

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Campus de Rio Claro

VANDERLEI LANÇAS GOMES

**CARACTERIZAÇÃO DA ORIGEM DOS FLUXOS DE ÁGUA
EM MICROBACIAS NATURAIS E URBANAS: UMA
CONTRIBUIÇÃO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE H E O**

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Campus de Rio Claro

VANDERLEI LANÇAS GOMES

**CARACTERIZAÇÃO DA ORIGEM DOS FLUXOS DE ÁGUA
EM MICROBACIAS NATURAIS E URBANAS: UMA
CONTRIBUIÇÃO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE H E O**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro (SP)

2021

G633c Gomes, Vanderlei Lanças
Caracterização da origem dos fluxos de água em
microbacias naturais e urbanas: uma contribuição dos isótopos
estáveis de H e O / Vanderlei Lanças Gomes. -- Rio Claro,
2021
95 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Didier Gastmans

1. Isótopos Estáveis. 2. Microbacias Hidrográficas. 3.
Urbanização. 4. FLONA. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Campus de Rio Claro

VANDERLEI LANÇAS GOMES

**CARACTERIZAÇÃO DA ORIGEM DOS FLUXOS DE ÁGUA
EM MICROBACIAS NATURAIS E URBANAS: UMA
CONTRIBUIÇÃO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE H E O**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. DIDIER GASTMANS
CEA / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. LUCAS VITURI SANTAROSA
Universidad Tecnologia del Uruguay / Durazno – Uruguai

Dra. SIBELE EZAKI
CGMA / Instituto Geológico - SMA/São Paulo (SP)

Conceito: APROVADO

Rio Claro / SP, 09 de Abril de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Didier Gastmans, pela oportunidade, por todos os ensinamentos, incentivos, apoio e confiança.

Agradeço à minha família, em especial à minha esposa Sandra, pelo apoio e ajuda, e aos meus filhos Sean, Diana e Serena, e aos que estão chegando à família, Graziella e Vinícius.

Agradeço aos amigos que ganhei no Laboratório de Recursos Hídricos e Isótopos Ambientais (LARHIA): Vinícius, Lucas, Marcelo, Lia, Carol, José Claudio, Gian, Sebastian, Ludmila e Marcos.

Agradeço ao Centro Paula Souza pela oportunidade de poder realizar o mestrado através do Programa de Qualificação para Estudos de mestrado na Universidade Estadual Paulista (UNESP) pelo Edital nº. 001-2018 – PROPG-UNESP – CETEC-CPS.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Campus do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, pela oportunidade da realização de um sonho.

Agradeço à amiga engenheira agrônoma Ofélia de Fátima Gil Willmersdorf (*in memoriam*), e a todos os funcionários que de alguma forma colaboraram para o acesso e a disponibilidade do local para as coletas das amostras na Floresta Nacional de Ipanema (FLONA).

Agradeço à Empresa Júlio & Júlio Mineração LTDA, pela disponibilidade da coleta das águas subterrâneas.

Agradeço à Associação Recreativa São Bento pela disponibilidade da coleta das águas subterrâneas.

Agradeço ao Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto (SAAE) do município de Sorocaba, pela disponibilidade das coletas das amostras da Represa de Itupararanga na ETA-Cerrado.

Agradeço a todos os colegas professores da ETEC Fernando Prestes, pelo incentivo aos estudos, em especial ao prof. “Carlão” de química (*in memoriam*) que me deu a primeira definição de isótopos estáveis.

“Se eu vi mais longe foi por estar
sobre ombros de gigantes”
Isaac Newton

GOMES, V.L. (2021) Caracterização da origem dos fluxos de água em microbacias naturais e urbanas: uma contribuição dos isótopos estáveis de H e O. 95 p. Tese de Mestrado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP-Rio Claro.

RESUMO

O crescimento urbano, muitas vezes desordenado, pode implicar em alteração das características naturais de uma bacia hidrográfica, modificando o ciclo hidrológico natural e produzindo uma série de impactos que podem acarretar a perda de oportunidades do uso da água em termos de quantidade e qualidade. Os Isótopos estáveis de Hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) e Oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) constituem excelentes traçadores de movimentação da molécula de água ao longo do ciclo hidrológico, sendo utilizados como ferramentas auxiliares na interpretação das origens dos fluxos de água dentro de bacias hidrográficas. Com base nos processos envolvidos nas transformações isotópicas sofridas pela água ao longo do seu trajeto no ciclo hidrológico em áreas urbanizadas e não urbanizadas, o projeto buscou, de forma comparativa, responder às seguintes questões: qual o efeito local (em ambientes naturais e urbanizados) sobre a composição isotópica das águas superficiais; se as perdas das redes de distribuição de água potável podem contribuir para a descarga dos rios em áreas urbanas; quais as origens das águas responsáveis pela manutenção do fluxo de base em bacias hidrográficas urbanas; como os processos de urbanização afetam a movimentação da água nesses ambientes, e as fontes para a manutenção do fluxo de base. Foram selecionadas duas microbacias hidrográficas, uma em área urbana e outra em área pristina, na mesma bacia hidrográfica (URGHI 10 – Rio Sorocaba e Médio Tietê). As amostras foram coletadas quinzenalmente nos dois pontos escolhidos, de janeiro a dezembro de 2019. Foi utilizado o modelo de mistura bayesiano para identificar contribuições proporcionais de fontes ao fluxo nas duas drenagens analisadas. O estudo mostrou que a movimentação da água nas áreas estudadas apresenta comportamentos naturais distintos indicados pelas diferenças em suas composições isotópicas. Também mostrou que as águas da microbacia natural, que drenam áreas em que ocorrem sedimentos associados ao Grupo Tubarão, são mais empobrecidas que as águas da microbacia urbanizada drenando superfícies impermeabilizadas sobre rochas cristalinas. A semelhança entre as composições isotópicas das águas superficiais na área natural e as águas subterrâneas indicou que as águas subterrâneas contribuem muito para a manutenção do fluxo no canal do curso d'água, e que a contribuição do fluxo superficial (*runoff*) concentrou-se no dia da precipitação ou logo após esse dia. O estudo salienta a importância de os isótopos ambientais serem incorporados aos programas de monitoramento hidrológico e hidrogeológico, e de fornecer aos gerenciadores de sistemas do abastecimento de águas informações para poder entender melhor os efeitos que uma bacia natural com interferência antropogênica pode sofrer com esse processo de transformação humana.

Palavras-chave: Isótopos estáveis, microbacias hidrográficas, urbanização, FLONA.

GOMES, V.L. (2021) Characterization of the origin of water flows in natural and urban microbasins: a contribution from the stable isotopes of H and O. 95 p. Tese de Mestrado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP-Rio Claro.

ABSTRACT

Urban growth, which is often disordered, may result in altering the natural characteristics of a hydrographic basin, modifying the natural hydrological cycle, and producing a series of impacts that can lead to the loss of opportunities for the use of water in terms of quantity and quality. The stable Isotopes of Hydrogen ($^1\text{H}/^2\text{H}$) and Oxygen ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) are excellent tracers of movement of the water molecule throughout the hydrological cycle, being used as auxiliary tools in the interpretation of the origins of water flows within basins hydrographic. Based on the processes involved in the isotopic transformations suffered by water along its path in the hydrological cycle in urbanized and non-urbanized areas, the project sought, in a comparative way, to answer the following questions: what is the local effect (in natural environments and urbanized) on the isotopic composition of surface waters; whether losses from drinking water distribution networks can contribute to the discharge of rivers in urban areas; what are the origins of the waters responsible for maintaining the base flow in urban watersheds; how urbanization processes affect the movement of water in these environments; and the sources for maintaining the base flow. Two watersheds were selected, one in an urban area and another in a pristine area, in the same watershed (URGHI 10 - Rio Sorocaba and Médio Tietê). Samples were collected every two weeks at the two chosen points, from January to December 2019. The Bayesian mixture model was used to identify proportional contributions of sources to the flow in the two drainages analyzed. The study showed that the movement of water in the studied areas presents distinct natural behaviors indicated by the differences in their isotopic compositions. It also showed that the waters of the natural watershed, which drains areas where sediments occur associated with the Tubarão Group, are more impoverished than the waters of the urbanized watershed draining waterproofed surfaces on crystalline rocks. The similarity between the isotopic compositions of surface waters in the natural area and groundwater indicated that groundwater contributes a lot to the maintenance of the flow in the channel of the watercourse, and that the contribution of the surface flow (runoff) was concentrated on the precipitation day or just right after that day. The study highlights the importance of environmental isotopes being incorporated into hydrological and hydrogeological monitoring programs, and of providing water supply system managers with information to better understand the effects that a natural basin with anthropogenic interference can suffer from this process of human transformation.

Keywords: stable isotopes, watersheds, urbanization, FLONA.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de localização da UGRHI 10, com detalhe para as duas bacias hidrográficas utilizadas no estudo (a oeste, a Bacia do Riacho do Ferro, na FLONA Ipanema e a leste, a Bacia do Rio Lavapés na área urbana da cidade de Sorocaba), bem como a localização do Reservatório de Itupararanga, responsável pelo suprimento de água para a população do município de Sorocaba. Autora: Lia Nogueira Garpelli 2020.	18
Figura 2.1. Modelo tridimensional da tecnourbesfera na escala da cidade, identificando as porções de cada esfera planetária por ela modificada (A), Modelo tridimensional idealizado de parte da tecnourbesfera na escala de megalópole (B) (MENEGAT, 2010 p. 82 e 83).	23
Figura 2.2. Esquema das alterações no balanço hídrico, decorrentes da urbanização. (adaptado de BACA <i>apud</i> JHA <i>et al.</i> , 2012).	24
Figura 2.3. Impactos da urbanização sobre as águas. (Adaptado de CHOCAT <i>et al.</i> , 2007).	27
Figura 2.4. Exemplo de Drenagem Urbana aplicada: Singapura, 2019). Disponível em: http://infraroi.com.br/wp-content/uploads/2019/03/Aerial-view-of-Kallang-River-Bishan-Ang-Mo-Kio-Park-Singapore-Source-Wikimedia.jpg , acesso em julho/2020.	32
Figura 2.5. Retrata as variações no conteúdo de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ no ciclo hidrológico (oceano, vapor, chuva, escoamento superficial, neve, etc.) resultantes das reações de mudança de fase entre a água líquida e o vapor. Fonte: BARBOSA (2009).	37
Figura 2.6. Diagrama esquemático dos efeitos antropogênicos nos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ do rio nas cidades (LI <i>et al.</i> , 2019).	40
Figura 3.1. Foto aérea das Represas responsáveis pelo abastecimento de água da cidade de Sorocaba: Represa de Itupararanga (A) e Represa do Clemente (B) no município de Votorantim, SP. (Fonte: SAAE Sorocaba, 2020).	44

Figura 3.2. Médias históricas mensais da precipitação em Sorocaba. Estação E4-128 (Período 1971-2016) (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>). 45

Figura 3.3. Mapa geológico com a localização das bacias hidrográficas selecionadas para a realização do presente estudo (Fonte: DAEE/UNESP, 1980). 46

Figura 3.4. Localização das bacias em estudo nos domínios Aquífero Cristalino-Fraturado e Aquífero Tubarão-Sedimentar. 47

Figura 4.1. Mapa de localização dos pontos amostrados na bacia do Riacho do Ferro na FLONA (A); detalhe do ponto de amostragem no Riacho do Ferro (B). 53

Figura 4.2. Mapa de localização dos pontos amostrados na bacia do Córrego Lavapés na área urbana de Sorocaba (A); Calha Parshal ETA-Cerrado (B); detalhe da vazão normal do córrego (C); vazão após chuva (D). 54

Figura 4.3. Material utilizado para a coleta. Imagens: Vanderlei Lanças, outubro de 2019. 55

Figura 5.1. Médias mensais da precipitação do período de janeiro a dezembro de 2019 da estação implantada na FLONA, código 9000105, Latitude -23,4256, Longitude -47,5852, altura 609,0m (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>). 58

Figura 5.2. Variação sazonal dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $d\text{-excess}$ para as amostras de água superficial (Riacho do Ferro) – FLONA..... 59

Figura 5.3. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água superficial (Riacho do Ferro) e subterrâneas na área da FLONA. A Reta Meteórica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho). 60

Figura 5.4. Médias mensais da precipitação do período de janeiro a dezembro de 2019 na estação Sorocaba código 83851. Latitude -23,48, Longitude -47,43; altura 645,0m (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>).. 61

Figura 5.5. Variação sazonal dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de d -excess para as amostras de água superficial no Córrego Lavapés. 62

Figura 5.6. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água superficial e subterrâneas na bacia do Córrego Lavapés. A Reta Meteorica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho). No detalhe são representadas as amostras coletadas na ETA Cerrado e na rede de distribuição de água potável na bacia do Córrego Lavapés. 63

Figura 6.1. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água das microbacias do Ribeirão do Ferro (círculo) e do Córrego Lavapés (triângulos). A Reta Meteorica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho). Observar a clara separação entre as duas áreas..... 65

Figura 6.2. Modelo de mistura Bayesiano – FLONA: com a proporção das contribuições para o Córrego do Ferro. Em lilás, a contribuição das águas subterrâneas, e em amarelo, a contribuição da precipitação. 68

Figura 6.3. Modelo de mistura Bayesiano com a proporção das fontes da água superficial: – SOR. As proporções de contribuição das águas subterrânea (lilás), chuva (azul) e água da rede de abastecimento (amarelo). Observar a constância na contribuição das águas de abastecimento. 71

Figura 6.4. Distribuição mensal das contribuições de cada uma das possíveis fontes ao fluxo do Córrego Lavapés..... 72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Isótopos estáveis da Água (de acordo com MOOK, 2002)..... 34

Tabela 3.1. Aspectos demográficos do município de Sorocaba. Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano (PNUD, IPEA E FJP) (2013). Disponível em: http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/sorocaba_sp). 42

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

APA: Área de Proteção Ambiental
APP: Área de Preservação Ambiental
Cwa: Clima Subtropical Úmido
Cfa: Clima Subtropical Úmido
CEA: Centro de Estudos Ambientais
CEPAS: Centro de Pesquisas de águas subterrâneas
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica
ETA: Estação de Tratamento de Água
FJP: Fundação João Pinheiro
FLONA: Floresta Nacional de Ipanema
GMWL: Global Meteoric Water Line ou reta meteórica global
GNIP: Global Network of Isotopes in Precipitation
H: Hidrogênio
IAEA: International Agency of Atomic Energy
IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IGCE: Instituto de Geociências e Ciências exatas
IGc-USP: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo
IHL: Isotope Hydrology Laboratory
IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LIA: Laboratório de Isótopos Ambientais
LMWL: Local Meteoric Water Line ou Reta Meteórica Local (em português)
MCMC: Markov Chain Monte Carlo
O: Oxigênio
RMS: Região Metropolitana de Sorocaba
Bacias PCJ: Bacias Piracicaba-Capivari-Jundiaí
PEAD: Polietileno de Alta Densidade
PNUD: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PVDF: Polifluoreto de Vinilideno
SAAE: Sistema de Abastecimento de Água e Esgoto de Sorocaba
SAC: Sistema Aquífero Cristalino
SAT: Sistema Aquífero Tubarão
SLAP: Standart Light Antarctic Precipitation
SOR: Sigla adotada para coleta na Microbacia do Corrego Lavapés
VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water
UGRHI 10: Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
USGS: United States Geological Survey

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Ciclo Hidrológico e Impactos Causados pelo Desenvolvimento Urbano 20	
2.2	Isótopos Ambientais	32
2.3	Hidrologia Isotópica em Áreas Urbanas	37
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
3.1	Caracterização Física Geral da Região.....	45
3.1.1	Caracterização Física da Região da Microbacia do Ribeirão do Ferro	48
3.1.2	Caracterização Física da região da Microbacia do Córrego Lavapés ..	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	Revisão Bibliográfica.....	52
4.2	Localização dos Pontos de Amostragem e Coleta das Amostras	52
4.3	Determinação das razões isotópicas.....	56
4.4	Análise dos resultados	56
4.5	Modelo de mistura.....	57
5	RESULTADOS	58
5.1	Riacho do Ferro - FLONA	58
5.2	Córrego Lavapés – SOR	60
6	ORIGEM E CIRCULAÇÃO DAS ÁGUAS NAS MICROBACIAS DO RIACHO DO FERRO E CÓRREGO LAVAPÉS	65
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	Anexo A. Composição isotópica das amostras coletadas no Riacho do Ferro - FLONA e nos poços artesianos.	93
	Anexo B. Composição isotópica das amostras coletadas no Córrego Lavapés - SOR e nos poços artesianos.	94
	Anexo C. Composição isotópica das amostras coletadas nas torneiras de residências nas proximidades do Córrego Lavapés e na ETA Cerrado.....	95

1 INTRODUÇÃO

A urbanização representa o processo de crescimento das cidades, o qual implica na modificação das características naturais ou rurais das paisagens, transformando-as em urbanas (MIGUEZ, 2016). O aumento da urbanização das últimas décadas, observado no crescimento de manchas urbanas, está alterando inúmeros processos de bacias hidrográficas localizadas em áreas urbanizadas, que vem modificando o ciclo hidrológico e preocupando cientistas de diversas áreas da ciência, como a climatologia, hidrologia, meteorologia, dentre outras.

O intenso crescimento da população mundial a partir do século XX e a concentração da população nas cidades – sobretudo nas grandes cidades, frequentemente em áreas inundáveis, às margens dos rios, ampliou significativamente os impactos da urbanização sobre o meio natural, em geral, e sobre as águas, em particular (BAPTISTA; CARDOSO, 2013). No Brasil, a ocupação de locais inapropriados, como morros, encostas, planícies fluviais e áreas lindeiras (margens de córregos e rios – APP's), acarretou a ocupação desordenada do espaço urbano, onde essa ocupação desordenada causa uma série de impactos ambientais nas áreas urbanas tais como os descartes inadequados de lixo, e o despejo de esgoto sanitário nos rios (PACHECO; AZEVEDO, 2019).

Nas áreas urbanas, o ciclo hidrológico é modificado a medida que a área urbanizada cresce. A impermeabilização de solos nativos, transformados em superfícies impermeáveis, aumenta o escoamento superficial, diminuindo a evapotranspiração e a infiltração das águas (no solo). As vias de fluxo são modificadas e o excesso de escoamento superficial é direcionado diretamente para as águas receptoras dos rios urbanos, através de sistemas de drenagens hidraulicamente eficientes (BURNS *et al.*, 2012; BONNEAU *et al.*, 2018). Em bacias hidrográficas não-urbanas, outros caminhos dominantes para o fluxo das águas foram identificados, como a infiltração e fluxos subsuperficiais (BUTTLE, 1994; TETZLAFF *et al.*, 2015).

Embora a importância das águas subterrâneas para os córregos urbanos seja cada vez mais aparente (BHASKAR; WELTY, 2015; GABOR *et al.*, 2017),

a compreensão das respostas de fluxos de base após a urbanização ainda é muito incerta (PRICE, 2011; BHASKAR; WELTY, 2015). A recarga de águas subterrâneas reduzida, causada por superfícies impermeáveis (BARRON *et al.*, 2013; BRAUD *et al.*, 2013), é combatida pelo aumento da recarga através de vazamentos de serviços públicos (LERNER, 2002), demandando estudos específicos para a melhor compreensão desses processos (BONNEAU *et al.*, 2018).

A presença de linhas de drenagem superficiais, de tubulação de esgotos, de telecomunicações e de gás afeta potencialmente a circulação das águas subterrâneas. Tubos fraturados podem interceptar o fluxo de águas subterrâneas (WITTENBERG; AKSOY, 2010), e esses tubos são geralmente colocados e instalados nas valas com areia ou cascalho - altamente permeáveis que podem se tornar vias de fluxos preferenciais para águas subterrâneas e poluentes (SHARP *et al.*, 2013).

Os isótopos ambientais, especialmente os isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio, vêm sendo utilizados há tempos na compreensão da movimentação da água ao longo do ciclo hidrológico em diferentes escalas (WEST; FEBRUARY; BOWEN, 2014). Nesse contexto de contrastes entre ambientes urbanos e naturais, em que alterações nos fluxos em bacias hidrográficas são observados, esses isótopos constituem excelentes ferramentas para a definição das origens e quantificação das contribuições dos fluxos em bacias hidrográficas.

Devido às diferenças de massas, durante a mudança de fase da água ocorrem processos de fracionamento isotópico e de destilação que promovem a variação da proporção dos isótopos de hidrogênio e oxigênio, produzindo uma assinatura isotópica única para a água. Essa assinatura pode ser utilizada na caracterização de sua origem, sua associação com processos climáticos e transformações ocorridas ao longo do ciclo hidrológico, constituindo uma poderosa ferramenta para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas, seja em áreas urbanas, seja em áreas naturais (CLARK & FRITZ, 1997; MOOK, 2000; KENDALL; YOUNG; SILVA, 2010; JASECHKO *et al.*, 2016; JASECHKO, 2019).

O presente estudo foi desenvolvido em duas microbacias hidrográficas localizadas na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 – Médio Tietê (UGRHI 10), com características de uso e ocupação do solo distintas, visando demonstrar a utilidade dos isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio na definição de origem de fluxos superficiais e subsuperficiais em bacias hidrográficas e como os resultados podem apontar para gestão integrada de recursos hídricos.

Uma das áreas, a bacia do Córrego Lavapés, está localizada no município de Sorocaba, pertencente à Região Metropolitana de Sorocaba, que é parte da Macro Metrópole Paulista, inserida em área urbana. O município apresenta altas taxas de crescimento populacional, passando na década de 1940 de cerca de 70 mil habitantes para quase 700 mil habitantes atualmente (GONÇALVES *et al.*, 2014; IBGE, 2019). Esse é o motivo pelo qual ocorreram o uso e a ocupação do solo, principalmente nas últimas décadas, apesar de haver um plano diretor municipal de desenvolvimento físico-territorial que, de modo desordenado, suscitou o aparecimento de problemas também relacionados à drenagem urbana.

Na UGRHI 10, a intensa urbanização da cidade de Sorocaba contrasta com a existência de áreas preservadas como a Floresta Nacional de Ipanema (FLONA Ipanema), localizada no município de Iperó, distante cerca de 40 km da cidade de Sorocaba. Essa área foi utilizada neste estudo comparativamente, como uma área em que a movimentação da água não foi afetada pela urbanização (Figura 1.1).

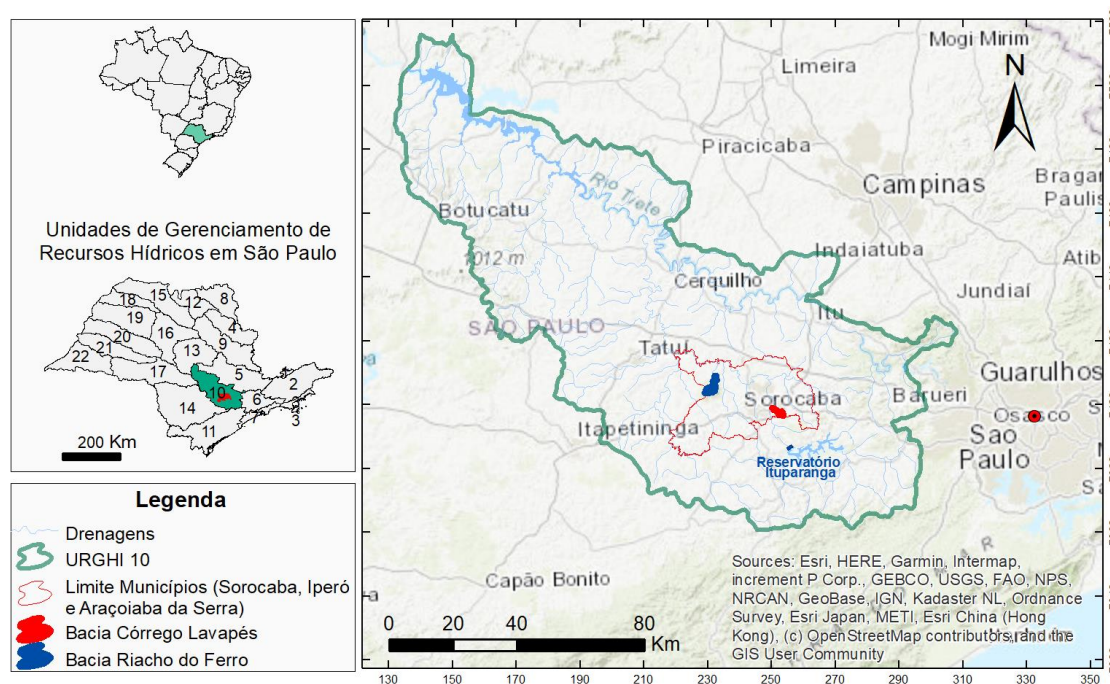


Figura 1.1. Mapa de localização da UGRHI 10, com detalhe para as duas bacias hidrográficas utilizadas no estudo (a oeste, a Bacia do Riacho do Ferro, na FLONA Ipanema e a leste, a Bacia do Rio Lavapés na área urbana da cidade de Sorocaba), bem como a localização do Reservatório de Itupararanga, responsável pelo suprimento de água para a população do município de Sorocaba. Autora: Lia Nogueira Garpelli 2020.

