,95	-51,8	11,8
Itirapina	-7,49	-48,8	11,12
São Carlos	-7,49	-46,1	11,34
Ribeirão Bonito	-7,29	-47	11,32
São Pedro	-7,1	-45,4	11,4

2013			
Mês	**$d^{18}O$ (‰) RC**	**d^2H (‰) RC**	**Volume de precipitação (mm)**
jan/13			256,20
fev/13	-3,15	-13,20	119,70
mar/13	-4,10	-20,60	124,60
abr/13	-7,21	-46,40	142,60
mai/13	-5,54	-32,70	139,50
jun/13	-4,29	-22,40	81,90
jul/13	-1,45	3,24	49,70
ago/13	-0,57	10,00	4,30
set/13	-0,72	6,40	42,10
out/13	-2,01	-0,60	121,60
nov/13	-5,04	-28,00	291,70
dez/13	-7,66	-52,10	155,40
2014			
Mês	**$d^{18}O$ (‰) RC**	**d^2H (‰) RC**	**Volume de precipitação (mm)**
jan/14	-3,32	-18,10	110,00
fev/14	-3,15	-13,40	69,50
mar/14	-4,88	-29,20	143,20
abr/14	-7,88	-49,60	51,80
mai/14	-5,01	-24,40	49,80
jun/14			2,10
jul/14	-2,83	-1,90	18,70
ago/14	-0,32	18,80	4,20
set/14	-1,69	6,17	97,50
out/14	-3,50	-9,70	25,20
nov/14	-9,92	-67,00	152,90
dez/14	-10,76	-75,60	186,20
2015			
Mês	**$d^{18}O$ (‰) RC**	**d^2H (‰) RC**	**Volume de precipitação (mm)**
jan/15	-1,90	-0,80	94,00
fev/15	-7,50	-45,40	328,50
mar/15	-9,84	-63,90	166,30
abr/15	-3,22	-14,10	37,00
mai/15	-6,90	-38,90	105,40
jun/15	-2,04	-2,60	18,70
jul/15	-1,99	-3,70	41,70
ago/15	0,54	14,60	22,10
set/15			145,30
out/15	-1,31	10,70	46,30
nov/15	-3,79	-12,70	193,30
dez/15(I)	-7,02	-41,10	232,10
dez/15(II)	-1,38	7,20	122,40

2016			
Mês	**$d^{18}O$ (‰) RC**	**d^2H (‰) RC**	**Volume de precipitação (mm)**
jan/16	-10,47	-72,30	319,40
fev/16	-3,76	-15,90	148,80
mar/16	-5,02	-26,20	156,00
abr/16	-0,66	5,70	31,70
mai/16	-3,98	-17,00	151,50
jun/16	-4,01	-16,00	167,20
jul/16			0,30
ago/16	-1,68	4,10	68,28
set/16	-2,13	-0,40	66,98
out/16	-1,26	5,90	70,27
nov/16	-6,50	-34,40	73,99
dez/16	-2,83	-7,00	72,94
2017			
Mês	**$d^{18}O$ (‰) RC**	**d^2H (‰) RC**	**Volume de precipitação (mm)**
jan/17	-8,59	-55,90	298,80
fev/17	-4,25	-25,30	86,30
mar/17	-10,09	-69,70	201,50
abr/17	-7,35	-41,20	164,60
mai/17	-6,79	-37,90	167,40
jun/17	-2,15	-2,30	15,80
jul/17			0,00
ago/17			35,40
set/17			17,50
out/17	-2,82	-6,10	131,90
nov/17	-7,94	-54,10	178,80
dez/17	-6,55	-35,50	164,50