

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 09/04/2023.

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).

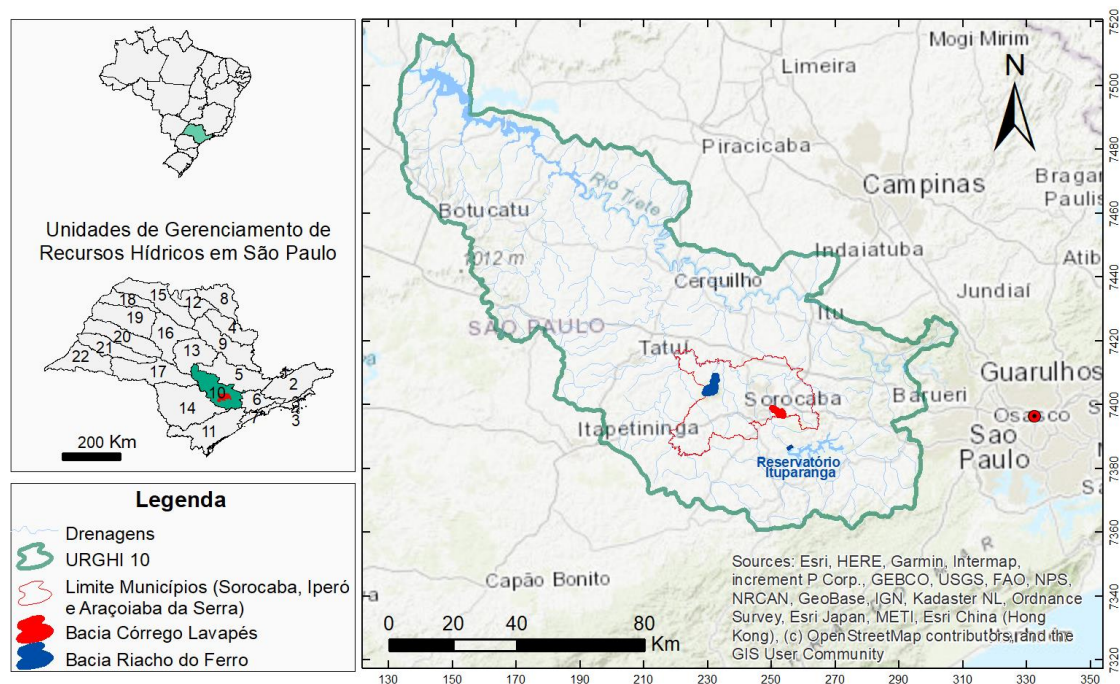


Figura 1.1. Mapa de localização da UGRHI 10, com detalhe para as duas bacias hidrográficas utilizadas no estudo (a oeste, a Bacia do Riacho do Ferro, na FLONA Ipanema e a leste, a Bacia do Rio Lavapés na área urbana da cidade de Sorocaba), bem como a localização do Reservatório de Itupararanga, responsável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

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.