A grande maioria dos municípios integrantes da UGRHI 10 apresenta perdas elevadas na distribuição, variando de 30 a 60%. No caso específico de Sorocaba, a perda média na distribuição está em torno de 40%, valor que pode ser considerado mediano. Essa perda é composta das perdas reais (físicas) e das perdas aparentes (não físicas). As perdas reais referem-se às perdas por vazamentos na rede de distribuição e em outras unidades do sistema, como é o caso dos reservatórios. As perdas aparentes estão relacionadas a erros na micromedição, fraudes, existência de ligações irregulares em favelas e áreas invadidas, além de falhas no cadastro comercial (EST. SÃO PAULO, 2013).

1.1 OBJETIVOS

A partir da premissa de que a origem dos fluxos de água em bacias hidrográficas pode ser determinada a partir de diferenças na composição isotópica (isótopos estáveis de H e O) das fontes (precipitação e descarga de águas subterrâneas – interação rios/aquíferos), o presente trabalho busca, de forma comparativa, responder às seguintes questões científicas:

- ✓ Qual o efeito local (ambientes naturais e urbanizados) sobre a composição isotópica das águas superficiais?
- ✓ Perdas das redes de distribuição de água potável podem contribuir para a descarga dos rios em áreas urbanas?
- ✓ Quais as origens das águas responsáveis pela manutenção do fluxo de base em bacias hidrográficas urbanas?
- ✓ Como os processos de urbanização afetam a movimentação e o aporte da água nesses ambientes e interferem nas fontes para a manutenção do fluxo de base?

Com base nessas questões, o presente estudo tem por objetivo principal compreender como a urbanização afeta o ciclo hidrológico numa bacia hidrográfica, a partir da comparação entre duas áreas, uma antropizada e outra preservada (referencial natural). Tem como objetivos secundários:

- ✓ Identificar diferenças nas composições isotópicas nas duas bacias hidrográficas avaliadas, sendo uma antropizada e outra situada em unidade de conservação;
- ✓ Determinar as origens dos fluxos das águas no canal dos rios nas duas bacias hidrográficas avaliadas;
- ✓ Quantificar essas contribuições utilizando modelos de misturas isotópicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado o referencial teórico que embasou esta dissertação de mestrado, envolvendo conceitos a respeito de bacias hidrográficas, drenagem urbana, hidrologia isotópica, isótopos ambientais, impactos da urbanização no ciclo hidrológico e suas conexões com a movimentação das águas e os processos de urbanização, analisados através de isótopos estáveis.

2.1 Ciclo Hidrológico e Impactos Causados pelo Desenvolvimento Urbano

A movimentação da água ao longo da atmosfera e os reservatórios superficiais e subsuperficiais dos continentes, cada um com capacidade de armazenamento, fluxos e tempo de residência específicos, constituem o ciclo hidrológico natural, no qual qualquer perturbação duradoura, seja de ordem climática (como a redução da precipitação) e/ou antrópica (impermeabilização, obras de engenharia hidrológica, super exploração, entre outros) pode desencadear efeitos negativos para a sua manutenção (CLARVIS; ALLAN; HANNAH, 2014; KEYS *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a movimentação da água ao longo dos compartimentos continentais do ciclo hidrológico está intimamente relacionada à cobertura do solo presente em uma bacia hidrográfica nos processos relacionados à erosão, infiltração de água, fluxo superficial e sub superficial (fluxo de base), qualidade da água e controle de vazão dos rios. As florestas contribuem para o armazenamento de água, com a diminuição do risco de escassez em estação seca, e funcionam como filtros em matas ciliares, retendo sedimentos e poluentes das áreas agrícolas e urbanas adjacentes (ATTANASIO *et al.*, 2008).

O manejo de bacias hidrográficas visa a produção de água em quantidade e qualidade, sendo que a quantidade significa sua boa distribuição no tempo. Assim, a bacia deve absorver grande parte das águas precipitadas, armazená-las em seu lençol freático e, paulatinamente, cedê-las aos cursos d'água, garantindo perenidade e boa quantidade, mesmo em períodos de seca (NAGY, 2008). Apresenta a vantagem de concentrar as ações numa área geográfica

definida previamente com o auxílio de cartas topográficas e delimitada pelos divisores de água, de onde fluem as águas da chuva para as partes mais baixas do terreno, formando os cursos d'água.

A história urbana pode ser traçada tendo como eixos as formas de apropriação das dinâmicas hídricas. A trajetória das relações entre cidades e corpos d'água reflete, assim, os ciclos históricos da relação entre Homem e Natureza (MELLO, 2008; BAPTISTA; CARDOSO, 2013) e, nesse sentido, as primeiras áreas a serem ocupadas pela humanidade são aquelas mais planas, próximas aos rios, por conta do fácil acesso e da facilidade de construção de habitações.

Nesses locais, também é fácil lançar ruas que muitas vezes, acompanham o próprio curso do rio. A ocupação humana, então, desenvolve-se a partir das áreas lindeiras aos cursos de água, em direção às encostas (MIGUEZ; MAGALHÃES, 2010). Após a abertura de espaços para a urbanização e com a retirada da vegetação, a impermeabilização das superfícies é o efeito que segue da urbanização, que modifica a resposta hidrológica da bacia, reduzindo a capacidade de sua infiltração, além de eliminar retenções pela regularização das superfícies, e acelerar os escoamentos (MIGUEZ, 2016).

Já para Ferrari (1991), “cidade é o espaço contínuo, ocupado por um aglomerado humano considerável, denso e permanente, cuja evolução e estrutura (física, social e econômica) são determinadas pelo meio físico, pelo desenvolvimento tecnológico e pelo modo de produção do período histórico considerado e cujos habitantes têm status urbano.” O ambiente urbano é o *habitat* de mais de 50% da população mundial (aproximadamente 3,5 bilhões de pessoas). Essa mudança na distribuição da população, migrando de um perfil rural para um perfil urbano, alavancada na era industrial, intensificou os diversos problemas do uso e ocupação do solo relacionados às mudanças climáticas. (WARD *et al.*, 2013).

A urbanização é um processo social complexo e contraditório, caracterizado pela intensificação das relações sociais, econômicas e políticas, e pela necessidade de infraestruturas física e social para garantir a produção, a circulação, o controle, a decisão e o consumo da vida urbana (CUSTODIO,

2006). Essas atividades cristalizam-se como linhas, pontos e áreas no meio físico-natural que é, assim, transformado por elas e para elas de modo tão intenso quanto mais intenso for o processo de urbanização (CORREA, 1987; CUSTODIO, 2006).

Sabe-se que o crescimento populacional e, em consequência, a expansão urbana, são processos sobre os quais não se têm total controle. Entretanto, o planejamento urbano é imprescindível para a garantia da qualidade de vida da população, sobretudo no tocante aos recursos hídricos. Os impactos sobre as águas urbanas, em geral, ficam atrelados ao forte adensamento urbano, além das questões climáticas e às práticas humanas como o despejo de esgoto, sem tratamento, nos rios; os depósitos de resíduos sólidos, que contaminam as águas superficiais e subterrâneas; a ocupação do solo urbano sem controle do impacto sobre o sistema hídrico; dentre outras (TUCCI, 2008).

As questões que também afetam os fluxos dos cursos d'água nas áreas urbanizadas, águas superficiais ou subterrâneas, são a do tamanho e a da velocidade da ocupação (urbana) extremamente acelerada nas últimas décadas, sem que fossem atendidas normas regulamentadoras de edificações e da estrutura fundiária urbana. Ou seja, essas gigantes ocupações irregulares não atendem a um planejamento ou a uma gestão por parte das instituições públicas, que tentam criar soluções paliativas posteriormente à ocupação para os problemas gerados anteriormente (SANTORO, 2004).

Há também a questão da escalada da urbanização, como salienta Menegat (2010): as megacidades conectam-se entre si por inúmeros artefatos que estão engastados nas esferas planetárias, como túneis, tubulações, rodovias, ferrovias, hidrovias e aerovias.

Desse modo, o sistema físico urbano global inclui as porções das esferas planetárias modificadas, constituindo a tecnourbesfera: “A cidade não se ‘apoia’ no substrato geológico da mesma forma que um livro se apoia sobre uma mesa: ela se engasta no subsolo, onde estabelece bordos de reatividade sólida, líquida e gasosa. Essa borda de interface entre a cidade e a litosfera passa a adquirir propriedades da cidade, como se fosse um crescimento autogênico (MENEGAT, 2010) (Figura 2.1).

O túnel, por exemplo, não é da montanha, mas da via que une cidades. Da mesma forma, quando a cidade despeja seus esgotos na água dos rios, lagos e oceanos, ela passa a se enxertar nesses corpos d'água. A urbe necessita deles tanto para abastecer seus cidadãos e atividades, quanto para despejar suas sobras de alta reatividade.

Esses corpos d'água alterados são, portanto, parte indissociável do meio urbano, com cheiros, cores e características que lhes são típicos. (...) Na construção de uma cidade, (...) se coloca a possibilidade de uma cultura atravessar a densidade do tempo e dos processos geológicos, (...) capaz de lançar sondas profundas nos sistemas naturais, de modo a melhor entendê-los e modificá-los (...)" (MENEGAT, 2010) (Figura 2.1).

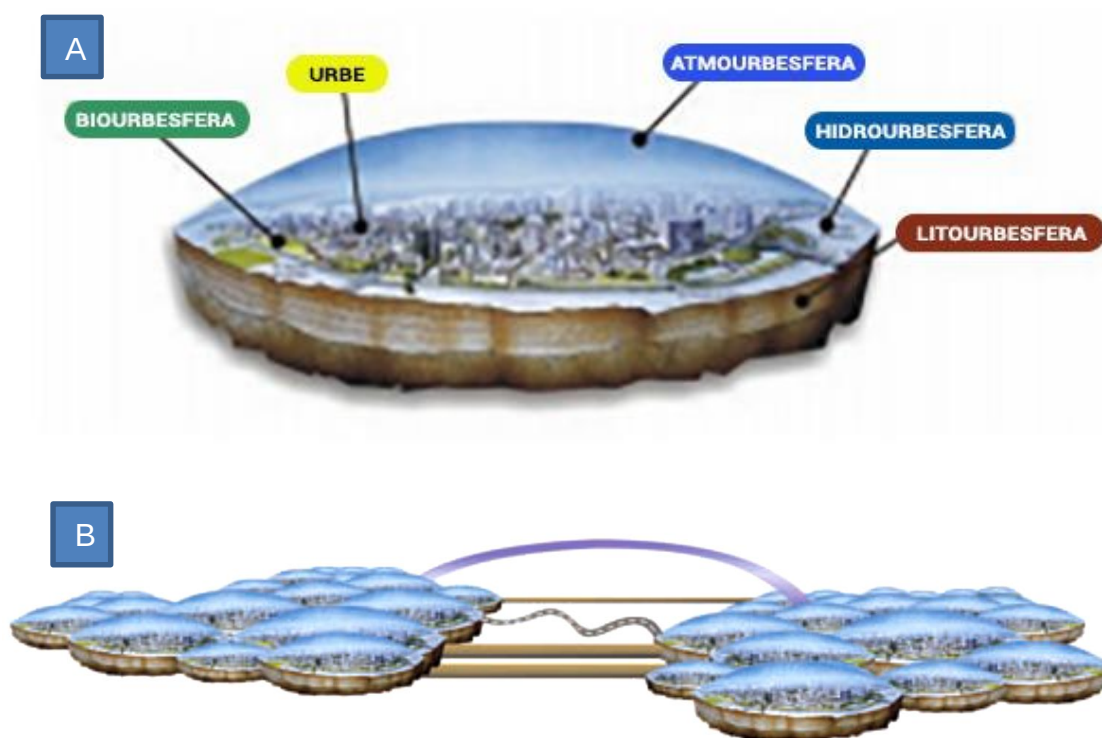


Figura 2.1. Modelo tridimensional da tecnourbesfera na escala da cidade, identificando as porções de cada esfera planetária por ela modificada (A), Modelo tridimensional idealizado de parte da tecnourbesfera na escala de megalópole (B) (MENEGAT, 2010 p. 82 e 83).

Grande parte dos problemas relacionados aos impactos sobre as águas urbanas foi gerado por uma visão limitada do que representa a gestão integrada do solo urbano, sua infraestrutura, e seus aspectos: 1. Falta de conhecimento sobre o assunto; 2. Concepção inadequada dos profissionais de engenharia para

o planejamento e controle dos sistemas; 3. Visão setorizada do planejamento urbano; 4. Falta de capacidade gerencial (do sistema) (TUCCI, 2008, p. 100).

As alterações que ocorrem no ciclo hidrológico urbano podem aumentar o escoamento superficial que, em alguns casos, pode corresponder a cerca de seis vezes o valor do escoamento natural (LEOPOLD, 1968) (Figura 2.2).

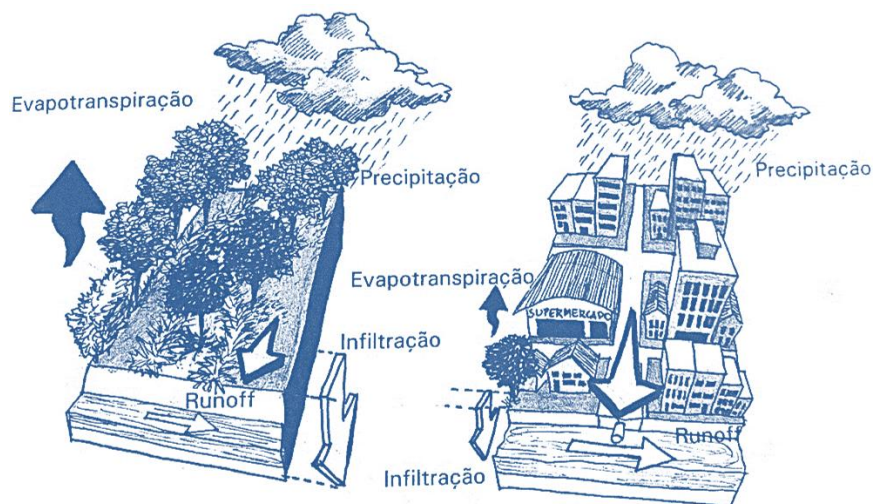


Figura 2.2. Esquema das alterações no balanço hídrico, decorrentes da urbanização. (adaptado de BACA *apud* JHA *et al.*, 2012).

Segundo Ross (2006), a degradação do meio ambiente concentra-se em três grandes processos de desenvolvimento: i) um caracterizado pela intensa e ampla utilização das terras para as atividades agropecuárias; ii) outro, pelo crescimento das áreas urbanas acompanhado de uma crescente concentração das atividades industriais; e iii) pelo crescimento da exploração dos recursos naturais como base energética e de matérias-primas.

Os impactos causados no ciclo natural da água pelo processo de urbanização de uma área ocorrem em todas as suas etapas de desenvolvimento, desde a fase de limpeza do terreno até a fase de implantação de rede de drenagem, como segue (TORONTO AND REGION CONSERVATION, 2006):

- ✓ Com a limpeza dos terrenos para a preparação do local, é removida a cobertura vegetal responsável por interceptar e desacelerar o

escoamento superficial e devolver a água para a atmosfera através da evapotranspiração;

- ✓ Os serviços de terraplanagem nivelam o terreno, eliminando as depressões naturais que diminuem a velocidade do escoamento e providenciam o armazenamento provisório para a água da chuva infiltrar ou evaporar;

- ✓ A retirada do solo e da camada de húmus superficial e a compactação do subsolo reduzem ou eliminam o percurso de recarga das águas para a atmosfera através da evapotranspiração. A água que infiltraria e reabasteceria as águas subterrâneas é rapidamente transformada em escoamento superficial;

- ✓ A adição de superfícies impermeáveis associada a comunidades, com prédios, ruas e estacionamentos, reduz ainda mais as características de infiltração do solo, contribuindo para aumentar o escoamento superficial;

- ✓ Esses efeitos são agravados pela implantação dos serviços de drenagem, compostos pelas sarjetas, galerias de drenagem e canais, que são incorporados ao desenvolvimento urbano para prover o rápido transporte das águas de chuva para os corpos receptores.

Leopold (1968) agrupa os impactos da urbanização causados na bacia hidrográfica em três grupos: a) **impactos na quantidade**, b) na **qualidade** e c) no **valor ambiental da bacia**.

a) Impactos na Quantidade

Os impactos de quantidade representam aqueles causados no regime de escoamento dos rios e estão diretamente relacionados, primeiramente, à porcentagem de área impermeável na bacia (dependendo do tipo de uso e ocupação do solo). Em segundo lugar, à velocidade de escoamento através das planícies até os rios (que depende da densidade, do tamanho e das características dos rios tributários) e à existência de sistemas de drenagem.

Mascarenhas *et al.* (2005) simularam os efeitos da urbanização em uma área com 360 m², considerando variações nas condições locais de uso e ocupação do solo, desde as condições de cobertura vegetal natural até a condição de impermeabilização de quase toda a área. O resultado dessa

avaliação demonstrou um aumento de vazão máxima nesse experimento, que é de 3,4 vezes, devido à urbanização da área. A variação do volume de escoamento superficial, além de impactar os picos de vazão nas cheias, também influencia o escoamento de base dos rios, pois o grande volume de escoamento superficial diminui a água disponível para renovação da umidade do solo e recarga do armazenamento de água subterrânea. Portanto, o aumento da impermeabilização do solo leva ao aumento do volume de escoamento superficial que, por sua vez, aumenta os picos de cheia nas épocas de fortes chuvas e diminui a vazão de base nas épocas secas.

b) Impactos na Qualidade

A introdução de efluentes de esgotos nos rios, sejam *in natura*, ou mesmo tratados em estações de tratamento de esgoto, é um grande agente de degradação dos corpos d'água, representando um dos principais fatores causadores dos impactos na qualidade. Essa introdução leva ao aumento da quantidade de nutrientes disponíveis, propiciando o crescimento de algas e bactérias, o que pode desequilibrar toda a biota aquática, levando, em casos extremos, à eutrofização do corpo d'água.

Mesmo em uma situação com cobertura total e eficiente de tratamento dos esgotos urbanos, a lavagem da superfície urbanizada pelas chuvas carrega para os corpos d'água inúmeros tipos de poluentes, como combustíveis e óleos, e uma quantidade razoável de carga orgânica, impactando na qualidade da água.

c) Impactos no Valor Ambiental

Leopold (1968) destaca os três principais fatores responsáveis pela deterioração do valor ambiental de uma bacia hidrográfica urbanizada:

1. **Instabilidade do canal:** A mudança no regime de escoamento dos rios em áreas urbanas altera a estabilidade do canal, que tende a apresentar margens instáveis e sem vegetação, leito assoreado e com lodo, e acúmulo de sedimentos e detritos.
2. **Acúmulo de lixo nos canais e nas planícies:** Latas, garrafas, plásticos, resíduos de construção, e todo tipo de resíduo gerado nas cidades.

3. **Desequilíbrio da biota aquática:** O aumento de nutrientes favorece o crescimento de algas, aumenta a turbidez da água e pode gerar odores desagradáveis.

Assim, o avanço da urbanização e a consequente modificação no ciclo hidrológico produzem uma série de impactos, acarretando, ao final, a perda de oportunidades de usos da água, uma vez que reduzem a sua disponibilidade em termos de qualidade e/ou da quantidade requerida para diversos usos potenciais (MIGUEZ, 2016).

Essa sucessão de impactos está apresentada no diagrama da Figura 2.3:



Figura 2.3. Impactos da urbanização sobre as águas. (Adaptado de CHOCAT *et al.*, 2007).

Para atender aos múltiplos usos das águas – irrigação, transporte em hidrovias, geração de energia elétrica, abastecimento humano etc. – as atividades humanas transformam as paisagens: destroem as preexistentes, criam novas paisagens e modificam os ambientes. Tais alterações podem ter impactos negativos ou positivos, intencionais ou não, destrutivos ou criadores de novas paisagens enriquecidas. As obras de infraestrutura hídrica, tais como barramentos, eclusas, hidrovias, aquedutos, e canais, são transformadoras das paisagens e introduzem em paisagens naturais o elemento da ação humana (BAPTISTA; CARDOSO, 2013).

Tornar os rios invisíveis é estratégia adotada em muitos municípios, que os encaixotam, retificam, cobrem, asfaltam e concretam (BARTALINI, 2004).

A maioria das cidades no Brasil dá as costas à água. Os rios têm diferentes graus de intervenção humana ao longo de seus cursos: as suas nascentes, em geral com menor intervenção, estão em estado natural; quando passam por cidades, são confinados para darem espaço para trânsito, avenidas de fundo de vale, lançamento de despejos, poluição, mau cheiro, enchentes; depois podem ter trechos de regeneração natural ou sistemas de tratamento. “A relação com a água precisa tornar-se amigável; as cidades precisam voltar-se de frente para os rios e para a água. Os cidadãos precisam ser hidroalfabetizados.” (RIBEIRO *et al*, 2013).

A drenagem urbana faz parte do contexto do Saneamento Básico e, conforme prevê a Lei federal nº 11.445, de 2007, ela é um serviço que deve ser prestado considerando-se como princípios básicos: 1) a universalização do acesso e 2) a integração com os demais serviços de saneamento, ou seja, com o abastecimento de água, com o esgotamento sanitário, com a limpeza urbana e com o manejo dos resíduos sólidos. Para os efeitos dessa Lei, consideram-se como drenagem e manejo das águas pluviais urbanas o conjunto de atividades, infraestrutura e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas. (BRASIL, 2007)

A drenagem urbana é definida tradicionalmente como o conjunto de elementos, interligados em um sistema, destinados a recolher as águas pluviais precipitadas sobre uma determinada região, conduzindo-as, de forma segura, a uma destinação final. Mais modernamente, pode-se acrescentar a esse conjunto de atividades de coleta e condução também a infiltração, sempre que possível, e a armazenagem, como formas de promover uma solução com um funcionamento que procura recuperar parte do ciclo hidrológico natural (MIGUEZ, 2016).

A drenagem urbana, no seu sentido mais amplo, pode ser definida como o conjunto de ações e medidas, cujo objetivo é não apenas minimizar os riscos

a que as comunidades estão sujeitas, mas também diminuir os diversos prejuízos causados por inundações, e participar, de forma articulada, de um plano integrado para o desenvolvimento urbano, de maneira harmônica e sustentável.

Os sistemas de drenagem urbana englobam dois subsistemas característicos: I) a microdrenagem e II) a macrodrenagem (MIGUEZ, 2016):

- I) A **microdrenagem urbana** é definida por um sistema de condutos em nível de loteamento ou de rede primária urbana, construído localmente para captação distribuída dos escoamentos superficiais gerados pelas áreas urbanizadas, sendo destinado a receber e conduzir as águas das chuvas vindas de construções, lotes, ruas, praças, etc. em uma área urbana; o caminho da rede de microdrenagem é essencialmente definido pelo traçado das ruas e composto pelos pavimentos, sarjetas, bocas de lobo, galerias de águas pluviais e canais de pequenas dimensões.
- II) Já a **macrodrenagem urbana** corresponde à rede de maior porte, que recebe águas já concentradas. Os primeiros componentes da rede de macrodrenagem se referem aos próprios caminhos de drenagem natural, preexistentes à urbanização, constituídos por rios e córregos, localizados nos talvegues dos vales.

As cheias urbanas estão diretamente associadas às falhas das redes de micro e macrodrenagem, seja por erro de concepção, por falha na previsão do horizonte de projeto, por falta de manutenção, por envelhecimento de partes do sistema ou obsolescência devido ao acelerado (e não controlado) crescimento urbano, fazendo com que a rede não consiga mais comportar as necessidades de escoamento. O mesmo autor define os objetivos de um sistema de drenagem em um contexto amplo como:

1. **Redução dos alagamentos** de uma dada região de interesse e minimização dos prejuízos da comunidade instalada na bacia drenada;
2. **Integração com o plano urbanístico da cidade**, tanto no que diz respeito às questões de zoneamento e uso do solo, como em relação ao crescimento urbano;

3. **Preservação de várzeas** e integração de soluções de drenagem com paisagens urbanas, em combinações multifuncionais;
4. **Avaliação integrada de questões de qualidade e quantidade das águas escoadas;**
5. **Conservação de logradouros e preservação das condições de tráfego na bacia;**
6. **Compromisso entre drenagem da região e destino das águas no corpo receptor**, sem transferência de problemas para a jusante.

Assim, pode-se dizer que problemas de drenagem surgem, basicamente, por desconpassos entre o projeto do sistema e o seu efetivo funcionamento. A falta de manutenção ou obsolescência são falhas relacionadas com a perda de capacidade do projeto de rede. A urbanização não controlada gera o efeito de um acréscimo nas vazões que chegam à rede acima da capacidade projetada. Dentre as principais falhas de integração entre projeto de drenagem e urbanização, podem ser citadas:

- i. **Superação da capacidade de escoamento da rede**, pelo acréscimo urbano que contribui diretamente para o sistema, atingindo valores de vazão além daqueles previstos no horizonte de projeto da cidade;
- ii. **Falta de controle de crescimento urbano a montante** da área de projeto, em áreas que originalmente eram naturais, lançando sobre o sistema um incremento de vazão não compatível;
- iii. **Ocupação inadvertida do solo em áreas ribeirinhas**, que deveriam ser preservadas como planícies de inundação, com a exploração direta das comunidades que ali se instalam ao risco de cheias;
- iv. **Falta de integração entre os sistemas do saneamento básico**, que devem ser compreendidos como complementares, e não independentes entre si – o correto funcionamento de um é condição essencial para a eficiência do outro.

A gestão das águas pluviais tem um papel fundamental em uma área urbana, pois pode ser utilizada para definir medidas para o controle de cheias, a melhoria da qualidade da água, o aproveitamento da água da chuva, a adoção de soluções de baixo custo, ou uma combinação entre elas.

Da mesma forma, a gestão também pode ser utilizada para: i) indicar as alternativas preferenciais para o controle do escoamento pluvial de cada local; ii) definir parâmetros e metodologias de projetos regionais; iii) elaborar estudos que justifiquem a busca por recursos financeiros; iv) desenvolver tecnologias inovadoras, ou de adaptações das edificações antigas às medidas de controle do escoamento pluvial; v) proteger as funções ambientais, entre outros usos.

Um dos princípios fundamentais mais frequentes em projetos de drenagem, atualmente, relaciona-se com o conceito de drenagem sustentável, em que se busca não ampliar a cheia natural com o processo de urbanização.

Evitar o aumento do escoamento superficial é uma das principais regras da “boa prática” na drenagem urbana sustentável, minimizando a utilização de superfícies impermeáveis na urbanização, substituindo-as por superfícies permeáveis sempre que possível.

Assim, se a urbanização traz modificações sobre a bacia, é importante procurar soluções que tentem contrabalancear essas modificações a fim de que os efeitos negativos sobre o escoamento sejam os mínimos possíveis, em vez de se procurar adaptar a capacidade de escoamento da rede de drenagem da bacia para receber uma cheia maior (MIGUEZ, 2016). Exemplos desse tipo de medidas são os pavimentos permeáveis, poços, as valas e trincheiras de infiltração e os telhados verdes (CASTRO; GOLDENFUM, 2008; PERSCH *et al.*, 2010). Desde o início do século XXI, também temos a aplicação nos países desenvolvidos dos conceitos de Infraestrutura Verde (BENEDICT; McMAHON, 2006), como em Cingapura, que readequou a área urbanizada para a área de drenagem natural do Rio Kallang (Figura 2.4).



Figura 2.4. Exemplo de Drenagem Urbana aplicada: Singapura, 2019). Disponível em: <http://infraroi.com.br/wp-content/uploads/2019/03/Aerial-view-of-Kallang-River-Bishan-Ang-Mo-Kio-Park-Singapore-Source-Wikimedia.jpg>, acesso em julho/2020.

Um condicionante crítico no Brasil, e na maioria dos países na região, é que muito do trabalho em drenagem urbana está orientado a solucionar problemas em áreas que já estão total e/ou parcialmente urbanizadas, numa espécie de “planejamento *a posteriori*”. Isso limita o leque de medidas disponíveis, seja por questões físicas (não há espaço disponível para reservatórios ou áreas permeáveis), legais (direito adquirido impede modificar o já existente), ou sociais (os moradores não gostam de algumas das soluções propostas). Em geral, somente em novos empreendimentos imobiliários é possível estabelecer o controle através de legislação municipal (VILLANUEVA *et al.*, 2011).

2.2 Isótopos Ambientais

Isótopos são átomos de um mesmo elemento químico constituído pelo mesmo número de prótons e distinto número de nêutrons. Diversos elementos têm naturalmente dois ou mais isótopos estáveis e radioativos. Apesar das

propriedades químicas de um elemento serem associadas ao seu número atômico, certas propriedades são controladas pela massa atômica do elemento, que são distintas entre isótopos de um mesmo elemento. Sendo assim, durante os processos naturais, a abundância relativa entre os isótopos de um mesmo elemento pode variar, resultando em abundâncias distintas nas moléculas formadas por esses isótopos. Quando se trata de isótopos radioativos, o processo de desintegração radioativa produz uma redução nas concentrações dos isótopos (MOOK, 2002).

Isótopos ambientais são definidos como aqueles com ocorrência generalizada no meio ambiente, sendo considerados traçadores para processos ambientais. As razões de isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio das moléculas de água ($\delta^2\text{D}$ e $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente) são gravadores integrados, poderosos e bem estabelecidos de diversos processos hidrometeorológicos (GAT, 1996; BARBIERI, 2019), e têm sido utilizados como ferramenta auxiliar em estudos hidrometeorológicos. Esses estudos auxiliam na interpretação da dinâmica da água no ciclo hidrológico (WORDEN *et al.*, 2007), oferecendo informações sobre a recarga e movimento de águas subterrâneas e o seu tempo de residência (GOVENDER *et al.*, 2013; JASECHKO *et al.*, 2014), a origem da água que abastece um corpo d'água superficial (LIU *et al.*, 2015; REN *et al.*, 2017) e a formação e origem da precipitação (AGGARWAL *et al.*, 2016; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2016; GASTMANS *et al.*, 2017; LACOUR *et al.*, 2018). Funcionam também com excelente registro em arquivos paleoclimáticos, como núcleos de gelo, anéis de árvores, corais, sedimentos e depósitos lacustres, sendo utilizados como ferramenta para a compreensão de processos naturais específicos em diversas áreas do conhecimento, como a espeleologia (CRUZ *et al.*, 2006; FRAPPIER *et al.*, 2007), e a dendrocronologia (BOYSEN; EVANS; BAKER, 2014), dentre outras.

Durante as mudanças do estado físico da água, uma assinatura isotópica única é registrada, possibilitando a investigação a respeito da origem e movimentação da água, vital no contexto de estudos de interação no sistema atmosfera-hidrosfera e os possíveis impactos ocasionados pelas mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, especialmente nos reservatórios subterrâneos e superficiais (SANTOS *et al.*, 2019).

Diferentes fontes de água em condições naturais apresentam valores diferentes nas razões isotópicas de H-O, que respondem com sensibilidade a mudanças ambientais, refletindo o fracionamento do isótopo no processo de transformação da fase aquosa, que é amplamente utilizado como um indicador ideal na pesquisa do ciclo da água (CHEN *et al.*, 2019; JOEL, 2010).

As principais características dos isótopos estáveis constituintes da molécula da água são apresentadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1. Isótopos estáveis da Água (de acordo com MOOK, 2002)

Elemento	O			H	
Isótopos	^{16}O	^{17}O	^{18}O	^1H	^2H
Abundância Natural (%)	0,9976	0,0004	0,0020	0,9998	0,0001
Expresso como	-	$^{17}\delta$ ou $\delta^{17}\text{O}$	$^{18}\delta$ ou $\delta^{18}\text{O}$	-	$^2\delta$ ou $\delta^2\text{H}$ ou δD
Padrão Internacional	VSMOW (‰)				
Razão Isotópica	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$			$^2\text{H}/^1\text{H}$	
	0,00204			0,015	

Como as variações nas quantidades absolutas dos diferentes isótopos são diminutas, convencionou-se calcular a abundância ou razão isotópica (R) para expressar esses valores, definida como (MOOK, 2002):

$$R = \frac{\text{abundância do isótopo raro}}{\text{abundância do isótopo abundante}} \quad (1)$$

Ademais, as razões isotópicas, por expressarem valores muito diminutos, passaram a ser adotadas com a notação delta (δ), que representa a razão de um isótopo em relação a uma razão de uma amostra de referência, o Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), que foi criado com base em amostras de águas oceânicas de diversas partes do globo. Além disso, convencionou-se multiplicar por mil (‰) os resultados isotópicos. Dessa forma, utilizando-se o exemplo do oxigênio, os resultados são expressos através da seguinte fórmula (CRAIG, 1961; DANSGAARD, 1964):

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{amostra}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{referência}}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰ VSMOW} \quad (2)$$

O processo que provoca a alteração do conteúdo de isótopos na natureza é denominado de fracionamento isotópico. Este é definido como um fenômeno no qual a composição isotópica de um determinado elemento altera-se por meio da transição deste composto, de um estado físico ou químico a outro. Há três processos de fracionamento isotópico dependentes de massa: o termodinâmico (em sistema de equilíbrio físico e químico), o cinético (em reações biogeoquímicas de uma única direção e irreversíveis) e o fracionamento de transporte durante os processos difusos (MOOK, 2002).

As variações das composições isotópicas no ciclo hidrológico são causadas principalmente durante os processos de mudanças de fase da água e reações de troca entre as moléculas isotópicas (MOOK, 2002). Os isótopos pesados de deutério (D) e oxigênio-18 (^{18}O), por exemplo, estão preferencialmente contidos na fase residual da evaporação ou condensação de fase líquida, e a remoção do vapor ou da fase líquida provoca a separação parcial dos isótopos (STEWART, 1975).

Craig (1961), buscando compreender os processos de mudanças de fase no ciclo hidrológico de águas meteóricas que resultam nas variações do conteúdo isotópico, identificou uma relação entre os isótopos de oxigênio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) e hidrogênio ($^2\text{H}/^1\text{H}$). Essa relação é correlacionada e expressa através de uma reta linear global, denominada de Linha ou Reta Meteórica Global (GMWL, no acrônimo em inglês), representada pela equação:

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

A reta meteórica global é utilizada amplamente em estudos de hidrologia isotópica para identificar a relação entre as águas de chuva, superficial e subterrânea. Amostras de todo o mundo se encaixam próximas à inclinação de

8, ou ainda estão inclinadas com valores superiores ou inferiores a este. Amostras com inclinação ≤ 8 indicam enriquecimento isotópico, associadas a processos Rayleigh, governados principalmente pela temperatura (CRAIG, 1961).

O valor de 10 na GMWL representa um importante componente na análise de águas meteóricas, denominado de excesso de deutério (*d-excess*), calculado através da seguinte equação (DANSGAARD, 1964):

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

Os valores de *d-excess* estão relacionados a condições físicas como umidade, temperatura do ar, temperatura da superfície do mar, fonte de vapor atmosférico e reevaporação, podendo ser usados como um parâmetro isotópico de segunda ordem e relacionado aos processos associados à formação de chuva. Dessa forma, ele é correlacionado a distintas fontes de vapor que originam uma chuva e indica sucessivos processos de reevaporação e/ou recirculação de vapor durante o deslocamento e a mistura de massas de ar, além de evaporação parcial de gotas de chuva abaixo da base da nuvem em condições climáticas quentes e secas (FROEHLICH; GIBSON; AGGARWAL, 2002).

O fracionamento isotópico é a variação dos isótopos estáveis, decorrente, segundo Clark e Fritz (1997), da mudança de fase ou estado, da diferença na taxa de reação química e da diferença na velocidade de difusão de um dado elemento químico. As mudanças na razão isotópica ocorrem, no meio natural, devido à evaporação, condensação e pela perda de isótopos pesados na precipitação.

Por se tratar de isótopos estáveis, variações como tais não estão relacionadas ao tempo ou ao enfraquecimento radioativo natural. A composição isotópica das águas da chuva (Figura 2.5) é dependente, dentre outros fatores, da distância à costa, da altitude e da longitude geográfica (SANTIAGO *et al.*, 2008).

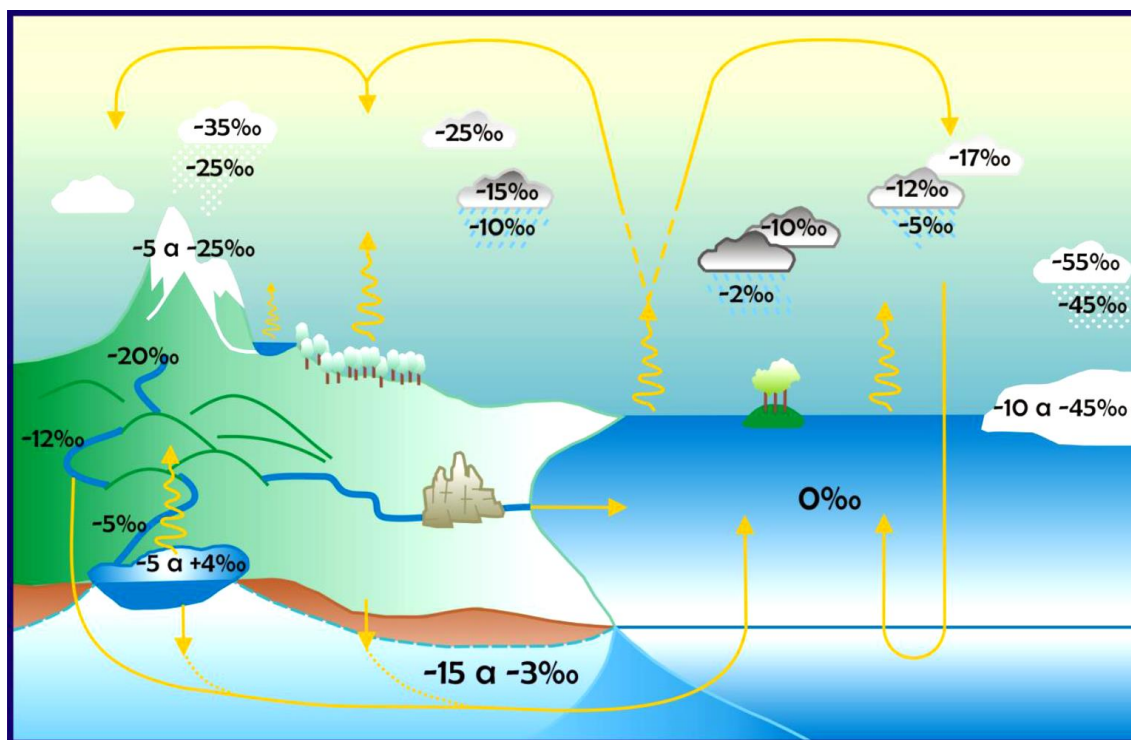


Figura 2.5. Retrata as variações no conteúdo de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ no ciclo hidrológico (oceano, vapor, chuva, escoamento superficial, neve, etc.) resultantes das reações de mudança de fase entre a água líquida e o vapor. Fonte: BARBOSA (2009).

2.3 Hidrologia Isotópica em Áreas Urbanas

A hidrologia isotópica tem concentrado seus estudos em paisagens distantes de regiões densamente habitadas; entretanto, em função da concentração do uso em regiões urbanizadas, será cada vez mais importante concentrar-se no abastecimento de água e na dinâmica dos sistemas urbanos, através da análise de isótopos estáveis que poderão fornecer informações importantes para os gestores de água nas grandes cidades e que possam servir como uma ferramenta útil para a correta gestão dos recursos hídricos (EHLERINGER *et al.*, 2016).

De maneira geral, pode-se afirmar que as razões isotópicas de águas utilizadas para o abastecimento público refletem a mistura de águas com distintas origens: subterrâneas, águas superficiais e águas de outras bacias. Em paisagens urbanas, essas proporções podem ser acrescidas com águas recicladas (isto é, água cinzenta, recarga de água subterrânea com águas superficiais, águas pluviais etc.) adicionando mais complexidade à água urbana. A inclusão de isótopos da água na hidrologia dos sistemas urbanos é uma nova

fronteira em que a nossa ciência pode ser aplicada em benefício social e econômico (EHLERINGER *et al.*, 2016).

A urbanização modifica substancialmente o balanço hídrico nas bacias hidrográficas. A impermeabilização de solos nativos aumenta o escoamento superficial, diminuindo a evapotranspiração e a infiltração. As vias de fluxo são modificadas, pois o excesso de escoamento superficial é comumente direcionado diretamente para as águas receptoras através de sistemas de drenagem hidraulicamente eficientes (BURNS *et al.*, 2012). O impacto dessas interferências nas contribuições das águas subterrâneas para os riachos urbanos (isto é, o escoamento de base) é pouco estudado. Embora os fluxos elevados causados pelo escoamento impermeável aos rios sejam um foco comum dos estudos urbanos, a rota tomada pelas águas subterrâneas para se tornar um fluxo em paisagens urbanas não é geralmente considerada (BONNEAU *et al.*, 2018).

A forma como as águas subterrâneas viajam no ambiente urbano é importante, e conhecer esses caminhos poderia auxiliar no gerenciamento de contaminantes de água subterrânea que representam uma ameaça à qualidade da água urbana (ROY; BICKERTON, 2012; GABOR *et al.*, 2017). Também poderia melhorar a eficácia da infiltração de águas pluviais, pois grandes investimentos são feitos em todo o mundo em estruturas de infiltração de águas pluviais (MOURA *et al.*, 2007; BLECKEN *et al.*, 2015), sem uma forte compreensão do destino da infiltração de águas pluviais.

A dependência da distribuição espaço-temporal da composição isotópica da água a fatores climáticos ou geográficos é bastante conhecida (GIBSON *et al.*, 2002; ROZANSKI *et al.*, 1993; DANSGAARD, 1964); no entanto, esses efeitos ignoram os efeitos antropogênicos, que alteram significativamente os atributos naturais dos rios, o que pode afetar o nível da composição isotópica da água dos rios (GORSKI *et al.*, 2015; JAMEEL *et al.*, 2016).

Análises de isótopos estáveis podem fornecer importantes informações aos gestores de água nas grandes cidades e auxiliar na compreensão espacial e vertical dos isótopos em sistemas urbanos de abastecimento de água. Podem também ser usados como uma ferramenta de gestão para fornecer informações

da origem e do histórico evaporativo do abastecimento urbano de água (EHLERINGER, *et al.*, 2016; JAMEEL, *et al.*, 2018), uma vez que a urbanização muda as condições das áreas das bacias hidrográficas, resultando em mudanças na distribuição temporal e espacial da infiltração, do escoamento superficial e da evaporação (BHADURI *et al.*, 2000; SHUSTER *et al.*, 2005).

A área territorial de uma bacia é o principal fator que afeta as características climáticas em ambiente urbano. Em cidades com maior área territorial, apresenta temperatura atmosférica frequentemente mais alta do que as áreas vizinhas não urbanizadas (WATKINS *et al.*, 2007).

A expansão das cidades pode alterar a composição isotópica das águas dos rios na área urbana, que são geralmente mais enriquecidas do que em áreas não urbanizadas. Os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ apresentam uma forte correlação com a área territorial, indicando que as variações nas razões isotópicas podem ser usadas como indicadores para estudo do impacto das águas em uma bacia hidrográfica urbanizada (LI *et al.*, 2019).

Essas variações podem ser associadas aos efeitos decorrentes das ilhas de calor, associados à elevação da temperatura das áreas urbanas quando comparadas às áreas periurbanas ou rurais, o que pode afetar elementos meteorológicos, como temperatura e precipitação em áreas urbanas. Esse processo afeta a formação e o movimento das nuvens, o que leva a mudanças nos mecanismos de precipitação nas áreas locais (BORNSTEIN; LEROY, 1990; DIXON; MOTE, 2003 *apud* LI *et al.*, 2019). Acredita-se geralmente que os efeitos das ilhas de calor urbano podem aumentar as chuvas urbanas (SHEPHERD; PIERCE; NEGRI, 2002 *apud* LI *et al.*, 2019) (Figura 2.6).

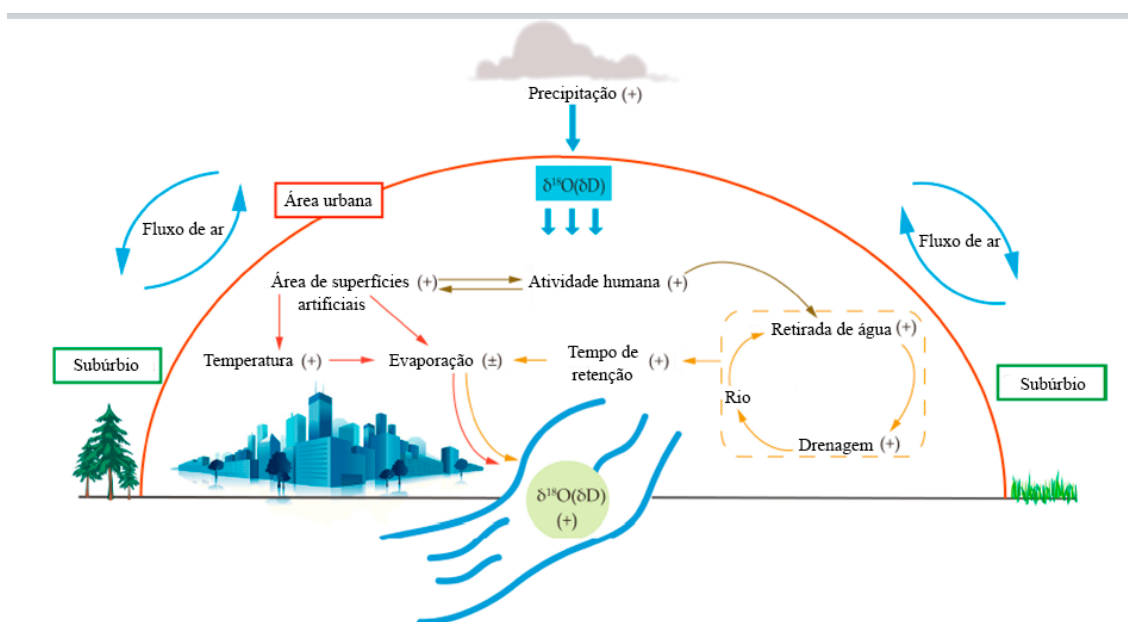


Figura 2.6. Diagrama esquemático dos efeitos antropogênicos nos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ do rio nas cidades (LI *et al.*, 2019).

O aumento da temperatura local também pode promover o fracionamento por evaporação. Existem evidências de que áreas altamente urbanizadas têm regimes de evapotranspiração alterados devido à remoção da vegetação e à diminuição da retenção de água e armazenamento do solo, o que pode levar a um aumento no escoamento superficial em 50%, reduzindo a infiltração de água e da evapotranspiração (ALBRECHT, 1974).

Para Li (2019), as alterações dos efeitos antropogênicos alteram significativamente o estado climático ao redor da cidade, alterando a composição isotópica e refletindo no fracionamento por evaporação dos isótopos estáveis de H-O. É como o efeito de uma represa que, depois que é construída, aumenta o tempo de retenção da água, promovendo a evaporação e o fracionamento dos isótopos de H-O das águas oriundas de áreas naturais. Portanto, o impacto de fatores ambientais urbanos nos isótopos da água dos rios é bastante complexa.

Nas áreas urbanas, a água do rio passa por muitos processos, como abastecimento, uso, drenagem e reciclagem (isto é, água cinzenta, recarga de águas subterrânea com águas superficiais, águas pluviais etc.), adicionando maior complexidade nas águas da paisagem urbana. Esses efeitos poderão levar

a valores mais altos de hidrogênio e oxigênio nas águas da bacia urbanizada em comparação com as da bacia de floresta natural (LI *et al.*, 2019).

No ciclo global da água, os rios geralmente herdam as assinaturas isotópicas de H-O da precipitação, mas a urbanização afeta indiretamente as características dos isótopos de H-O do rio urbano, afetando os isótopos da precipitação (LI *et al.*, 2019).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi conduzido em duas microbacias situadas nos municípios de Sorocaba, Iperó e Araçoiaba da Serra, todos pertencentes à região metropolitana de Sorocaba.

A primeira microbacia, a do Córrego Lavapés, localiza-se na área urbana do município de Sorocaba e a segunda, a do Ribeirão do Ferro, na Floresta Nacional de Ipanema (FLONA), nos municípios de Iperó e Araçoiaba da Serra, no Estado de São Paulo. Ambas as áreas estão situadas na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10) (Figura 1.1), com uma distância entre elas de cerca de 22 km em linha reta.

A cidade de Sorocaba representa um importante polo de crescimento econômico do Estado de São Paulo (IPEA, 2017). Além de ser sede de uma região metropolitana recém-criada (2014/2016), vem apresentando nas últimas décadas uma das maiores taxas de crescimento populacional do estado de São Paulo, comprovada pela série de dados populacionais: Sorocaba tinha, na década de 1940, 70.835 habitantes; na década de 1970, 174.323 habitantes, e em 2000, 493.468 habitantes (GONÇALVES *et al*, 2014).

Dados do censo realizado pelo IBGE no ano de 2010 comprovam a alta taxa de urbanização do município (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Aspectos demográficos do município de Sorocaba (Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano (PNUD, IPEA e FJP) (2013). Disponível em: http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/sorocaba_sp).

População	População (1991)	% do Total (1991)	População (2000)	% do Total (2000)	População (2010)	% do Total (2010)
População total	379.006	100	493.468	100	586.625	100
População urbana	374.108	98,71	486.726	98,63	580.655	98,98
População rural	4.898	1,29	6.742	1,37	5.970	1,02

Em 2018, Sorocaba tinha 671.186 habitantes. O número indica que a cidade ganhou 11.315 residentes em um ano, um crescimento de 1,71% em comparação a 2017. Comparativamente à taxa brasileira de 0,82% no mesmo período, Sorocaba cresceu mais do que o dobro da média brasileira. Para 2019, o IBGE estimou uma população de 679.378 pessoas para o município de Sorocaba, um aumento de 1,012%. A densidade demográfica em 2010 era de 1.304,18 habitantes/km², e o atendimento de esgotamento sanitário adequado alcançou 98% da população (IBGE, 2019).

O Sistema de Abastecimento de Água de Sorocaba é atendido pelos mananciais de superfície: 1) Represa Itupararanga/Clemente; 2) Represa de Ipaneminha e 3) o Rio Pirajibu-Mirim. A complementação do abastecimento na área urbana é feita por meio de poços tubulares.

A Represa e Usina Hidrelétrica de Itupararanga constituem uma importante área de reserva de água para cerca de 800 mil habitantes da região metropolitana de Sorocaba (ROSA *et al.*, 2012). É formada por uma barragem da junção das águas dos rios Una, Sorocamirin e Sorocabuçu, que formam as águas do Rio Sorocaba, no município de Votorantim (RIBEIRO, 2019). A Represa de Itupararanga está localizada parcialmente em vários municípios: Ibiúna, Piedade, São Roque, Mairinque, Alumínio e Votorantim. Atualmente, está compreendida na Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga (POMPEO *et al.*, 2015).

As águas da Represa de Itupararanga seguem para a Represa do Clemente, uma pequena represa localizada a aproximadamente 1,5 km da Represa de Itupararanga. Atualmente a vazão captada é da ordem de 1.800 l/s, representando cerca de 75 % do volume total (em 2020) necessário ao abastecimento de Sorocaba (Figura 3.1).



Figura 3.1. Foto aérea das Represas responsáveis pelo abastecimento de água da cidade de Sorocaba: Represa de Itupararanga (A) e Represa do Clemente (B) no município de Votorantim, SP. (Fonte: SAAE Sorocaba, 2020).

Da Represa do Clemente até a ETA do Cerrado (zona oeste de Sorocaba), a água é transportada por quatro adutoras que funcionam por gravidade, uma com 800 mm de diâmetro, duas com 500 mm de diâmetro e a outra adutora com 350 mm de diâmetro. Após tratamento na ETA Cerrado, a água tratada é distribuída à população por meio de uma malha subterrânea, composta por 1.744,87 km de tubulações de diversos diâmetros e materiais. A água potável é aduzida (levada) para 45 reservatórios térreos e elevados, dependendo da necessidade da região, distribuídos por toda a cidade (SÃO PAULO, 2013).

Contrastando com a urbanização da cidade de Sorocaba, a Floresta Nacional de Ipanema (FLONA) está localizada em uma região de Tensão Ecológica com matriz de Floresta Estacional Semi-decidual, com elementos de Floresta Ombrófila Densa, Ombrófila Mista e mesmo cerrado, em *sensu lato* (ICMBIO, 2017). É uma unidade de conservação federal, situada no sudoeste do estado de São Paulo, Brasil, entre as latitudes 23° 25' e 23° 28' S, e entre as longitudes de 47° 33' e 47° 40' W (Figura 1.1) Pertence aos municípios de Araçoiaba da Serra, Iperó e Capela do Alto, que estão inseridos na Região Metropolitana de Sorocaba, a 120 km distante da capital de São Paulo e 20 km da cidade de Sorocaba. Abrange uma área territorial de 5.069,73 ha, com altitudes compreendidas entre 550 e 971 metros acima do nível do mar, e tem a Serra de Araçoiaba como o grande destaque na paisagem da região.

3.1 Caracterização Física Geral da Região

A área de estudo, que engloba os municípios de Sorocaba, Araçoiaba da Serra e Iperó, está localizada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10), que engloba o domínio territorial de mais de 31 municípios, além dos três mencionados acima.

Quanto ao clima, segundo classificação de Köppen (Peel *et al.*, 2007), a área de estudo situa-se em região de transição entre os tipos climáticos Cwa e Cfa, caracterizados por possuírem temperaturas médias anuais inferiores de 21,4°C. A precipitação anual é de cerca de 1300 mm, largamente concentrados no verão (Figura 3.2). Assim, o verão é quente e chuvoso (com temperaturas médias mínimas e máximas de 16 e 27°C, respectivamente), e inverno frio e seco (com temperaturas médias de 12 e 22°C, para mínima e máxima, respectivamente) (SILVA; SILVA, 2016).

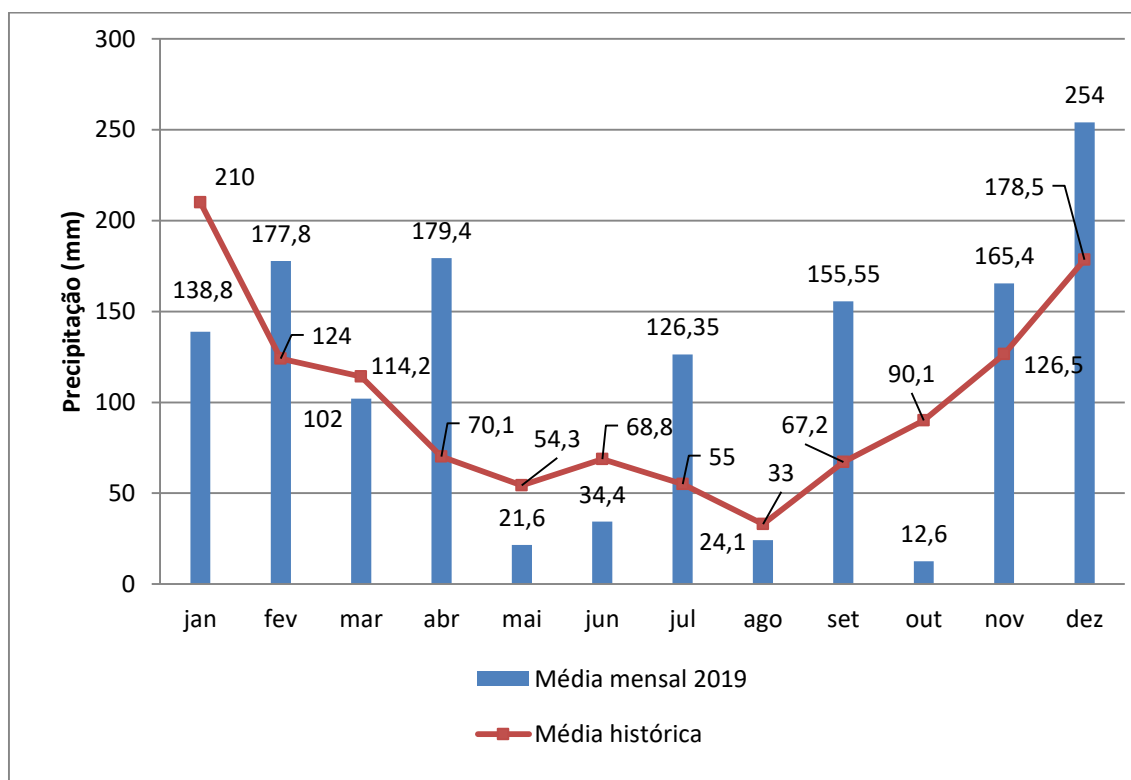


Figura 3.2. Médias históricas mensais da precipitação em Sorocaba. Estação E4-128 (Período 1971-2016) (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>).

O arcabouço geológico da área de estudo é composto por uma diversidade de unidades litológicas, englobando rochas de idades variadas, do

Pré-Cambriano até o Cenozoico (Figura 3.3). Na porção leste, ocorrem rochas proterozoicas do Embasamento Cristalino, como quartzitos, filitos, incluindo metassiltitos, quartzoxistos, quartzitos e micaxistos subordinados do Grupo São Roque. Ocorrem também Granitóides do Orógeno Socorro-Guaxupé, com granitos, granodioritos, monzogranitos e sienogranitos (DAEE, 1980).

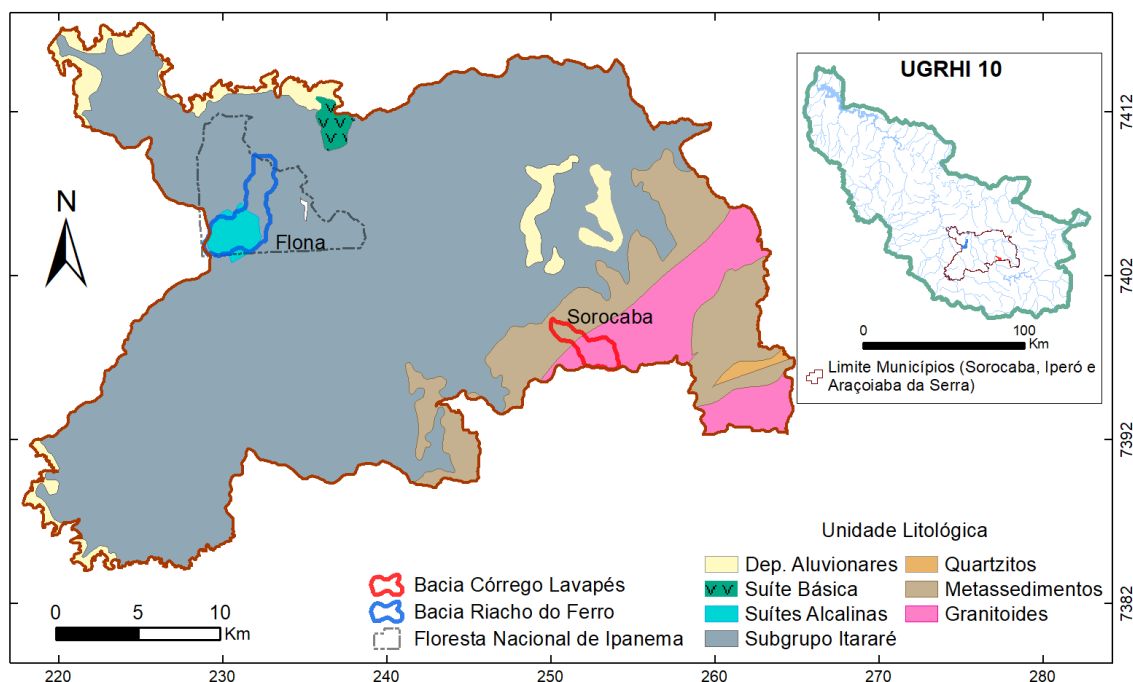


Figura 3.3. Mapa geológico com a localização das bacias hidrográficas selecionadas para a realização do presente estudo (Fonte: DAEE/UNESP, 1980).

Na porção centro-oeste, ocorrem majoritariamente as rochas pertencentes à Bacia do Paraná, como as do Grupo Itararé, e rochas básicas intrusivas da Formação Serra Geral. O Grupo Itararé, mais abrangente na área, é composto por arenitos, de finos a grossos, siltitos, lamitos, diamictitos e ritmitos. Na Formação Serra Geral ocorrem diques e sills de composição básica, no norte da área. Outras litologias ocorrem na região, como um corpo circular alcalino, na região da Flona, pertencente ao Complexo Alcalino de Ipanema, composto por glimeritos, pulaskitos, aegirinitos e carbonatitos. Por fim, sedimentos recentes coluviais e aluviais, compostos por areias, argilas e conglomerados completam a geologia da área (DAEE, 1980).

A diversidade de rochas na área promove uma geomorfologia particular na região. O Planalto Atlântico, de ocorrência no extremo-leste da região, está

inserido sobre o embasamento cristalino, em uma área com elevadas altitudes que atingem até 1030m, e relevos marcados por morrotes alongados e paralelos. Nos terrenos sedimentares, que bordejam os maciços cristalinos, ocorre a Depressão Periférica, mais precisamente, na Zona do Médio Tietê, de topografia pouco acidentada, com predomínio de colinas amplas e topos tabulares e convexos, com altitudes entre 500 e 650m (IPT, 1981).

Na área de estudo são reconhecidos dois domínios aquíferos: o sedimentar e o fraturado. Os aquíferos sedimentares apresentam porosidade granular, e os fraturados são permeáveis por discontinuidades das rochas cristalinas. Desse modo, na região do embasamento cristalino ocorre o Sistema Aquífero Cristalino (SAC), enquanto na porção noroeste, região da Bacia do Paraná, ocorre o Sistema Aquífero Tubarão (SAT) (CAMPOS, 1993). (Figura 3.4).

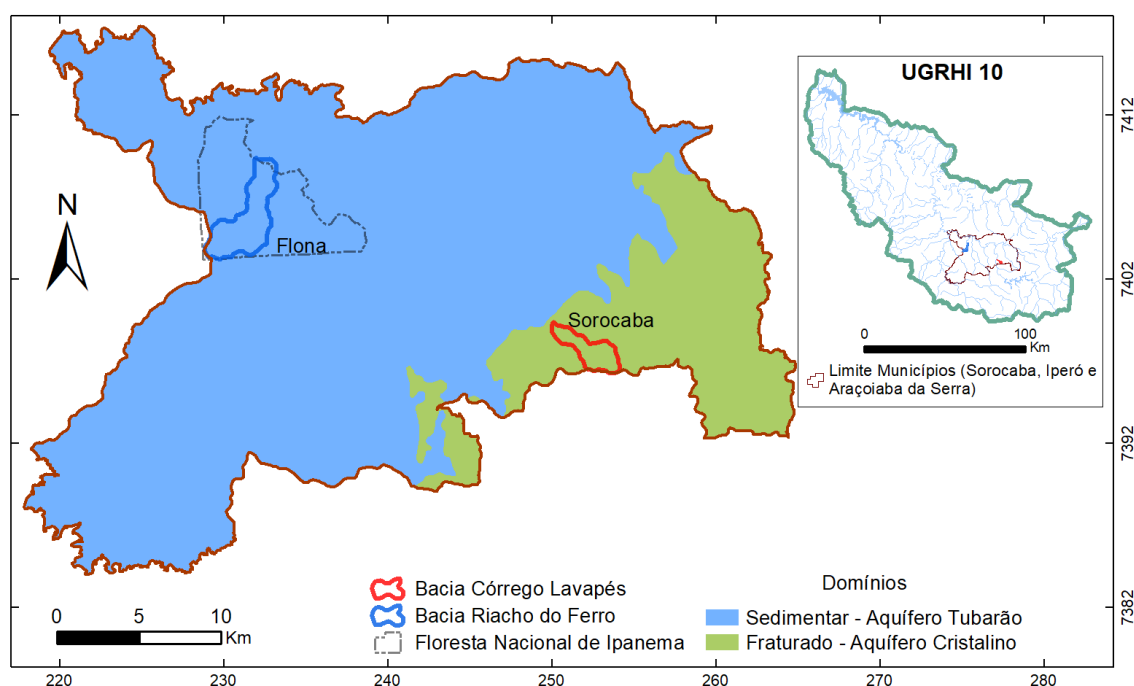


Figura 3.4. Localização das bacias em estudo nos domínios Aquífero Cristalino-Fraturado e Aquífero Tubarão-Sedimentar.

Na porção leste da área, ocorre o SAC, no qual a circulação de água está associada a fraturas e lineamentos. As águas subterrâneas são exploradas por meio de poços tubulares, com profundidades que variam entre 80 a 100 m, e vazões baixas a moderadas, entre 5 a 30 m³/h. Tais variações são reflexos das

rochas em que estão inseridos os poços. (DAEE, 2005). Na região de Salto de Pirapora e Itu, próxima à área de estudo, levantamentos realizados por Oda (1998) mostraram que os poços apresentam capacidade específica média de $0,44\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, sendo que, no município de Sorocaba, obteve-se uma média de $0,53\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ e, no município de Araçoiaba da Serra, o valor inexpressivo de $0,07\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$.

O Aquífero Tubarão ocupa uma porção da bacia sedimentar do Paraná e compreende arenitos, siltitos, lamitos, ritmitos e diamictitos do Subgrupo Itararé; é de extensão regional, granular, localmente fissurado, de livre a semiconfinado, heterogêneo, descontínuo e anisotrópico ou localmente contínuo e isotrópico (LOPES, 1994). Sua exploração ocorre em poços na faixa de 200 a 300m de profundidade, com vazões moderadas entre 10 a $20\text{m}^3/\text{h}$ (CAMPOS, 1993). Ocorrem variações locais na vazão, que constata a heterogeneidade do SAT (DAEE, 2005).

Ao realizar um estudo hidrogeológico na região entre Salto de Pirapora e Itu, Oda (1998) encontrou valores de capacidade específica da ordem de $0,14\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ para o Sistema Aquífero Tubarão, após a análise de dados de 84 poços. Nesse mesmo estudo, o autor encontrou produtividades variando entre 0,08 e $0,18\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ (RODRIGUES, 2004).

3.1.1 Caracterização Física da Região da Microbacia do Ribeirão do Ferro

O Ribeirão do Ferro está localizado na Floresta Nacional de Ipanema, que é cortada, ao sul de sua área, pelo Trópico de Capricórnio, ou seja, é uma zona de transição de clima tropical para clima temperado. Apresenta precipitação média anual de 1.400mm, com mínimo de 800mm e máximo de 2.200mm (Figura 3.2). O clima da região, segundo a classificação de Köppen (PEEL *et al.*, 2007), apresenta condições do tipo Cfa (ao sul) e Cwa (ao norte).

Trata-se de um riacho de primeira ordem da Mata Atlântica com uma extensão de 8 km, largura entre um e dois metros, e profundidades sempre inferiores a um metro. Seu relevo varia de 725 a 875m e encontra-se encaixado entre as vertentes onde ocorrem uns dos declives mais acentuados da FLONA.

O substrato é predominantemente composto de rochas e fundo arenoso com material orgânico de origem alóctone como folhas, galhos e outros. Suas águas são claras e cristalinas, apresentando boa oxigenação e temperatura comum de zonas tropicais. Os meses com menor pluviosidade vão de julho a novembro e os meses com maior pluviosidade, de março a maio (IBAMA, 2003; ICMBio, 2017).

Sua bacia drena principalmente as rochas do Grupo Tubarão, que circundam a área de estudo, sendo caracterizada por relevo suave gerado por ambientes de rochas sedimentares, e contraposto pelo relevo acentuado, modelado por um evento de intrusão alcalina (130 +/- 9,5 m.a.) (SONOKI; GARDA, 1988), que expõe rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino como metassedimentos do Grupo São Roque, anfíbolitos e granitos, gerando uma estrutura dômica marcante, denominada Domo de Araçoiaba, com feições geológicas anômalas que se destacam na paisagem.

Segundo Davino (1975), os litotipos mapeados na área se dividem em dois contextos geológicos, sendo a Bacia do Paraná e o Embasamento cristalino. O primeiro é caracterizado por arenitos arcóseos e tilitos com intercalações conglomeráticas e silto-argiloso dentro do Grupo Tubarão, seguido por intrusões alcalinas compostas por glimeritos e shonkinitos (TOLEDO; SOUZA, 1991). Já o embasamento é composto por filitos prateados, quartizitos e micaxistos do Grupo São Roque, além de granitos e anfíbolitos (DAVINO, 1975).

Fávero *et al.* (2004) constata que na área de estudo existem, basicamente, quatro tipos de solo: latossolo vermelho escuro, solo podzólico amarelo, litossolo e solos aluviais e hidromórfico, e que são caracterizados pelo mesmo autor como segue:

- a) Latossolo vermelho escuro: oriundos de gnaisses e outras rochas metamórficas, além de granitos; abrangem 23% da área da FLONA; é caracterizado pela textura média e argilosa, com drenagem variando de moderada a boa; geralmente são profundos e com transição suave entre horizontes.

- b) Solo podzólico amarelo: originado pela alteração de arenitos; abrange 22% da área de pesquisa; é caracterizado pela textura média a arenosa, perfil de alteração profundo e transição suave entre horizontes.
- c) Litossolo: possui horizonte A diretamente sobre a rocha sã, gerando perfis de alteração pouco espessos, associados a exposições rochosas. Esse fator se deve à maior declividade da área (de serra) que movimenta o produto de alteração onde o perfil se instalaria. Compõe cerca de 38% dos solos da FLONA.
- d) Solos aluviais e hidromórficos: solos de origem fluvial, depositados sob bacias de acumulação ao longo dos rios, normalmente apresentando excesso de água e ocupando cerca de 15% da área.

O rio Ipanema, afluente do rio Sorocaba, nasce dos contrafortes do Morro de Ipanema, também conhecido como Morro de Araçoiaba. Deste mesmo morro, em sua parte central, nascem alguns riachos, sendo o mais significativo o Ribeirão do Ferro, afluente do rio Ipanema (FÁVERO *et al.*, 2004).

3.1.2 Caracterização Física da região da Microbacia do Córrego Lavapés

O Córrego do Lavapés está localizado na porção centro-sul do município de Sorocaba, e sua área de drenagem é quase toda pavimentada e urbanizada, com intensa pressão antrópica nos recursos naturais ali localizados. Constitui uma drenagem de terceira ordem, ocupando uma área de 2,88 km² com 2.550 metros de extensão, com suas águas desembocando na margem direita do Rio Sorocaba.

O clima da região é, segundo classificação de Köppen (1948), do tipo “Cfa” (subtropical quente), com a temperatura média anual 21,4°C, sendo a máxima de verão 30,1°C e a mínima de inverno 12,2°C, e ainda com 1.285 milímetros de altura pluviométrica anual (Figura 3.2).

Quanto ao contexto geológico, Rodrigues (2004) descreve que na área estudada predominam os sedimentos do Subgrupo Itararé, ocupando cerca de 70% da área. Observou também que, dentro do Subgrupo Itararé, predominavam arenitos sobre as demais litologias. Estes são texturalmente

imaturos, mal selecionados, com granulação predominantemente fina, podendo esta variar de muito fina a grossa, com cores bege claro, rosadas, amareladas, esbranquiçadas e marrom-avermelhadas. Ocorrem em camadas de submétricas a métricas, com intercalações de camadas dessimétricas de lamitos, siltitos, argilitos e diamictitos que apresentam clastos de diversas litologias, como granitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos, além de outras rochas do embasamento.

Nas escarpas rochosas (de 750 a 900 metros), encontram-se os Maciços Sorocaba e São Francisco. O Maciço Sorocaba vai desde o centro e sudeste do município até o extremo sudoeste, caracterizado pelo biotita granito grosso porfirítico, com matriz de granulação de média a fina, constituída de quartzo, plagioclásio e biotita. A rocha é desprovida de foliação, com estrutura maciça e homogênea e com coloração cinza médio. Já o Maciço São Francisco limita-se ao extremo sudeste do município e corresponde a um granitóide leucocrático, rosa salmão, acinzentado, com textura fanerítica inequigranular grossa, sendo comum a ocorrência de termos porfiríticos (RODRIGUES, 2004).

O relevo do município é classificado como ondulado (com 13 a 20% de declive), com altitudes entre 535 e 1025 metros em relação ao nível do mar (Sorocaba, 2018).

A bacia hidrográfica do córrego Lavapés possui como vegetação original a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Estacional Semidecidual, com ecótonos de formações de Cerrado e unidades pedológicas predominantes de Latossolos Vermelho-Escuro, Latossolos Vermelho-Amarelo de textura argilosa e Cambissolos (Oliveira *et al.*, 1999).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo da execução do projeto, que culminou com a presente dissertação, foram propostas e realizadas diversas etapas e atividades que serão detalhadas a seguir.

4.1 Revisão Bibliográfica

A etapa inicial do trabalho consistiu em revisão bibliográfica a respeito dos conceitos envolvidos na pesquisa, como conceitos de hidrologia, drenagem urbana, isótopos estáveis e sua aplicação em estudos hidrológicos, e que nortearam os procedimentos de seleção dos pontos de coleta, amostragem e a interpretação dos resultados.

4.2 Localização dos Pontos de Amostragem e Coleta das Amostras

Por se tratar de um estudo comparativo, em que se buscou compreender os efeitos da urbanização sobre os fluxos de água em cursos d'água localizados em áreas urbanizadas, foram selecionadas duas bacias hidrográficas situadas na UGRHI 10 que contemplassem essas características: urbanização e preservação ambiental.

A primeira área selecionada, representando uma bacia hidrográfica antropizada e localizada em área urbana da cidade de Sorocaba, foi a Bacia do Córrego Lavapés. A segunda área, a bacia do Riacho do Ferro, representando uma área pristina, situa-se na Floresta Nacional de Ipanema, localizada na cidade de Iperó.

Na bacia do Riacho do Ferro, foram coletadas amostras de água superficial e amostras em dois poços tubulares perfurados para uso da FLONA. O ponto PA03FL localiza-se no viveiro de mudas nas coordenadas latitude -23,426794 e longitude -47,599778; e o ponto PA04FL localiza-se próximo ao antigo cemitério dos protestantes e do atual prédio da administração da FLONA, nas coordenadas latitude -23,4341 e longitude -47,592730. Estes dois poços têm

profundidade aproximada de 120 m de profundidade, com revestimento em aço de 8" de diâmetro e vazão aproximada de 20 m³/hora, captando águas no Sistema Aquífero Tubarão (Figura 4.1). Importante destacar que os dois poços estão fora da área da microbacia do Riacho do Ferro.

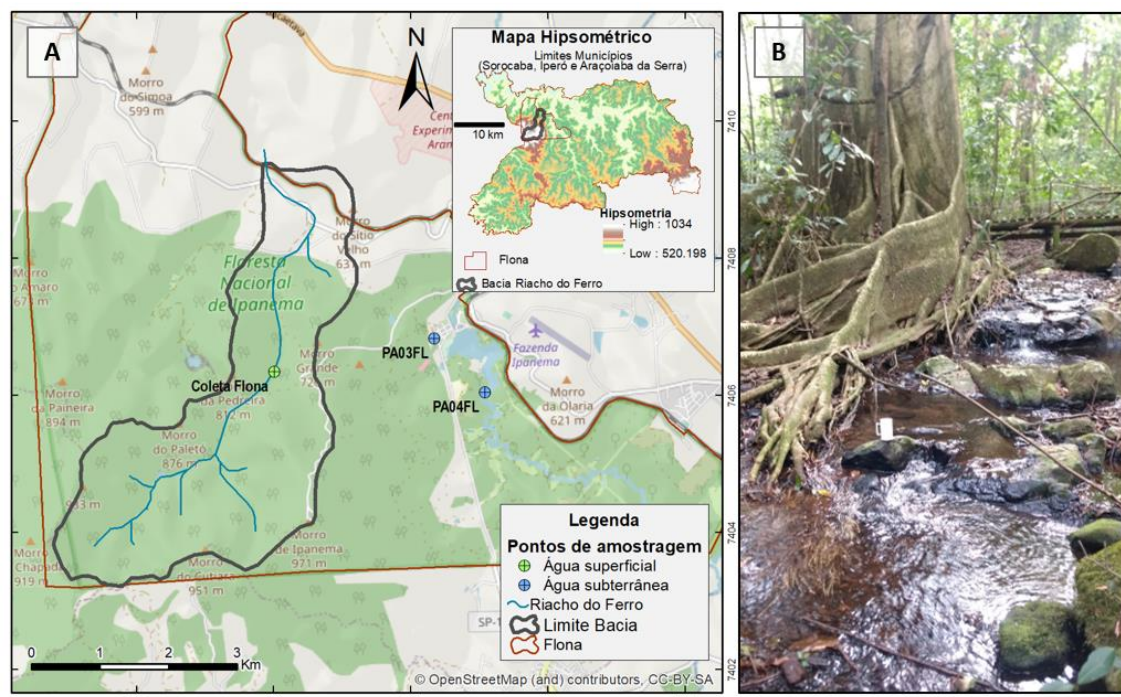


Figura 4.1. Mapa de localização dos pontos amostrados na bacia do Riacho do Ferro na FLONA (A); detalhe do ponto de amostragem no Riacho do Ferro (B).

Na bacia do Córrego do Lavapés, localizada na área urbana do município de Sorocaba, foram coletadas amostras de água superficial e de água subterrânea, além de outras amostras na rede de distribuição, diretamente nos cavaletes das residências situadas ao redor do canal principal do curso d'água (Figura 4.2).

As águas subterrâneas foram coletadas em dois pontos: o poço PA01 está localizado nas dependências da Associação Recreativa São Bento, tendo profundidade de 100 m, vazão de 30.000 litros por hora, nível estático de 25 m, nível dinâmico de 70 m, revestimento nos 25 m de aluvião, tubo de aço com diâmetro de 6" e o restante da perfuração em rocha. Já o poço PA02 está localizado nas dependências da empresa Júlio & Júlio Mineração Ltda, captando águas no Sistema Aquífero Cristalino.

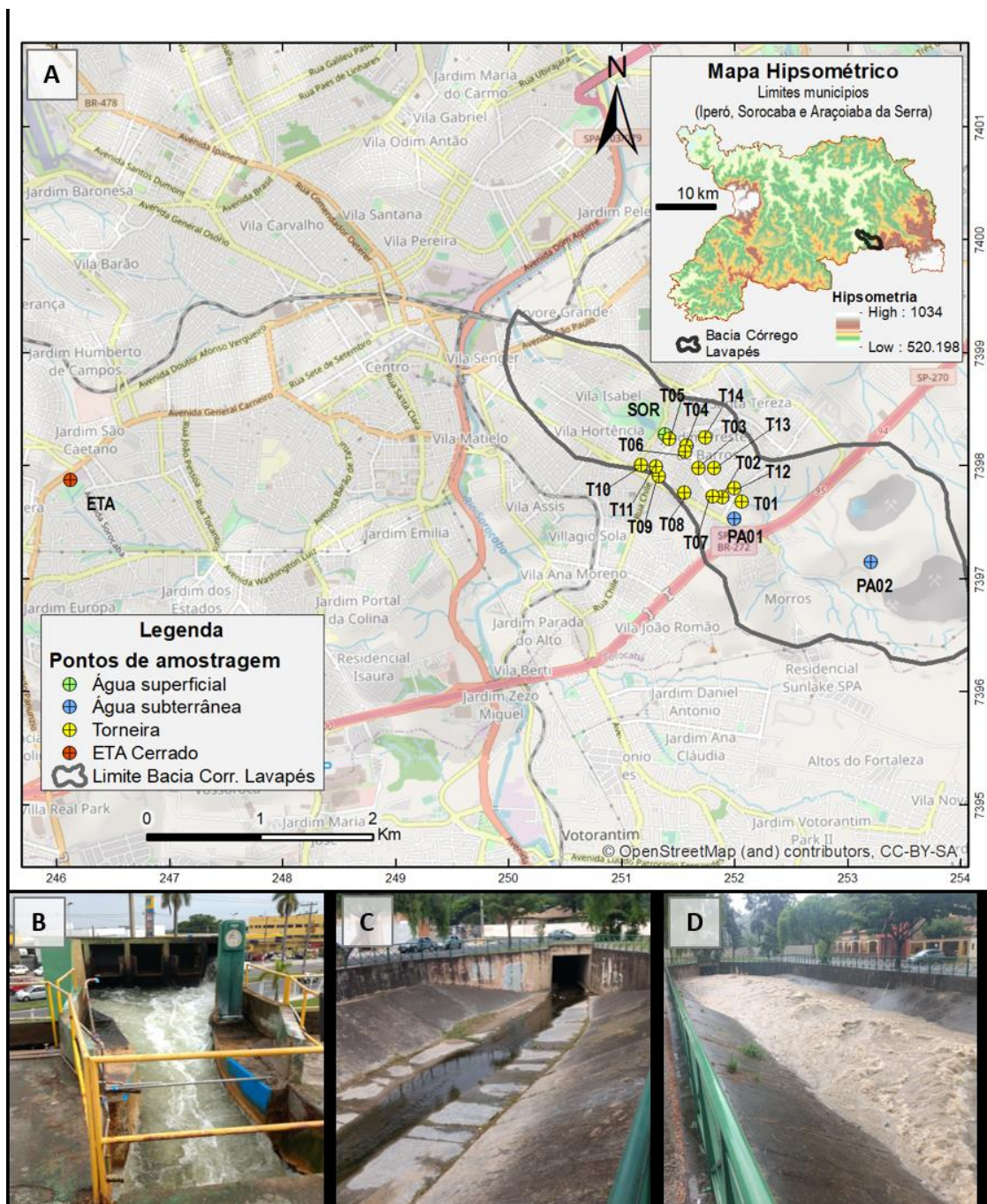


Figura 4.2. Mapa de localização dos pontos amostrados na bacia do Córrego Lavapés na área urbana de Sorocaba (A); Calha Parshal ETA-Cerrado (B); detalhe da vazão normal do córrego (C); vazão após chuva (D).

Além das amostras coletadas na área da Bacia do Córrego Lavapés, e como forma de avaliar a composição isotópica da água fornecida à população, foram coletadas duas amostras para a caracterização do reservatório de Itupararanga, uma na entrada e outra na saída da estação de tratamento de água.

A coleta de água superficial foi realizada a cada quinze dias, entre janeiro de 2019 e dezembro de 2019. As amostras foram coletadas na porção central do canal dos cursos d'água; as amostras de água subterrânea foram coletadas uma única vez nos cavaletes dos poços após purga de 15 minutos, enquanto que as amostras nas residências também foram coletadas uma única vez nos cavaletes de entrada.

Foram analisadas as águas retiradas diretamente dos cavaletes de distribuição em algumas residências da área, bem como as da Estação de Tratamento – ETA Cerrado, que recebe as águas provenientes da Represa de Itupararanga, pois outro fator importante para o ciclo hidrológico na microbacia do Córrego Lavapés é a água distribuída pela concessionária de saneamento da cidade de Sorocaba.

Após a coleta, as amostras foram filtradas em campo com filtros de seringa PVDF com diâmetro de 25 mm e abertura de 0,45 μm , foram acondicionadas em frascos de PEAD com tampa e batoque, evitando-se a existência de espaços vazios no frasco, para que não ocorresse o fracionamento devido à evaporação. As amostras foram numeradas, identificadas com a data da coleta e armazenadas sob refrigeração antes de serem enviadas ao laboratório (Figura 4.3).



Figura 4.3. Material utilizado para a coleta. Imagens: Vanderlei Lanças, outubro de 2019.

4.3 Determinação das razões isotópicas

As análises de isótopos de H e O foram realizadas por espectroscopia de absorção a laser em equipamento da marca Picarro, modelo Cavity Ringdown Spectrometer L2130i Isotopic H₂O, no Laboratório de Isótopos Ambientais (LIA) e no Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), IGc-USP. Os resultados foram expressos em relação ao VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). Foram utilizados três padrões de referência internos: SP1 ($\delta^2\text{H}$: -2,20‰ e $\delta^{18}\text{O}$: -1,43‰); SP2 ($\delta^2\text{H}$: -26,70‰ e $\delta^{18}\text{O}$: -4,39‰) e SP3 ($\delta^2\text{H}$: -70,40‰ e $\delta^{18}\text{O}$: -9,88‰), previamente calibrados com os padrões VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) - SLAP (*Standard Light Antarctic Precipitation*). Os resultados foram tratados no software LIMS for Laser, desenvolvido pelo Laboratório de Hidrologia Isotópica da Agência Internacional de Energia Atômica e pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), no Isotope Hydrology Laboratory (IHL) da IAEA e United States Geological Survey (USGS). O desvio padrão dos resultados é de ± 0.09 para $\delta^{18}\text{O}$ e ± 0.9 para $\delta^2\text{H}$.

4.4 Análise dos resultados

Para a comparação dos dados isotópicos, foi utilizada a variação sazonal da composição isotópica da precipitação realizada na cidade de Rio Claro, abrangendo o período de fevereiro/2013 a dezembro/2017, disponível no banco de dados GNIP. A linha meteórica local usada como referência é a calculada por Santos *et al.* (2019):

$$\delta^2\text{H} = 8,37 * \delta^{18}\text{O} + 14,38 \quad (5)$$

A composição isotópica média ponderada da precipitação (2013-2017) foi de -5,8 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -32,4 ‰ para $\delta^2\text{H}$. Variações sazonais foram relatadas por Santos *et al.* (2019b); para a estação chuvosa (outubro-abril) a composição isotópica média da precipitação apresentou valores de -5,4 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -29,4 ‰ para $\delta^2\text{H}$, enquanto, para a estação seca (maio-setembro), a precipitação foi

mais enriquecida e os valores observados foram $-3,3\text{ ‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $-11,7\text{ ‰}$ para $\delta^2\text{H}$.

4.5 Modelo de mistura

O modelo de mistura bayesiano foi usado para identificar contribuições proporcionais de fontes ao fluxo nas duas drenagens analisadas. O pacote de modelo de mistura isotópica estável (*simmr*) em R (R CORETEAM, 2019) foi desenvolvido para resolver equações de mistura para dados isotópicos estáveis, usando uma estrutura estatística bayesiana (PARNELL *et al.*, 2013; PARNELL, 2019). Na origem, os modelos de mistura bayesiana foram aplicados para identificar as assinaturas de isótopos estáveis para encontrar as principais fontes de água consumidas pela vegetação (MA; SONG, 2016; EVARISTO; MCDONNELL, 2017; ROTHFUSS; JAVAUX, 2017; ZHANG *et al.*, 2017b; GOKOOL *et al.*, 2018; BRUM *et al.*, 2019). A proporção de cada contribuição da fonte para a mistura do fluxo do rio foi subsequentemente determinada utilizando uma função de Markov Chain Monte Carlo (MCMC) (PARNELL, 2019).

As proporções de água de diferentes fontes requerem três conjuntos de dados de entrada, no mínimo. Assim, foram utilizados os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para todas as amostras de rios, e a média e o desvio padrão das águas subterrâneas e das chuvas provenientes da estação coletora de Rio Claro.

No contexto bayesiano, o MCMC avalia repetidamente os valores da proporção da água e encontra os valores que melhor se ajustam aos dados que representam diferentes fontes. As simulações produzem contribuições plausíveis de águas subterrâneas e chuvas (em termos de proporção) para o fluxo do rio e retornam uma distribuição posterior que representa uma verdadeira densidade de probabilidade de dados (PARNELL *et al.*, 2013; BRUM *et al.*, 2019; SANTAROSA 2020).

5 RESULTADOS

A apresentação dos resultados será dividida em duas partes, referentes aos dados levantados em cada uma das microbacias.

5.1 Riacho do Ferro - FLONA

No período entre janeiro a dezembro de 2019, a precipitação total foi de 1392mm, sendo esse valor maior que a média histórica anual de 1191,8 mm, com 14,4 por cento de variação. Os valores mensais variaram de 12,6 mm (outubro 2019) a 254 mm (dezembro 2019). Em comparação com as médias históricas mensais (2006-2018), foi registrado um aumento no volume de precipitação nos meses de fevereiro, abril, julho, setembro, novembro e dezembro, enquanto que, para os outros meses, observou-se uma redução nos volumes mensais (Figura 5.1).

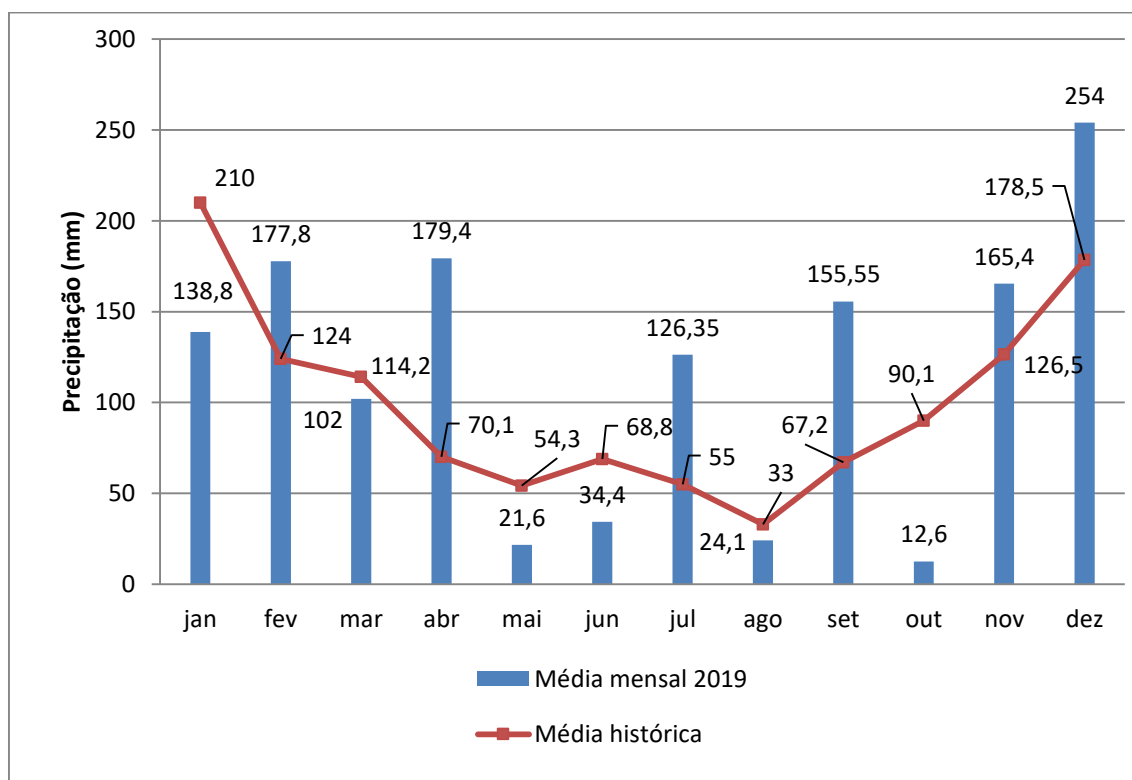


Figura 5.1. Médias mensais da precipitação do período de janeiro a dezembro de 2019 da estação implantada na FLONA, código 9000105, Latitude -23,4256, Longitude -47,5852, altura 609,0m (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>).

5.1.2 Composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas no Riacho do Ferro – FLONA

A composição isotópica das amostras de água superficial coletadas no Riacho do Ferro entre janeiro e dezembro de 2019 variou entre -6,38 a -7,51‰ (média de $-7,27 \pm 0,22$ ‰) para o $\delta^{18}\text{O}$, e de -37,65 a -47,0‰ (média de $-45,30 \pm 1,81$ ‰) para o $\delta^2\text{H}$, com valores de *d-excess* entre 12,41 e 14,06‰ (média de $12,87 \pm 0,38$ ‰) (Figura 5.2).

Aparentemente não houve uma variação sazonal da composição isotópica, com exceção da amostra referente à primeira semana de julho, (Flona_R_julho-01) que está mais enriquecida. Esse enriquecimento pode estar associado a uma participação maior da chuva no fluxo de água, pois observou-se a ocorrência de chuvas nos dias anteriores, que geralmente apresentam uma composição isotópica mais enriquecida, como a observada por Santos *et al.* (2019) para o mês de junho na cidade de Rio Claro.

Em relação ao *d-excess*, o que se observa também é uma pequena variação sazonal, que se reflete no posicionamento das amostras alinhadas à reta meteórica. Isso indica que essas águas, independentemente da sua origem, não passaram por processos de evaporação (Figura 5.2).

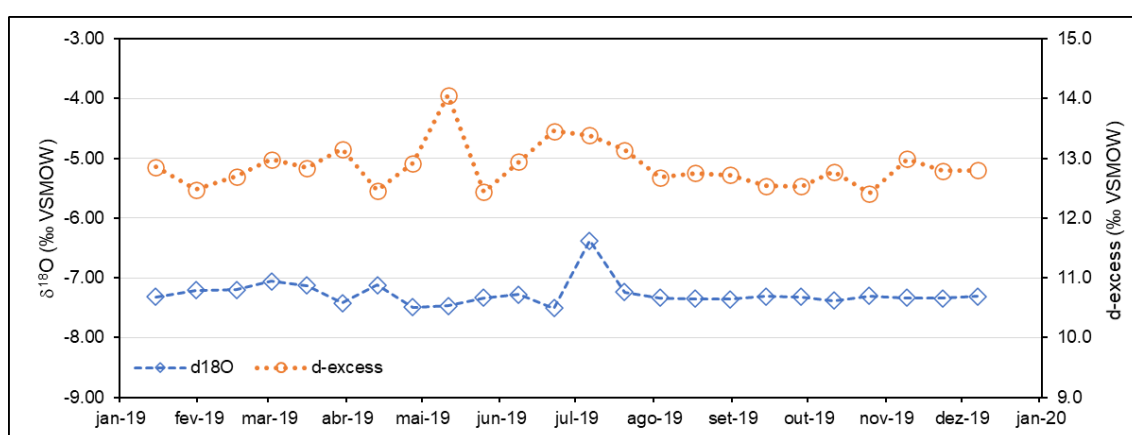


Figura 5.2. Variação sazonal dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de *d-excess* para as amostras de água superficial (Riacho do Ferro) – FLONA.

As águas subterrâneas, coletadas em poços perfurados no SAT (Figura 4.1), apresentaram composição isotópica com valores para o $\delta^{18}\text{O}$ de -7,78 e -7,28‰, para o $\delta^2\text{H}$ de -50,3 e -46,9‰VSMOW e *d-excess* de 11,94 e

11,34‰VSMOW, próximos às médias da composição isotópica das águas superficiais, todas alinhadas com a reta meteórica local de Rio Claro, adotada para este estudo (Figura 5.3).

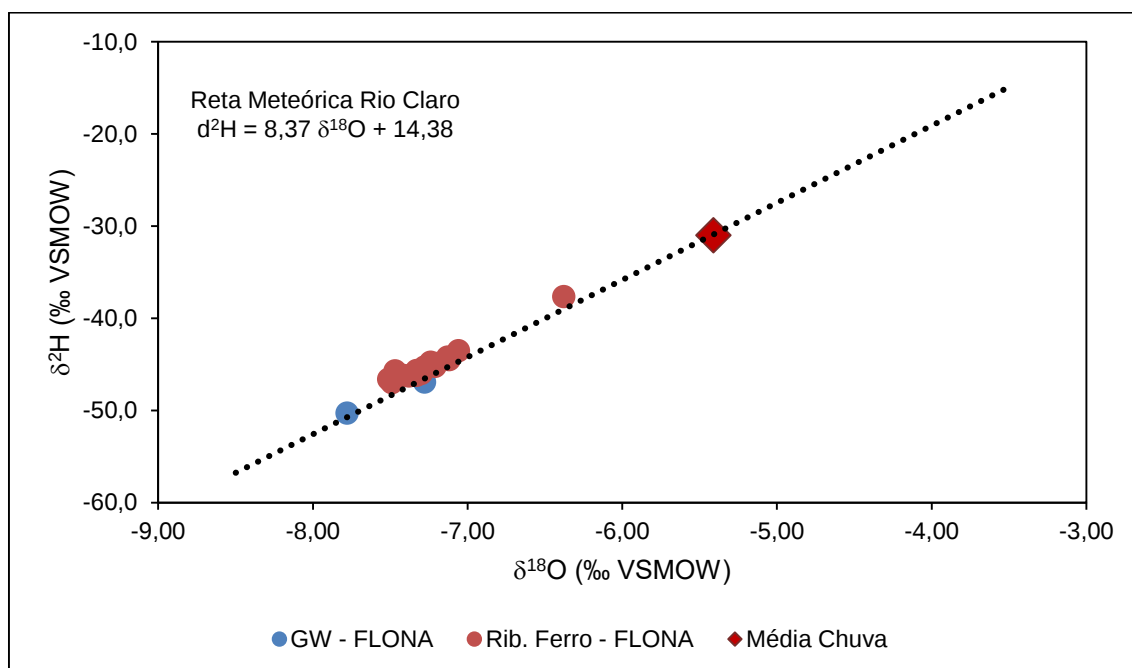


Figura 5.3. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água superficial (Riacho do Ferro) e subterrâneas na área da FLONA. A Reta Meteórica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho).

5.2 Córrego Lavapés – SOR

No período compreendido entre janeiro a dezembro de 2019, a precipitação total foi de 1009,15 mm, sendo esse valor menor que a média histórica anual de 1242,60 mm, com 18,8% de variação. Os valores mensais variaram de 3,6 mm (agosto 2019) a 284 mm (janeiro 2019). Em comparação com as médias históricas mensais (2006-2018), foi registrado um aumento no volume de precipitação nos meses de janeiro, fevereiro, abril e julho, enquanto que, para os meses de novembro e dezembro, as chuvas foram similares às médias históricas; para os outros meses, observou-se uma redução nos volumes mensais (Figura 5.4).

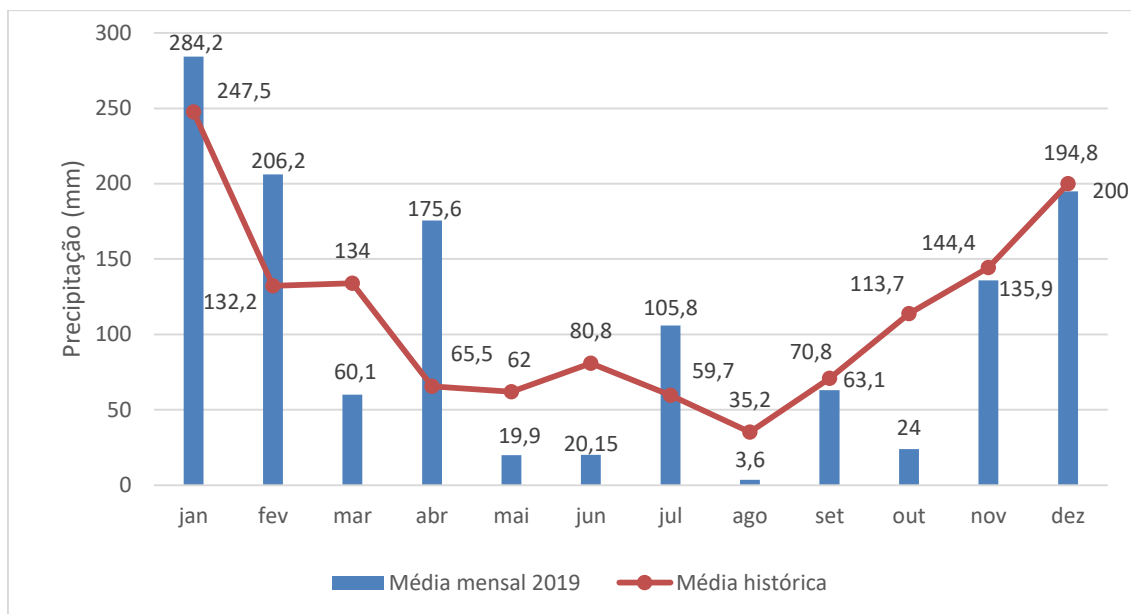


Figura 5.4. Médias mensais da precipitação do período de janeiro a dezembro de 2019 na estação Sorocaba código 83851. Latitude -23,48, Longitude -47,43; altura 645,0m (dados disponíveis em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>).

5.2.2 Composição isotópica das águas de abastecimento, superficiais e subterrâneas na bacia do Córrego Lavapés

Na bacia do Córrego Lavapés, as águas superficiais apresentam composição isotópica, com valores de $\delta^{18}\text{O}$, variando de -5,33 a -3,88‰ (média de $-5,00 \pm 0,38$ ‰), de $\delta^2\text{H}$ entre -34,7 a -23,9‰ (média $-31,46 \pm 2,59$ ‰) e *d-excess* entre 7,14 a 10,02‰ (média $8,58 \pm 1,03$ ‰), normalmente mais enriquecidas que as coletadas no Riacho do Ferro na FLONA.

A amostra coletada em 16 de fevereiro apresentou um valor de *d-excess* muito baixo (0,48), possivelmente associado a processos de evaporação que ocorreram entre a coleta e a realização da determinação isotópica no laboratório. Foi constatado que o frasco da amostra não estava bem fechado, o que explicaria o resultado.

Contrariamente às amostras coletadas no Riacho do Ferro, que não apresentaram tendência de variação na composição isotópica, apenas efeitos localizados devido à ocorrência de chuvas nos dias anteriores à coleta da amostra, para as amostras coletadas no Córrego Lavapés, observou-se uma tendência ao longo da série de dados de um empobrecimento da composição

isotópica das águas superficiais, com águas mais enriquecidas no início da série, e valores mais depletados nos meses mais chuvosos (a partir de setembro/2019). Esse empobrecimento progressivo é acompanhado por um incremento nos valores de *d-excess*, que podem estar associados aos processos evaporativos nos meses mais secos, entre fevereiro e abril de 2019 (Figura 5.5).

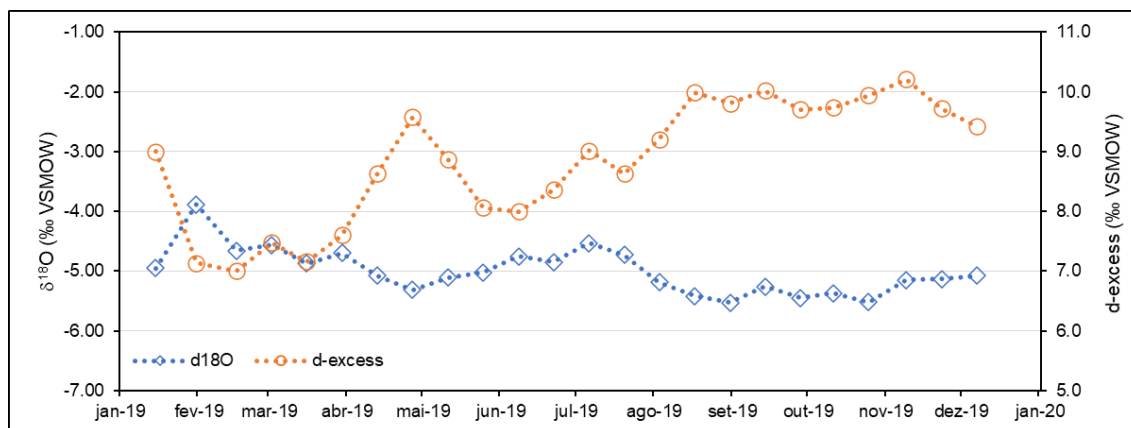


Figura 5.5. Variação sazonal dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de *d-excess* para as amostras de água superficial no Córrego Lavapés.

As águas subterrâneas coletadas em dois poços perfurados no SAC, na área de contribuição da bacia (Figura 4.2), apresentam composições isotópicas mais empobrecidas que as águas superficiais, com valores para o $\delta^{18}\text{O}$ de -5,91 e -5,98‰, para o $\delta^2\text{H}$ de -34,74 e -37,73‰ e *d-excess* de 12,54 e 10,09‰. Entretanto, são mais enriquecidas que as águas subterrâneas dos poços da FLONA, próximos à média da composição isotópica da precipitação, e alinhada à reta meteórica local.

Em relação às águas superficiais, observa-se um deslocamento em relação à reta meteórica, indicando a ocorrência de processos evaporativos, como apontado pelos valores de *d-excess* (Figura 5.6).

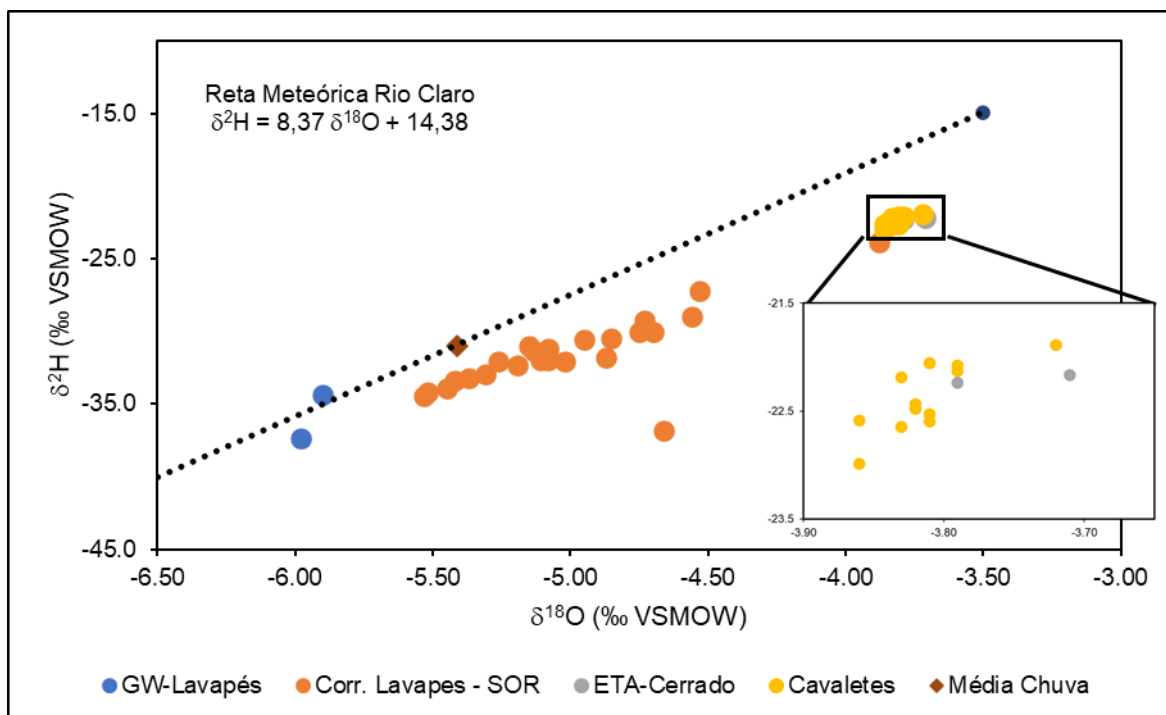


Figura 5.6. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água superficial e subterrâneas na bacia do Córrego Lavapés. A Reta Meteórica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho). No detalhe são representadas as amostras coletadas na ETA Cerrado e na rede de distribuição de água potável na bacia do Córrego Lavapés.

As águas procedentes da Represa de Itupararanga recebem tratamento na ETA Cerrado, que é a responsável pelo abastecimento das águas para a área em estudo. Foram coletadas duas amostras de água provenientes desse sistema de abastecimento: uma na Calha Parshal, e outra em uma torneira antes do processo de tratamento da água, ambas localizadas na ETA Cerrado (Figura 4.2), que apresentaram valores para o $\delta^{18}\text{O}$ de -3,82 e -3,74‰, para $\delta^2\text{H}$ de -23,01‰ e -22,88‰ e valores de *d-excess* de 7,58 e 7,03‰, respectivamente.

As amostras coletadas nos cavaletes de residências, na área de contribuição do local em que se coletou a amostra de água superficial no Córrego Lavapés (Figura 4.2), apresentam composição isotópica semelhante à da água da ETA Cerrado. Os valores medidos variaram para o $\delta^{18}\text{O}$ de -3,86 a -3,72‰ (média de $-3,81 \pm 0,03$ ‰), enquanto os valores de $\delta^2\text{H}$ variaram de -22,99 a -21,89‰ (média de $-22,37 \pm 0,31$ ‰) e com valores de *d-excess* entre 7,87 e 8,45‰ (média de $8,13 \pm 0,21$ ‰).

Esses valores são mais enriquecidos que os das águas superficiais e subterrâneas, mas alinham-se às amostras de água superficial coletadas no Córrego Lavapés, indicando a possibilidade de contribuição da água do abastecimento no fluxo do canal do Córrego Lavapés (Figura 5.6).

6 ORIGEM E CIRCULAÇÃO DAS ÁGUAS NAS MICROBACIAS DO RIACHO DO FERRO E CÓRREGO LAVAPÉS

A análise conjunta da composição isotópica dos diversos reservatórios envolvidos no ciclo hidrológico das duas áreas de estudo mostra claramente origens e caminhos distintos percorridos pela água. A composição isotópica das águas da microbacia do Ribeirão do Ferro, que drena áreas em que ocorrem sedimentos associados ao Grupo Tubarão e também as rochas cristalinas alcalinas em área florestada, é mais empobrecida que a do conjunto de amostras coletadas na região urbanizada e que drenam superfícies impermeabilizadas sobre rochas cristalinas da microbacia do Córrego Lavapés (Figura 6.1).

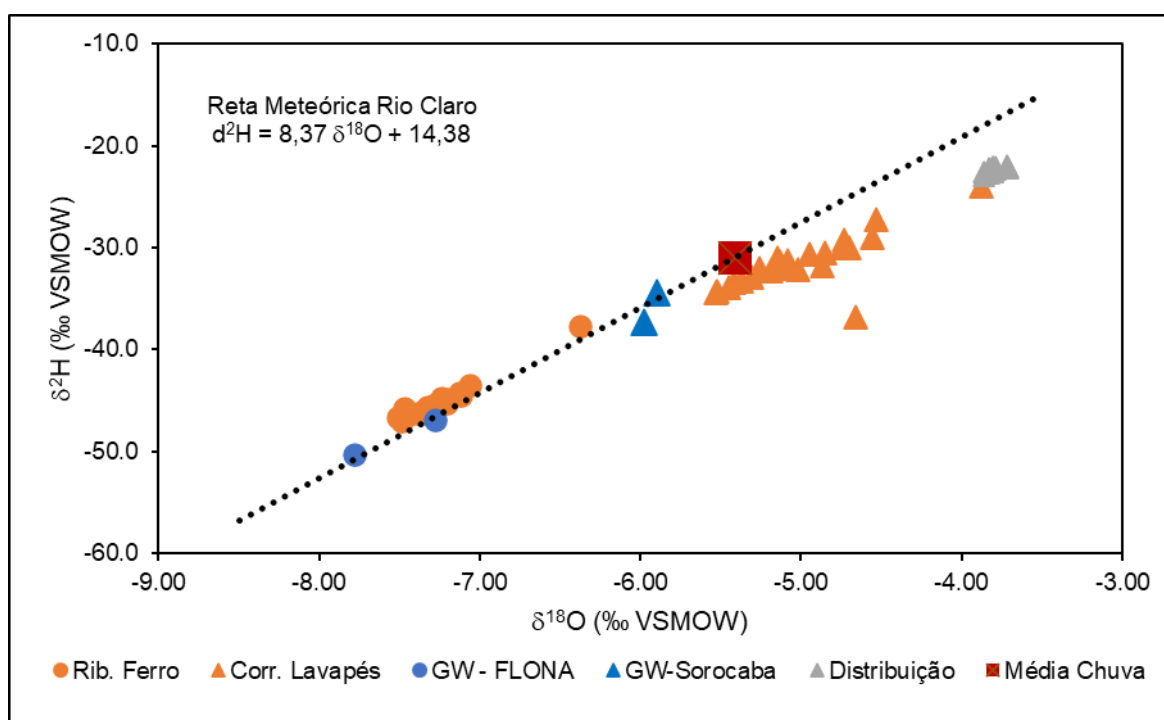


Figura 6.1. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras de água das microbacias do Ribeirão do Ferro (círculo) e do Córrego Lavapés (triângulos). A Reta Meteórica Local de referência é a de Rio Claro (SANTOS *et al.*, 2019), cuja equação é apresentada no canto superior esquerdo, bem como a composição isotópica média da precipitação (losango vermelho). Observar a clara separação entre as duas áreas.

A composição isotópica das amostras de água subterrânea coletadas na FLONA é mais empobrecida que a média ponderada da composição isotópica da precipitação observada na cidade de Rio Claro. Para o $\delta^{18}\text{O}$, a diferença é da

ordem de -2,0‰, indicando que os processos de recarga dessa unidade não representam todos os eventos de chuva, mas que a recarga estaria associada a períodos em que a precipitação seja mais depletada (JASECHKO, 2019), o que, segundo Santos *et al.* (2019), ocorre durante a estação chuvosa na cidade de Rio Claro.

Comparando-se esses valores medidos com aqueles observados para o SAT em outros estudos regionais, observa-se que os valores são semelhantes. Vidal (2002) observou, para a região centro sul da área de ocorrência do SAT no estado de São Paulo, uma variação nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -9,44 e -6,50‰ (com média de -7,97‰). Já Ezaki *et al.* (2020), avaliando os tempos de residência das águas subterrâneas do SAT, ao norte da área de estudo, encontraram idades entre 5.000 e 10.000 anos para as águas subterrâneas com composição isotópica similar àquela medida na área. Segundo os autores, essa é uma assinatura isotópica típica para as águas da porção superior do SAT e que receberiam recarga constante das águas de chuva durante a estação chuvosa.

A semelhança entre as composições isotópicas das águas superficiais coletadas no Ribeirão do Ferro e as águas subterrâneas (Figura 5.2), indica que as águas subterrâneas contribuem muito para a manutenção do fluxo no canal do curso d'água, e que a contribuição do fluxo superficial (*runoff*) concentra-se no dia da precipitação, ou logo após a esse dia, como observado no mês de junho/2019, em que a ocorrência de um evento de precipitação no dia anterior ao da coleta da amostra fez com que se observasse um enriquecimento proporcional na composição isotópica da água no Riacho do Ferro.

As matas ciliares ao longo das margens dos corpos d'água fornecem serviços ambientais importantes, como manutenção da qualidade da água, redução da erosão, controle de temperatura etc., mantendo a integridade da bacia (FIRMINO *et al.*, 2011). O tipo de vegetação caracteriza a quantidade de gotas que cada folha pode reter, e a sua densidade indica o volume retido na superfície da bacia hidrográfica. Por outro lado, a porção de chuva que atinge o solo, via precipitação interna e/ou escoamento superficial, irá interferir na dinâmica do escoamento superficial e no processo de infiltração, de modo a

proporcionar uma maior umidade para o solo e água disponível para a utilização pelos vegetais (TONELLO *et al.*, 2004).

As amostras isotópicas das águas do Riacho do Ferro indicaram, independentemente da sua origem, que não passaram por processos de evaporação (Figura 5.1), tendo como fator importante a cobertura vegetal na conservação da água e evitando perdas por evaporação.

Comparamos a composição isotópica do curso das águas superficiais no ciclo hidrológico da área da FLONA, com os dados das Bacias PCJ na porção do Aquífero Tubarão estudado por Santarosa (2020), os valores medidos no período chuvoso foram de -6,89‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -43,7‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 11,44‰ para o *d-excess*, e no período seco, de -6,40‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -39,5‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 11,63‰ para o *d-excess*, enquanto que, na área da FLONA, no período chuvoso, apresentaram-se os valores de -7,27‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -45,38‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 12,80‰ para o *d-excess*, e no período seco, de -7,26‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -41,68‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 12,92‰ para o *d-excess*, em que verificamos valores isotópicos próximos, sendo que no período chuvoso a composição isotópica das águas superficiais é mais empobrecida no período chuvoso e ligeiramente mais enriquecida no período seco.

Aplicando o modelo de mistura Bayesiano para identificar as contribuições proporcionais das fontes de fluxo entre as áreas, podemos afirmar que na microbacia do Riacho do Ferro temos uma contribuição para o fluxo superficial de 12,5% proveniente da precipitação e de 87,5% de contribuição a partir das águas subterrâneas (Figura 6.2), evidenciando o ciclo hidrológico de uma bacia natural, sem interferências antropogênicas. Valores semelhantes para as contribuições foram encontradas por Santarosa (2020) no domínio sedimentar das Bacias Piracicaba-Capivari-Jundiá, onde o arcabouço geológico também é majoritariamente formado por sedimentos do Grupo Tubarão.

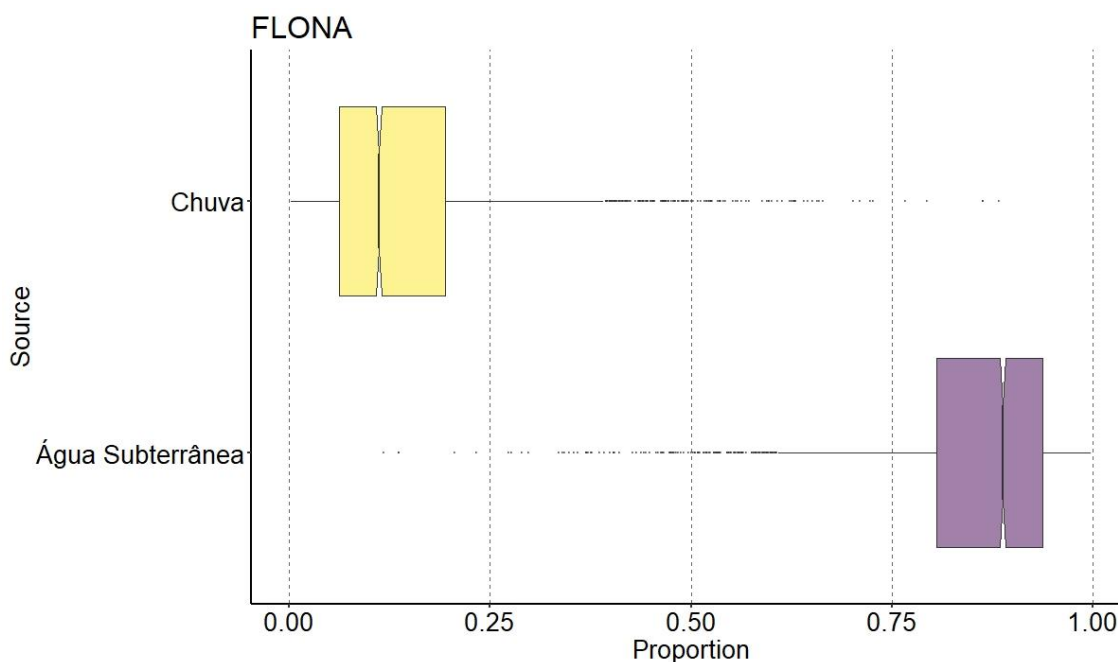


Figura 6.2. Modelo de mistura Bayesiano – FLONA: com a proporção das contribuições para o Córrego do Ferro. Em lilás, a contribuição das águas subterrâneas, e em amarelo, a contribuição da precipitação.

Em contraposição às contribuições ao fluxo no Riacho do Ferro, que representa uma mistura de duas fontes distintas, as águas de chuva e as águas subterrâneas, com proporções de misturas bem estabelecidas e constantes ao longo do ano, indicam que não ocorre uma variação sazonal, observada por outros autores em áreas pristinas (BONNEAU, 2018).

Na microbacia do Córrego Lavapés, observa-se a contribuição de uma terceira fonte, bastante comum para áreas urbanas: os vazamentos da rede de distribuição de água potável.

As razões isotópicas nas amostras das águas coletadas na área do Córrego Lavapés indicam águas mais enriquecidas isotopicamente, para os compartimentos superficial e subterrâneo, que as águas do Ribeirão do Ferro.

As águas subterrâneas apresentam composição isotópica próximas à composição isotópica média da precipitação medida na cidade de Rio Claro ($\delta^{18}\text{O}$ de -5,94‰ para as águas subterrâneas contra -5,41‰ para a precipitação), o que, segundo Jasechko (2019), poderia indicar uma contribuição para a recarga de diversos eventos ao longo do ano.

A composição isotópica das águas subterrâneas coletadas na área da microbacia do Córrego Lavapés apresenta valores ligeiramente mais enriquecidos que os observados por Santarosa (2020) para as águas subterrâneas do SAC na região das Bacias PCJ ($\delta^{18}\text{O}$ de -5,94‰ para este estudo contra -6,21‰ para o SAC nas Bacias PCJ), com valores de *d*-excess superiores a 11‰ em ambos os casos. Isso indica que as águas subterrâneas não apresentam sinais de terem sofrido processos de evaporação, o que é bastante condizente com o modelo de recarga de aquíferos fraturados que apresentam geralmente uma alta taxa de renovação e de circulação mais rápida. Esse fato é corroborado pela sua composição isotópica ser próxima à média da chuva.

As águas que são distribuídas à população apresentam uma composição isotópica bastante homogênea, desde a sua entrada no sistema de tratamento da ETA Cerrado até a sua chegada às residências, com a composição isotópica mais enriquecida de todo o conjunto e apresentando os menores valores de *d*-excess. Essas características estão associadas a processos claros de evaporação da água que teriam ocorrido na Represa de Itupararanga, em processo muito bem descrito associado a grandes lagos e reservatórios (FRITZ & CLARK, 1997). Ocorre a evaporação somente no represamento das águas da represa e durante o seu transporte da Represa de Itupararanga até a Represa do Clemente por canal aberto. Posteriormente, as águas seguem por tubulação superficial e subsuperficial até a ETA, sem ocorrência de evaporação.

Analizando a composição isotópica do curso das águas superficiais no ciclo hidrológico da área SOR, com os dados das Bacias PCJ na porção do Aquífero Cristalino estudado por Santarosa (2020), com valores medidos no período chuvoso de -7,80‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -53,2‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 9,23‰ para o *d*-excess, e no período seco de -5,44‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -33,6‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 10,98‰ para o *d*-excess, verificamos valores isotópicos diferentes em ambos os períodos, havendo um maior empobrecimento no período chuvoso e um enriquecimento no período seco. Já na área do SOR no período chuvoso, apresentaram-se os valores de -4,90‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -31,41‰ para o $\delta^2\text{H}$ e 8,50‰ para o *d*-excess, e no período seco, de -5,10‰ para o $\delta^{18}\text{O}$, -31,73‰ para o $\delta^2\text{H}$

e 9,04‰ para o *d*-excess, em que verificamos valores isotópicos próximos em ambos os períodos, havendo um ligeiro empobrecimento no período seco. O *d*-excess mostra o processo de evaporação causando empobrecimento isotópico ao longo do curso hídrico.

A maior variação observada na composição isotópica das águas superficiais coletadas no Córrego Lavapés indica que um número maior de fontes pode estar associado à geração dos fluxos, e suas contribuições variam ao longo ano, fato comprovado com a aplicação do modelo de mistura Bayesiano (Figura 6.3).

As contribuições decorrentes das descargas de água subterrânea e da precipitação apresentam as maiores variações nas proporções de contribuição, enquanto a contribuição é decorrente dos vazamentos da rede de distribuição constantes. Mesmo assim, esses vazamentos alcançam contribuições de cerca de 40% do fluxo no canal do Córrego Lavapés.

Apesar da impermeabilização da área, é importante observar a contribuição relevante das águas subterrâneas na manutenção das condições de fluxo na drenagem; essa contribuição pode apresentar valores médios ao longo do ano de cerca de 50%.

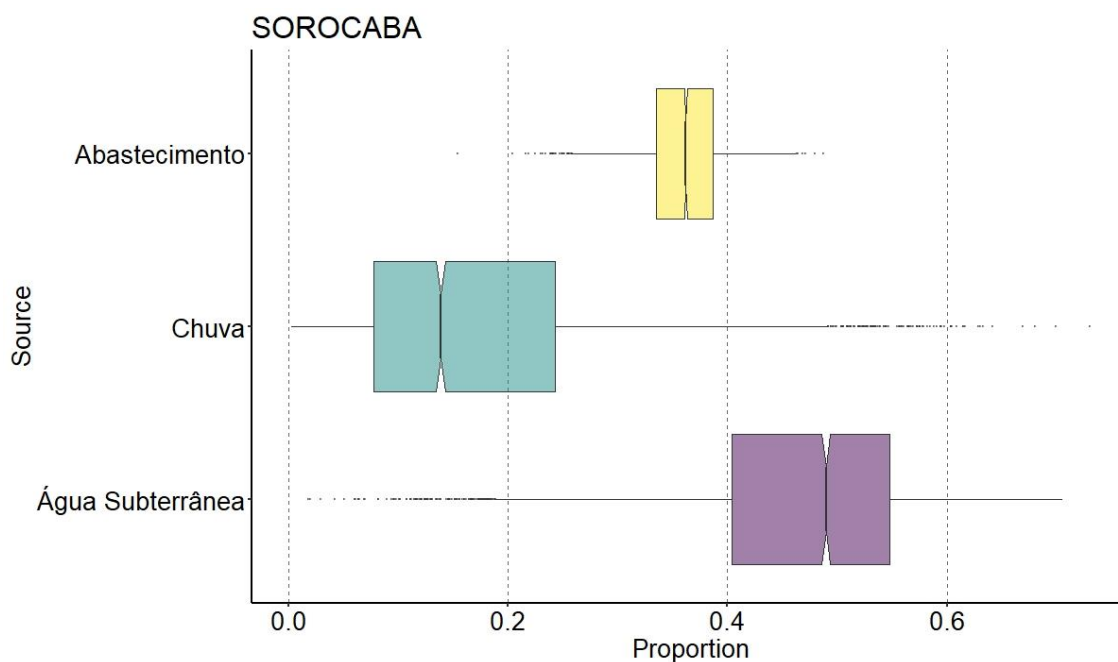


Figura 6.3. Modelo de mistura Bayesiano com a proporção das fontes da água superficial: – SOR. As proporções de contribuição das águas subterrânea (lilás), chuva (azul) e água da rede de abastecimento (amarelo). Observar a constância na contribuição das águas de abastecimento.

A análise das contribuições mensais indica essa variação entre as contribuições da precipitação e das águas subterrâneas. Parece haver uma relação inversa entre a quantidade de chuva e a contribuição das águas subterrâneas ($r=-0.46$), ou seja, em meses com baixa taxa de precipitação, a contribuição da descarga das águas subterrâneas é mais importante, como se observa nos meses de maio, agosto, setembro e outubro (Figura 6.4).

Por outro lado, devido à frequência da amostragem, não se observa correlação importante entre a porcentagem de contribuição do fluxo proveniente das águas de chuva. Entretanto, um aumento na contribuição das fugas de rede pode ser observado nos meses mais chuvosos, apesar da baixa correlação observada ($r=0,38$).

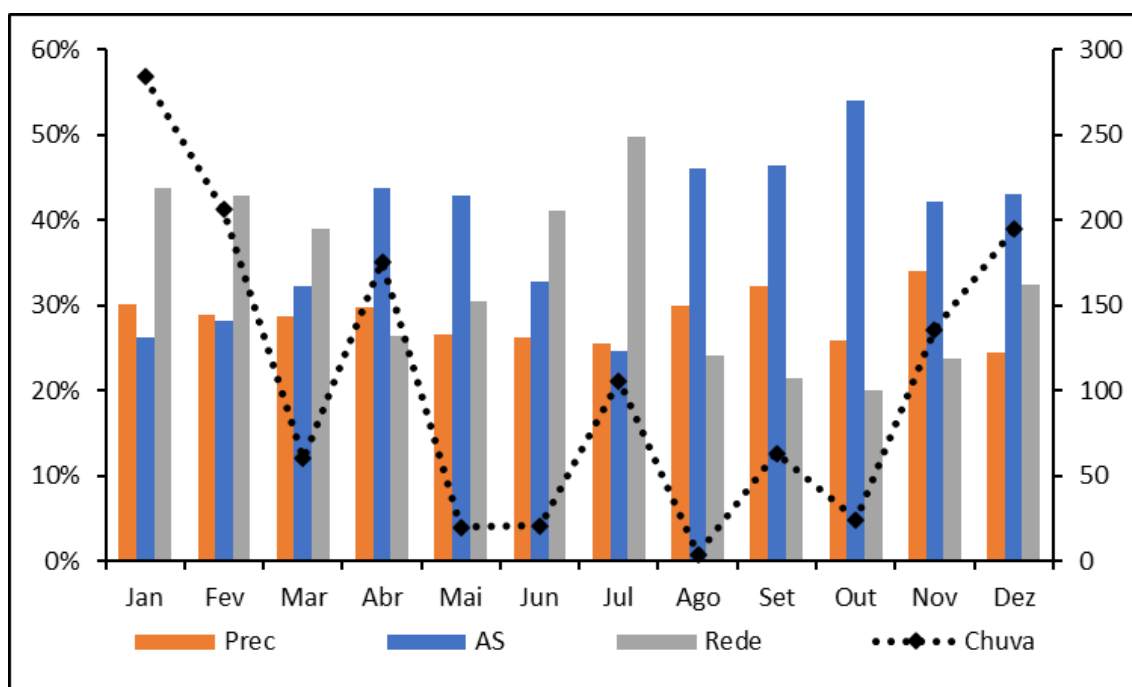


Figura 6.4. Distribuição mensal das contribuições de cada uma das possíveis fontes ao fluxo do Córrego Lavapés.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo mostra que a movimentação da água nas condições de uso das bacias estudadas, as microbacias do Riacho do Ferro e do Córrego do Lavapés apresentaram comportamentos distintos, indicados pelas diferenças em suas composições isotópicas, que atestaram as distintas origens e caminhos percorridos pelos fluxos.

A análise conjunta da composição isotópica dos diversos reservatórios envolvidos no ciclo hidrológico das duas áreas mostra claramente origens e caminhos distintos percorridos pela água. As águas da microbacia natural em área florestada, que drena áreas em que ocorrem sedimentos associados ao Grupo Tubarão, são mais empobrecidas que as águas da microbacia urbanizada, drenando superfícies impermeabilizadas sobre rochas cristalinas. Até hoje há poucos trabalhos científicos realizados e publicados; assim, o Aquífero Cristalino não dispõe ainda de dados suficientes para uma melhor análise comparativa e para se chegar a conclusões acerca do assunto, o qual, dada a sua importância, deveria ser mais explorado.

O empobrecimento dos isótopos estáveis das águas superficiais da área natural está associado a uma participação maior das águas subterrâneas, em que essas águas, independentemente da sua origem, não passaram por processos de evaporação, tendo, como fator importante, a cobertura vegetal da microbacia contribuído na conservação da água, evitando perdas por evaporação. A importância na preservação da mata densa por onde percorre o curso d'água em bacia natural, resulta em solo forrado por vegetação que, além de proteger o solo contra o intemperismo, contribui para evitar o processo de evaporação. Isso também corrobora no abastecimento das águas superficiais e no armazenamento das águas subterrâneas. Já na área urbanizada, as águas superficiais apresentaram composição isotópica mais enriquecida que a da área natural, com alta taxa de evaporação, indicado pelos valores menores apresentados pelo *d-excess* nas amostras analisadas.

O estudo levou também em consideração o fato de que as águas subterrâneas, em aquíferos distintos, apresentaram diferentes características de

recarga, taxas de renovação e tempos de residências, influenciando na contribuição e na composição isotópica dos cursos d'água.

Em condições naturais, o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é caracterizado pela interação entre águas superficiais e subterrâneas. Essa relação fica bastante evidente na microbacia do Ribeirão do Ferro, onde as únicas fontes para o fluxo no canal são as águas de chuva e a descarga das águas subterrâneas.

De outra forma, na microbacia do Córrego do Lavapés, a existência de uma rede de distribuição de água e afastamento de esgotos, leva a um novo arranjo entre as contribuições ao fluxo no canal da drenagem, que passam a ter a participação das águas subterrâneas, das águas de chuva e das águas distribuídas, procedentes, no caso, da represa de Itupararanga. Esse novo arranjo no ciclo hidrológico e sua dinâmica em áreas urbanas mostra que as interferências associadas à urbanização se intensificaram no local, alterando o balanço hídrico, fruto da necessidade da implantação de um sistema de drenagem urbana, seja ela como um item de planejamento urbano bem elaborado (ou não) a ser implementado.

A semelhança entre as composições isotópicas das águas superficiais na área natural e as águas subterrâneas indica que as águas subterrâneas contribuem muito para a manutenção do fluxo no canal do curso d'água, e que a contribuição do fluxo superficial (*runoff*) concentra-se no dia da precipitação ou logo após a esse dia. A ocorrência de um evento de precipitação no dia anterior ao da coleta da amostra provoca um enriquecimento proporcional na composição isotópica das águas da área natural.

Os isótopos ambientais devem ser incorporados aos programas de monitoramento hidrológico e hidrogeológico não somente nas bacias naturais, mas também nas bacias urbanizadas para tornar possível o melhor entendimento quanto aos efeitos causados pela urbanização em uma bacia natural, possibilitando compreender as movimentações e variações no armazenamento das águas superficiais e águas subterrâneas.

Pela análise da composição isotópica no modelo de mistura Bayesiano, verificamos que uma grande parcela de água potável contribui diariamente para a descarga nos rios urbanos, propiciando uma perda considerável dessas águas, trazendo à tona a discussão do alerta junto aos gerenciadores de sistemas do abastecimento de águas para as populações urbanas das grandes cidades, principalmente aquelas cuja população está acima de 500 mil habitantes. Ressalta-se assim, a importância de implantação da análise de isótopos estáveis como uma ferramenta para a contribuição nos planos de gestão dos recursos hídricos, os quais poderão fornecer importantes informações associadas à origem de fontes, e de como, em áreas urbanas, os sistemas de distribuição podem contribuir para a manutenção dos fluxos na rede de drenagem.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, J.C. *Alterations in the Hydrologic Cycle Induced by Urbanization in Northern New Castle County, Delaware: Magnitudes and Projections*; U.S. Environmental Protection Agency Library Report Number: DI-14-31-0001-3508; DI-14-31-0001-3808; OWRR-A-017-DEL.; W74- 07729; OWRR-A-017-DEL(2); U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 1974.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL (PNUD, FJP, IPEA). **População de Sorocaba, SP.** Disponível em http://atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/sorocaba_sp, acesso em jan/2020.

ATTANASIO, C. M.; RODRIGUES, R. R; GANDOLFI, S. As Matas Ciliares de uma Microbacia. In: SILVA, R. F. B.; CHINELATO, F. C. S.; ORSI, A. C. **Lavapés, água e vida: nos caminhos da Educação Ambiental**. Botucatu: SABEP, 2008. cap. 4, p. 79-95.

BAPTISTA, Márcio; CARDOSO, Adriana. Rios e Cidades: Uma longa e sinuosa história...**Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, vol. 20, N.2, P. 124-153, julho/dezembro 2013. Belo Horizonte: UFMG, 1965-v. il.

BARBIERI, M. Isotopes in hydrology and hydrogeology. **Water**, 2019, *11*, 291.

BARBOSA N. S. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia na Região das Bacias Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado, Oeste do Estado da Bahia**. Dissertação de mestrado. Curso de pós-graduação em geologia. 2009.

BARRON, O. V.; BARR, A.D.; DONN, M.J.: Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. **J. Hydrol.** 485, 162 –176, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.027>.

BARTALINI, V. Os córregos ocultos e a rede de espaços públicos urbanos. **Pós. Revista Do Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura E Urbanismo Da FAUUSP**, (16), 82-96. (2004). <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v0i16p82-96>. Acesso em julho/2020.

BENEDICT, M. A., McMAHON, E. T.: Green Infrastructure: linking Landscapes and Communities. Island Press, EUA, 2006.

BHADURI, B.; HARBOR, J.; ENGEL, B.; GROVE, M. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS Model. **Environ. Manag.** 2000, 26, 643–658.

BHASKAR, A.S.; WELTY, C. Analysis of subsurface storage and streamflow generation in urban watersheds. **Water Resour. Res.** 51, 1493 –1513, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/2014wr015607>.

BLECKEN, G.-T.; HUNT, W.F.; AL-RUBAEI, A.M.; VIKLANDER, M.; LORD, W.G. Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. **Urban Water J.** 14, 278 –290. 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2015.1111913>.

BONNEAU, J.; BURNS, M., FLETCHER, WITT, R., DRYSDALE, COSTELLOE, J. The impact of urbanization on subsurface flow paths – A paired-catchment isotopic study. **Journal de Hydrology** nr, 561, 2018 p. 413-426. Elsevier.

BORNSTEIN, R.; LEROY, M. Urban Barrier Effects on Convective and Frontal Thunderstorms. In: **Proceedings of the Fourth AMS Conference on Mesoscale Processes**, Boulder, CO, USA, 25–29 June 1990.

BOYSEN, B. M. M.; EVANS, M. N.; BAKER, P. J. $\delta^{18}\text{O}$ in the tropical conifer *Agathis robusta* records ENSO-related precipitation variations. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, p. 1 –10, 2014.

BRASIL, Lei Federal 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Lei de Saneamento**. Senado Federal. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm.

BRASIL. **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Ipanema (Revisão)**. Ministério do Meio Ambiente. VOLUME I - Diagnóstico – Iperó, SP, 2017.

BRAUD, I.; BREIL, P.; HOLLET, F.; LAGOUY, M.; BRANGER, F.; JACQUEMINET, C.; KERMADI, S.; MICHEL, K. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. **J. Hydrol.** 485, 5 –23, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.049>.

BRUM, M. et al. Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *Journal of Ecology*, v. 107, n. 1, p. 318–333, 2019.

BURNS, M.J.; FLETCHER, T.D.; WALSH, C.J.; LADSON, A.R.; HATT, B.E. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. **Landsc, Urban Plann.** 105, 230–240. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j>.

BUTTLE, J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. **Prog. Phys. Geogr.** 18, 16 –41. 1994.

CAMPOS, H. C. N. S. **Caracterizacao e Cartografia das Províncias Hidrogeoquímicas do Estado de SP.** Tese de doutorado - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. p. 177. 1993.

CHEN, X.; WANG, G.; WANG, F. Classification of stable isotopes and identification of water replenishment in the Naqu River basin, Qinghai-Tibet plateau. **Water**, 11, 46. 2019.

CHOCAT, B. *et al.* Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water. Indoor And Built Environment: **International Society of the Built Environment.**: p. 273-285. 2007.

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

CLARVIS, M. H.; ALLAN, A.; HANNAH, D. M. Water, resilience and the law: From general concepts and governance design principles to actionable mechanisms. **Environmental Science and Policy**, v. 43, p. 98–110, 2014.

CRAIG, H. Isotopic Variations in Meteoric Waters. **Science**, v. 133, n. 3465, p. 1702–1703, 1961.

CRUZ, F. W. *et al.* Reconstruction of regional atmospheric circulation features during the late Pleistocene in subtropical Brazil from oxygen isotope composition of speleothems. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 248, n. 1–2, p. 494–506, 2006.

CORRÊA, Roberto L. **Região e organização espacial**. São Paulo: Ática, 1987.

CUSTÓDIO, V. (2006). A relação cidade-água nos artigos dos anais da Associação de Geógrafos Brasileiros (AGB). **GEOUSP Espaço E Tempo** (Online), 10(1), 175-182. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2006.74014>.

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

DAVINO, A. **Geologia da Serra de Araçoiaba, estado de São Paulo**. Boletim IG – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, v. 6, p. 129-144, 1975.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO - UNESP. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000**. Rio Claro: DAEE/UNESP, 1980.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE; INSTITUTO GEOLÓGICO - IG/SMA; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, Escala 1:1.000.000: Nota Explicativa / Rocha, G. (Coord.)**. São Paulo: DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005.

DIXON, P.G.; MOTE, T.L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. **J. Appl. Meteorol.** 42, 1273–1284. 2003.

DUTTON, A. *et al.* Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrological Processes*, v. 19, n. 20, p. 4121–4146, 2005.

EHLERINGER J. R.; BARNETTE J. E.; YUSUF, J.; BRETT J.; Tipple & Gabriel J. B. (2016): Urban water – a new frontier in isotope hydrology. **Isot. Environ. Health Sci.** 52, 477–486. 2016.

ESTADO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS. **Proposta Do Plano Municipal Integrado De Saneamento Básico, Município de Sorocaba.** 1063-SSE-GST-RT-P004 Revisão 0/B Atualização de dados Outubro/2013. Disponível em: <https://www.saaesorocaba.com.br/downloads/pmsb.pdf>, acesso em jan/2020.

ETCHEVERRY, D. Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. In: **Série Géologie**, OFEG (ed.). 2002.

EVARISTO, J.; MCDONNELL, J. J. Prevalence and magnitude of groundwater use by vegetation: A global stable isotope meta-analysis. *Scientific Reports*, v. 7, n. January 2016, p. 1–12, 2017.

EZAKI, S.; GASTMANS, D.; IRITANI, M. A.; SANTOS, V. dos & STRADIOTO, M. R. (2020): 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* <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1797714>

FÁVERO, O. A.; NICCI, J. C.; DE BIASI, M. **Vegetação natural potencial e mapeamento da vegetação e usos atuais das terras da Floresta Nacional de Ipanema, Iperó-SP: conservação e gestão ambiental.** Revista RA'E GA, Curitiba, n. 8, p. 55-68, 2004. Editora UFPR.

FERRARI, C. **Curso de Planejamento Municipal Integrado: Urbanismo.** 7ª Ed. São Paulo: Pioneira Editora. 1991.

FRAPPIER, A. B. *et al.* Stalagmite stable isotope record of recent tropic cyclone events. **Geology**, v. 35, n. 2, p. 111 –114, 2007.

FROEHLICH, K.; GIBSON, J. J.; AGGARWAL, P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. ***Journal of Geophysical Research-Atmospheres***, n. July 2002, p. 1–23, 2002.

GABOR, R.S.; HALL, S.J.; EIRIKSSON, D.P.; JAMEEL, Y.; MILLINGTON, M.; STOIT, T.; BARNES, M.L.; GELDERLOOS, A.; TENNANT, H.; BOWEN, G.J. Persistent urban influence on surface water quality via impacted groundwater. ***Environ. Sci. Technol.*** 51, 9477–9487, 2017.

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, n. 5, p. 518–538, 3 set. 2017.

GAT, J.J. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. ***Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*** 24, 225–262. 1996.

GIBSON, J.J.; AGGARWAL, P.; HOGAN, I.; KENDALLI, C.; MARTINELLI, L.A.; STICHLER, W.; RANK, D.; GONI, I.; CHOUDHRY, M.; GAT, J. Isotope studies in large river basins: A new global research focus. ***EOS Trans. Am. Geophys. Union.*** 83, 613–617. 2002.

GOKOOL, S. *et al.* Estimating groundwater contribution to transpiration using satellite-derived evapotranspiration estimates coupled with stable isotope analysis. *Journal of Arid Environments*, v. 152, n. September 2017, p. 45–54, 2018.

GORSKI, G.; STRONG, C.; GOOD, S.P.; BARES, R.; EHLERINGER, J.R.; BOWEN, G.J. Vapor hydrogen and oxygen isotopes reflect water of combustion in the urban atmosphere. ***Proc. Natl. Acad. Sci. USA***, 112, 3247–3252. 2015.

GONÇALVES, A.C.G.; ALMEIDA, H.C.; TAVARES, P. A., A transformação do município de Sorocaba e a interferência nas relações socioambientais da população no período 1654 a 2014. ***Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística. Edição Temática: Sustentabilidade.*** Vol. 4 no 2 - Agosto de 2014, São Paulo: Centro Universitário Senac, 2014. ISSN 2179474 X.

GOVENDER, Y. *et al.* Temporal Variation in Stable Isotopic Composition of Rainfall and Groundwater in a Tropical Dry Forest in the Northeastern Caribbean. **Earth Interactions**, v. 17, n. 27, p. 1 –20. 2013.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei Complementar nº 1.241, de 8 de maio de 2014. Cria a Região Metropolitana de Sorocaba e dá providências correlatas.** São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.legislacao.sp.gov.br/legislacao/dg280202.nsf/69aaa17c14b8cb5483256cfb0050146e/399ae95c2cf6d39583257cd30043511f?OpenDocument> acesso em jan./2020.

Instituto Brasileiro Geografia e Economia. (IBGE). **Densidade demográfica [2010].** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>, dados de 2010. Acesso em janeiro de 2020.

Instituto Brasileiro Geografia e Economia. (IBGE). **População estimada [2019].** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>, dados de 2019. Acesso em janeiro de 2020.

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Plano de manejo da Floresta Nacional de Ipanema / Revisão – Volume I – Diagnóstico.** Flona de Ipanema. Iperó, SP. 2017.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Governança Metropolitana.** (pdf). Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/151208_relatorio_analise_comparativa_rm_sao_paulo.pdf

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**, 1981. Série Monografia (5) vol.

JAMEEL, Y.; BREWER, S.; FIORELLA, R.P.; TIPPLE, B.J.; TERRY, S.; BOWEN, G.J. Isotopic reconnaissance of urban water supply system dynamics. **Hydrol. Earth Syst. Sc.**, 22, 6109–6125. 2018.

JAMEEL, Y.; BREWER, S.; GOOD, S.P.; TIPPLE, B.J.; EHLENGER, J.R.; BOWEN, G.J. Tap water isotope ratios reflect urban water system structure and dynamics across a semiarid metropolitan area. **Water Resour. Res.**, 52, 5891–5910. 2016.

JASECHKO, S. *et al.* The pronounced seasonality of global groundwater recharge. **Water Resources Research**, v. 50, p. 8845–8867. 2014.

JASECHKO, S. *et al.* Substantial proportion of global streamflow less than three months old. *Nature Geoscience*, v. 9, n. 2, p. 126–129, fev. 2016.

JASECHKO, S. (2019). Global isotope hydrogeology—review. *Reviews of Geophysics*, 57 <https://doi.org/10.1029/2018RG000627>.

JOEL, R.G. **Isotope Hydrology—A Study of the Water Cycle**. Imperial College Press: London, UK; pp. 9–19. 2010.

Jornal Cruzeiro do Sul. (JCS). **População de Sorocaba passa dos 670 mil habitantes.** Disponível em: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/populacao-de-sorocaba-passa-dos-670-mil-habitantes/>, acesso em jan./2020.

KENDALL, C.; COPLEN, T. B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 7, p. 1363–1393, 2001.

KENDALL, C.; YOUNG, M. B.; SILVA, S. R. Applications of Stable Isotopes for Regional to National-Scale Water Quality and Environmental Monitoring Programs. In: *Isoscapes*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 89–111.

KEYS, P. W. *et al.* Invisible water security: Moisture recycling and water resilience. **Water Security**, v. 8, n. October, p. 100046, 2019.

KÖPPEN, W. **Climatología**: con um estudio de los climas de la tierra. Cidade do México: Fondo de Cultura Económica. 1948

LACOUR, J. L. *et al.* Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES δD observations. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 481, p. 387–394. 2018.

LEOPOLD, L. B. **Hydrology for Urban Planning – A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use**. United States Department of Interior. Circular 554. Washington, USA, 1968.

LERNER, D.N. Identifying and quantifying urban recharge: a review. **Hydrogeol. J.** 10, 2002. 143 –152. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-001-0177-1> .

LI, Xiangnan; BAISHA, Weng; DENGHUA, Yan; TIANLING, Qin; KUN, Wang; WUXIA, Bi; ZHILEI, Yu; BATSUREN, Dorjsuren. Anthropogenic Effects on Hydrogen and Oxygen Isotopes of River Water in Cities. **Res. Public Health** 16, 4429, 2019. doi:10.3390/ijerph16224429.

LIU, Q. *et al.* A study of longitudinal and altitudinal variations in surface water stable isotopes in West Pamir, Tajikistan. **Atmospheric Research**, v. 153, n. January, p. 10–18. 2015.

MA, Y.; SONG, X. Using stable isotopes to determine seasonal variations in water uptake of summer maize under different fertilization treatments. *Science of the Total Environment*, v. 550, p. 471–483, 2016.

MADEIRA N. J. Comportamento espectral dos solos. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. **Sensoriamento remoto: refletância dos alvos naturais**. Brasilia. UnB. 2001.

MALOSZEWSKI, P.; ZUBER, A. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. **J. Hydrol.** 57, 207 -231. 1982.

MALOSZEWSKI, P.; ZUBER, A. **Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data**. 1996.

MANFREDINI, F.N.; NAVARRO, F.; GUANDIQUE, M.E.G. **A história ambiental de Sorocaba**. [recurso eletrônico]. Sorocaba: Unesp – Câmpus Experimental

de Sorocaba. p. 180, 2015. Disponível em: <https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Eventos191/historia-ambiental-editora-ebook.pdf>.

MASCARENHAS, F. C. B.; TODA, K.; MIGUEZ, M. G.; INOUE, K. **Flood risk simulation**. Boston: WIT. 2005.

McDONNELL, J.J.; McGUIRE, K.; AGGARWAL, P.; BEVEN, K.J.; BIONDI, D.; DESTOUNI, G.; DUNN, S.; JAMES, A.; KIRCHNER, J.; KRAFT, P.; LYON, S.; MALOSZEWSKI, P.; NEWMAN, B.; PFISTER, L.; RINALDO, A.; RODHE, A.; SAYAMA, T.; SEIBERT, J.; SOLOMON, K.; SOULSBY, C.; STEWART, M.; TETZLAFF, D.; TOBIN, C.; TROCH, P.; WEILER, M.; WESTERN, A.; ORMAN, A.; WREDE, S., 2010. How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. **Hydrol. Process.** 24, 1745 –1754. 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7796>.

McGUIRE, K.J.; McDONNELL, J.J. A review and evaluation of catchment transit time modeling. **J. Hydrol.** 330, 543 –563. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.020>.

McGUIRE, K.J.; McDONNELL, J.J.; WEILER, M.; KENDALL, C.; McGLYNN, B.L.; Welker, J.M.; Seibert, J. The role of topography on catchment-scale water residence time. **Water Resour. Res.** 41: n/a-n/a. 2005. DOI:10.1029/2004wr003657

McGLYNN, B.; McDONNELL, J.; STEWART, M.; SEIBERT, J. On the relationships between catchment scale and streamwater mean residence time. **Hydrol. Process.** 17, 175 -181. 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5085>.

MELLO, S. S. **Na beira do rio tem uma cidade: urbanidade e valorização dos corpos d'água**. 2008. 348f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MENEGAT, R. **A emergência da tecnourbesfera e os novos desafios da geologia urbana**. As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade A contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra -AIPT.

(PDF), 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Rualdo_Menegat/publication/282441472_A_emergencia_da_tecnourbesfera_e_os_novos_desafios_da_geologia_urbana/links/560feb5408ae483375180db6/A-emergencia-da-tecnourbesfera-e-os-novos-desafios-da-geologia-urbana.pdf, acesso em julho/2020.

MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, L. P. C. Urban Flood Control, Simulation and Management – an Integrated Approach. “In”: A. C. Pina Filho; A. C. de Pina. (Org.) **Methods and Techniques in Urban Engineering**. 1ª ed. Viena: INTECH Education and Publishing, v. 1. P. 131-160, 2010.

MIGUEZ, Marcelo Gomes. VEROL, ALINE Pires., OSVALDO Moura Rezende **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. -1. Ed. – Rio de Janeiro: Elsevier. 2016.

MOOK, W. G. (Ed.). Environmental Isotopes in Hydrological Cycle – Principles and Applications. **IHP-V Technical Documents in Hydrology**, nº 39, UNESCO-IAEA. 2002. 596P. Available at: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/HIS_resources_publication_hydroCycle_en.html.

MOURA, P.; BARRAUD, S.; BAPTISTA, M. Multicriteria procedure for the design and the management of infiltration systems. 2007. **Water Sci. Technol.** 55, 145. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.104>.

NAGY, S. C. S. Recuperação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés. In: SILVA, R. F. B.; CHINELATO, F. C. S.; ORSI, A. C. **Lavapés, Água e Vida: nos caminhos da Educação Ambiental**. Cap. 6, p. 119-135. Botucatu: SABEP, 2008.

ODA, G.H. Contribuição à hidrogeologia da região entre Salto de Pirapora e Itu (SP): análise da produtividade, ocorrência e circulação das águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Tubarão e Cristalino. 1998, 116p. Di – Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo, 64 p. 1999.

PACHECO P.; AZEVEDO L. **A história da urbanização brasileira**. 2019. <https://wribrasil.org.br/pot/blog/2019/05historia-da-urbanizacao-brasileira>.

PERRIN, J.; JEANNIN, P.-Y.; ZWAHLEN, F. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. **J. Hydrol.** 279, 106–124. 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00171-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00171-9).

PARNELL, A. C. *et al.* Bayesian stable isotope mixing models. *Environmetrics*, v. 24, n. 6, p. 387–399, 2013.

PARNELL, A. C. Package “simmr”, 2019.

Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* **11** (5): 1633–1644 DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007

POMPEO *et al.* (Orgs.) **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015.

PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Prog. Phys. Geogr.** 35, 465 – 492, 2011. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133311402714>.

R CORETEAM. R: A language and environment for statistical computing Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, 2019.

REN, W. *et al.* Controls on the stable isotopes in precipitation and surface waters across the southeastern Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 545, p. 276–287, 2017.

RIBEIRO, C. Engenharia e Arte em pedra e cimento. **Associação de Engenheiros e Arquitetos em Revista**. P. 16-23. Sorocaba, 2019.

RIBEIRA, M.S.; CAMARGO, E.; FRANCA, D.T.; CALANSAS, J.T.; BRANCO, M.S.L.C.; TRIGO, A.J. Gestão da água e paisagens culturais. **Rev. UFMG**, Belo Horizonte, V. 20, n.2, p. 44-67, jul/dez/2013.

RODGERS, P.; SOULSBY, C.; WALDRON, S.; TETZLAFF, D. Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 9, 139 - 155. 2005.

RODRIGUES, V. R. Dissertação (mestrado) – **Gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Sorocaba – SP: uma contribuição**. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro: [s.n.], 2004.

ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMAs. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 6. Ed. Rio de Janeiro/RJ: Bertrand Brasil, cap. 6. 2006a, p. 291-336.

ROTHFUSS, Y.; JAVAUX, M. Reviews and syntheses: Isotopic approaches to quantify root water uptake: A review and comparison of methods. *Biogeosciences*, v. 14, n. 8, p. 2199–2224, 2017.

ROY, J.W.; BICKERTON, G. Toxic groundwater contaminants: an overlooked contributor to urban stream syndrome? **Environ Sci Technol** 46, 729 –736. 2012. <http://dx.doi.org/10.1021/es2034137>.

ROZANSKI, K.; ARAGUAS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. **Geophys. Monogr. Ser.**, 78, 1–36. 1993.

SÁNCHEZ-MURILLO, R. *et al.* Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. **Quaternary Science Reviews**, v. 131, p. 250–261, 2016.

SÁNCHEZ-MURILLO, R. *et al.* Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 4, p. 956–967, 2017.

SANTAROSA, Lucas Viture. **Impactos Antropogênicos e Climáticos nos Processos Hidrológicos: uma abordagem múltipla sobre a função das águas subterrâneas em bacias hidrográficas complexas no Estado de São**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2020.

SANTIAGO M. F.; FRISCHKORN H.; SILVA C. M. S. V. **HIDROGEOLOGIA CONCEITOS E APLICAÇÕES** 3ª Edição - Revisada e Ampliada. Capítulo 4.3, pág. 255 a 270. 2008.

SANTORO, P. F. Perímetro urbano flexível, urbanização sob demanda incompleta: o papel do Estado frente ao desafio do planejamento da expansão urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 16, n. 1, p. 169-187, 2004.

SANTOS, Vinícius dos. **Composição Isotópica da Precipitação e suas Relações com a Variabilidade Climática na porção Centro-Sul do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2016.

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.

SÃO PAULO (Estado de): **Proposta Do Plano Municipal Integrado De Saneamento Básico Atualização Dados Município: Sorocaba (2013)**. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. (pdf). Disponível em: <https://www.saaesorocaba.com.br/arquivos/pmsb.pdf>, acesso em jan/2020.

SELBORNE, Lord. **A Ética do uso da Água Doce: um levantamento**. Brasília: UNESCO, 2001.

SHARP, J.M.; KROTHER, J.N.; MATHER, J.D.; GRACIA-FRESCA, B.; STEWART, C.A. **Effects of Urbanization on Groundwater Systems**. 257 –278. 2013. doi:10.1029/SP056p0257.

Shepherd, J.M.; Pierce, H.; Negri, A.J. Rainfall modification by major urban areas: Observation from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. **J. Appl. Meteorol.** 2002, 41, 689–701.

SHUSTER, W. D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. **Urban Water J.** 2, 263-275. 2005.

SILVA, J. B DA; SILVA, E. N. D. A. Análise Temporal da Precipitação em Sorocaba: 2002 a 2014. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, XII, Goiânia, **Anais [...]**. Goiânia: UFG. P. 404-412. 2016.

SOARES, P. V., et al. Mapa de Infiltração do Alto e Médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos da paisagem, In: I SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: o eucalipto e o ciclo hidrológico, 2007, Taubaté. **Anais [...]**. Taubaté: 2007. p. 83-90.

SONOK, I. K.; GARDA, G.M. **Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento**. Boletim IG-USP. Série Científica, v. 19, p. 63-85, 1988.

STEWART, M. K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 9, p. 1133–1146. 1975.

TETZLAFF, D.; BUTLLE, J.; CAREY, S.K.; MCGUIRE, K.; LAUDON, H., Soulsby, C. Tracerbased assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: a review. **Hydrol. Process.** 29, 3475 –3490, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10412>.

TOLEDO, G. M. C.; SOUZA, R. V. **Estudo Preliminar da Alteração Intempérica das Rochas Ultramáficas Ricas em Apatita da Mina Gonzaga de Campos, Maciço Alcalino de Ipanema, SP.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3., 1991. *Extended Abstracts*. São Paulo, Sbgq/Sociedade Geológica de Portugal/IG-USP, 1991. p. 91-94.

Toronto And Region Conservation. **Water Budget Discussion Paper**. Gartner Lee Ltd. Toronto: 2006. 37p. Disponível em: <http://www.Sustainabletechnologies.ca>. Acesso em 06 jan. 2020.

TUCCI, C.E.M. Águas urbanas. Universidade de São Paulo. Instituto de Estudos Avançados. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112. 2008.

VITVAR, T.; URNS, D.A.; LAWRENCE, G.B.; McDONNELL, J.J.; WOLOCK, D.M. Estimation of baseflow residence times in watersheds from the runoff hydrograph recession: method and application in the Neversink watershed, Catskill Mountains, New York. **Hydrol. Process.** 16, 1871 –1877. 2002. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5027>.

WARD, P. J.; PAUW, W. P.; VAN BUUREN, M. W.; MARFAI, M. A. Governance of flood risk management in a time of climate change: the cases of Jakarta and Rotterdam. **Environmental Politics**. v. 22, nº 3, p. 518-536. 2013.

WATKINS, R.; PALMER, J.; KOLOKOTRONI, M. Increased temperature and intensification of the urban heat island: Implications for human comfort and urban design. **Built Environ.** 33, 85–96. 2007.

WEST, A. G.; FEBRUARY, E. C.; BOWEN, G. J. Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes (“isoscapes”) in ground water and tap water across South Africa. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 145, p. 213–222, 2014.

WITTENBERG, H., AKSOY, H. Groundwater intrusion into leaky sewer systems. **Water Sci. Technol.** 62, 92 –98. 2010.

XIANGNAN, Li; BAISHA, Weng; DENGHUA, Yan; TIANLING, Qin; KUN, Wang; WUXIA, Bi; ZHILEI, Yu; BATSUREN, Dorjsuren. Anthropogenic Effects on

Hydrogen and Oxygen Isotopes of River Water in Cities. **Res. Public Health** 16, 4429, 2019. doi:10.3390/ijerph16224429.

ZHANG, Z. Q. *et al.* Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 5, p. 1196–1201, 2017b.

Anexo A. Composição isotópica das amostras coletadas no Riacho do Ferro - FLONA e nos poços artesanais.

Nº CAMPO	Data Coleta	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d-excess
FLONA-PA02 (Viveiro)	15/01/2019	-7,78	-50,3	11,94
FLONA-PA01 (Administração)	15/01/2019	-7,28	-46,9	11,34
FLONA-R-JANEIRO (1)	15/01/2019	-7,32	-45,7	12,86
FLONA-R-JANEIRO (2)	31/01/2019	-7,21	-45,2	12,48
FLONA-R-FEVEREIRO (1)	16/02/2019	-7,20	-44,9	12,70
FLONA-R-MARÇO (1)	02/03/2019	-7,06	-43,5	12,98
FLONA-R-MARÇO (2)	16/03/2019	-7,13	-44,2	12,84
FLONA-R-MARÇO (3)	30/03/2019	-7,42	-46,2	13,16
FLONA-R-ABRIL (1)	13/04/2019	-7,12	-44,5	12,46
FLONA-R-ABRIL (2)	27/04/2019	-7,49	-47,0	12,92
FLONA-R-MAIO (1)	11/05/2019	-7,47	-45,7	14,06
FLONA-R-MAIO (2)	25/05/2019	-7,33	-46,2	12,44
FLONA-R-JUNHO (1)	08/06/2019	-7,28	-45,3	12,94
FLONA-R-JUNHO (2)	22/06/2019	-7,51	-46,62	13,46
FLONA-R-JULHO (1)	06/07/2019	-6,38	-37,65	13,39
FLONA-R-JULHO (2)	20/07/2019	-7,24	-44,78	13,14
FLONA-R-AGOSTO (1)	03/08/2019	-7,33	-45,96	12,68
FLONA-R-AGOSTO (2)	17/08/2019	-7,35	-46,05	12,75
FLONA-R-AGOSTO (3)	31/08/2019	-7,36	-46,16	12,72
FLONA-R-SETEMBRO (1)	14/09/2019	-7,31	-45,94	12,54
FLONA-R-SETEMBRO (2)	28/09/2019	-7,32	-46,03	12,53
FLONA-R-OUTUBRO (1)	11/10/2019	-7,38	-46,26	12,78
FLONA-R-OUTUBRO (2)	25/10/2019	-7,30	-45,99	12,41
FLONA-R-NOVEMBRO (1)	09/11/2019	-7,33	-45,65	12,99
FLONA-R-NOVEMBRO (2)	23/11/2019	-7,34	-45,93	12,79
FLONA-R-DEZEMBRO (1)	07/12/2019	-7,31	-45,68	12,80

Anexo B. Composição isotópica das amostras coletadas no Córrego Lavapés
- SOR e nos poços artesianos.

Nº CAMPO	Data Coleta	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d-excess
SOR-R-JANEIRO (I)	15/01/2019	-4,95	-30,6	9,00
SOR-R-JANEIRO (II)	31/01/2019	-3,88	-23,9	7,14
SOR-R-FEVEREIRO(I)	16/02/2019	-4,66	-36,8	0,48
SOR-R-MARÇO (1)	02/03/2019	-4,56	-29,0	7,48
SOR-R-MARÇO (2)	16/03/2019	-4,87	-31,8	7,16
SOR-R-MARÇO (3)	30/03/2019	-4,70	-30,0	7,60
SOR-R-ABRIL (1)	13/04/2019	-5,08	-32,0	8,64
SOR-R-ABRIL (2)	27/04/2019	-5,31	-32,9	9,58
SOR-R-MAIO (1)	11/05/2019	-5,11	-32,0	8,88
SOR-R-MAIO (2)	25/05/2019	-5,02	-32,1	8,06
SOR-R-JUNHO (1)	08/06/2019	-4,75	-30,0	8,00
SOR-R-JUNHO (2)	22/06/2019	-4,85	-30,44	8,36
SOR-R-JULHO (1)	06/07/2019	-4,53	-27,22	9,02
SOR-R-JULHO (2)	20/07/2019	-4,73	-29,21	8,63
SOR-R-AGOSTO (1)	03/08/2019	-5,19	-32,31	9,21
SOR-R-AGOSTO (2)	17/08/2019	-5,42	-33,37	9,99
SOR-R-AGOSTO (3)	31/08/2019	-5,53	-34,43	9,81
SOR-R-SETEMBRO (1)	14/09/2019	-5,26	-32,06	10,02
SOR-R-SETEMBRO (2)	28/09/2019	-5,47	-34,41	9,33
SOR-R-OUTUBRO (1)	11/10/2019	-5,34	-33,59	9,15
SOR-R-OUTUBRO (2)	25/10/2019	-5,53	-34,70	9,53
SOR-R-NOVEMBRO (1)	09/11/2019	-5,17	-31,56	9,78
SOR-R-NOVEMBRO (2)	23/11/2019	-5,15	-31,85	9,32
SOR-R-DEZEMBRO (1)	07/12/2019	-5,09	-31,76	8,95
SOR-PA04FL (Empresa J&J)	18/07/2019	-5,91	-34,74	12,54
SOR-PA03FL (A.R.S.B.)	10/12/2019	-5,98	-37,73	10,09

Anexo C. Composição isotópica das amostras coletadas nas torneiras de residências nas proximidades do Córrego Lavapés e na ETA Cerrado.

Nº CAMPO	Data Coleta	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d-excess
ETA Cerrado - Calha Parshal	05/12/2019	-3,82	-23,01	7,58
ETA Cerrado - Torneira	05/12/2019	-3,74	-22,88	7,03
Casa T01	08/12/2019	-3,86	-23,08	7,83
Casa T02	08/12/2019	-3,80	-22,75	7,63
Casa T03	08/12/2019	-3,82	-23,30	7,25
Casa T04	08/12/2019	-3,79	-22,71	7,58
Casa T05	08/12/2019	-3,77	-22,75	7,44
Casa T06	08/12/2019	-3,81	-23,02	7,43
Casa T07	08/12/2019	-3,73	-22,39	7,48
Casa T08	08/12/2019	-3,80	-23,02	7,38
Casa T09	08/12/2019	-3,80	-22,55	7,86
Casa T10	08/12/2019	-3,82	-22,65	7,89
Casa T11	08/12/2019	-3,84	-23,13	7,63
Casa T12	08/12/2019	-3,87	-23,30	7,66
Casa T13	08/12/2019	-3,86	-23,21	7,68
Casa T14	08/12/2019	-3,83	-23,00	7,66